



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)*

Présentée et soutenue le *24/06/2015* par :

JULIEN LE BRAS

**Le microclimat urbain à haute résolution : mesures et
modélisation**

JURY

SERGE CHAUZY
RAFIQ HAMDY
AUDE LEMONSU
VALÉRY MASSON
MARJORIE MUSY
GEORGES NAJJAR

Président du Jury
Rapporteur
Examineur
Directeur de thèse
Rapporteur
Examineur

École doctorale et spécialité :

SDU2E : Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales

Unité de Recherche :

Centre National de Recherches Météorologiques - GAME, URA 3589

Directeur de Thèse :

Valéry MASSON

Rapporteurs :

Marjorie MUSY et Rafiq HAMDY

Remerciements

Trois ans de thèse passés à Météo France représentent trois ans de travail passés au CNRM qui seront détaillés dans ce manuscrit, mais aussi trois ans de vie et de rencontres à Toulouse. J'aimerais remercier tous ceux que j'ai croisés dans la ville rose et qui ont rendu cette expérience mémorable. Pour ce faire, comme j'ai reçu de la part des gens présents à ma soutenance un mot dans un carnet, je vais laisser un mot pour tout ceux qui ont marqué mon passage toulousain.

Pour Valéry

Merci beaucoup de m'avoir accueilli et encadré pendant ces trois années. C'était un plaisir de travailler dans cette équipe. Merci pour ta disponibilité, pour les opportunités de conférences (et les burgers à Atlanta), d'école d'été ou les campagnes de mesures. J'ai beaucoup appris pendant ces trois ans d'un point de vue scientifique grâce à toi et toute l'équipe.

Pour Aude

Merci pour ces trois ans à TURBAU. C'était un plaisir de travailler avec toi et de taper quelques balles de tennis. Je me rappellerai bien sûr aussi de l'aller-retour à Marseille pour EUREQUA et les campagnes de mesure de jour comme de nuit !

Pour Cécile

Merci co-bureau pour l'aide et la compagnie lors de la première moitié de cette thèse et pour m'avoir appris à faire du café, chose que je maîtrise parfaitement désormais !

Pour Marie Parrens

Merci pour toutes les longues conversations au début de ma thèse et les bons conseils. Merci bien entendu aussi pour l'appartement. Et qui aurait cru que je viendrai en vélo tous les jours à la fin de ma thèse ? Ce n'était pas gagné au début en tout cas.

Pour Xavi

Merci Xavier pour les deux années passées avec toi au labo, pour les PSG Barcelone au Seventies.

Pour Grégoire

Tu n'es pas resté mon directeur de thèse très longtemps mais ça a été un plaisir de travailler ces premiers mois avec toi. Merci aussi pour les conseils tout au long de ma thèse.

Pour les thésards de TURBAU (Maxime, Émilie et Quentin)

Bon courage pour la suite de vos thèses ! Profitez bien de la qualité et l'ambiance de l'équipe !

Pour tous ceux de l'équipe TURBAU et ceux du couloir

Merci à tous pour les pauses du matin. Je pense avoir bien profité de tous les gâteaux et autres viennoiseries apportées à chaque fois. J'espère vous les avoir rendus avec les quelques gâteaux et chouquettes que j'ai pu ramener et en essayant d'apporter un peu de bonne humeur (avec au moins des anecdotes de gamelles à vélo).

Pour le jury de thèse

Merci de vous être déplacés et d'avoir pris le temps de lire et commenter mon travail.

Pour les participants au projet EUREQUA

Merci à tous pour cette belle aventure. J'ai découvert ce qu'étaient les campagnes de mesure avec vous, les POI de jour et de nuit, sous le soleil, la pluie ou les cailloux, les soirées post POI et la découverte de l'interdisciplinarité. Et comme dirait Benoît, c'était un plaisir de travailler avec sérieux dans une bonne ambiance.

Pour Hélène 'Pitchoune' Dewaele

Oh pitchoune! C'est beau de te voir passer du statut de stagiaire à celui de thésarde. J'espère que tu prendras soin du minion, que tu continueras à aller courir après les marmottes et les licornes dans la montagne. Ton cœur devrait aller mieux maintenant que je ne serai plus là pour provoquer deux ou trois crises cardiaques par jour dans ton bureau. Tu devrais te sentir plus libérée, délivrée. La bise à ta sœur et à Claudine.

Pour Benoît

Merci pour ces trois années, du stage Meso-Monsieur Patate-NH à la coloc, en passant les soirées FIFA, les voyages, les soirées canards, René Coty et autres précrémaillères. Huge régalaade!

Pour Marie 'Docteur' Drouard

Qui aurait imaginé qu'une poule blonde vénitienne puisse avoir autant de talents cachés? Malheureusement, je ne peux pas continuer mes observations plus longtemps mais chaque jour a révélé son lot de surprises avec toi. Au-delà de ces considérations scientifiques, merci Marie, pour le soutien sur toute la fin de thèse, sur la to do list de départ, pour les soirées, repas et autres bons moments! Et non, tu ne parles pas trop, ça a toujours été un plaisir de papoter avec toi.

For Alan

Well buddy! Thank you for the new irish words that you taught me. I hope you will continue to learn some new french words too! J'arrête là pour l'anglais, je ne suis pas sûr de pouvoir assurer plus longtemps. Mais merci à toi et à Stef pour tous les bons moments passés ensemble, les soirées bonnes charcut' et vins de Bordeaux!

Pour le captain Lagadec

Merci captain pour tous les supers week-ends et soirées absurdes passés ensemble. C'était bien de retrouver un vrai breton à Toulouse. Tu es parti voguer sur d'autres flots en Indonésie mais on retrouvera bien un endroit pour se retrouver. Kenavo!

Pour Hélène 'La Baronne' Fréville

Merci Hélène pour ces trois ans de thèse passés au labo. Désolé pour l'invention de ce surnom de baronne, mais même si cela sortait un peu de nulle part, je reste persuadé que c'était une bonne idée.

Pour Yann

Merci Yann! Tu faisais parti du groupe des 'mecs marrants' du début de thèse. On se sera bien marré pendant ces trois ans. Merci pour m'avoir accompagné dans mon apprentissage du vélo bien sûr!

Pour la famille Canal

Merci Nico pour ces trois ans à Toulouse. Toujours à l'écoute et prêt pour une soirée FIFA! C'était cool de vous retrouver toi et Hélène à Jonzac. En espérant que vous n'y resterez pas trop longtemps! See you soon petit homme!

Et merci Antoine pour les soirées et matchs passés ensemble!

Pour Maxime 'Machine' Daniel

J'espère que tu vas enfin commencer à te mettre à courir sur des distances un peu plus longues sur tes courses. Parce que ne faire que 40 ou 80 km, c'est petit joueur. Merci pour les bons moments passés au labo, en ville ou au basket-piscine!

Pour Simon

Pareil que pour Maxime, j'espère que tu vas te mettre à faire un peu plus de vélo et à courir un peu plus vite! On aura bien rigolé en tout cas pendant 2 ans. Merci pour ton Touran aussi! J'espère qu'il vivra encore longtemps.

Pour Maxime 'Mégazor' Martinet

Merci pour le soutien pendant la rédaction Maxime! J'espère que tu continueras à grandir tout au long de ta thèse. Même si en tant que Mégazor, tu es déjà assez grand...

Pour tous les autres thésards

Pierre, Lisa, Vincent, Émilie, Quentin, Carole, Xavier, Marie Maz, Marine, Pipa, Robin, Hélène 'Chouquette' Peiro, Adrien, Jessica et les autres si jamais j'en ai oublié, merci pour tous les repas Sodex/Eurest, les parties de baby puis de ping-pong et les soirées.

Pour Alis et Émilie

Merci les filles pour tous les bons moments passés ensemble, entre les déménagements épiques, les soirées canard, René Coty, l'Islande et Londres. Je garderai en mémoire l'expression 'Faire une Émilie' bien fûr!

Pour Audrey

Ouech Gaudel! Merci pour les longues discussions, les petits dîners et les soirées salsa. J'espère te retrouver très vite avec Nanor de l'autre côté de l'océan ou à Paris!

Pour Jessie

Merci Jessie pour tes moult talents manuels, de la guirlande à mon chapeau de thèse tu as été géniale! Et puis c'est bien agréable de tomber sur une vraie fan de Jean-Jacques!

Pour Lucie 'Hippie' Bordois

Merci Lucie pour les conversations et soirées passées ensemble! Mais j'espère qu'un jour tu finiras par avoir un téléphone intelligent avec internet et tout.

Pour Jeff

Richard forever!

Pour PEB

C'est qui le patron?

Pour les amis de Paris et de Lyon

Merci à ceux qui sont venus dans cette lointaine contrée toulousaine me rendre visite. Et merci pour l'hébergement, les soirées et autres quand je remontais sur Paris ou que je venais sur Lyon. Ce n'était pas évident de partir de Paris mais je savais que je pourrais toujours compter sur vous! Marion, Clément, Claire, Seb, Aude, Héloïse, Nicoco, Sorya, Rébecca, Alice, Tristan, le Ben, Antoine, Anne-so, Audrey, Manu, Estelle et tous les autres, du Franco et de Hoche, merci pour tout.

Pour ma famille

Merci à mes parents pour tout, à mes frères, belles-sœur et leurs enfants. Et bienvenue au petit Mathys, né pendant cette thèse!

Je dédie cette thèse à Adeline.

Résumé

Le confort thermique des habitants d'une ville est principalement affecté par l'îlot de chaleur urbain (ICU). Ce phénomène se traduit par des températures plus chaudes en ville que dans sa périphérie la nuit. Il est causé par les relâchements de chaleur stockée dans les bâtiments et la route le jour, mais aussi par des sources anthropiques comme le trafic ou le chauffage et la climatisation des bâtiments. En cas de canicule, de forts ICU peuvent apparaître en ville et provoquer l'augmentation du taux de mortalité des personnes les plus fragiles, comme ce fut le cas en 2003 à Paris où un excès de 15000 morts dû à ce phénomène a été constaté. L'étude de l'ICU est donc essentielle et concerne de nombreux corps de métier, de la recherche en science atmosphérique aux aménageurs urbains en passant par les ingénieurs en bâtiment. Cependant le modéliser nécessite des moyens numériques ou de mesures qui ne sont accessibles que dans le monde de la recherche.

L'objectif de cette thèse est de mettre en place une chaîne de modélisation de l'ICU à l'échelle de la rue à partir de données issues de stations météorologiques opérationnelles en périphérie d'une ville, se situant dans un aéroport par exemple, et de données de description du tissu urbain. Ces données sont souvent accessibles au plus grand nombre. Le principe de cette chaîne de modélisation est qu'elle doit être rapide afin de pouvoir simuler des scénarios d'aménagement urbain sur le long terme et ne pas nécessiter trop de temps de calcul afin d'être accessible en dehors des laboratoires de recherche.

La chaîne de modélisation développée comporte deux étapes. La première permet de calculer l'ICU sur une agglomération complète à l'échelle du kilomètre carré à partir de données provenant d'une station rurale et du modèle de canopée urbaine TEB. Cette étape a été réalisée avec le développement du générateur de climat urbain spatialisé effectué pendant la première partie de la thèse. Ce modèle comprend un modèle simple de hauteur de couche limite et un modèle d'advection lagrangienne par le vent. Il permet de reproduire spatialement la température d'une ville donnée. Il a été validé sur une année complète à Paris par comparaison à une simulation avec le modèle atmosphérique complet MesoNH et des données provenant de stations opérationnelles.

La deuxième étape permet d'obtenir la variabilité de température au sein d'un quartier à l'échelle de la rue à partir des données météorologiques issues de la simulation de la première étape. Cette modélisation repose sur une relation statistique croisant des indicateurs de morphologie et d'occupation du sol du tissu urbain et des données de température à haute résolution obtenues dans le cadre du projet EUREQUA lors de campagnes de mesures dans trois villes, à Paris, Marseille et Toulouse. Ces données ont été obtenues grâce à une station mobile piétonne développée spécifiquement pour ce projet. Le croisement entre les données de température et les indicateurs urbains a permis de mettre en évidence le rayon d'influence des indicateurs et l'importance de la végétation pour la variabilité de la température au sein d'un quartier. L'objectif était dans un premier temps d'obtenir une relation statistique commune aux trois villes. Mais il s'est avéré que cela n'était pas possible. Si l'approche choisie dans cette thèse a fourni des résultats concluants sur Marseille et Paris, cela n'a pas été le cas sur Toulouse. D'autres paramètres comme l'influence de l'écoulement de l'air à fine échelle ou les matériaux composants le tissu urbain sont prépondérants dans le quartier de cette ville.

La chaîne de modélisation complète a été mise en place sur le cas de Paris lors de la campagne de mesure EUREQUA, permettant de reproduire la température à fine échelle rapidement à partir des données issues des aéroports entourant la région parisienne.

Abstract

The thermal comfort of urban residents is mainly affected by the Urban Heat Island (UHI) effect (difference in air temperature between urban and surrounding area). This effect is caused by anthropogenic sources, low vegetated areas and heat stored in buildings and roads released during the night. In case of heat wave, strong UHIs occur and mortality rates can increase in towns. For example, during the 2003 heat wave in Paris, almost 15000 excess deaths were recorded. The study of the UHI is essential and involves not only atmospheric sciences researchers but also urban planners or building engineers. However the modeling of the UHI needs numerical or experimental resources which are not accessible to other communities than atmospheric researchers.

The aim of this PhD work is to develop a modeling chain of the UHI at the street scale from data of an operational weather station located in a rural area like an airport and data describing the urban surface. These data are often accessible to the general public. The modeling chain has to be quick enough in order to simulate long term urban planning scenarios and have a low computational cost in order to be run outside of atmospheric sciences laboratories.

The modeling chain is built in two steps. The first step calculates the UHI at the city scale with data from a rural operational weather station and with the urban canopy model TEB. This step has been achieved with the development of the spatialized urban weather generator. This model contains a simple boundary layer model and a lagrangian advection model. Thus it computes spatialized urban temperatures. The spatialized urban weather generator has been validated on Paris with a one year simulation with a full atmospheric model MesoNH and with data from operational weather stations inside the city.

The second step calculates the temperature variability at the street scale inside a neighborhood with meteorological data from the simulation of the precedent step. This modeling relies on a statistical relationship combining morphological and land use indicators for the urban surface and high resolution temperature measurements. The temperatures are measured by a pedestrian mobile station developed in the framework of the research project EUREQUA. The cross analysis of the temperature and the urban indicators highlights the influence radius of the urban indicators and the role of the vegetation at the street scale. First, the objective was to obtain a common statistical relationship for the three cities but we did not succeed. The chosen approach give positive results for Paris and Marseille but not for Toulouse. Other parameters like fine scale air flows or materials used for the urban surface could be relevant in this neighborhood of Toulouse. The full modeling chain has been tested on Paris during the EUREQUA field survey. It reproduces quickly and correctly the fine scale temperature variability using data from operational weather stations located in airports in Paris area.

Table des matières

Table des figures	xiii
Liste des tableaux	xix
Introduction	3
1 Contexte et état de l'art	5
1.1 L'îlot de chaleur urbain : formation et adaptation	6
1.1.1 Description du phénomène	6
1.1.1.1 La couche limite atmosphérique urbaine	6
1.1.1.2 Définition de l'îlot de chaleur urbain	7
1.1.2 Les causes de l'îlot de chaleur urbain	8
1.1.3 Redéfinition de l'îlot de chaleur urbain	11
1.1.4 Conséquences de l'îlot de chaleur urbain	12
1.1.5 Stratégies d'adaptation des villes contre l'îlot de chaleur urbain	12
1.2 Mesures	15
1.2.1 Mesures de l'îlot de chaleur urbain de surface	15
1.2.2 Mesures de l'îlot de chaleur urbain dans la canopée	16
1.2.2.1 Mesures fixes	16
1.2.2.2 Mesures mobiles	17
1.2.3 Mesures du confort thermique extérieur	17
1.2.4 Positionnement de la thèse	19
1.3 Modélisation numérique	20
1.3.1 Modèles à l'échelle du bâtiment	20
1.3.2 Modèles à l'échelle de la ville	21
1.3.3 Vers des modèles simplifiés	22
1.3.4 Positionnement de la thèse	23
1.4 Modélisation statistique et utilisation de systèmes d'information géographique	24
1.4.1 Intérêt des systèmes d'information géographique	24
1.4.2 Modélisation statistique à l'échelle de la ville	24
1.4.3 Modélisation statistique à l'échelle du quartier	26
1.4.4 Positionnement de la thèse	27

2	Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle de la ville	29
2.1	Introduction	30
2.2	Présentation du modèle Town Energy Balance (TEB)	31
2.2.1	Le modèle de surface SURFEX	31
2.2.2	Le schéma originel de TEB	33
2.2.3	Amélioration de la modélisation des bâtiments	35
2.2.3.1	TEB-BEM	35
2.2.3.2	TEB-GREENROOF	37
2.2.3.3	Panneaux photovoltaïques	37
2.2.4	Amélioration de la végétation et de l'hydrologie dans TEB	38
2.2.4.1	TEB-Veg	38
2.2.5	Prise en compte du confort thermiques des habitants (TEB - UTCI)	39
2.3	Développement du générateur de climat urbain	41
2.4	Article	43
2.5	Conclusion	59
3	Mesures de la variabilité climatique à l'échelle du quartier	61
3.1	Introduction	62
3.2	Présentation du projet EUREQUA	64
3.2.1	Objectifs du projet	65
3.2.2	Méthodologie	65
3.3	Terrains expérimentaux choisis	66
3.3.1	Description du terrain à Marseille	67
3.3.2	Description du terrain à Paris	67
3.3.3	Description du terrain à Toulouse	68
3.4	Moyens expérimentaux mis en œuvre	69
3.4.1	Le réseau fixe	69
3.4.2	Les périodes d'observation intensive	72
3.5	Déroulement des campagnes de mesures	77
3.5.1	Paris	77
3.5.2	Marseille	81
3.5.3	Toulouse	84
3.6	Conclusion	88
4	Analyse croisée de la variabilité de température à l'échelle du quartier et des paramètres descriptifs du tissu urbain	89
4.1	Introduction	90
4.2	Traitement des mesures météorologiques	91
4.2.1	Projection sur un parcours théorique	93
4.3	Analyse des quartiers par différents indicateurs urbains	94
4.3.1	Choix des indicateurs urbains	95
4.3.2	Mise en forme des données SIG	97
4.3.3	Agrégation des indicateurs dans des zones tampons	102
4.3.3.1	Méthodologie	102
4.3.3.2	Illustrations des indicateurs par points d'arrêts	102
4.4	Croisement des indicateurs urbains et de la variabilité de la température	105

4.4.1	Méthodologie	105
4.4.2	Influence des conditions météorologiques	106
4.4.3	Zonages sur le parcours réduit	108
4.4.4	Signal thermique des zones choisies	111
4.4.4.1	Marseille	112
4.4.4.2	Paris	113
4.4.4.3	Toulouse	114
4.4.5	Rayon d'influence des indicateurs urbains	116
4.4.5.1	Analyse globale	118
4.4.5.2	Marseille et Paris	118
4.4.5.3	Toulouse	120
4.4.6	Relations statistiques liant la température et les indicateurs urbains	122
4.5	Comportement des mesures des réseaux de mesures fixes par rapport aux modèles statistiques	128
4.6	Conclusion	132
5	Mise en place d'une chaîne de modélisation complète sur le cas de Paris	135
5.1	Introduction	136
5.2	Limites de TEB pour reproduire la variabilité de la température à fine échelle	136
5.3	Modélisation simple d'effets d'ombrage avec TEB	140
5.4	Exemple de la mise en place de la chaîne de modélisation complète	142
5.5	Conclusion	145
6	Conclusion et perspectives	147
A	Questionnaire EUREQUA	151
B	Présentation des zones déterminées de manière experte à Marseille, Paris et Toulouse	159
C	Données de températures zonées par ville	187
D	Détermination du rayon d'influence des indicateurs urbains	193

Table des figures

1.1	Description de la couche limite atmosphérique (CLA) et de sa décomposition en couche limite rurale (CLR) et couche limite urbaine (CLU), elle-même décomposée en couche limite de surface (CLS), couche limite de canopée urbaine (CU) et couche de mélange. Source : adaptation de OKE (2006) par BOUYER (2009)	6
1.2	Variation spatiale de la température de l'air le long d'une coupe transversale d'une zone urbanisée. Source : PIGEON et al. (2008a)	7
1.3	Évolution temporelle des températures de l'air en milieu rural et urbain observées dans l'agglomération toulousaine le 25 février 2005 pendant la campagne CAPI-TOUL. Source : PIGEON et al. (2008a)	8
1.4	Comparaison des composantes du bilan d'énergie (rayonnement net, flux de chaleur sensible et latent, stockage de chaleur) pour un jour d'été moyen à Vancouver (British Columbia), en zone rurale (haut) et en zone péri-urbaine (bas). Dans la colonne de gauche sont tracés les cycles diurnes des flux et à droite leur valeurs agrégées sur les heures de jour. Source : BONAN (2002) d'après CLEUGH et al. (1986)	9
1.5	Exemples de facteurs de vue du ciel (Sky View Factor donc SVF en anglais) pris avec un objectif fish-eye à Curitiba au Brésil. Source : KRÜGER et al. (2011)	10
1.6	Représentation schématique du phénomène de brise urbaine. Source : HIDALGO RODRIGUEZ (2008)	11
1.7	Présentation des 17 types de LCZ et des propriétés du sol pouvant leur être ad-jointes. Source : STEWART et al. (2012).	13
1.8	Îlot de chaleur de surface à Pyongyang et Beijing. Source : TRAN et al. (2006). . .	15
1.9	Exemples de stations de mesures pour des études de confort thermique. Celle du haut a été utilisée par CHEN et al. (2012) à Hong Kong et celle du bas par BRÖDE et al. (2012) au Brésil.	18
1.10	Capteur dit 'globe gris' développé et calibré par THORSSON et al. (2007).	18
1.11	Station de mesure mobile proposée par POTVIN (2000) reprenant la structure d'un casque audio.	19
1.12	Exemple de simulation CFD de vitesse de vent et de température de surface sur un quartier de Rotterdam idéalisé. Source : (TOPARLAR et al. 2014)	20
1.13	Carte climatique urbaine de Stuttgart en Allemagne. Source : REN et al. (2011) . .	25
1.14	Étude de la valeur de l'îlot de chaleur urbain à Singapour en fonction du rapport d'aspect. Les données mesurées sont en carrés noirs, le modèle issu de ces données en trait noir et en pointillés est représentée la loi issue de OKE 1981. Source : CHANG et al. (1999).	26

1.15	Cercles sur lesquels sont agrégés les paramètres de la zone tampon autour d'un capteur à Florence. Le rayon des cercles varie de 10 à 500 mètres. Source : PETRALI et al. (2014).	27
1.16	Différents tests statistiques de spatialisation de l'îlot de chaleur urbain à Wrocław en Pologne. Source : SZYMANOWSKI et al. (2009).	28
2.1	Différentes applications de la plate-forme de surface SURFEX. Source : Valéry Masson.	31
2.2	Fonctionnement de type mosaïque du modèle SURFEX. Source : MASSON et al. 2013	32
2.3	Description de la physique de TEB et du modèle en rue canyon. Source : Météo France	33
2.4	Schéma décrivant le fonctionnement du module CANOPY en ville et à la campagne. Source : MASSON et al. 2013	34
2.5	Schéma décrivant les processus modélisés dans le schéma TEB-BEM. Source : BUENO et al. 2011	35
2.6	Méthodologie développée pour l'évaluation de TEB-BEM. Source : PIGEON et al. 2014	36
2.7	Méthodologie développée pour le modèle de toiture végétalisée GREENROOF. Source : DE MUNCK et al. 2013	37
2.8	Méthodologie développée pour le modèle de panneaux solaires inclu dans TEB. Source : MASSON et al. 2014b.	38
2.9	Fonctionnement de TEB-Veg. Source : LEMONSU et al. 2012.	39
2.10	Les trois environnements utilisés dans TEB pour calculer l'UTCI. Source : PIGEON 2011.	40
2.11	Échelle de stress thermique définie pour l'UTCI. Source : www.utci.org	40
2.12	Schéma de fonctionnement global du générateur de climat urbain en trois étapes.	42
2.13	a. Schéma de fonctionnement du générateur de climat urbain par BUENO et al. (2013). Le bilan d'énergie se fait sur une boîte de la taille de la ville. b. Schéma de fonctionnement du générateur de climat urbain spatialisé. Le bilan d'énergie se fait sur plusieurs boîtes de différentes hauteurs communiquant entre elles par une advection lagrangienne à deux dimensions.	42
3.1	Température à Blagnac sur un parcours à vélo le 3 juin 2009 le matin. Source : rapport final du projet PIRVE.	62
3.2	Méthodologie globale du projet EUREQUA.	66
3.3	Localisation du terrain à Marseille à gauche et zoom sur le quartier d'étude à droite. Images satellites issues de Google Earth.	67
3.4	Localisation du terrain à Paris à gauche et zoom sur le quartier d'étude à droite. Images satellites issues de Google Earth.	68
3.5	Localisation du terrain à Toulouse à gauche et zoom sur le quartier d'étude à droite. Images satellites issues de Google Earth.	69
3.6	Stations de mesures du réseau fixe météorologique. À gauche, une station du réseau fixe, au centre le mât de mesure de la station de référence et à droite le radiomètre de la station de référence. Source : Dominique Legain.	70

3.7	Station mobile développée par le CNRM/GAME lors de la campagne d’avril à Toulouse.	72
3.8	a. Sonomètre lors d’une POI de nuit, b. Caméra thermique à Toulouse, c. Radiosondage à Marseille, d. Enquêtés lors de la POI marseillaise.	74
3.9	Voiture instrumentée du CEREMA de l’est.	75
3.10	Installation du réseau fixe météorologique à Paris. En étiquette rouge, les stations fixes, en vert le lieu de lancement des radiosondages et en bleu le mât de mesure avec la station de référence. Le parcours de mesures physiques est représenté en ligne rouge.	78
3.11	Paris : a. Tracé du parcours mesures physiques (ligne rouge) et points d’arrêts (épingles jaunes). b. Tracé du parcours enquête (ligne bleue) et points d’arrêts (épingles vertes). c. Tracé du parcours de la voiture instrumentée (vert) et parcours mesures physiques (rouge).	79
3.12	Résumé des conditions météorologiques au moment de la POI parisienne issues de la station de référence.	80
3.13	Installation du réseau fixe météorologique à Marseille. En étiquette rouge, les stations fixes, en vert le lieu de lancement des radiosondages et en bleu le mât de mesure avec la station de référence. Le parcours de mesures physiques est représenté en ligne rouge.	81
3.14	Marseille : a. Tracé du parcours mesures physiques (ligne rouge) et points d’arrêts (épingles jaunes). b. Tracé du parcours enquête (ligne bleue) et points d’arrêts (épingles vertes). c. Tracé du parcours de la voiture instrumentée (vert) et parcours mesures physiques (rouge).	82
3.15	Résumé des conditions météorologiques au moment de la POI marseillaise issues de la station de référence.	83
3.16	Installation du réseau fixe météorologique à Toulouse. En étiquette rouge, les stations fixes, en vert le lieu de lancement des radiosondages et en bleu le mât de mesure avec la station de référence. Le parcours de mesures physiques est représenté en ligne rouge.	84
3.17	Résumé des conditions météorologiques au moment des POI toulousaines issues de la station de référence.	86
3.18	Toulouse : a. Tracé du parcours mesures physiques (ligne rouge) et points d’arrêts (épingles jaunes). b. Tracé du parcours enquête (ligne bleue) et points d’arrêts (épingles vertes). c. Tracé du parcours de la voiture instrumentée (vert) et parcours mesures physiques (rouge).	87
4.1	Exemple de traitement du signal de température de la station mobile sur le parcours du 10 avril à 9h00 à Toulouse : a. Le signal correspondant au signal du capteur non ventilé (en rouge) est retiré du signal global (en noir). b. Signal de la station mobile réinitialisé (sans la partie non ventilée) en noir et signal de la station de référence lissé sur 5 minutes en vert . c. Signal de la station mobile réinitialisé (en pointillés noirs), signal de la station de référence lissé en vert et signal de la station mobile corrigé de la tendance de la station de référence en bleu. d. Signal de la station mobile réinitialisé (en pointillés noir), température initiale du parcours en orange, signal de la station mobile corrigé de la tendance de la station de référence en pointillés bleus et signal final corrigé linéairement en rouge.	92
4.2	Exemple de correction de la trace GPS pour le parcours du 8 octobre à 21h à Paris.	93

4.3	Parcours théoriques de mesures physiques de Marseille, Paris et Toulouse. Tous les points sont distants de 20 mètres.	94
4.4	Bilan de la numérisation pour la couche SIG de végétation, Toulouse. Source : Noémie Gaudio.	98
4.5	Traitement pour obtenir les bases de données vectorielles. Source : Lina Quinteiro.	99
4.6	Couches BD TOPO et BD TOPO 'enrichie' de Toulouse, Marseille et Paris. Source : Lina Quinteiro et Noémie Gaudio.	100
4.7	Identifications de zones vides avec l'ORTHO PHOTO autour des points d'arrêt à Paris. Source : Lina Quinteiro.	101
4.8	Identifications de zones vides avec l'ORTHO PHOTO autour des points d'arrêt à Paris. Source : Lina Quinteiro.	102
4.9	Fractions d'occupation du sol calculées pour les zones tampon de 20, 50 et 100 m autour des points d'arrêt du parcours à Paris. Source : Lina Quinteiro.	103
4.10	Paramètres morphologiques calculés pour les zones tampon de 20, 50 et 100 m autour des points d'arrêt du parcours à Paris et Marseille. Source : Lina Quinteiro.	104
4.11	Variabilité de température sur parcours idéalisé à Marseille le 19 juin à 15 heures (la valeur médiane a été ôtée au signal de température traité).	105
4.12	Comparaison de l'amplitude Amp_{90} mesurée et modélisée pour toutes les villes étudiées.	107
4.13	Zones choisies par expertise pour chaque ville sur chaque parcours idéalisé.	109
4.14	Boîtes à moustache représentant la variabilité de température normalisée (VTN) pour chaque zone du parcours à Marseille la nuit et le jour.	112
4.15	Boîtes à moustache représentant la variabilité de température normalisée (VTN) pour chaque zone du parcours à Paris la nuit et le jour.	113
4.16	Histogrammes représentant la variabilité de température normalisée (VTN) pour chaque zone du parcours de Toulouse en janvier, avril, juin et sur toute les saisons la nuit et le jour.	114
4.17	Boîtes à moustache représentant la variabilité de température normalisée (VTN) pour chaque zone du parcours de Toulouse en janvier, avril et juin la nuit et le jour.	115
4.18	Coefficient R^2 issu d'une régression linéaire entre la variabilité de température normalisée et le paramètre ROUTE en fonction du rayon choisi pour la zone tampon à Paris et Marseille la nuit et le jour.	119
4.19	Coefficient R^2 issu d'une régression linéaire entre la variabilité de température normalisée et le paramètre VEGE en fonction du rayon choisi pour la zone tampon à Paris et Marseille la nuit et le jour.	120
4.20	Variabilité de température toutes zones et parcours confondus mesurée en fonction de celle modélisée par la relation spécifique à la ville à gauche et la relation globale à droite, pour les campagnes de Marseille, Paris et Toulouse en Avril.	124
4.21	Variabilité de température en fonction de l'heure de chaque parcours à Marseille avec en noir les points issus des mesures et en rouge ceux issus de la relation statistique particulière à Marseille à gauche et la relation statistique globale à droite.	125
4.22	Variabilité de température en fonction de l'heure de chaque parcours à Paris avec en noir les points issus des mesures et en rouge ceux issus de la relation statistique particulière à Marseille à gauche et la relation statistique globale à droite.	127
4.23	Positions des stations de mesures fixes à Marseille et Paris.	128

4.24	Variabilité de température normalisée (VTN) mesurée par le réseau fixe en noir et la station mobile en rouge en fonction de la VTN modélisée statistiquement de jour et de nuit à Marseille et Paris.	130
5.1	Variabilité de température mesurée par la station mobile en noir et modélisée par TEB en rouge en fonction de l'heure et de la température de chaque parcours à Marseille et Paris.	137
5.2	Développement envisagé pour un diagnostic de la température dans une zone végétalisée dans le model TEB sans CANOPY (a) et dans le model TEB avec CANOPY (b).	139
5.3	Variabilité de température mesurée par la station mobile en noir et modélisée par TEB en rouge en fonction de l'heure des parcours avec à gauche la simulation sans ombrage et droite la simulation avec ombrage.	140
5.4	Développement envisagé pour un diagnostic de la température à l'ombre dans TEB.	141
5.5	Température à 2 mètres simulée par le générateur de climat urbain spatialisé le 8 octobre à 0h UTC. Le point rouge représente l'emplacement du mât de mesure porte de Bagnolet. La figure du bas représente la température modélisée sur le transect représenté en pointillés bleus sur la figure supérieure.	142
5.6	Température mesurée lors des parcours (cercle noir), température de la station moyenne de campagne (en vert) et température simulée par le générateur de climat urbain spatialisé (en rouge) lors des trois jours de campagne de mesures à Paris en octobre 2013.	143
5.7	Variabilité de température mesurée en fonction de la variabilité modélisée par la chaîne de modélisation à Paris.	144
C.1	Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Marseille.	188
C.2	Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Paris.	189
C.3	Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Toulouse en janvier.	190
C.4	Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Toulouse en avril.	191
C.5	Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Toulouse en juin.	192
D.1	Coefficient de corrélation au carré en fonction du rayon des indicateurs urbains à Marseille le jour et la nuit.	194
D.2	Coefficient de corrélation au carré en fonction du rayon des indicateurs urbains à Paris le jour et la nuit.	195
D.3	Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Toulouse en janvier le jour et la nuit.	196
D.4	Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Toulouse en avril le jour et la nuit.	197
D.5	Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Toulouse en juin le jour et la nuit.	198
D.6	Variabilité de température normalisée par parcours à Toulouse (moyenne sur les parcours de toutes les saisons) le jour et la nuit.	199

D.7 Variabilité de température normalisée par parcours de toutes les villes le jour et la nuit. 200

Liste des tableaux

3.1	Caractéristiques des capteurs installés sur les stations fixes du réseau.	70
3.2	Caractéristiques des capteurs installés sur la station de référence du réseau.	71
3.3	Caractéristiques des capteurs installés sur la station de mesures mobile.	76
3.4	Stations fixes installées à lors de la campagne parisienne.	77
3.5	Stations fixes installées à lors de la campagne marseillaise.	82
3.6	Stations fixes installées à lors de la campagne toulousaine.	85
4.1	Indicateurs d'occupation du sol et de morphologie urbaine choisis pour l'étude. Source : Lina Quinteiro.	96
4.2	Résultat de la régression linéaire multiple pour l'amplitude Amp_{90} . Le coefficient R^2 pour cette régression est de 0,78.	107
4.3	Anomalies par rapport à la moyenne des indicateurs urbains pour chaque zone de chaque ville du projet EUREQUA.	110
4.4	Rayon d'influence et coefficient R^2 associé entre parenthèse pour toutes les cam- pagnes de mesure, sur Toulouse (agrégation de chaque saison) et sur toutes les villes (en agrégeant toutes les campagnes).	117
4.5	Résultats de la comparaison entre la modélisation choisie et les anomalies de tem- pérature mesurées. R^2 est le coefficient de corrélation issu de la régression linéaire entre la modélisation et les mesures, RMSE l'erreur quadratique moyenne et MBE le biais moyen.	123
4.6	Anomalie des indicateurs urbains par rapport à leur moyenne sur la zone pour les stations du réseau fixe de Marseille et pour les zones du parcours de mesures physiques.	129
4.7	Anomalie des indicateurs urbains par rapport à leur moyenne sur la zone pour les stations du réseau fixe de Paris et pour les zones du parcours de mesures physiques.	129

Introduction

Contexte de la thèse

D'après le rapport des Nations Unies (DESA 2010), 54% de la population mondiale (et 73% en Europe) vit aujourd'hui en ville. Ce chiffre devrait croître jusqu'à un taux de 66% en 2050. Ce phénomène s'accompagne d'une urbanisation rapide en conséquence du nombre d'habitants nouveaux que doivent accueillir les villes. Or l'environnement urbain est un environnement particulier. En effet, le remplacement de surfaces naturelles comme les campagnes, les forêts ou le désert par des routes, des bâtiments et des parkings a un impact sensible sur le climat local. L'îlot de chaleur urbain, qui se traduit par des températures plus élevées en ville par rapport à la campagne environnante, est une des plus importantes conséquences de l'urbanisation. Ses causes principales sont les flux de chaleur issus des rayonnements solaires et infra-rouges stockés par les bâtiments et relâchés la nuit, la moindre présence de végétation en milieu urbain et les flux anthropiques engendrés par le trafic routier, le chauffage et la climatisation ou les activités industrielles. Pour les plus grandes mégapoles, l'îlot de chaleur urbain peut dépasser les $10^{\circ}C$ (OKE 1973). Cet excès de température en ville a des conséquences fortes pour les habitants. En effet, l'îlot de chaleur urbain engendre une augmentation de la pollution (LAI et al. 2009) car la création d'ozone au niveau du sol augmente avec la température. Il accentue aussi la consommation énergétique des bâtiments via la demande climatisation ou en chauffage (GARTLAND 2010) et a une forte influence sur le confort thermique des habitants. Cette notion de confort thermique est très importante car en cas de canicule, comme en Europe à l'été 2003, la température en ville ne peut pas redescendre à des niveaux 'confortables' pour le corps humain qui ne peut donc pas se reposer. FOUILLET et al. (2006) estiment qu'à Paris, un excédent de 15 000 morts était dû à la canicule aggravée par l'îlot de chaleur urbain parisien. Or, avec le changement climatique, les modèles prédisent que les canicules comme celles de 2003 seront beaucoup plus fréquentes qu'aujourd'hui, avec en moyenne à l'horizon 2100 une canicule et demi du type de 2003 par an selon un scénario d'émission d'effet de serre de type A1B (BEAULANT et al. 2012).

L'étude de l'îlot de chaleur urbain est donc un enjeu majeur aujourd'hui et dans le futur pour les habitants des villes. Ses causes et conséquences sont nombreuses et mobilisent des acteurs aux profils très variés de la vie et de l'aménagement des villes. Les décideurs politiques, les laboratoires de recherche, les bureaux d'études d'étude en ingénierie du bâtiment et en urbanisme sont préoccupés par cette thématique. Or, l'étude de l'îlot de chaleur urbain nécessite des infrastructures lourdes qui ne sont souvent utilisables que par des laboratoires de sciences atmosphériques. Que ce soit pour la mesure via des réseaux de mesures fixes, mobiles ou par télédétection ou par la simulation par des modèles atmosphériques complexes, les moyens requis pour faire un diagnostic précis ou des scénarios d'aménagement requièrent des compétences et des outils (notamment pour le calcul numérique) qui ne sont pas accessibles à des cabinets d'études par exemple.

Au CNRM-GAME, l'activité sur l'étude du climat urbain est développée depuis une quinzaine d'années. Elle a débuté par la création d'un modèle numérique de ville par Valéry Masson, le modèle TEB (Town Energy Balance) et l'étude expérimentale de l'îlot de chaleur urbain par des campagnes de mesures sur Marseille, grâce au projet ESCOMPTE et à Toulouse, grâce au projet CAPITOU. Le modèle TEB étant arrivé à maturité suite à de nombreux développements tout au long des années 2000 (une présentation exhaustive sera faite dans le chapitre 2), les activités de l'équipe se sont orientées vers des projets interdisciplinaires et liés au changement climatique. Par exemple, le projet ANR MUSCADE (2010-2012) a donné lieu à une étude sur les interactions entre

structure de ville, consommation énergétique, microclimat urbain et changement climatique. Le projet ACCLIMAT (2010-2013) a permis la mise en place d'une plate-forme permettant de coupler des scénarios climatiques avec des scénarios économiques, architecturaux et géographiques. Aujourd'hui, l'équipe est impliquée dans le projet ANR EUREQUA (2012-2016), présenté dans le chapitre 3, qui étudie la qualité environnementale à l'échelle du quartier et regroupe des équipes de recherche en sciences sociales, en architecture, en acoustique, en qualité de l'air et en climat. Le projet MApUCE (2014-2018), en cours lui aussi vise à intégrer des données quantitatives de microclimat urbain, de climat et d'énergie dans les politiques urbaines et les documents juridiques les plus pertinents, dans une démarche applicable à toutes les villes de France.

Tous ces projets sont des projets ambitieux qui nécessitent de renouveler l'approche de la modélisation du climat urbain. En effet, le modèle TEB est prévu pour être forcé soit par des données provenant de campagnes expérimentales soit par un modèle atmosphérique complet. Ceci est une contrainte très forte pour faire des études sur le long terme, en climat futur ou sur un grand nombre de villes. Un des premiers objectifs de ma thèse a été le développement d'un générateur de climat urbain permettant de s'affranchir de ces contraintes en simulant des données de forçage à partir d'un point de mesure en dehors de la ville étudiée et du modèle de surface TEB. De plus, le projet EUREQUA s'intéresse au confort des habitants. Les variations de ce confort se manifestent à l'échelle de la rue, en passant près d'un parc ou en passant d'une zone ensoleillée à une zone ombragée. Or, le modèle TEB est limité en résolution par ses hypothèses à l'échelle du quartier (quelques centaines de mètres). Pour modéliser la variation de température à l'échelle de la rue, des modèles dits de CFD (Computational Fluid Dynamics) sont utilisés. Mais ces modèles sont très lourds en temps de calcul et ne sont pas fait pour étudier le climat urbain à l'échelle de la ville. Un des objectifs de la thèse a donc été d'étudier expérimentalement la variabilité micro-échelle du climat urbain pour en déduire des lois statistiques croisant température et paramètres d'occupation du sol et de morphologie, données souvent disponibles à haute résolution pour tous les acteurs de la ville.

Objectif de la thèse

L'objectif global de cette thèse est de mettre en place une chaîne de modélisation rapide du climat urbain à l'échelle de la rue à partir d'une station de mesure rurale et de la description de la morphologie et de l'occupation du sol urbain à haute résolution. Cette chaîne de modélisation nécessite le développement d'un générateur rapide de climat urbain et l'analyse et la modélisation de la variabilité de la température à l'échelle de la rue. Le principe est d'éviter d'utiliser des modèles complexes d'atmosphère méso-échelle et de CFD pour que la modélisation soit adaptée aux développements de scénarios d'aménagement urbain ou aux études de confort thermique des habitants sur le long terme et à haute résolution.

Organisation de la thèse

Dans le premier chapitre de la thèse, un état de l'art de la climatologie urbaine autant du côté de la mesure que de la modélisation est effectué. Cet état de l'art permettra de positionner mon travail par rapport aux avancements actuels dans le domaine.

Le deuxième chapitre a pour sujet le développement de générateur de climat urbain spatialisé sur lequel j'ai travaillé dans la première partie de ma thèse. Ce chapitre permet dans un premier

temps de faire le point sur le fonctionnement et les développements du modèle TEB, développé au CRNM-GAME, qui est utilisé tout au long de la thèse. Ensuite, à travers mon premier article scientifique, le générateur de climat urbain spatialisé est présenté. Ce modèle permet de calculer l'îlot de chaleur urbain à l'échelle du quartier (quelques centaines de mètres) à partir des données d'une station météorologique rurale et du modèle TEB, ce qui constitue le premier élément de la chaîne de modélisation.

Le troisième chapitre permet de présenter le projet ANR EUREQUA dans lequel s'inscrit une partie de cette thèse. Au cours de ce projet, des campagnes de mesures inter-disciplinaires ont été effectuées dans trois quartiers de trois villes, Marseille, Paris et Toulouse. J'ai participé activement à ces campagnes de mesures en organisant et coordonnant la campagne de mesure à Paris et en participant aux campagnes de Toulouse et Marseille. Ces campagnes de mesures, pour le côté météorologique, étaient composées au sein d'un quartier d'environ 500 mètres de côté, d'un réseau de mesures fixe de 10 stations météorologiques, d'une voiture instrumentée et d'une station de mesure piétonne. Cette station a été développée au CNRM/GAME par l'équipe d'instrumentation et est composée des instruments nécessaires pour reconstituer des indices de confort thermique. Avec cette station, j'ai obtenu une image de la variabilité de la température de l'air à l'échelle de la rue donc à très haute résolution. Cette étape est nécessaire pour pouvoir mettre en place la deuxième partie de chaîne de modélisation qui doit permettre de simuler la variabilité de la température à l'échelle de la rue à partir de données météorologiques représentatives d'un quartier.

Dans le quatrième chapitre, j'ai croisé la variabilité de la température obtenue lors des campagnes de mesure avec des indicateurs urbains de morphologie et d'occupation du sol obtenus par un traitement de logiciel de système d'information géographique. Ces indicateurs ont été calculés via une méthodologie mise au point par Lina Quinteiro au cours d'un stage de M2 effectué dans notre équipe. Le but est d'obtenir une relation statistique entre les indicateurs urbains et la variabilité de la température. Pour cela, j'ai dû déterminer le rayon d'influence de chaque indicateur urbain par rapport aux points de mesure et mettre ensuite en place une régression multiple linéaire pour obtenir une relation simple entre les paramètres étudiés, ce qui permettra de simuler la température de manière statistique à haute résolution sans faire appel à un modèle de CFD. Ce travail constitue la deuxième étape de la chaîne de modélisation.

Le cinquième chapitre montrera les limites de TEB dans la modélisation à haute résolution et l'intégration du modèle statistique dans TEB. Un exemple complet de la chaîne de modélisation sera présenté sur le cas de Paris pour conclure ce travail.

Le sixième et dernier chapitre sera une conclusion quant aux avancées majeures présentées dans cette thèse. Ce chapitre sera aussi l'occasion de dresser une liste des perspectives qu'il serait à mon sens intéressant de développer dans la continuité de ce travail de thèse.

Chapitre 1

Contexte et état de l'art

1.1 L'îlot de chaleur urbain : formation et adaptation

1.1.1 Description du phénomène

1.1.1.1 La couche limite atmosphérique urbaine

Les propriétés physiques du sol, qu'elles soient radiatives, thermiques, hydriques ou aérodynamiques, définissent un bilan d'énergie global qui modifie les propriétés de l'atmosphère. La couche limite atmosphérique est la partie de l'atmosphère dans laquelle cette influence est la plus forte car gouvernée par des constantes de temps courtes (de l'ordre de la journée au maximum). Ainsi, la présence d'une ville au milieu d'une campagne implique la présence de surfaces imperméables, de bâtiments et de flux anthropiques (comme le trafic routier, la présence d'usines ou le chauffage et la climatisation des bâtiments) qui modifient le bilan énergétique de la surface. Les villes donnent donc naissance à un microclimat particulier, le microclimat urbain.

La couche limite atmosphérique urbaine a une épaisseur variant sur un cycle journalier complet de quelques kilomètres le jour à quelques centaines de mètres la nuit (DUPONT et al. 1999). Elle se décompose en plusieurs couches illustrées par la figure 1.1.

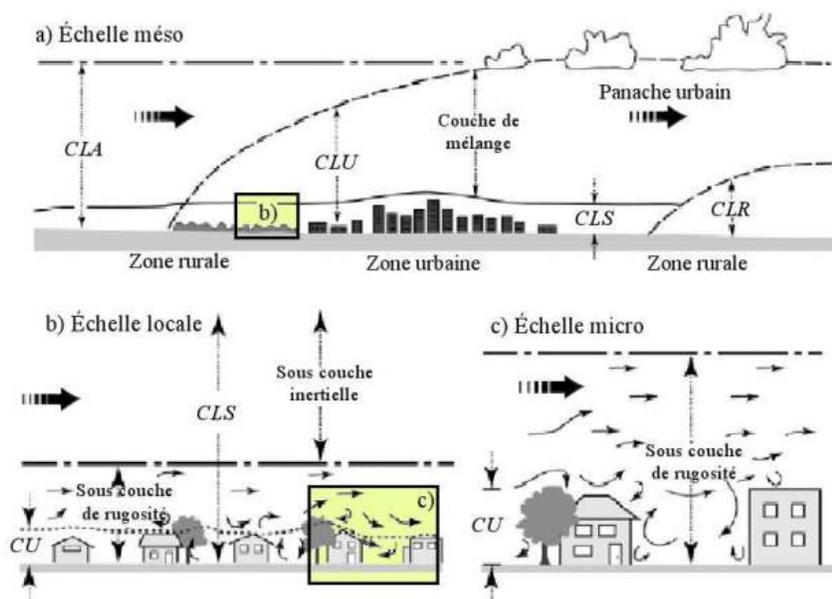


FIGURE 1.1 – Description de la couche limite atmosphérique (CLA) et de sa décomposition en couche limite rurale (CLR) et couche limite urbaine (CLU), elle-même décomposée en couche limite de surface (CLS), couche limite de canopée urbaine (CU) et couche de mélange. Source : adaptation de OKE (2006) par BOUYER (2009)

La couche limite atmosphérique urbaine se décompose en deux couches :

- la couche de mélange, sa partie haute, qui ne subit que peu les effets de rugosité de la surface et qui est le siège d'une importante convection due aux effets thermiques et aux vents synoptiques ;
- la couche limite de surface qui représente environ 10% de la hauteur totale de la couche limite atmosphérique (ROBITU 2005).

D'après OKE (1976), la couche limite de surface se décompose en trois sous-couches :

- la partie haute, la sous-couche inertielle, qui n'est pas affectée directement par les éléments de rugosité mais par la rugosité moyenne de la zone au-dessus de laquelle elle se trouve, grâce au brassage turbulent de l'air (ERELL et al. 2012) ;
- la sous-couche de rugosité, en dessous de la sous-couche inertielle, qui s'étend du sommet de la canopée urbaine à une hauteur de 1,5 à 4 fois la hauteur des éléments de rugosité (GRIMMOND et al. 1999). Cette sous-couche est le siège de flux turbulents inhomogènes dus à l'influence directe des bâtiments ;
- la couche limite de canopée urbaine, qui est la couche située entre le sol et le sommet des bâtiments. Cette couche est la plus importante car c'est dans celle-ci que vivent les habitants d'une ville. Elle est aussi la plus complexe à modéliser car les effets de turbulence y sont les plus importants.

1.1.1.2 Définition de l'îlot de chaleur urbain

Le microclimat urbain est caractérisé par un phénomène communément appelé l'îlot de chaleur urbain (voir Figure 1.2 pour une illustration), correspondant à la différence de température existant au sein de la ville et dans sa périphérie (OKE 1976 ; GARTLAND 2010).

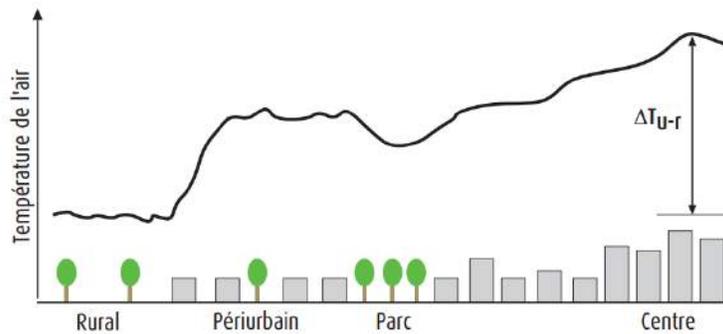


FIGURE 1.2 – Variation spatiale de la température de l'air le long d'une coupe transversale d'une zone urbanisée. Source : PIGEON et al. (2008a)

L'ICU est principalement dû à la présence de bâtiments et de surfaces imperméables en ville. Le tissu urbain stocke de la chaleur le jour et la relâche vers l'atmosphère la nuit. À la campagne, l'énergie solaire n'est pas stockée mais sert à l'évapotranspiration du sol et des plantes. L'ICU est donc un phénomène principalement nocturne.

Il a été mis en évidence pour la première fois à Londres en 1820 (LANDSBERG 1981) mais son étude s'est fortement développée à partir des années 1970 (voir STEWART (2011) pour une

chronologie détaillée). Trois types d'îlots de chaleur urbains peuvent être distingués.

1. L'îlot de chaleur urbain souterrain. Les villes ont tendance en effet à avoir un sous-sol plus chaud qu'à la campagne (TANIGUCHI et al. 2008). Ce phénomène est le moins étudié dans la littérature.
2. L'îlot de chaleur urbain de surface caractérisé par la différence de température des revêtements urbains (routes, sols, toits entre autres) et des sols naturels. Les nombreux matériaux composant une ville impliquent des différences de température fortes au sein même de la ville en fonction de l'albédo des matériaux.
3. L'îlot de chaleur urbain atmosphérique qui correspond à la différence de température de l'air existant entre la ville et la campagne. Ce phénomène peut être étudié soit au-dessus de la canopée urbaine soit au cœur de la canopée.

Comme l'étude de cette thèse est centrée sur l'îlot de chaleur ressenti par les habitants, j'étudierai principalement l'îlot de chaleur situé dans la canopée urbaine et celui-ci sera noté ICU ou appelé 'îlot de chaleur urbain' par la suite. Toute référence à un autre type d'îlot de chaleur sera explicitement mentionnée.

L'ICU se manifeste principalement la nuit par temps de ciel clair avec peu de vent. Il est plus marqué en début de nuit et peut atteindre des valeurs allant jusqu'à plus de $10^{\circ}C$ (OKE 1973). Pour une ville comme Toulouse, son intensité a atteint en hiver, en conditions favorables, la valeur de $4^{\circ}C$ pendant la campagne CAPITOUL (MASSON et al. 2008) (voir Figure 1.3).

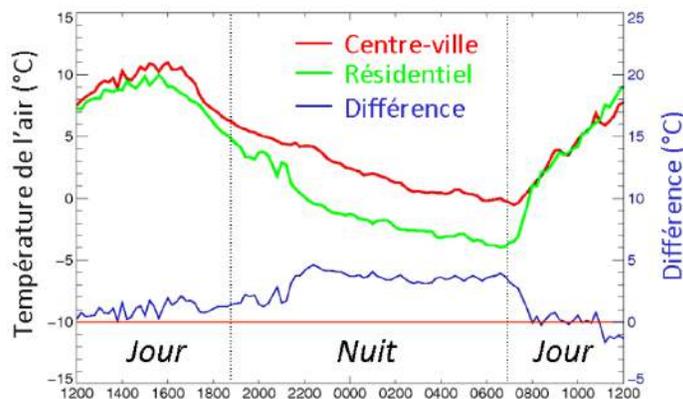


FIGURE 1.3 – Évolution temporelle des températures de l'air en milieu rural et urbain observées dans l'agglomération toulousaine le 25 février 2005 pendant la campagne CAPITOUL. Source : PIGEON et al. (2008a)

1.1.2 Les causes de l'îlot de chaleur urbain

La différence de température entre la ville et sa campagne environnante s'explique par le remplacement de sols perméables et végétalisés par des matériaux et revêtements imperméables. L'étude de la différence des bilans d'énergie des surfaces rurales et urbaines permet de comprendre la formation de ce phénomène.

Pour une surface rurale, le bilan d'énergie s'écrit

$$Q^* = Q_H + Q_{LE} + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1.1)$$

avec Q^* le flux de rayonnement infra-rouge et solaire net, Q_H le flux de chaleur sensible, Q_{LE} le flux de chaleur latente, ΔQ_S le terme de stockage de chaleur dans le sol et les bâtiments et ΔQ_A l'advection de la chaleur par le vent.

Le bilan énergétique d'une surface urbaine, formulé par (OKE 1988) reprend le bilan effectué à la campagne en lui ajoutant un flux anthropique Q_F dû aux activités anthropiques comme le trafic routier, les activités industrielles, le chauffage ou la climatisation des bâtiments.

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_{LE} + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1.2)$$

L'ICU va être dû d'une part à la présence de ces flux anthropiques, mais aussi à une différence dans la distribution de la chaleur dans les termes de flux de chaleur sensible, latente et de stockage. La figure 1.4 donne un exemple de ce phénomène pour une jour moyen d'été à Vancouver.

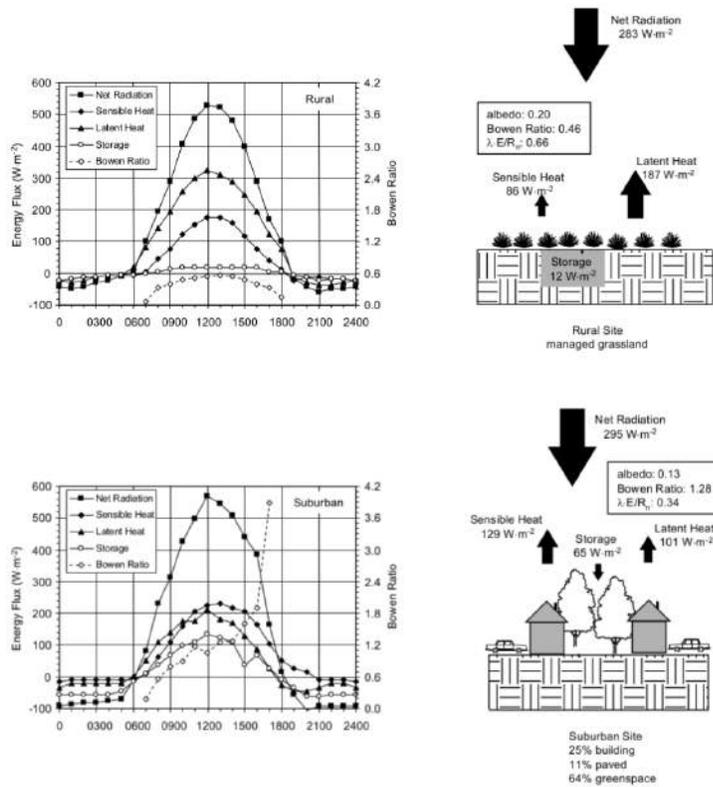


FIGURE 1.4 – Comparaison des composantes du bilan d'énergie (rayonnement net, flux de chaleur sensible et latent, stockage de chaleur) pour un jour d'été moyen à Vancouver (British Columbia), en zone rurale (haut) et en zone péri-urbaine (bas). Dans la colonne de gauche sont tracés les cycles diurnes des flux et à droite leur valeurs agrégées sur les heures de jour. Source : BONAN (2002) d'après CLEUGH et al. (1986)

À la campagne, le bilan d'énergie se caractérise par un fort flux de chaleur latente dû à l'évapotranspiration du sol et des plantes. Les termes de stockage et de chaleur sensible y sont assez faibles. En zone péri-urbaine, le terme de stockage est beaucoup plus élevé grâce aux matériaux urbains ayant une forte capacité thermique. De plus le rapport de Bowen, défini comme le rapport Q_H/Q_E est inversé en ville (1, 28) par rapport à la campagne (0, 48). L'énergie stockée le jour dans les matériaux est restituée la nuit par refroidissement infra-rouge, ce qui implique une température nocturne plus élevée en ville que dans sa périphérie.

Les causes de l'ICU peuvent être plus détaillées qu'à travers la lecture de ce cas précis. D'après STEWART et al. (2012), ces causes sont les suivantes.

1. Une meilleure absorption du rayonnement solaire (et donc une augmentation de Q^*) due au piégeage radiatif par les surfaces verticales et horizontales de la ville ainsi que par les réflexions multiples sur ces surfaces. La morphologie de la ville offre donc une plus grande surface d'échange thermique qu'une surface plane naturelle.
2. Le rayonnement infra-rouge est mieux retenu dans les rues des villes ayant un facteur de vue du ciel élevé (ce qui entraîne une augmentation de Q^*). Le facteur de vue du ciel est défini comme la partie du ciel qui n'est pas obstruée par une structure urbaine. Le facteur de vue du ciel vaut 1 pour un ciel dégagé et 0 lorsqu'il est complètement obstrué (voir Figure 1.5). Ainsi l'énergie stockée dans les bâtiments la nuit est difficilement rejetée à l'atmosphère à cause de la rétention du rayonnement infra-rouge par les surfaces verticales urbaines.



FIGURE 1.5 – Exemples de facteurs de vue du ciel (Sky View Factor donc SVF en anglais) pris avec un objectif fish-eye à Curitiba au Brésil. Source : KRÜGER et al. (2011)

3. Un meilleur stockage et relâchement de la chaleur par les bâtiments et les routes en ville (donc une augmentation de ΔQ_S). Ce phénomène est dû aux propriétés thermiques des bâtiments, au piégeage radiatif mais aussi à la convection qui est plus faible en ville. Les vents sont en effet atténués en ville par rapport à la campagne d'environ 50% (GARTLAND 2010) à cause de la rugosité qui y est plus forte.
4. En ville, une plus grande partie du rayonnement solaire est converti en chaleur sensible plutôt qu'en chaleur latente (diminution de Q_{LE} et augmentation de Q_H). Le remplacement des sols humides et de plantes par des matériaux imperméables y inverse le rapport de Bowen par rapport à la campagne.

- Des émissions anthropiques (le facteur Q_F) plus grandes dues au trafic routiers, aux activités industrielles ou au chauffage et à la climatisation. DE MUNCK et al. (2013) ont montré que l'emploi intensif de climatisation à Paris pourrait augmenter la température en ville d'environ $1^\circ C$ la nuit en condition de canicule.

De plus, l'amplitude de l'ICU est contrôlée par les conditions météorologiques synoptiques. Par exemple, l'ICU est moins intense en conditions nuageuses (MORRIS et al. 2001; ALONSO et al. 2007) et il diminue lorsque la vitesse du vent augmente (ALONSO et al. 2007; MEMON et al. 2010). Cela implique qu'une ville côtière, sous l'influence régulière d'une brise de mer, subit des îlots de chaleur plus faibles qu'une ville continentale. Par ailleurs, les propriétés du site rural sont aussi un facteur de contrôle de l'amplitude de l'ICU (ARNFIELD 1990). Une variation de la température de l'air du site rural peut être provoquée par sa teneur en humidité du sol. Le jour, plus l'humidité du sol est importante, plus la température du site est faible (à cause de l'évaporation au niveau du sol) et plus l'ICU sera fort.

Enfin, l'ICU s'auto-régule en donnant naissance à une brise urbaine (ADO 1992; LU et al. 1997; HIDALGO et al. 2010). En effet, les températures plus élevées en ville qu'à la campagne créent une circulation d'air, un vent thermique, comme le décrit la figure 1.6. La brise urbaine amène par des flux convergents l'air frais de la campagne vers la ville. Un flux ascensionnel se crée en centre ville et l'air est évacué par un flux divergent vers la campagne.

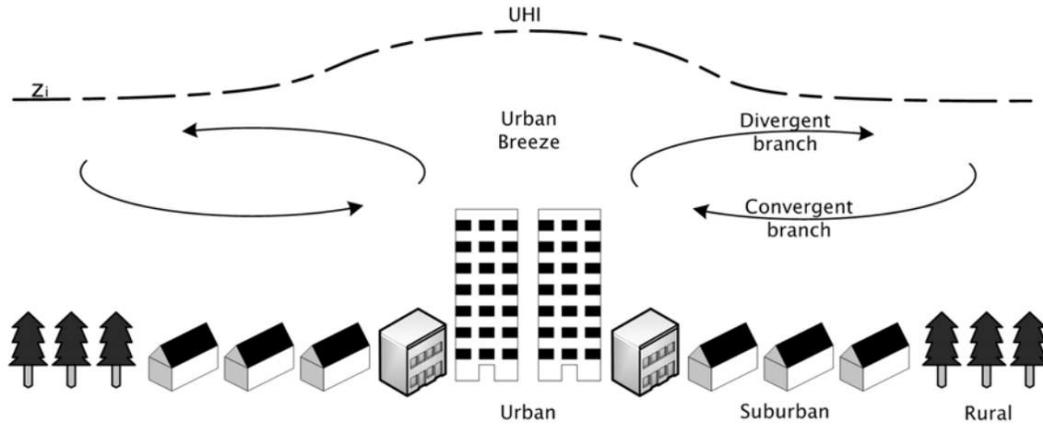


FIGURE 1.6 – Représentation schématique du phénomène de brise urbaine. Source : HIDALGO RODRIGUEZ (2008)

L'ICU est donc un phénomène complexe. Il est induit par la morphologie et l'occupation du sol caractéristiques des villes ainsi que par les flux anthropiques qui y sont produits. Son intensité dépend fortement des conditions météorologiques synoptiques.

1.1.3 Redéfinition de l'îlot de chaleur urbain

La complexité de l'ICU, autant par sa structure que par les causes qui lui donnent naissance, rend sa définition classique imprécise. En effet, les notions de sites 'ruraux' et 'urbains' peuvent correspondre à des paysages très variés. Dans la littérature, le terme urbain peut correspondre

entre autres à une zone composée de gratte-ciels à Singapour (CHOW et al. 2006), à un parc dans Pretoria en Afrique du Sud (LOUW et al. 1965) ou une zone industrielle à Ashod en Israël (SHARON et al. 1972). Il est donc impossible de définir de manière universelle un site urbain de référence par des propriétés architecturales ou climatologiques précises.

De plus, la forme urbaine devient aujourd’hui de plus en plus dispersée et décentralisée. Ainsi la démarcation spatiale entre l’urbain et le rural est devenue continue alors qu’elle était nette auparavant (GUGLER 1996). Ceci est particulièrement vrai aujourd’hui en Asie. Dans certaines régions asiatiques, la division ‘urbain-rural’, qu’elle soit économique, politique ou sociale, n’existe plus (LO et al. 1998).

Cette analyse, effectuée par STEWART et al. (2012), a mené à la définition de Locale Climate Zone (LCZ). Le but de STEWART et al. (2012), a été de prendre en compte un nombre significatif de paramètres urbains (bâtiments ou plantes présents dans la zone, hauteur de ces objets, densité spatiale et caractéristique perméable ou non du sol), de considérer de manière équilibrée les zones rurales et urbaines et d’adopter ainsi une nomenclature claire et non équivoque qui puisse être utilisée dans la majorité des agglomérations mondiales. À l’aide de simulations et de campagnes de mesures, ils ont aboutis à la définition de 17 LCZ (voir Figure 1.7) ayant une signature climatique déterminée. Ainsi, l’îlot de chaleur urbain n’est plus défini par des mesures entre site urbain et rural mais entre deux LCZ aux caractéristiques morphologiques et climatiques précises.

1.1.4 Conséquences de l’îlot de chaleur urbain

L’ICU a de nombreuses conséquences sur la qualité de vie des habitants d’une ville. Celui-ci augmente la pollution de l’air (GARTLAND 2010 ; LAI et al. 2009) car la création d’ozone au niveau du sol augmente avec la température. Les habitants d’une ville sont aussi très sensibles au confort thermique. Lors de la canicule à Paris en août 2003, une surmortalité très élevée a été constatée avec plus de 15000 décès en excès au cours de cet événement imputables aux extrêmes chaleurs (FOUILLET et al. 2006 ; LAALIDI et al. 2012). Durant cette période, la température en ville n’est pas redescendue en-dessous de 25 ° C pendant plusieurs jours ce qui a créé un stress thermique intense et fatal aux personnes âgées ou fragiles. De plus, l’ICU joue sur la consommation énergétique des villes car la demande de chauffage et de climatisation est liée à la température extérieure. Lors de la canicule de 2003, la sur-consommation énergétique avait été estimée à 10% de la consommation d’électricité totale. Néanmoins, en hiver aux moyennes latitudes, l’ICU peut être un avantage car il contribue à diminuer la consommation de chauffage (TAHA 1997).

1.1.5 Stratégies d’adaptation des villes contre l’îlot de chaleur urbain

Que ce soit d’un point de vue sanitaire ou de consommation énergétique, il est donc important de trouver des solutions pour lutter contre l’ICU. Différentes stratégies sont envisageables pour adapter un ville :

- **l’aménagement urbain** en augmentant par exemple la surface consacrée aux espaces verts. En effet, BOWLER et al. (2010) montrent qu’un parc peut engendrer un rafraîchissement de l’ordre de 1 ° C en ville. Cette valeur dépend de la taille du parc, de sa composition et des conditions climatiques environnantes ;

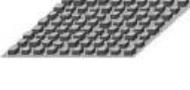
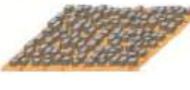
Built types	Definition	Land cover types	Definition
 <p>1. Compact high-rise</p>	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>A. Dense trees</p>	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>2. Compact midrise</p>	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>B. Scattered trees</p>	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>3. Compact low-rise</p>	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>C. Bush, scrub</p>	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
 <p>4. Open high-rise</p>	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>D. Low plants</p>	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
 <p>5. Open midrise</p>	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>E. Bare rock or paved</p>	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
 <p>6. Open low-rise</p>	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	 <p>F. Bare soil or sand</p>	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
 <p>7. Lightweight low-rise</p>	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	 <p>G. Water</p>	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
 <p>8. Large low-rise</p>	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	VARIABLE LAND COVER PROPERTIES	
 <p>9. Sparsely built</p>	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	Variable or ephemeral land cover properties that change significantly with synoptic weather patterns, agricultural practices, and/or seasonal cycles.	
 <p>10. Heavy industry</p>	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	<p>b. bare trees</p> <p>s. snow cover</p> <p>d. dry ground</p> <p>w. wet ground</p>	<p>Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.</p> <p>Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.</p> <p>Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.</p> <p>Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.</p>

FIGURE 1.7 – Présentation des 17 types de LCZ et des propriétés du sol pouvant leur être adjointes. Source : STEWART et al. (2012).

- **une modification du bâti**, par exemple la modification de l'isolation des bâtiments, des choix de matériaux plus réfléchissants, l'installation de toitures et façades végétalisées ou de panneaux solaires ;
- **le changement de comportements individuels**, en jouant sur la consommation en chauffage et climatisation ou en diminuant les activités aux heures les plus chaudes.

Dans le cadre du Grand Pari(s), le groupe Descartes (DESCARTES 2009) a imaginé un scénario d'aménagement de la région parisienne comprenant entre autres l'aménagement de lacs, l'extension de zones forestières et le remplacement des cultures forestières par des cultures maraîchères. Cette combinaison de leviers d'adaptation qui ne concernerait que des zones péri-urbaines a donné une réduction de l'ICU de l'ordre de 2 à 3 ° C pour un épisode de canicule type de l'été 2003 au cours duquel l'ICU est monté jusqu'à 8 ° C.

1.2 Mesures

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène spatial qui s'étend sur toute une ville. Il a une forte variabilité temporelle sur un cycle journalier et son intensité dépend des conditions météorologiques. Le choix des instruments de mesure fait par un expérimentateur dépendra des caractéristiques de l'ICU qu'il veut étudier.

1.2.1 Mesures de l'îlot de chaleur urbain de surface

Les mesures par satellites ou par instruments de mesure aéroportés permettent d'analyser l'îlot de chaleur de surface. Beaucoup d'études sont faites par ces moyens, comme par exemple HARTZ et al. (2006) à Phoenix ou en Asie pour les principales capitales de la région par TRAN et al. (2006) comme le montre la figure 1.8. Sur cette figure, la capitale et les agglomérations périphériques se dénotent par leur température plus chaude en rouge le jour et la nuit. À Pyongyang, on remarque que la ville est traversée par un fleuve qui a la même température que la ville la nuit, ce qui peut perturber l'analyse.

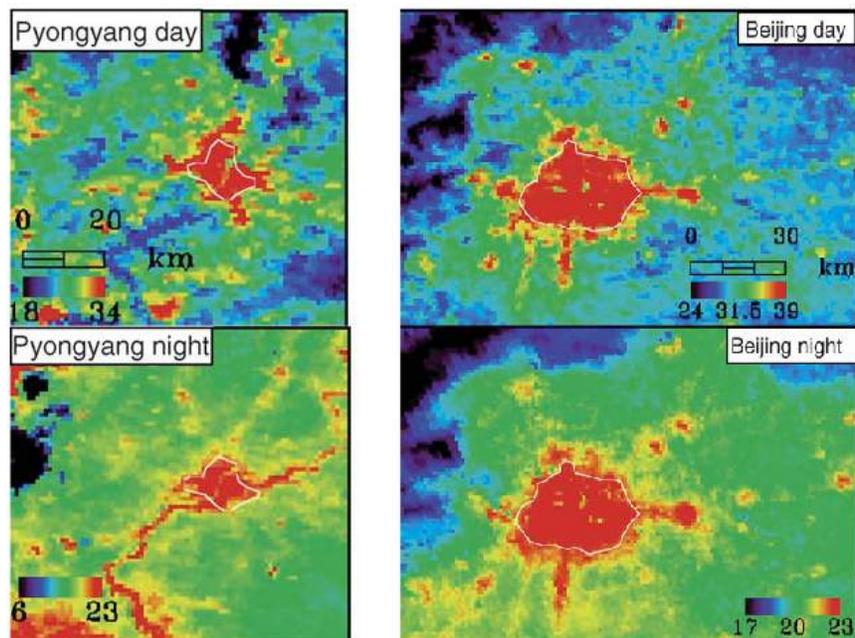


FIGURE 1.8 – Îlot de chaleur de surface à Pyongyang et Beijing. Source : TRAN et al. (2006).

Les instruments embarqués mesurent le rayonnement infra-rouge et de courte longueur d'onde émis par la surface urbaine. Cette méthode de mesure a l'avantage d'avoir une représentation spatiale complète de l'ICU. Cependant, pour remonter à la température de surface de la ville, la connaissance de l'émissivité de tous les matériaux urbains et des végétaux est nécessaire, ce qui n'est pas aisé, surtout à haute résolution. De plus, il est impossible de remonter à la température

des surfaces recouvertes. Il est aussi compliqué de remonter à la température de l'air à partir des mesures de température de surface, même si de nombreuses études essayent d'aller dans ce sens avec le plus de précision possible (ELIASSON 1992; GOLDEN et al. 2006; FUNG et al. 2009). Enfin, obtenir une forte résolution temporelle ou de longues périodes de mesures peut s'avérer très onéreux avec ces moyens de mesure.

1.2.2 Mesures de l'îlot de chaleur urbain dans la canopée

La mesure des paramètres météorologiques in situ en ville se fait en plaçant des capteurs dans la canopée urbaine ou dans la couche limite urbaine. Ces capteurs enregistrent des signaux caractéristiques de différentes échelles (LOWRY 1977). La première composante du signal correspond au climat général dans laquelle la ville est située (climat tropical ou continental par exemple). La deuxième composante correspond aux effets géographiques comme l'influence de la topographie ou du littoral. La troisième composante est la plus locale et est dite urbaine car elle correspond aux effets induits par la présence de bâti et de flux anthropiques.

Les mesures in situ de la couche limite urbaine ont plusieurs avantages. Elles peuvent couvrir une longue plage de temps (jusqu'à plusieurs années), et être effectuées à haute fréquence temporelle. Par ailleurs, elles peuvent couvrir une grande surface spatiale même si elles ne peuvent pas être aussi efficaces dans ce registre que les mesures par télédétection.

Deux types de mesures se distinguent en ville. Les campagnes de mesures fixes, effectuées à partir de stations météorologiques situées dans l'agglomération et les campagnes de mesures mobiles, faites sur des parcours faits à pied ou en utilisant un moyen de transport motorisé ou non.

1.2.2.1 Mesures fixes

Les mesures à partir de stations fixes sont largement répandues dans le domaine de la climatologie urbaine à l'échelle mondiale. De nombreuses mesures sont effectuées à partir de stations opérationnelles ou de déploiement de campagnes de mesures intensives, comme à Toulouse avec le projet CAPITOU (MASSON et al. 2008), à Hong Kong par MEMON et al. (2009) ou à Florence où un réseau de 35 stations est en place depuis 2004 (PETRALLI et al. 2014). La disponibilité sur le long terme de réseaux de mesures denses de stations fixes en milieu rural et urbain dans plusieurs agglomérations à travers le monde a permis de comprendre et analyser la formation de l'ICU et sa dynamique (KLYSIK et al. 1999; KIM et al. 2005; CHOW et al. 2006; MEMON et al. 2009; LEE et al. 2010).

Le nombre de stations étant fini lors d'une étude avec un réseau fixe, une information détaillée ne peut être fournie avec un tel réseau. Par ailleurs, il est important que les stations soient placées dans un environnement homogène au niveau du bâti, de l'occupation du sol et des matériaux et représentatif du milieu dans lequel elles se trouvent (OKE 2006). La zone source d'un capteur est défini comme la zone contenant les flux thermiques apportés au capteur par transport turbulent. STEWART et al. (2014) estiment que cette zone représente un rayon de 100 mètres pour une zone densément bâtie et 200 mètres en zone ouverte pour un capteur situé à une hauteur de 2 mètres. Il est par ailleurs recommandé de recueillir les données concernant la position locale (entourage direct de la station), relative à la ville (en centre ville ou en périphérie) et la localisation de l'agglomération ainsi que son climat.

1.2.2.2 Mesures mobiles

Les mesures mobiles se sont développées en même temps que les réseaux de mesures fixes. CHANDLER (1965) effectuait déjà dans Londres des circuits dans une voiture instrumentée. La voiture reste le moyen de transport le plus utilisé (UNGER et al. (2001) à Szeged en Hongrie, HART et al. (2009) à Portland, Oregon, LECONTE et al. (2015) à Nancy). Dans ce cas, les mesures thermiques doivent être éloignées des sources de chaleur du véhicule. Mais récemment des mesures à vélo ont aussi été mises place (BRANDSMA et al. 2012 ; HEUSINKVELD et al. 2014) ainsi que des trajets piétons effectués en déplaçant une station de mesure (SCHWARZ et al. 2012) ou en plaçant des capteurs de température et d’humidité sur un sac à dos (VANT-HULL et al. 2014).

L’avantage des mesures mobiles est qu’elles permettent d’obtenir une forte résolution spatiale (quelques dizaines de mètres) et d’avoir accès à la quasi-totalité des rues. Néanmoins, comme elles nécessitent des ressources humaines importantes, il est difficile de les effectuer sur du long terme à haute fréquence. De plus, elles s’effectuent le plus souvent au-dessus d’une surface imperméable (route ou trottoir). Ainsi, les mesures peuvent ne pas être représentatives du lieu dans lequel elles ont été effectuées. Par ailleurs, sur un parcours, les variables climatiques ne sont pas mesurées de manière synchrone. Elles nécessitent donc d’être ajustées à l’aide de station de référence enregistrant la variation synoptique des paramètres pour corriger le signal entre le début et la fin du trajet.

1.2.3 Mesures du confort thermique extérieur

Les mesures de l’îlot de chaleur urbain permettent de donner une meilleure compréhension de ce phénomène mais ne nous renseigne pas sur la manière dont les habitants d’une ville ressentent les différentes variables météorologiques en terme de confort. L’étude du confort thermique des habitants d’une ville s’est développée à partir des années 50 avec la création d’indices de confort thermique (YAGLOU et al. 1957 ; FANGER et al. 1970). Dans un premier temps, ces indices ont été définis de manière empirique pour mesurer par exemple l’impact de la température et de l’humidité en conditions humides (Humidex de MASTERTON et al. (1979)) ou de l’influence du vent et du rayonnement solaire en climat chaud (Heat stress index par BELDING et al. (1955)). Ces indices, déterminés de manière empirique, sont faciles à utiliser car ne nécessitant que peu de données d’entrée. En revanche, ces indices ne sont valables que dans la gamme de valeurs dans laquelle ils ont été établis et uniquement pour un environnement particulier. De manière à surmonter ces restrictions, des modèles plus complexes reposant sur un bilan d’énergie du corps humain à l’équilibre (PET (Physiological Equivalent Temperature) par HÖPPE (1999), l’UTCI (Universal Thermal Climate Index) par FIALA et al. (2012)) ou en régime instationnaire (l’ITCM (Individual Thermal Comfort Model) par BRUSE (2005)) ont été développés. L’avantage des indices de confort en régime instationnaire est qu’ils prennent en compte le parcours d’un individu et l’évolution temporelle de son ressenti comme celle des variables climatiques. Pour évaluer la qualité des indices de confort, des campagnes de mesures ont été effectuées par différentes équipes de recherches (KRÜGER et al. (2011) au Brésil, en Europe par NIKOLOPOULOU et al. (2006) (Athènes, Thessalonique, Cambridge, Fribourg, Milan, Sheffield et Kassel, PANTAVOU et al. (2013) à Athènes). La méthodologie de ces campagnes de mesures est toujours la même. Des stations de mesure sont placées en plusieurs endroits de la ville. Elles mesurent les variables caractéristiques du confort thermique humain à savoir la température, l’humidité, le vent et le rayonnement solaire. Des exemples de ce genre de station sont donnés dans la figure 1.9.



FIGURE 1.9 – Exemples de stations de mesures pour des études de confort thermique. Celle du haut a été utilisée par CHEN et al. (2012) à Hong Kong et celle du bas par BRÖDE et al. (2012) au Brésil.

Sur ces stations sont souvent aussi placés des globes gris, constitués d'une balle de ping-pong en acrylique peinte en gris au coeur de laquelle se trouve un thermomètre (voir Figure 1.10).



FIGURE 1.10 – Capteur dit 'globe gris' développé et calibré par THORSSON et al. (2007).

Ce type de capteur permet d'obtenir une image de la température ressentie d'une personne car il intègre aussi l'échauffement dû au rayonnement solaire. Ces stations sont décrites comme mobiles mais ne sont en fait que déplacées de point en point de mesures. Une seule tentative de station pédestre de mesures mobiles de confort a été proposée jusqu'à présent par POTVIN (2000)

(voir Figure 1.11). Mais ce procédé, calqué sur un modèle de casque audio n'a pas été repris jusqu'à présent.

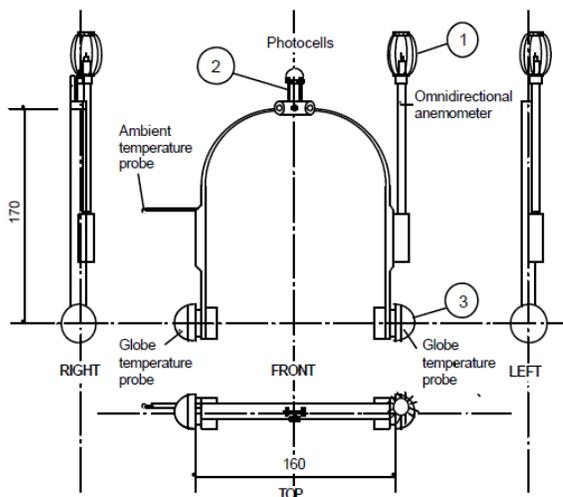


FIGURE 1.11 – Station de mesure mobile proposée par POTVIN (2000) reprenant la structure d'un casque audio.

En parallèle de ces mesures microclimatiques, des enquêtes sont réalisées auprès d'habitants ou d'usagers de la ville. Ces questionnaires renseignent les expérimentateurs sur le ressenti des personnes par rapport à chaque variable météorologique et leur confort climatique global, mais aussi sur leur habillement. Ainsi, la comparaison des résultats des enquêtes avec celles des mesures permet d'étudier la fiabilité des indices de confort et d'étudier quels sont les paramètres météorologiques les plus pertinents.

1.2.4 Positionnement de la thèse

Un des objectifs de cette thèse est de caractériser la variabilité des paramètres climatiques à l'échelle de la rue. Pour obtenir une densité forte de mesures en sein d'un quartier, nous avons déployé, dans le cadre du projet EUREQUA qui sera présenté dans le chapitre 3, un réseau de mesures fixes dans des quartiers de Paris, Marseille et Toulouse. Ces mesures fixes ont été accompagnées de parcours mobiles effectués à l'aide d'une voiture instrumentée et d'une station mobile piétonne. Cette station mobile, portée sur des épaules et unique en son genre à l'heure actuelle permet de mesurer à très fine échelle sur des parcours donnés la variabilité des paramètres météorologiques que sont la température, le vent et l'humidité au sein d'un quartier.

1.3 Modélisation numérique

La compréhension du phénomène de l'ICU et la nécessité de simuler des scénarios pour lutter contre l'ICU ont mené au développement de modèles numériques. Les modèles permettent d'évaluer les impacts d'aménagements urbains, expériences qui sont difficilement réalisables à l'échelle d'une ville. Les modèles atmosphériques ont en général besoin des données d'entrée suivantes : une description précise de la surface de la ville considérée, des forçages provenant de données ou de modèles atmosphériques. Des données pour l'initialisation de l'atmosphère et des paramètres comme l'humidité du sol ou la température des bâtiments sont aussi nécessaires.

1.3.1 Modèles à l'échelle du bâtiment

Les modèles micro-échelle décrivent la ville à l'échelle du mètre et à fine échelle temporelle (environ 1 seconde). Ils utilisent l'approche des modèles de dynamique des fluides dit CFD (Computational Fluid Dynamics). Ils permettent de décrire les écoulements d'air autour des bâtiments, la dispersion de polluant, le confort thermique des habitants et les effets de la végétation sur le climat (TAKAHASHI et al. 2004 ; GROMKE et al. 2008 ; ERELL et al. 2012 ; MOONEN et al. 2012 ; TOPARLAR et al. 2014). Un exemple de simulation CFD de température de surface et de vitesse de vent est illustré dans la figure 1.12.

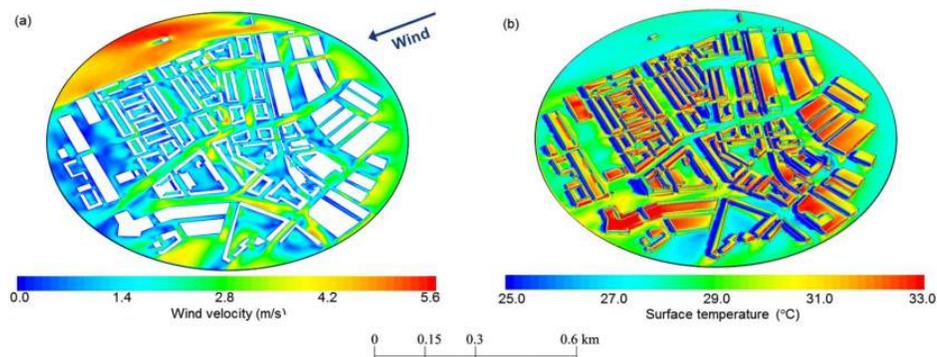


FIGURE 1.12 – Exemple de simulation CFD de vitesse de vent et de température de surface sur un quartier de Rotterdam idéalisé. Source : (TOPARLAR et al. 2014)

Ces modèles ont un grand coût de calcul. Ils ne sont donc pas adaptés pour décrire une ville complète et sa périphérie et ne peuvent tourner que sur quelques jours de simulation. Deux exemples de modèles CFD adaptés pour l'étude du microclimat au sein d'un quartier sont les modèles ENVI-met (BRUSE2004) et Solène-microclimat (Vinet 2000, Robitu 2005, Bouyer 2009, Malys 2012). Ces deux modèles sont des modèles tridimensionnels, basés sur les lois fondamentales de la dynamique des fluides et de la thermodynamique. Ils permettent tous les deux de s'intéresser au confort thermique extérieur des habitants et aux échanges avec la végétation. Le modèle Solène-microclimat contient aussi un modèle thermique de bâtiment prenant en compte les échanges entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments. Ainsi, il permet d'évaluer la consommation énergétiques de ces derniers.

1.3.2 Modèles à l'échelle de la ville

Les modèles de canopée urbaine, fonctionnant à l'échelle d'une ville et de sa périphérie, reposent sur un bilan d'énergie effectué en surface. Ils peuvent être forcés par des données météorologiques issues de campagne de mesures ou par un modèle météorologique méso-échelle. Un premier type de modélisation de la ville est d'assimiler la surface urbaine à une dalle ayant des propriétés radiatives et thermiques spécifiques (FORTUNIAK 2003; DUPONT et al. 2006). Cette approche a le mérite de la simplicité mais elle ne permet pas de mettre en avant la complexité de la ville et de modéliser le principe du piégeage radiatif. Pour cela, les modèles de ville font souvent l'hypothèse de la "rue canyon". Une rue canyon est considérée comme infiniment longue et sans intersections. Cette hypothèse qui peut paraître forte est en fait valide jusqu'à une taille de maille horizontale de l'ordre de quelques centaines de mètres. C'est ce qui limite la résolution de la modélisation urbaine par des modèles de canopée. Les modèles s'appuyant sur l'hypothèse de rue canyon ont une représentation tridimensionnelle de la ville et décompose celle-ci en trois types de surfaces : les murs, les toits et les routes. Parmi ces modèles représentant la canopée urbaine, il existe deux types de choix de discrétisation verticale. Soit le choix est fait de ne considérer la canopée urbaine que comme une seule couche d'air dont les variables thermodynamiques seraient représentatives de l'ensemble de la canopée. C'est le parti pris des modèles de GRIMMOND et al. (2002), CHEN et al. (2004), SHASHUA-BAR et al. (2002), OLESON et al. (2008) et PORSON et al. (2010). Soit une représentation multi-couche est choisie (MARTILLI et al. 2002; KONDO et al. 2005; KANDA et al. 2005; KRAYENHOFF et al. 2007; HAMDI et al. 2008) pour traiter les équations énergétiques à différentes hauteurs. Ce mode de représentation est plus précis mais plus coûteux en temps de calcul et plus difficile à coupler avec un modèle atmosphérique.

Le traitement de la végétation est souvent effectué sans interaction avec la ville dans les modèles de canopée urbaine. Souvent, une maille de modèle est composée de différentes 'tuiles' : une de végétation, une de ville et une d'eau par exemple. Chaque tuile est forcée par les mêmes données météorologiques. Le calcul des flux et variables météorologiques est fait indépendamment d'une tuile à l'autre. Les variables sont en suite agrégées au pro-rata de l'occupation de la maille de chaque tuile. Au cours des dernières années, un effort a été fait pour intégrer la végétation au sein même de la canopée urbaine, de manière à modéliser les interactions entre les bâtiments, les arbres, les parcs et les jardins (KRAYENHOFF et al. 2007; LEMONSU et al. 2012).

Enfin chaque modèle se distingue par des choix particuliers concernant la prise en compte ou non de l'orientation des rues, le nombre de réflexions maximales dans une rue canyon, la représentation des ombres portées ou non, la modélisation des flux anthropiques ou la manière dont est calculée la chaleur stockée dans les bâtiments et les routes (résidu du bilan énergétique ou prise en compte de la conduction thermique à travers les matériaux urbains).

Une grande intercomparaison de modèles de ville a été lancée par (GRIMMOND et al. 2010; GRIMMOND et al. 2011). Chaque modèle a été comparé aux données d'une campagne de mesure des flux présents dans le bilan énergétique de la surface urbaine (chaleur sensible et latente, flux radiatif net et flux de stockage de chaleur). Les résultats de cette étude montrent qu'aucun modèle ne se place en tête pour le calcul de tous les flux. Par ailleurs, il s'avère que les modèles simples (ayant une représentation simplifiée des phénomènes physiques) présentent des performances comparables à des modèles plus complexes.

1.3.3 Vers des modèles simplifiés

Les modèles de canopée urbaine ou CFD permettent de simuler des scénarios d'aménagement du territoire ou de consommation d'énergétique du bâtiment. Mais leur problème est qu'ils ne sont pas accessibles à des spécialistes de la ville hors laboratoires de sciences atmosphériques (comme les urbanistes ou les ingénieurs en bâtiments) car ils sont trop complexes ou lourds à utiliser. En effet, les modèles CFD ont un coût de calcul très grand et ne peuvent être employés que pour simuler une surface de l'ordre d' $1km^2$ au maximum et sur quelques jours. Cela est assez contraignant si une étude sur plusieurs saisons ou années doit être réalisée. Les modèles de canopée urbaine sont plus adaptés pour cela mais ils nécessitent d'être forcés par des données météorologiques issues soit de campagnes de mesures sur du long terme, ce qui n'est pas accessible pour un simple cabinet d'études en urbanisme, soit de modèle atmosphérique méso-échelle, ce qui n'est pas un outil simple d'accès pour ces cabinets non plus.

Les données qui sont accessibles au plus grand nombre sont les données de description d'une ville, au niveau du bâti, de la végétation ou des routes, et les données météorologiques issues le plus souvent de stations météorologiques opérationnelles situées dans les aéroports de chaque grande ville. Cependant, comme les aéroports sont situés dans la grande périphérie des villes, ces données ne prennent pas en compte l'ICU. Ce qui est fait dans des cabinets d'étude est donc d'ajouter de manière arbitraire quelques degrés aux mesures des stations situées dans des aéroports de manière à prendre en considération l'ICU.

Au cours des dernières années, différents modèles permettant de simuler l'ICU rapidement à partir de données issues d'aéroport ont été développés spécifiquement avec l'objectif d'être utilisables en dehors de la communauté de sciences atmosphériques. REN et al. (2012) ont choisi une approche statistique adaptée de la méthode dite de 'morphing' (BELCHER et al. 2005). Le principe du morphing est de coupler des données issues d'une station opérationnelle avec des données mensuelles issues de simulation de modèle méso-échelle. Pour l'appliquer à l'ICU, REN et al. (2012) ont donc couplé les données horaires issues d'une station opérationnelle rurale et les simulations mensuelles d'un modèle de canopée urbaine couplé avec un modèle atmosphérique. Cette méthode permet donc d'obtenir des données horaires tenant compte de l'ICU. Cependant, l'usage d'un modèle d'atmosphère méso-échelle rend cette méthode difficile à adopter par un cabinet d'étude en énergétique du bâtiment. BUENO et al. (2013) et ERELL et al. (2006) ont développé chacun une méthode, le générateur de climat urbain et le modèle CAT (pour Canyon Air Temperature) adaptée de l'approche des modèles de canopée urbaine. Le modèle CAT permet, à partir d'une température rurale, de calculer en un point donné de la ville la température au sein d'une rue canyon. Le modèle CAT ne donne en revanche pas une vision spatialisée de l'ICU. Le générateur de climat urbain calcule à partir de la température de campagne d'une ville une température uniforme au-dessus d'une ville à partir d'un bilan énergétique prenant en compte le flux de surface issu d'un modèle de canopée urbaine et l'advection du vent.

1.3.4 Positionnement de la thèse

Le générateur de climat urbain sera présenté plus en détail dans le chapitre 2. Le développement d'une nouvelle version a constitué la première partie de mon travail de thèse. Le générateur de climat urbain ne calcule qu'une température globale au-dessus de la ville sans prendre en compte l'advection en aval de cette dernière. J'ai développé une version spatialisée fonctionnant sur une grille régulière. J'y ai ajouté un modèle statistique de hauteur de couche limite et un traitement plus complet des flux de surface. Le but est d'avoir un modèle pouvant reproduire l'ICU rapidement pour n'importe quelle forme de ville ainsi que de bien gérer l'advection en aval de cette ville.

1.4 Modélisation statistique et utilisation de systèmes d'information géographique

1.4.1 Intérêt des systèmes d'information géographique

L'étude de l'ICU peut être vu comme un problème géographique impliquant de nombreuses caractéristiques urbaines et des mesures de données météorologiques localisées. Les systèmes d'information géographique (SIG) sont des outils puissants d'analyse géospatiale et de visualisation. Les SIG permettent d'assembler et d'organiser des données provenant de sources très variées comme l'utilisation du sol, la végétation, les bâtiments ou le réseau routier dans un format standardisé. L'utilisation des SIG pour l'étude de l'ICU permet de tracer des cartes d'ICU et de faire le lien avec les différentes causes de ce phénomène d'un point de vue spatial.

Pour cela, différentes approches peuvent être mises en œuvre pour lier l'intensité de l'ICU à des variables géographiques ou sociales. La première approche consiste à établir des cartes climatiques urbaines (Urban Climate Map, voir REN et al. (2011) pour une revue bibliographique complète). Le principe de ces cartes est d'agrèger plusieurs indicateurs de natures différentes sur une même carte. Ainsi, des zones appelées climatopes sont définies. Chaque climatope présente un microclimat particulier à une échelle de la centaine de mètres. Les cartes climatiques urbaines sont destinées principalement aux aménageurs et aux décideurs car leur visualisation permet de traiter simultanément différents aspects relatifs au confort urbain (voir l'exemple de Stuttgart en Allemagne Figure 1.13).

Une autre approche est de déterminer des lois statistiques donnant la valeur de l'ICU en un lieu donné en fonction des paramètres morphologiques ou d'occupation du sol du lieu. L'intérêt des lois statistiques pour l'étude de l'ICU est qu'elles ne nécessitent pas de modèle numérique et donc ne requièrent aucun outil spécifique à la recherche scientifique atmosphérique. En revanche, mettre au point ces lois nécessite souvent une instrumentation assez lourde, qui n'est pas à portée des cabinets d'études par exemple. De plus, une loi statistique appliquée à une ville n'est souvent pas applicable ailleurs.

1.4.2 Modélisation statistique à l'échelle de la ville

Parmi les premières lois statistiques permettant d'estimer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle d'une ville, OKE 1973 a choisi de lier l'amplitude de l'ICU ΔT_{u-r} pour des villes Nord-Américaines à la population P d'une ville concernée :

$$\Delta T_{u-r} = 2,96 \log(P) - 6,41 \quad (1.3)$$

Même si la population n'est pas une cause physique directe de l'amplitude de l'ICU, c'est un indicateur de la morphologie de la ville étudiée. PARK (1986) a mené une étude similaire en Corée du Sud, faisant le lien entre intensité de l'ICU la population mais aussi l'imperméabilité de la surface étudiée.

Ensuite, OKE (1981) a montré pour plusieurs villes d'Amérique du Nord et d'Europe qu'il existait un lien entre le rapport d'aspect H/W du centre de la ville étudiée, avec H la hauteur caractéristique des bâtiments et W la largeur des rues :

$$\Delta T_{u-r} = 7,54 + 3,97 \log\left(\frac{H}{W}\right) \quad (1.4)$$

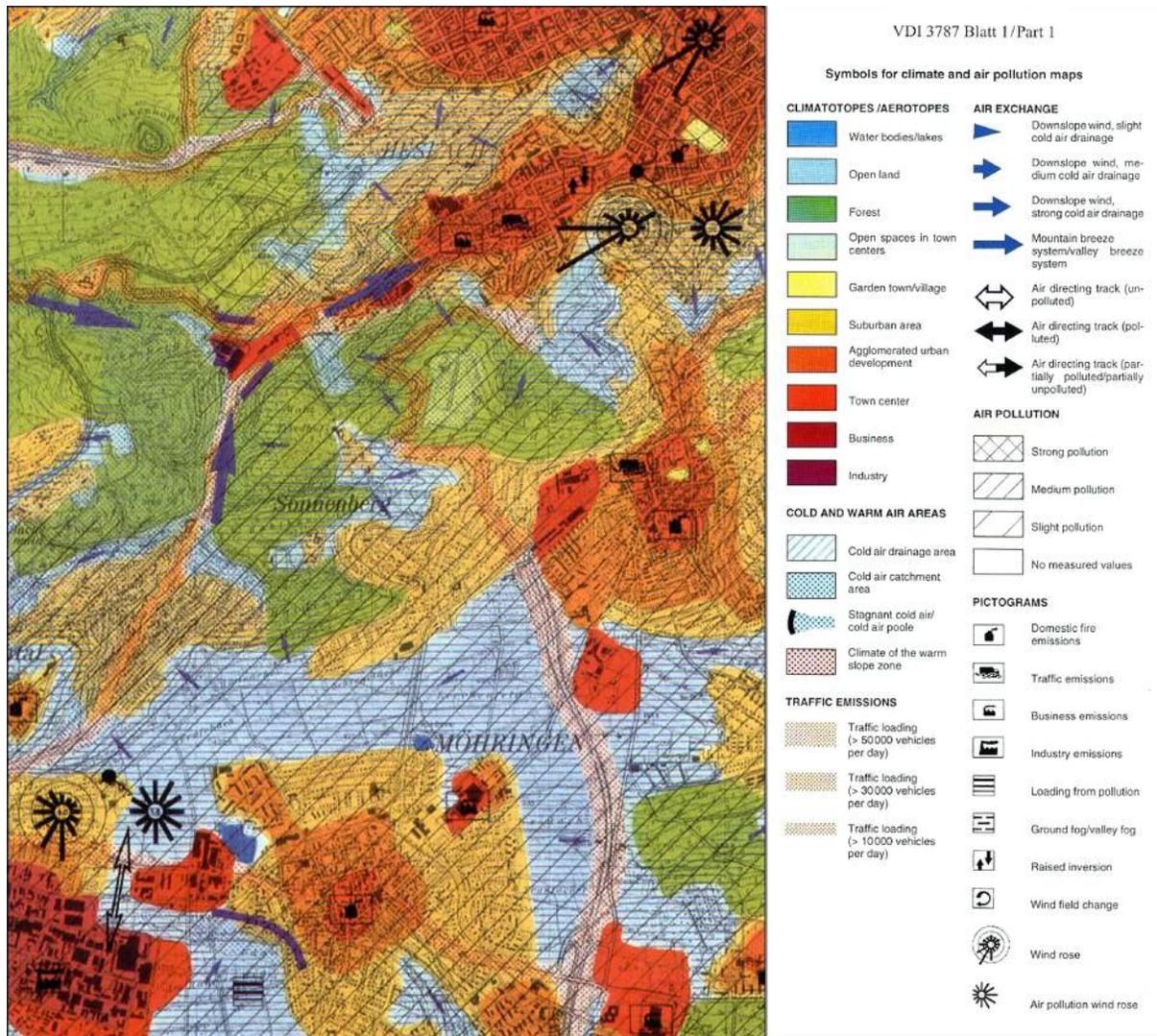


FIGURE 1.13 – Carte climatique urbaine de Stuttgart en Allemagne. Source : REN et al. (2011)

Cette étude a ensuite été menée par CHANG et al. (1999) à Singapour, donc pour une ville tropicale. Les auteurs ont montré que la loi précédente ne s’appliquait pas (voir Figure 1.14) et qu’il fallait la redéfinir pour le cas de Singapour, ce qui met en exergue la faiblesse des lois statistiques quant à leur universalité.

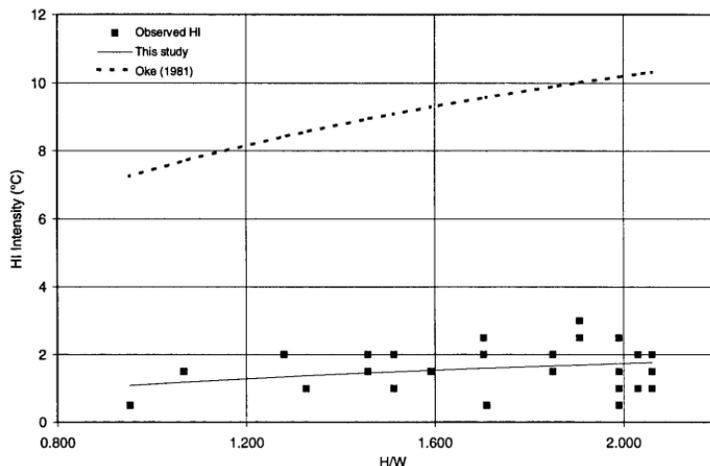


FIGURE 1.14 – Étude de la valeur de l’îlot de chaleur urbain à Singapour en fonction du rapport d’aspect. Les données mesurées sont en carrés noirs, le modèle issu de ces données en trait noir et en pointillés est représentée la loi issue de OKE 1981. Source : CHANG et al. (1999).

BOTTYÁN et al. (2003) a mené une étude sur la ville de Szeged en Hongrie à l’aide d’une régression multiple linéaire faisant intervenir beaucoup plus de paramètres d’entrées que les études précédentes. Ainsi, le maximum de l’ICU pour leur étude est lié au facteur de vue du ciel, à la fraction de bâti, à la fraction d’eau et à la hauteur moyenne des bâtiments, avec une plus grande influence du facteur de vue du ciel et de la hauteur moyenne des bâtiments.

1.4.3 Modélisation statistique à l’échelle du quartier

Au cours des quinze dernières années, l’utilisation des SIG et la disponibilité de données morphologiques à fine échelle a permis de développer des modèles statistiques intra-urbains, à l’échelle du quartier (SZYMANOWSKI et al. 2009 ; HEUSINKVELD et al. 2014 ; CHUN et al. 2014 ; PETRALLI et al. 2014 ; YAN et al. 2014 ; WONG 2014 ; HOVE et al. 2015). Les paramètres retenus pour ce genre d’étude sont soit agrégés sur une grille régulière ou dans des zones tampons (ou buffer) d’un rayon allant de l’ordre de la centaine de mètres centrées sur les stations de mesure. PETRALLI et al. (2014) expérimentent l’influence du rayon de la zone tampon sur les résultats (voir Figure 1.15).

Pour chaque étude, les paramètres suivant sont utilisés : la fraction du sol occupée par le bâti, la végétation, l’eau ainsi qu’un paramètre morphologique comme le facteur de vue du ciel. Mais chaque étude a aussi sa particularité sur les paramètres explicatifs choisis. Par exemple, PETRALLI et al. (2014) distingue la végétation basse et la végétation haute, WONG (2014) intègre des critères sociaux et SZYMANOWSKI et al. (2009) des admittances thermiques, des longueurs



FIGURE 1.15 – Cercles sur lesquels sont agrégés les paramètres de la zone tampon autour d’un capteur à Florence. Le rayon des cercles varie de 10 à 500 mètres. Source : PETRALLI et al. (2014).

de rugosité et des flux anthropiques. Le traitement statistique se fait à l’aide d’une régression multiple linéaire sur les paramètres explicatifs ou par une méthode d’analyse spatiale similaire (voir Figure 1.16 pour les résultats de différents types d’analyse par SZYMANOWSKI et al. (2009)).

1.4.4 Positionnement de la thèse

Alors que toutes les études précédemment citées s’intéressent à la variabilité de la température à l’échelle du quartier, un des objectifs de la thèse est d’étudier cette variabilité au sein-même d’un quartier. Je vais donc appliquer dans le chapitre 4 les méthodes vues précédemment mais sur des données issues de parcours faits avec une station mobile piétonne. Le but est d’étudier la variabilité de température à l’échelle de la rue et de croiser la variabilité de température avec la variabilité des paramètres morphologiques et d’occupation du sol. Les lois statistiques qui ressortiront de cette analyse seront intégrés dans la chaîne de modélisation globale dans le chapitre 5. En effet, le modèle TEB est limité par l’hypothèse de rue canyon et a donc une résolution minimale de l’ordre de quelques centaines de mètres. J’essayerai donc de développer par la suite des relations statistiques pour représenter la variabilité de la température à haute résolution, sans pour autant faire appel à un modèle de CFD.

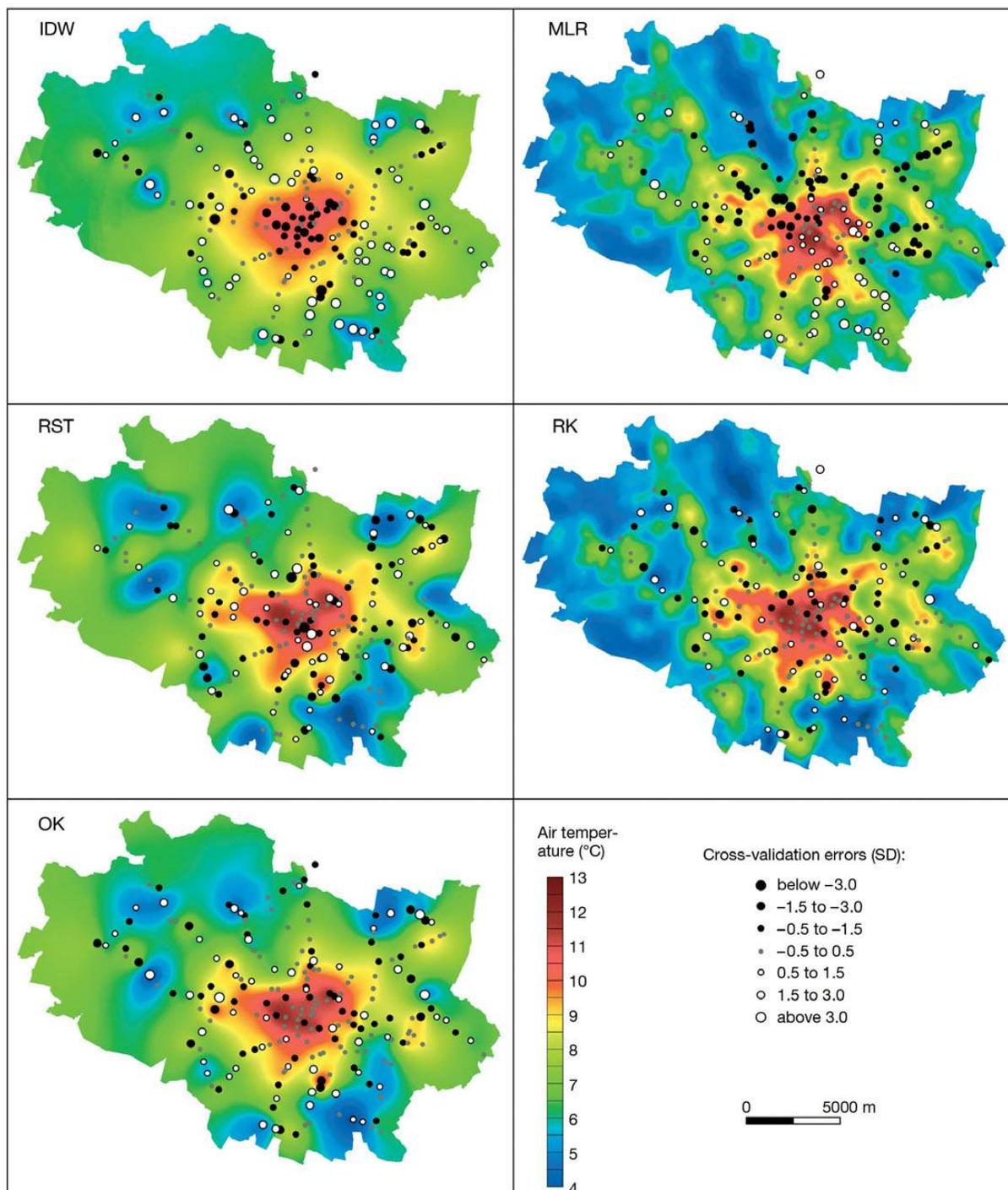


FIGURE 1.16 – Différents tests statistiques de spatialisations de l'îlot de chaleur urbain à Wrocław en Pologne. Source : SZYMANOWSKI et al. (2009).

Chapitre 2

Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle de la ville

2.1 Introduction

La première partie de la chaîne de modélisation consiste à simuler à l'échelle d'une ville et de sa région l'îlot de chaleur urbain à une résolution allant de l'échelle du quartier (environ 250 mètres) à 2 kilomètres. L'objectif est de pouvoir mettre à disposition un modèle d'îlot de chaleur urbain pour des domaines sortant de la recherche scientifique atmosphérique et qu'il puisse être utilisé pour des études de consommation énergétique du bâtiment ou des études de planification urbaine. Pour cela, deux contraintes doivent être respectées. La première est que la modélisation de la surface doit être faite par un modèle représentant les différents processus physiques en jeu en ville et qui puisse être modulable afin de pouvoir simuler plusieurs aménagements possibles dans une ville. Ainsi différents types de scénarios pourront être envisagés pour mener des études de sensibilité à l'échelle de la ville (rôle de la climatisation, des espaces verts ou d'une densification). Pour cela, le modèle Town Energy Balance (TEB), développé au CNRM par MASSON (2000), a été utilisé et sera présenté dans la section 2.2. La deuxième contrainte est que le modèle doit pouvoir tourner avec peu de données météorologiques d'entrée et être suffisamment rapide pour pouvoir conduire des études sur plusieurs saisons ou années. En effet, les données accessibles en dehors des laboratoires de recherches spécialisés dans la météorologie ne sont souvent que des données issues de stations météorologiques opérationnelles situées en périphérie des villes et donc non soumises à l'îlot de chaleur urbain. De plus, les cabinets d'études en énergétique du bâtiment ou en planification urbaine n'ont ni les compétences ni les temps de calculs nécessaires pour faire tourner un modèle atmosphérique complet sur une ville sur plusieurs mois ou années. Notre objectif est donc de mettre à disposition du plus grand nombre un outil de modélisation simple mais précis et rapide de calcul de l'îlot de chaleur urbain. C'est dans ce but qu'a été initialement développé le générateur de climat urbain par BUENO et al. (2013). L'idée de ce modèle est de calculer les forçages météorologiques au-dessus d'une ville à partir de données issues d'une station opérationnelle rurale. Pour cela, un bilan d'énergie est fait à partir des flux renvoyés par TEB sur une boîte ayant la hauteur de la couche limite et la surface équivalant à toute la surface urbaine. La version que j'ai développée et qui est présentée dans mon premier article scientifique reprend les idées de BUENO et al. (2013) mais chaque étape du processus a été repensée. J'ai ajouté un modèle statistique de la hauteur de couche limite nocturne. Le calcul des paramètres est fait sur une grille régulière répartie sur toute la zone d'étude et non plus que sur la zone urbanisée, ce qui permet une spatialisation de l'ICU. J'ai aussi retravaillé les flux qui jouent sur le bilan énergétique de chaque point de maille. Ainsi, avec la version que j'ai développée, l'ICU est modélisé en deux dimensions et reproduit correctement l'advection de l'ICU en aval de la ville étudiée, ce que ne permettait pas un modèle à une boîte. De plus, le modèle de hauteur de couche limite permet de mieux prendre en compte les effets saisonniers.

2.2 Présentation du modèle Town Energy Balance (TEB)

2.2.1 Le modèle de surface SURFEX

Le modèle SURFEX est une plateforme de SURFace EXternalisée développée au CNRM par MASSON et al. (2013). Elle a été développée pour la modélisation de surfaces en interaction avec l'atmosphère. Elle peut être utilisée dans un modèle météorologique ou de manière autonome en "offline". Elle permet de décrire la surface d'un domaine en la décomposant en quatre types d'occupation du sol : ville, nature, eau douce et océan. SURFEX calcule des flux de chaleurs, de quantité de mouvement et d'eau. Mais des flux de CO_2 , d'espèce chimiques, d'eau de mer, de neige ou d'aérosols continentaux peuvent aussi être modélisés. Ainsi, SURFEX peut être utilisé pour de très nombreuses applications, résumées dans la figure 2.1.

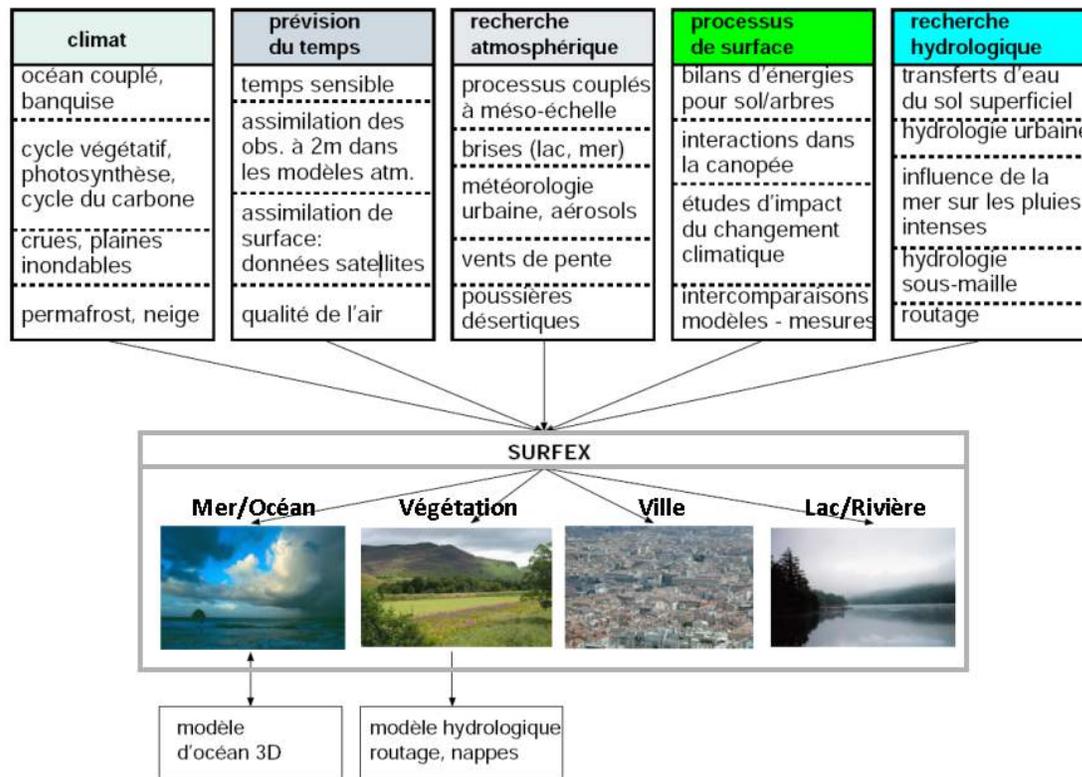


FIGURE 2.1 – Différentes applications de la plate-forme de surface SURFEX. Source : Valéry Masson.

SURFEX se décompose en différents modules permettant de modéliser la surface d'un domaine. Les deux principaux utilisés dans ce manuscrit sont :

- TEB (Town Energy Balance (MASSON 2000)) pour les surfaces urbaines.
- ISBA (Interaction between Soil Biosphère and Atmosphere (NOILHAN et al. 1989)) pour les surfaces naturelles et agricoles.

Pour représenter l'hétérogénéité de la surface dans un point de grille, une approche de type "mosaïque" est utilisée. Au sein d'une grille, la surface est divisée en entités homogènes. Chaque entité reçoit le même forçage atmosphérique provenant d'un modèle physique ou de données prescrites. Ensuite, chaque entité modélise ses flux propres. Enfin les flux sont agrégés au prorata de leurs fractions d'occupation du point de grille et renvoyés vers l'atmosphère ou diagnostiqués. Ce processus est représenté dans la figure 2.2.

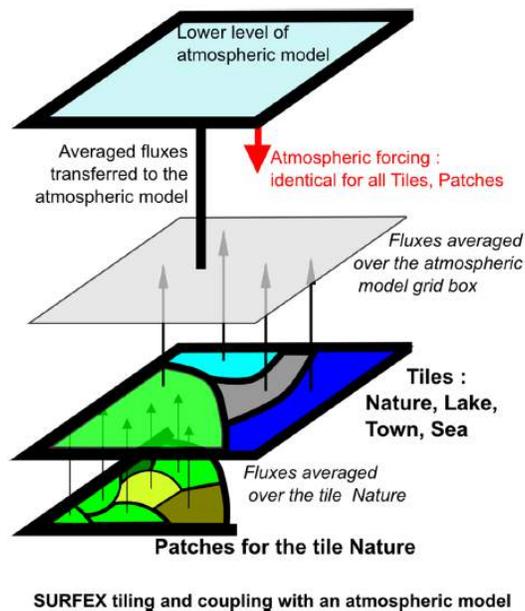


FIGURE 2.2 – Fonctionnement de type mosaïque du modèle SURFEX. Source : MASSON et al. 2013

2.2.2 Le schéma originel de TEB

TEB est un modèle développé pour ajouter une représentation de la ville dans les modèles météorologiques dans le but d'améliorer les prévisions dans les agglomérations. Jusqu'à son premier développement en 2000, la modélisation de ville était faite à partir d'une simple modification d'un modèle végétation/atmosphère, en remplaçant une surface naturelle par du sol nu ou du béton. Le modèle TEB repose sur une physique relativement complète. Il est le premier modèle proposant une approche du type "rue canyon" (MASSON 2000 et LEMONSU et al. 2004). Dans le modèle originel, sur un point de grille de surface urbanisée, les rues sont considérées comme infiniment longues, sans intersections et toutes les directions des rues sont équiprobables. Les caractéristiques de la structure urbaine de la maille sont considérées comme homogènes. Il en est ainsi de la hauteur des bâtiments, du rapport d'aspect de la rue, des propriétés radiatives et thermiques des bâtiments. Ces hypothèses peuvent paraître fortes mais sont adaptées pour des tailles de maille pouvant descendre jusqu'à 200 mètres.

Dans TEB, le bilan d'énergie repose sur une décomposition du canyon en trois parties : le toit, les murs et la route (voir Figure 2.3).

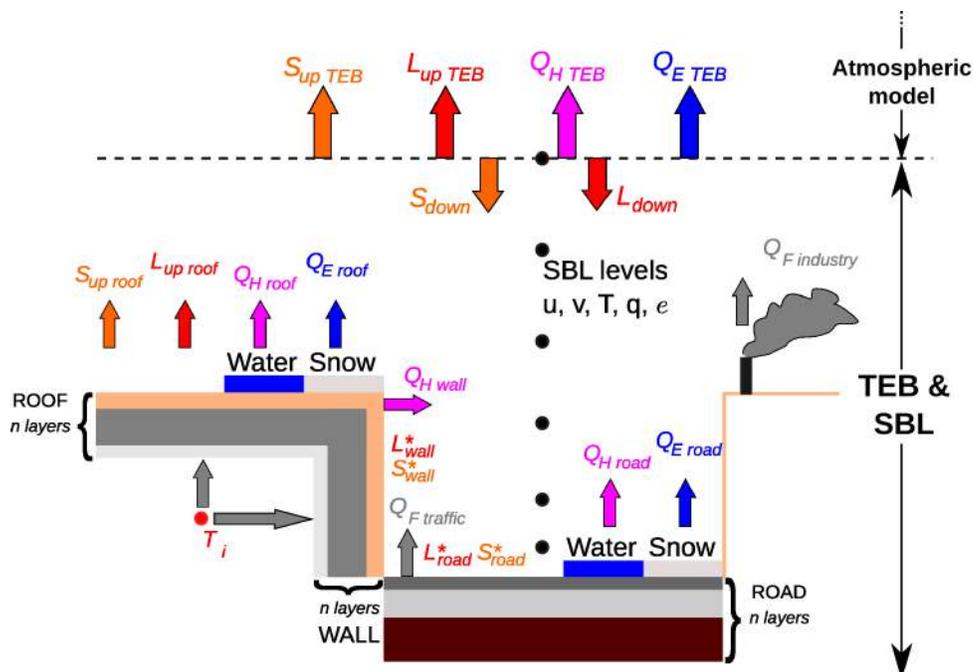


FIGURE 2.3 – Description de la physique de TEB et du modèle en rue canyon. Source : Météo France

Les différents processus pris en compte dans le modèle sont les suivants :

- Les radiations solaires et infra-rouges (S et L) sont piégées dans le canyon ou reflétées. Les effets d'ombrage sont pris en compte dans le modèle.
- Les flux anthropiques sont intégrés au bilan via des flux de chaleur sensible des murs, toits et routes (Q_H), ainsi que des flux émis par le trafic et l'industrie (Q_F).

- Les interactions entre la neige et l’eau sur les murs, les toits et la route créent des flux de chaleur latente (Q_E).
- La conduction et le stockage de chaleur dans les routes et les bâtiments sont aussi intégrés. Chaque surface est décrite par plusieurs couches, permettant par exemple de simuler le rôle de l’isolation dans les murs.
- Une force de traînée modélise l’interaction entre les bâtiments et l’air du canyon et ajoute de la turbulence. Les flux de chaleur et d’eau des bâtiments sont aussi transmis au canyon.

Dans les premières versions de TEB, la couche de surface urbaine n’était représentée que par un volume d’air unique. Pour améliorer les simulations des champs à l’intérieur d’une rue canyon, une nouvelle version appelée CANOPY a été développée en introduisant dans et au-dessus de la canopée une force de traînée pour prendre en compte les effets verticaux des bâtiments (MASSON et al. 2009 ; HAMDY et al. 2008). Cette paramétrisation, illustrée dans le figure 2.4, a été validée à l’aide d’une tour de mesure située dans une rue de Bâle lors de la campagne de mesure du projet BUBBLE (ROTACH et al. 2005). Il a été montré que CANOPY améliore nettement les profils de vitesse de vent, de friction, d’énergie cinétique turbulente, des flux de chaleur turbulents ainsi que de température potentielle par rapport au modèle à une seule couche.

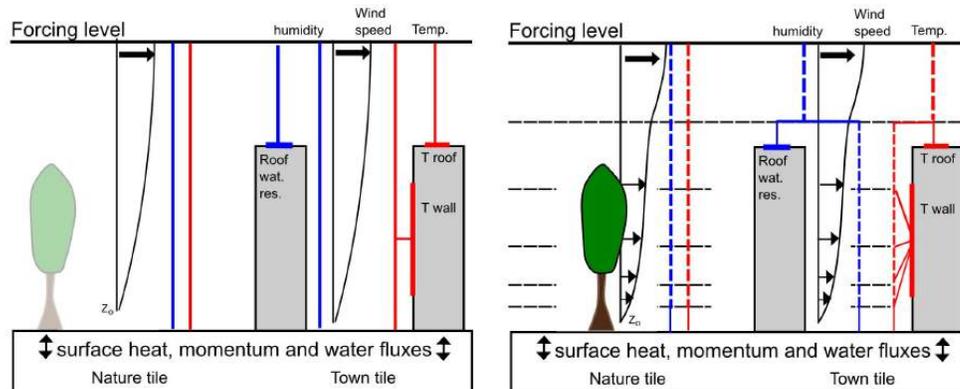


FIGURE 2.4 – Schéma décrivant le fonctionnement du module CANOPY en ville et à la campagne. Source : MASSON et al. 2013

TEB a fait l’objet de nombreuses validations expérimentales à travers le monde, pour différents types de villes et de climats. Ainsi, TEB a été validé aussi bien à Ouagadougou dans le Sahel africain (OFFERLE et al. 2005b) qu’à Montréal en hiver (LEMONSU et al. 2010). Il a aussi été validé dans des centres villes historiques à Marseille (LEMONSU et al. 2004), Toulouse (PIGEON et al. 2008b), Bâle (HAMDY et al. 2008), Lodz (OFFERLE et al. 2005a) et Mexico (MASSON et al. 2002), dans des sites industriels (MASSON et al. 2002) et en banlieue d’Oklahoma city (LEMONSU et al. 2009) et Nantes (LEMONSU et al. 2007). Il est intégré dans le modèle atmosphérique méso-échelle MesoNH ainsi que dans le modèle de prévision du temps Arome. Il est ainsi utilisé tous les jours pour les prévisions météorologiques de Météo France en France mais aussi aux Pays-Bas, en Europe du Nord et au Canada.

Dans les dernières années, TEB s’est enrichi de nouveaux modules de bâtiments, de végétation ou de confort thermique, permettant des études d’aménagement ou de consommation énergétique des bâtiments.

2.2.3 Amélioration de la modélisation des bâtiments

2.2.3.1 TEB-BEM

Un nouveau modèle d'énergétique du bâtiment, BEM (Building Energy Model), développé par BUENO et al. (2011) a été intégré dans TEB. TEB-BEM permet de représenter la consommation énergétique des bâtiments à l'échelle de la ville ainsi que de modéliser l'impact des modes de consommation (chauffage/climatisation) sur le microclimat urbain. Le modèle représente le bâtiment comme une zone thermique unique dans laquelle l'inertie thermique des composants du bâtiment est assimilée à une seule masse thermique.

TEB-BEM prend en compte différents types d'échanges de chaleur, représentés dans la figure 2.5 :

- Par apports solaires à travers des fenêtres, via un ratio surface de fenêtres/surface de mur constant pour chaque façade. Le modèle contient une paramétrisation permettant de simuler la fermeture de volets ou de stores.
- Par conduction et convection à travers les parois du bâtiments.
- Par ventilation et infiltration d'air.
- Par apport des différents équipements présents dans le bâtiment.
- Par effets de la climatisation ou du chauffage pour maintenir la température du bâtiment à une température de consigne.

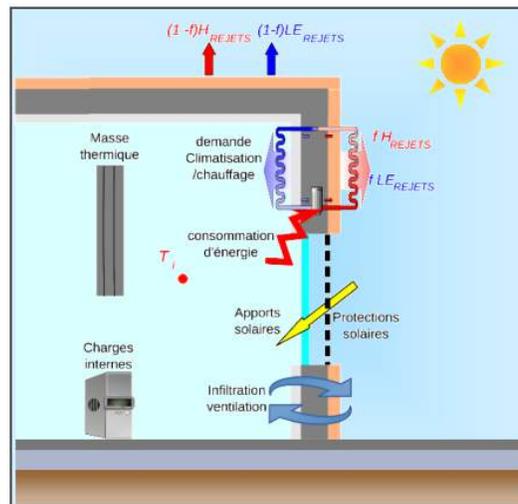


FIGURE 2.5 – Schéma décrivant les processus modélisés dans le schéma TEB-BEM. Source : BUENO et al. 2011

TEB-BEM inclut aussi une description avancée des systèmes de climatisation. Les performances des systèmes sont dépendants des conditions de température extérieur. La déshumidification de l'air passant à travers le système, les rejets de chaleur latente et sensible associés au système sont aussi modélisés.

TEB-BEM a été validé par rapport aux données expérimentales de la campagne de mesures CAPITOU (MASSON et al. 2008) et par comparaison à une simulation de TEB couplé avec le modèle de bâtiment de référence EnergyPlus (CRAWLEY et al. 2001) dans l'étude de BUENO

et al. (2011). Une étude de PIGEON et al. (2014), à laquelle j'ai participé en début de thèse, a permis de poursuivre le développement de TEB-BEM en comparant pour cinq types de bâtiments représentatifs de bâtiments parisiens les performances énergétiques de TEB-BEM et d'EnergyPlus dans deux types de climats contrastés. La méthodologie est décrite dans la figure 2.6. Cela a permis de valider les hypothèses de simplification des bâtiments dans TEB ainsi que d'affiner les paramétrisations de TEB-BEM.

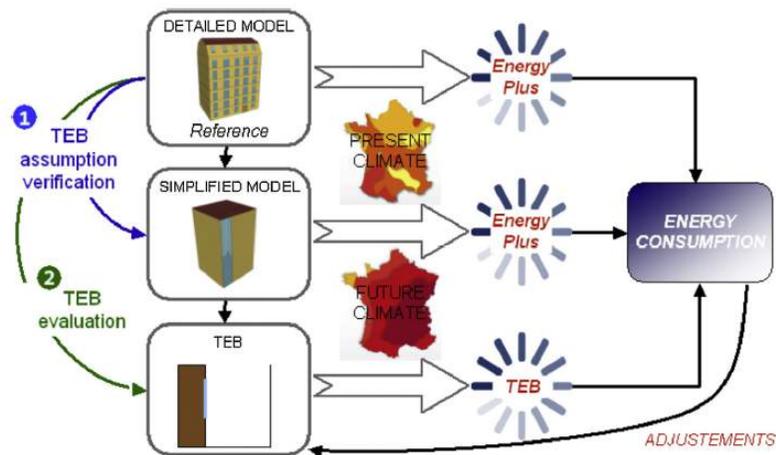


FIGURE 2.6 – Méthodologie développée pour l'évaluation de TEB-BEM. Source : PIGEON et al. 2014

2.2.3.2 TEB-GREENROOF

Un modèle de toiture végétalisée, TEB-GREENROOF, développé par DE MUNCK et al. 2013 a été ajouté au modèle de ville. Ce modèle combine le modèle de nature ISBA à TEB par une méthodologie schématisée dans la figure 2.7. La structure de la toiture végétalisée se décompose en trois couches : une couche de végétation, une couche de substrat et une couche de contrôle hydrologique. Cette structure repose sur le toit tel que décrit dans TEB-BEM. Le bilan hydrique du toit repose sur différents mécanismes : le ruissellement de surface, l'infiltration à travers le toit par capillarité, les précipitations et le drainage de l'eau. Pour le bilan d'énergie, le flux net de radiation s'équilibre avec les flux de chaleur sensible, de stockage et latent.

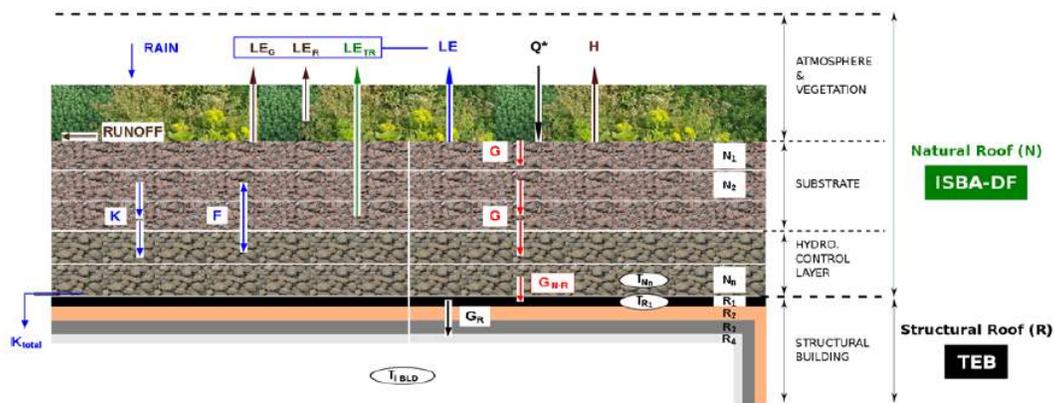


FIGURE 2.7 – Méthodologie développée pour le modèle de toiture végétalisée GREENROOF. Source : DE MUNCK et al. 2013

Le couplage de GREENROOF avec BEM permet de mettre en place des stratégies d'adaptation pour les villes en terme de confort thermique dans les bâtiments et de consommation d'énergie. Les toitures végétalisées permettent aussi de réduire l'îlot de chaleur urbain si le modèle est couplé à un modèle d'atmosphère ou d'étudier les effets sur la séquestration du CO_2 via la partie d'ISBA utilisée pour décrire le toit.

2.2.3.3 Panneaux photovoltaïques

Un autre moyen de recouvrir les toits dans une optique d'adaptation des villes est de les recouvrir de panneaux solaires. Un module a donc été ajouté dans TEB par MASSON et al. (2014b) pour modéliser des panneaux thermiques et photovoltaïques. Ces panneaux ont un impact sur le bâtiment situé en-dessous et sur le microclimat urbain car ils modifient les flux radiatifs et convectifs, comme indiqué dans la figure 2.8.

L'étude menée par MASSON et al. (2014b) sur Paris sur l'année 2003 à Paris montre une augmentation de la demande en chauffage le jour de 3% à cause de l'effet d'ombrage avec un déploiement réaliste de panneaux solaires. Mais l'étude montre aussi une baisse en été de la demande en air conditionné de 12%. Par ailleurs, le déploiement de panneaux solaires sur Paris réduirait l'îlot de chaleur urbain de 0,2 °C le jour et 0,3 °C la nuit. Cette étude montre donc que les panneaux solaires sont une source d'énergie renouvelable convenable et contribuent à réduire ou au moins à ne pas augmenter l'îlot de chaleur urbain.

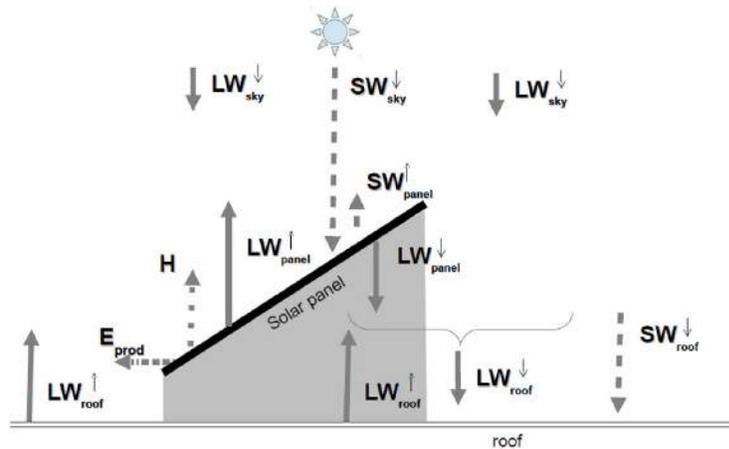


FIGURE 2.8 – Méthodologie développée pour le modèle de panneaux solaires inclu dans TEB. Source : MASSON et al. 2014b.

2.2.4 Amélioration de la végétation et de l'hydrologie dans TEB

2.2.4.1 TEB-Veg

La modélisation de la végétation pour TEB a été modifiée par LEMONSU et al. 2012 de manière à faire interagir végétation et surface urbanisée dans le modèle. En effet, dans SURFEX, TEB et ISBA calculent leur flux indépendamment et leurs résultats sont ensuite agrégés sur la maille. Avec le modèle TEB-Veg, la végétation est directement incluse dans la rue canyon (voir Figure 2.9).

TEB-Veg permet de modéliser les interactions entre le bâti et la végétation. Ainsi la végétation interagit directement avec l'air du canyon : les flux turbulents sur la végétation de ville sont calculés depuis TEB et non pas au-dessus de la canopée urbaine à partir des forçages. De plus des effets d'ombrage sur les jardins peuvent être modélisés. La température, le vent et l'humidité sont calculés dans le canyon en prenant en compte l'influence de la végétation urbaine. Enfin les canyons intégrant désormais des jardins, leur géométrie est plus réaliste.

TEB-Veg a été validé sur des données en Israël sur deux cours semi-fermées végétalisées avec deux stratégies différentes (SHASHUA-BAR et al. 2009). Ces expériences de validation ont montré que TEB-Veg donnait de meilleurs résultats sur la simulation de la température et de l'humidité dans le canyon végétalisé que la configuration TEB-ISBA simple.

Néanmoins, il faut noter que TEB-Veg ne prend pas en compte les effets d'ombrage de la végétation haute ainsi que l'influence de cette dernière sur les flux turbulents dans le canyon. La thèse d'Émilie Redon au CNRM, débutée en 2013, porte sur la modélisation des arbres dans TEB et devrait apporter une solution à ces problèmes.

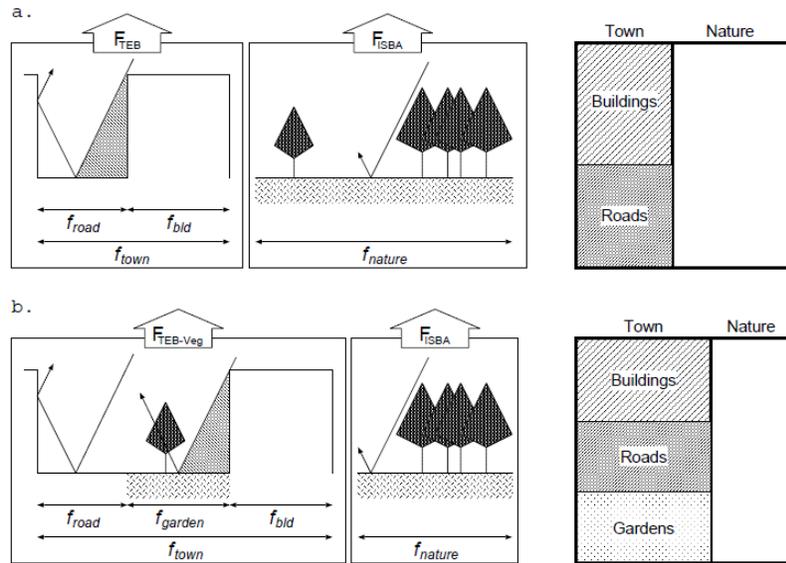


FIGURE 2.9 – Fonctionnement de TEB-Veg. Source : LEMONSU et al. 2012.

2.2.5 Prise en compte du confort thermique des habitants (TEB - UTCI)

Les épisodes de canicule comme celle de l'été 2003 en Europe pose la question du confort thermique dans les villes. En effet, lors de cette canicule, une surmortalité a été constatée au cœur de Paris (LAAIDI et al. 2012). De plus, les efforts d'aménagement urbain ont pour but d'améliorer le confort thermique des habitants en ville. C'est pourquoi plusieurs indicateurs thermiques ont été développés. L'UTCI (Universal Thermal Climate Index) a été choisi dans TEB par PIGEON (2011) car ses codes sont disponibles en ligne (www.utci.org). Le calcul de l'UTCI se fait à partir de variables météorologiques : le vent, la température de l'air, l'humidité et la température radiative (température dépendant des radiations solaires et infra-rouges). L'UTCI prend en compte l'habillement et le métabolisme des personnes. La référence est prise pour une personne marchant à 4km/h . La référence météorologique pour laquelle l'UTCI est égal à la température de l'air est défini par une humidité de 50% et sans vent. Le stress thermique est évalué à partir du modèle de thermorégulation multi-nodal de FIALA et al. (2012). Mais pour pouvoir être appliqué à des modèles numériques météorologiques sans faire tourner un modèle de thermorégulation complet, une formulation polynomiale a été développée par BRÖDE et al. (2012).

Ce code a été implémenté dans TEB pour trois environnements différents (voir Figure 2.10) :

- une personne exposée au soleil en extérieur ;
- une personne exposée à l'ombre en extérieur ;
- une personne à l'intérieur d'un bâtiment.

Une échelle de stress thermique est associée aux valeurs de l'UTCI (voir Figure 2.11), permettant de l'appliquer pour étudier des cas de fortes canicules ou des cas de grands froids.

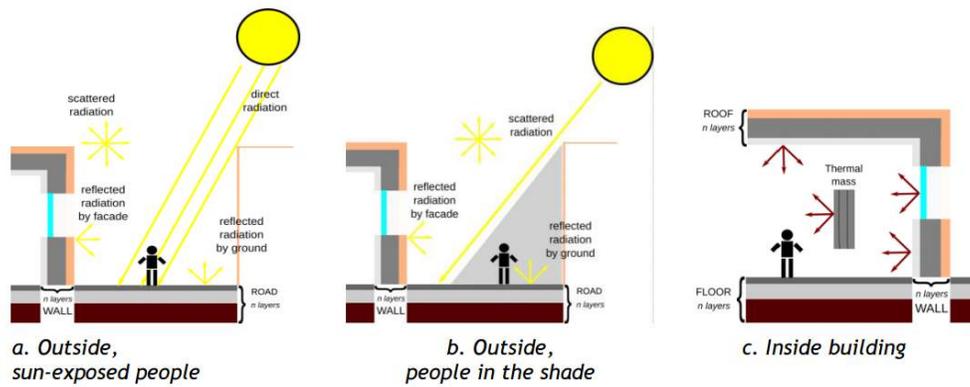


FIGURE 2.10 – Les trois environnements utilisés dans TEB pour calculer l’UTCI. Source : PIGEON 2011.

UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

FIGURE 2.11 – Échelle de stress thermique définie pour l’UTCI. Source : www.utci.org

2.3 Développement du générateur de climat urbain

Grâce à sa physique et ses améliorations, le modèle TEB est un outil de simulation performant pour des applications en énergétique des bâtiments ou en planification urbaine. Il permet en effet de modifier facilement sa surface pour étudier l'impact d'une extension urbaine ou l'implémentation de parcs dans une ville. Il permet aussi de simuler la consommation énergétique des bâtiments grâce à TEB-BEM et de quantifier l'impact d'installations de toitures végétalisées et de panneaux solaires sur cette consommation et sur l'îlot de chaleur urbain. TEB pourrait donc être un outil parfaitement adapté pour des consultants en dehors du monde de la recherche mais ses modes d'utilisation jusqu'à présent ne permettaient pas une utilisation simple hors des laboratoires. En effet, TEB peut être forcé soit par un modèle atmosphérique méso-échelle complet, soit par des données météorologiques sur le domaine étudié. Le problème de la première solution est qu'elle nécessite un temps de calcul lourd et des compétences avancées en physique de l'atmosphère. Une étude sur le long terme à l'aide d'un modèle de physique atmosphérique complet ne peut pas être faite en dehors d'un laboratoire. Le problème de la deuxième solution est qu'il est nécessaire de développer une longue campagne de mesure en ville pour avoir les données de forçage du modèle, ce qui n'est pas non plus adapté pour un cabinet d'étude. En dehors des laboratoires de météorologie, les données accessibles sont souvent les données issues des stations opérationnelles situées aux aéroports. Ces derniers étant placés le plus souvent en dehors des villes, leurs mesures ne tiennent pas en compte l'îlot de chaleur urbain. Ce dernier pouvant monter à plusieurs degrés la nuit, la différence de consommation énergétique d'un bâtiment peut être faussée si cet effet n'est pas pris en compte.

C'est pourquoi le générateur de climat urbain a été développé par BUENO et al. (2013). L'idée du générateur est de développer un outil permettant des simulations de longues durées d'îlot de chaleur urbain à partir d'un seul point de forçage en dehors des villes et d'un modèle de surface de ville complet. Ainsi ses seules entrées seraient des mesures de stations météorologiques opérationnelles ouvertes à tous et des données de description de surface souvent aussi disponibles pour des études urbaines.

Le générateur de climat urbain se décompose en trois étapes (voir Figure 2.12).

1. Les données de la station de mesure sont extrapolées à 30 mètres au-dessus du modèle de surface donc des bâtiments pour éviter les effets locaux de traînée dus à ces derniers.
2. Les paramètres microclimatiques (température, vent, humidité) sont calculés à 30 mètres au-dessus du niveau moyen des bâtiments par un bilan d'énergie sur la hauteur complète de couche limite. Ce bilan d'énergie fait intervenir l'advection du vent et les flux du modèle de surface.
3. Le modèle de surface est en interaction avec les champs météorologiques calculés à 30 mètres.

Il y a donc une interaction entre le modèle de surface et le calcul des forçages à 30 mètres car si les champs calculés à 30 mètres servent de forçage au modèle, le calcul de ces champs dépend des flux de surfaces donnés par le modèle.

La première version du générateur par BUENO et al. (2013) ne faisait faire le bilan d'énergie que sur une "boîte" dont la hauteur était celle de la couche limite et la surface celle de la ville complète. Le problème de cette méthode est qu'elle ne permet pas de générer le flux en aval de la ville de l'îlot de chaleur urbain et donc ne permet pas l'atténuation de celui-ci lorsqu'on s'éloigne de la ville. Il ne permet pas non plus de prendre en compte proprement des centres villes denses

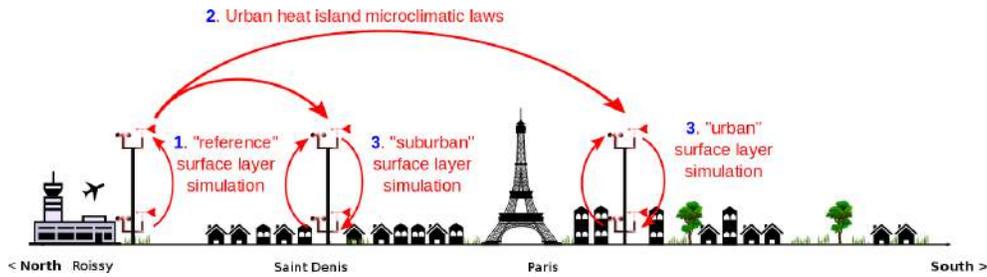


FIGURE 2.12 – Schéma de fonctionnement global du générateur de climat urbain en trois étapes.

en périphérie d'une mégapole. J'ai donc développé une nouvelle version du générateur appelée le "générateur de climat urbain spatialisé". Dans cette nouvelle version, le domaine est quadrillé de mailles régulières et un bilan d'énergie est fait pour chaque boîte, une boîte ayant la surface d'une maille et la hauteur de la couche limite à cet endroit. Un modèle d'advection lagrangienne à deux dimensions a été implémenté pour faire communiquer les mailles entre elles et un modèle de hauteur de couche limite a été développé. La hauteur d'une couche limite d'une boîte dépend la nuit de la fraction de ville de la maille considérée et des conditions météorologiques synoptiques (vent, couverture nuageuse et précipitations). Le jour, la hauteur de couche limite est fixée à 1000 mètres sur tout le domaine. Les différences entre les deux versions du générateur sont illustrées dans le figure 2.13.

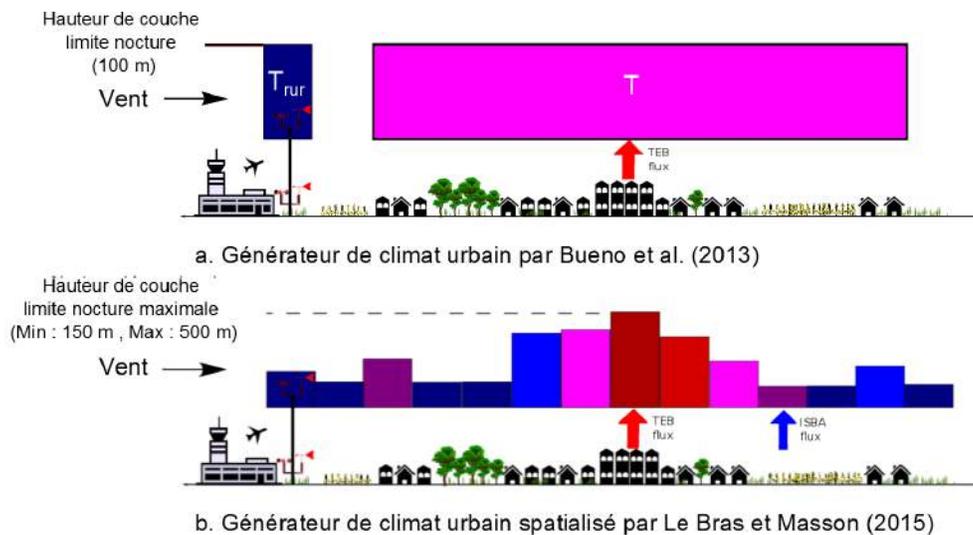


FIGURE 2.13 – a. Schéma de fonctionnement du générateur de climat urbain par BUENO et al. (2013). Le bilan d'énergie se fait sur une boîte de la taille de la ville. b. Schéma de fonctionnement du générateur de climat urbain spatialisé. Le bilan d'énergie se fait sur plusieurs boîtes de différentes hauteurs communiquant entre elles par une advection lagrangienne à deux dimensions.

Le générateur spatialisé a été validé par intercomparaison avec une simulation MesoNH d'un an sur la région parisienne issue du projet CO2-MegaParis (LAC et al. 2013) et sur différentes stations opérationnelles situées dans Paris et sa banlieue. L'étude complète, décrite dans l'article apparaissant dans la section suivante, montre l'importance de la localisation de la station opérationnelle ainsi que la capacité du modèle à reproduire les effets saisonniers.

2.4 Article

A fast and spatialized urban weather generator for long-term urban studies at the city-scale

Julien Le Bras and Valéry Masson *

Groupe d'Etudes de l'Atmosphère Météorologique, Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France, Toulouse, France

OPEN ACCESS

Edited by:

Gert-Jan Steeneveld,
Wageningen University, Netherlands

Reviewed by:

Shiguang Miao,
Institute of Urban Meteorology / China
Meteorological Administration, China
Evyatar Erell,
Ben-Gurion University of the Negev,
Israel

*Correspondence:

Valéry Masson,
Groupe d'Etudes de l'Atmosphère
Météorologique, Centre National de
Recherches Météorologiques,
Météo-France, 42, Avenue Gaspard
Coriolis, Toulouse 31057, France
valery.masson@meteo.fr

Specialty section:

This article was submitted to
Atmospheric Science,
a section of the journal
Frontiers in Earth Science

Received: 19 December 2014

Accepted: 26 May 2015

Published: 09 June 2015

Citation:

Le Bras J and Masson V (2015) A fast
and spatialized urban weather
generator for long-term urban studies
at the city-scale.
Front. Earth Sci. 3:27.
doi: 10.3389/feart.2015.00027

In order to make urban climate predictions at the city-scale and on long term experiment accessible to communities such as building engineers or urban planners, a method to calculate meteorological forcing for surface models is presented. This method is computed with weather data files from an operational measurement station outside of the city. The model, called the spatialized urban weather generator (SUWG) calculates the temperature field above the urban canopy level with an energy budget for each volume of the boundary layer considered and 2D lagrangian advection model in order to take wind advection into account. This method has multiple advantages. First, the files from operational weather stations can easily be found for a lot of cities, in most cases in airports. Second, the calculated urban heat island (UHI) can be influenced by urban planning scenarios. The method has been validated with an operational weather station network giving temperatures over the region of Paris and by comparing the SUWG simulations to a complete high resolution atmospheric simulation (MesoNH model) done over the Paris region at 2 km of resolution during years 2010 and 2011. The full atmospheric model and the SUWG give comparable results with comparison to the data over the period studied for each urban operational station.

Keywords: climate model, urban climate, urban heat island, air temperature, model intercomparison

1. Introduction

The urban heat island (UHI) corresponds to the temperature difference in a city and in its surrounding area. At night, for the biggest mega-cities, this temperature difference can reach 12°C (Oke, 1973). The city center is generally hotter at night because of the heat accumulated during the day released by the buildings and the roads, and the anthropogenic heat fluxes. The consequences of the UHI are multiple. It can affect the building energy consumption, the biodiversity in town or the thermal stress of the inhabitants. A UHI model could also interest a lot of communities as building engineers, urban planners or physiologists in order to know better the impact of UHI on a city and its inhabitants. For example, in case of severe heat waves like in Paris in 2003, Laaidi et al. (2012) show the link between high UHI and mortality during this period.

UHI simulations are provided by atmospheric scientists with different sorts of model. A first model class is the microscale CFD models (Takahashi et al., 2004; Gromke et al., 2008; Moonen et al., 2012; Toparlar et al., 2015). It describes the town at the space scale of 1 m and fine time scale of 1 s. These models solve the fluid dynamics equations and eddies, but they have a high computational cost, not available for all communities and are not suitable to describe a

whole city and its suburbs. A second class of UHI model uses a meso-scale atmospheric model, coupled to urban canopy models (UCM) (Masson, 2000; Grimmond and Oke, 2002; Martilli et al., 2002). Meso-scale atmospheric models solve the fluid dynamic equation at a 100 m to 1 km scale and need parameterizations for eddies or subgrid phenomenon. Moreover, they need information from an atmospheric model on a larger domain (e.g., numerical weather prediction model) for the prescription of their lateral boundaries. An urban canopy model relies on a simplified town description. For example, the streets are described like canyons. The characteristic size of those models is the street size (100 m). The use of a meso-scale model requires high computational facilities and weather forecast data, which both are not available to urban planners or building engineers for example. Finally, a third method to simulate UHI is a statistical method. Statistical methods rely on observations in city centers and in the countryside of a city. The statistical laws resulting from these observations could depend on the weather type, the size or the population of the city (Oke, 1973; Park, 1986; Chang and Goh, 1999; Fortuniak, 2003; Kershaw et al., 2010). The weakness of this method is that the law obtained must be recalibrated for a work on another city and that long term observations in the city studied are required.

Each method has its weakness for use outside of the meteorological community: a too high computational cost, the need of an full atmospheric model or of several long term measurements inside the city. However, in order to satisfy the need of UHI modeling of other communities, several efforts have been made recently to adapt one of the three points of view. The main idea is to combine the rapidity of statistical method with the adaptability and physics of the UCM coupled methods.

Ren et al. (2012) chose a statistical method, adapted from the morphing approach (Belcher et al., 2005) coupling hourly data outside of the city and the simulation of a meso-scale model coupled to an UCM, providing a monthly mean temperature. The morphing approach combines the rural temperature and the monthly average UCM temperature to give an hourly temperature including the urban heat island. This method requires weather forecast data in order to run the meso-scale model by downscaling of the reanalyses. Bueno et al. (2013) and Erell and Williamson (2006) developed two other methods, adapted from an UCM approach, the urban weather generator (UWG) and the canyon air temperature (CAT) model. Both methods just need one point of measurement outside of the city exposed to the same meso-scale climatic conditions, like an operational measure station at an airport for example. The weather data from Typical Meteorological Year 3 (Wilcox and Marion, 2008) or from the software Meteonorm (Remund, 2008) provide appropriate files for these models. The CAT model can be used in order to simulate the air canyon temperature in a specific site of a city. However, it can not be used to simulate UHI at the city-scale. The UWG is more suitable for simulations at the city-scale. The UWG calculates with an energy budget over the whole city the temperature at 30 m above the canopy layer (30 m above the mean height of the buildings in the city). A unique temperature is calculated over the city. The countryside temperature is unique too and is the forcing temperature. Then

a surface model is forced with this temperature field. The UWG does not take into account the variability at the city-scale of the UHI over the canopy layer and does not reproduce the UHI attenuation downstream the city.

In the present article, we develop a new method adapted from the urban weather generator of Bueno et al. (2013), called the spatialized urban weather generator (SUWG). Here, we spatialize in 2D horizontally the temperature above the urban canopy layer and take into account wind advection and height of the boundary layer depending on the weather type. The main objective is to develop a method which can simulate UHI with scarcely available meteorological observations, at the city scale, on long term experiment with the seasonal variability reproduced.

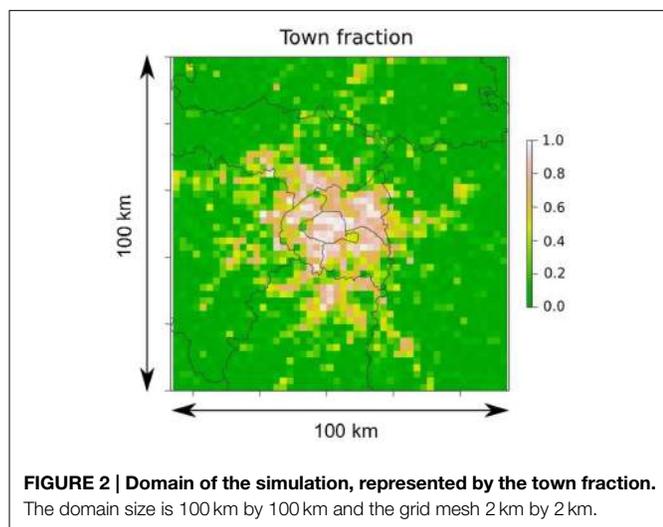
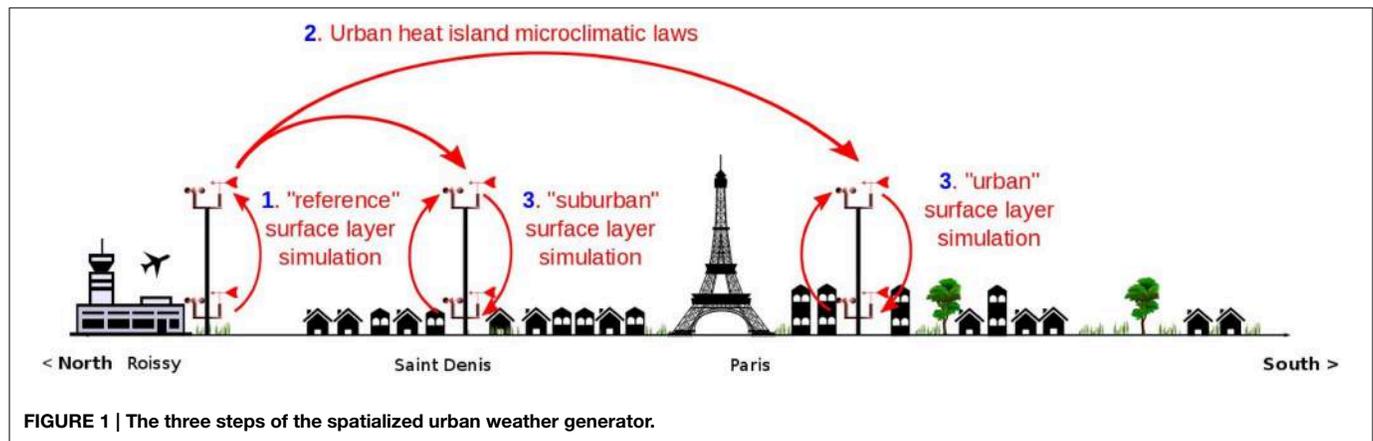
We first present our methodology and the physics of the SUWG. Then the SUWG is evaluated by comparison with a three dimensional full coupled atmospheric model MesoNH and with data from operational weather stations over the Paris area.

2. Materials and Methods

2.1. General Description

The SUWG works in three stages as the UWG (see **Figure 1**). The first stage is the extrapolation at 30 m of the data, often available at 2 or 10 m, above the mean height of the buildings, in order to avoid the zone of influence of the roughness of the building. At this height, above the urban canopy and the roughness sublayer, the atmosphere is more mixed and the temperature variability explained by the characteristics of a neighborhood more than the buildings aspect (Grimmond and Oke, 2002). The data extrapolated are the wind speed, the air temperature, the moisture and the long-wave radiation is recalculated at 30 m with the formula of Prata (1996) corrected for cloudy conditions. An iterative method has been chosen for the extrapolation and it has been validated by comparison to the data of a 30 m mast in Roissy. This stage is more detailed in Annex 1 in Supplementary Materials. The main original development of this study that is the second stage, a 2D-forcing is constructed above the domain with an energy budget of a simplified integral boundary layer model for each grid mesh. This part will be described in the next subsection. Note that the energy budget for each of these boundary layer models is influenced by step 3, the energy balance computations. The boundary layer model is also intrinsically linked to the surface model and the town description. Finally, the surface model SURFEX (Masson et al., 2013) is run in interaction with the 2D fields constructed in the previous stage. For this article, two modules of the SURFEX model are used: TEB (Masson, 2000) for the town description and ISBA (Noilhan and Planton, 1989) for the countryside. The TEB model is a physically-based town model using the street canyon description. A garden model (Lemonsu et al., 2012), building energy model BEM (Bueno et al., 2011), a greenroof model GREENROOOF (De Munck et al., 2013) and a solar panel model (Masson et al., 2014) are now implemented, making it suitable for urban planning or building energy consumption studies.

The domain chosen for this study is centered on the Paris city center, and has an extension of 100 km by 100 km. The grid mesh size is 2 km by 2 km (**Figure 2**). The domain size is chosen in



order to be able to simulate the UHI over the city of Paris and its suburbs.

2.2. Meteorological Parameters Calculation by the Spatialized Integral Boundary Layer Model

2.2.1. Methodology

Above each grid mesh of the domain, a simplified integral boundary layer model is implemented. The energetic evolution of each boundary layer is calculated (see Section 2.2.2). The heat flux below the boundary layer is taken into account, thus inducing the local effect of the urbanization on the temperature and hence on the UHI. The influence of the nearest boundary layers is taken into account with the advection by the wind, thus allowing to represent the effect of the urbanization at the whole city scale on the UHI.

The CAT model only allows for calculating the temperature at a specific point, with a parametrization depending of this point. It is not adapted for a spatial vision of the UHI at the city scale. The urban weather generator uses a boundary layer model too but at the city scale. The energy budget is obtained by aggregating the whole city heat flux on a box of the size of the whole city. The UWG does not take into account local effects of

the UHI. Moreover, the boundary layer height is always the same in the UWG. In this paper, a statistical model of the boundary layer height, depending of the built fraction, the wind speed, precipitation and cloud cover is implemented.

2.2.2. Heat Conservation in Boundary Layer Box Model

For each grid mesh, the boundary layer is considered as a box with a height z_i and a surface S corresponding to the grid mesh size. The energy budget is:

$$\frac{dE}{dt} = H.S \tag{1}$$

with E the energy of the box advected and H the sensible heat flux at the bottom of the box calculated by the surface model. The temporal energetic variation of the integral boundary layer depends on the volume and temperature variation of the box (see Figure 3). During the day, the boundary layer height (BLH) is supposed to be spatially uniform (Stull, 1988; Lemonsu and Masson, 2002) and constant for each box and the energy budget is:

$$T(t + dt) = T_{up}(t) + \frac{Hdt}{\rho c_p z_i} \tag{2}$$

with $T_{up}(t)$ the upstream temperature that is advected on the grid mesh at time $t + dt$ (see Section 2.2.3 for lagrangian advection details) and $T(t + dt)$ the resulting temperature. The energy budget is computed at constant pressure. The effects of air expansion or compression on the boundary layer height are neglected. If $T(t + dt)$ is less than the countryside temperature T_c , which is the temperature prescribed after the first step at 30 m at the operational weather station location, $T(t + dt)$ is set at the value of T_c . With this law, which will be applied during the night too, it is assumed that the countryside temperature of the 2D temperature field will follow the forcing air temperature.

During the night, the upstream box and the grid mesh box may not have the same height (see the boundary layer height prescription subsection). Two cases have to be considered and are described in Figure 4. If the upstream box is higher than the grid mesh box ($z_i < z_{iup}$), we consider that the air over the height of

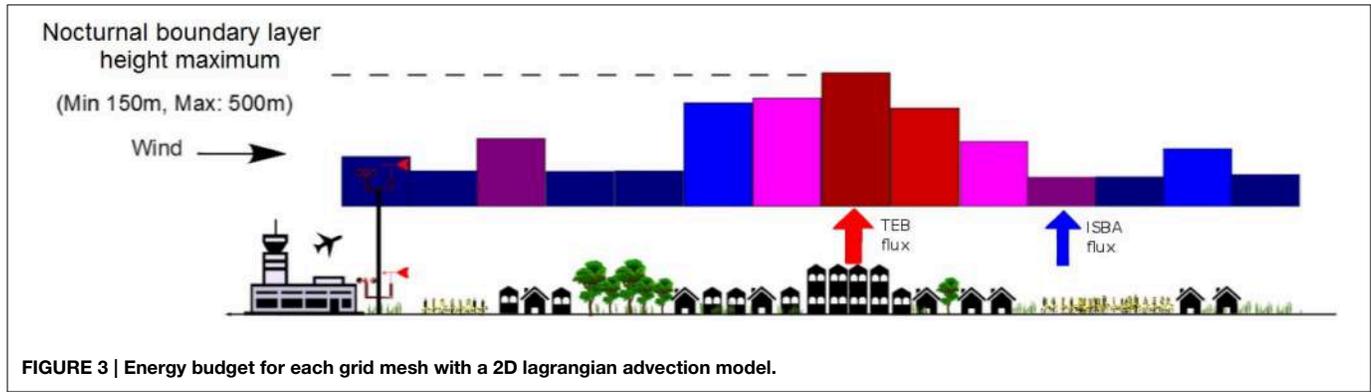


FIGURE 3 | Energy budget for each grid mesh with a 2D lagrangian advection model.

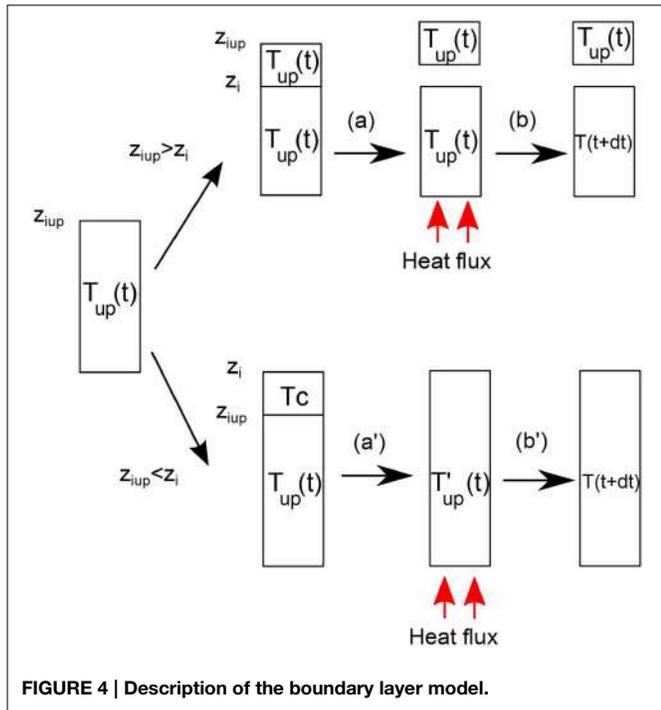


FIGURE 4 | Description of the boundary layer model.

the grid mesh box is escaping (a). The energy budget is made only on the volume of the grid mesh (b). If the grid mesh box is higher than the upstream box ($z_i > z_{iup}$), we have to consider a larger volume for the upstream box. The missing part of the upstream box should have the same volume as the grid mesh box. Its temperature is considered to be at the countryside temperature (a'). The upstream temperature is in this case modified as:

$$T'_{up}(t) = T_{up}(t)\left(\frac{z_{iup}}{z_i}\right) + T_c(t)\left(1 - \frac{z_{iup}}{z_i}\right) \quad (3)$$

Finally, the nighttime energy budget is:

$$T(t+dt) = T_{up}(t)\left(\frac{\min(z_{iup}, z_i)}{z_i}\right) + T_c(t)\left(1 - \frac{\min(z_{iup}, z_i)}{z_i}\right) + \frac{Hdt}{\rho c_p z_i} \quad (4)$$

with z_{iup} the upstream BLH.

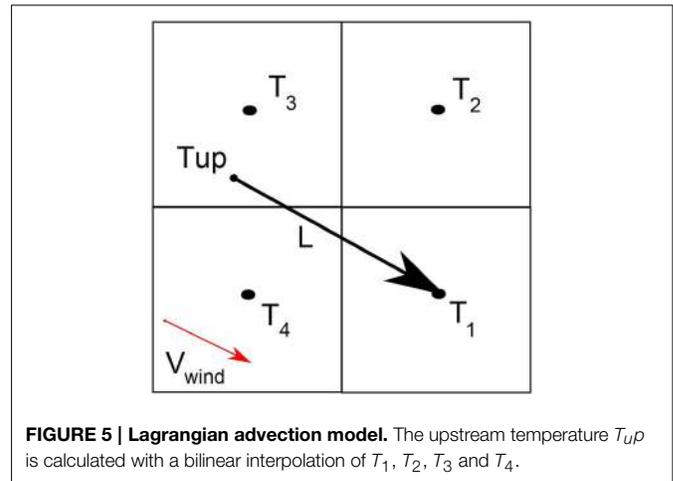


FIGURE 5 | Lagrangian advection model. The upstream temperature T_{up} is calculated with a bilinear interpolation of T_1, T_2, T_3 and T_4 .

After sunrise, the increase of the BLH has to be reproduced in order to attenuate the nighttime urban heat island. This is achieved by supposing a mixing with the air above the nocturnal boundary layer. That air originates from the countryside boundary layer, and then is supposed to be at the countryside temperature. The mixing is performed with a time constant $\tau = 1800$ s, representing the characteristic time for the boundary layer growth. The energy budget, initially drive by Equation (2) for daytime, becomes for the 2 h after sunrise :

$$T(t + dt) = \frac{dt}{\tau} T_c(t) + \left(1 - \frac{dt}{\tau}\right) T_{up}(t) + \frac{Hdt}{\rho c_p z_i} \quad (5)$$

2.2.3. 2D-Advection Scheme

Contrary to the UWG, a lagrangian advection model is used to account for the wind effect. An eulerian advection model has been tested too but the lagrangian model has a better numerical stability with the same results. The upstream temperature $T_{up}(t)$ is the temperature at the distance $L = V_{wind}.dt$ from the center of the grid mesh. It is calculated with a bilinear interpolation with the temperatures of the four nearest grid mesh to the position of the upstream box (see Figure 5). If a grid mesh is located outside of the domain, the countryside temperature T_c is applied.

The wind speed depends on the roughness length of the grid mesh (Grimmond and Oke, 1999). Considering a roughness length of 1 m in the city and 10 cm in the countryside, with a logarithmic law for the wind, a ratio $r_{wind} = \frac{V_{city}}{V_{country}} = 0.6$ is obtained. This ratio is applied with a linear law on town fraction f_{town} between 0.3 and 0.7:

$$\begin{cases} r_{wind} = 1 & \text{for } f_{town} < 0.3 \\ r_{wind} = 0.6 & \text{for } f_{town} > 0.7 \\ r_{wind} = -f_{town} + 1.3 & \text{else where} \end{cases} \quad (6)$$

2.2.4. Urban Breeze

The wind in the model is the superposition of the synoptic wind and of the urban breeze. The synoptic wind is the direction and the speed of the wind calculated at the operational measurement weather station at 30 m and is applied at each grid mesh. To the synoptic wind, an urban breeze is added with the formulation of Hidalgo et al. (2010). The urban breeze maximum is:

$$Vb_{max} = \frac{g}{T_c} \frac{z_i \max(H_{urb} - H_{coun}, 0)}{c_p \rho} \quad (7)$$

with H_{urb} the total town heat flux integrated all over the town fraction, H_{coun} , the recalculated country heat flux fitting the forcing air temperature evolution (see Section 2.2.6 for details), c_p the heat capacity at constant pressure, g the acceleration due to gravity, z_i the boundary layer height, calculated as z_{imax} in Section 2.2.5. In order to spatialize the urban breeze, we consider that the urban breeze direction is oriented to the city center. The urban breeze norm depends on the distance X_{dist} of the grid mesh center to the city center as defined in the following equations:

$$\begin{cases} Vb = Vb_{max} & \text{for } X_{dist} < 0.25Ra \\ Vb = 0 & \text{for } X_{dist} > 0.5Ra \\ Vb = Vb_{max} \frac{X_{dist}}{0.5Ra} - 2Vb_{max} & \text{else where} \end{cases} \quad (8)$$

with Ra the characteristic diameter of the city studied.

2.2.5. Boundary Layer Height Prescription

During the day, the boundary layer is the same on each grid mesh and is fixed at 1000 m. During the night, it appears with a 1 year MesoNH simulation (see Section 3.1 for details) that the BLH depends on the built fraction f_{bld} of the grid mesh. The nocturnal BLH maximum z_{imax} is obtained in the city center, where the built fraction is maximal and it appears that the BLH in the countryside is on average a quarter of the maximal BLH. Thus, the BLH is at night calculated as:

$$z_i = \frac{z_{imax}}{4} + \frac{3f_{bld}z_{imax}}{4\max(f_{bld})} \quad (9)$$

z_{imax} depends on the synoptic conditions (wind speed, cloud cover and precipitation), given by the forcing files. In the boundary layer model, z_{imax} depends on the wind speed. A

statistical relation for the dependence of the boundary layer height has been extracted from a 1 year MesoNH simulation over Paris. This simulation will be used as a reference simulation for the validation of the SUWG but here it is used in order to prescribe the boundary layer height for the energy budget. A linear regression on the nocturnal boundary layer height in the city center of Paris (where the built fraction is maximal) at 3:00 UTC (in order to be at night all year long) in function the wind speed V_s gives a coefficient of correlation of 0.67 and the following relationship:

$$z_{imax} = \max(46V_s + 53, 150) \quad (10)$$

Moreover, if the cloud fraction is higher than 75% or if it rains or snows during the night, z_{imax} is set to 500 m, from the beginning of the precipitation to the end of the night. This statistical relation is very important in the SUWG because it will contribute to reproduce the seasonal variations of the UHI. Note that only the boundary layer height is prescribed statistically in the SUWG. The major part of the SUWG (the energy budget and the wind advection) is physically-based, so that the SUWG could reproduce the results of a meteorological mesoscale model.

2.2.6. Surface Fluxes Simulation

In the SUWG, the surface heat flux H is the weighted sum of the urban heat flux prescribed by TEB model H_{teb} and the country heat flux H_c :

$$H = f H_{teb} + (1 - f)H_c \quad (11)$$

with f the town fraction of the grid mesh. The urban flux heats locally the boundary layer. Then this heating is spatially distributed at the city-scale with the 2D-advection model. Thus, the UHI is higher in the city center than in a little town in the suburbs which could have locally the same urbanization. This outlines and models the role of the upstream urbanization for the UHI (Zhang et al., 2011). The UHI therefore affects the surface fluxes and the surface fluxes affects the UHI.

The countryside flux H_c is:

$$H_c = H_{coun} + H_{isba} - \max(H_{isba}) \quad (12)$$

H_c represents the effect of the surface heating/cooling on the air temperature through surface energy fluxes, but not only. Indeed, the air temperature does not evolve solely due to the surface fluxes. Another main driver of the air temperature is the synoptic evolution of the air masses. Here, one has to ensure that our energy budget equation, in the countryside, follows the observed air temperature evolution. Consequently the heat flux entering

TABLE 1 | Statistical evaluation of the predicted urban heat island at 2 m in Paris in comparison with a reference simulation MesoNH.

	MesoNH	MEAN	ROI	TOU	PON	ORL	NoSUWG
UHI (K)	2.55	2.51	2.14	2.85	2.85	2.76	1.92
MBE (K)	0	-0.04	-0.41	0.30	0.30	0.21	-0.63
RMSE (K)	0	0.83	0.98	1.01	1.20	1.09	1.11

in the box energy budget (for the countryside), is primarily constructed from the observed countryside temperature, with the first right-hand-side term H_{coun} defined as:

$$H_{coun} = \frac{(T_c - T_{old})\rho c_p z_i}{dt} \tag{13}$$

with ρ the air density, c_p the heat capacity at constant pressure of the air, dt the time step, T_c the countryside temperature at the new time step, T_{old} the temperature at the previous time step and z_i the boundary layer height. This flux allows to take into account all effects affecting the countryside air temperature, including the synoptic conditions. Note that the synoptic conditions will also impact the urban air temperature, since the countryside air will be advected above the city.

However, we also wish to represent, when possible, the local effects due to different rural landscapes, such as forests or crops, that produce different heat fluxes and then potentially different temperature pattern within the simulation domain. In order to do this, we add in Equation (12) to H_{coun} a variability term computed by the ISBA surface model, that is able to simulate the variation of the surface heat fluxes.

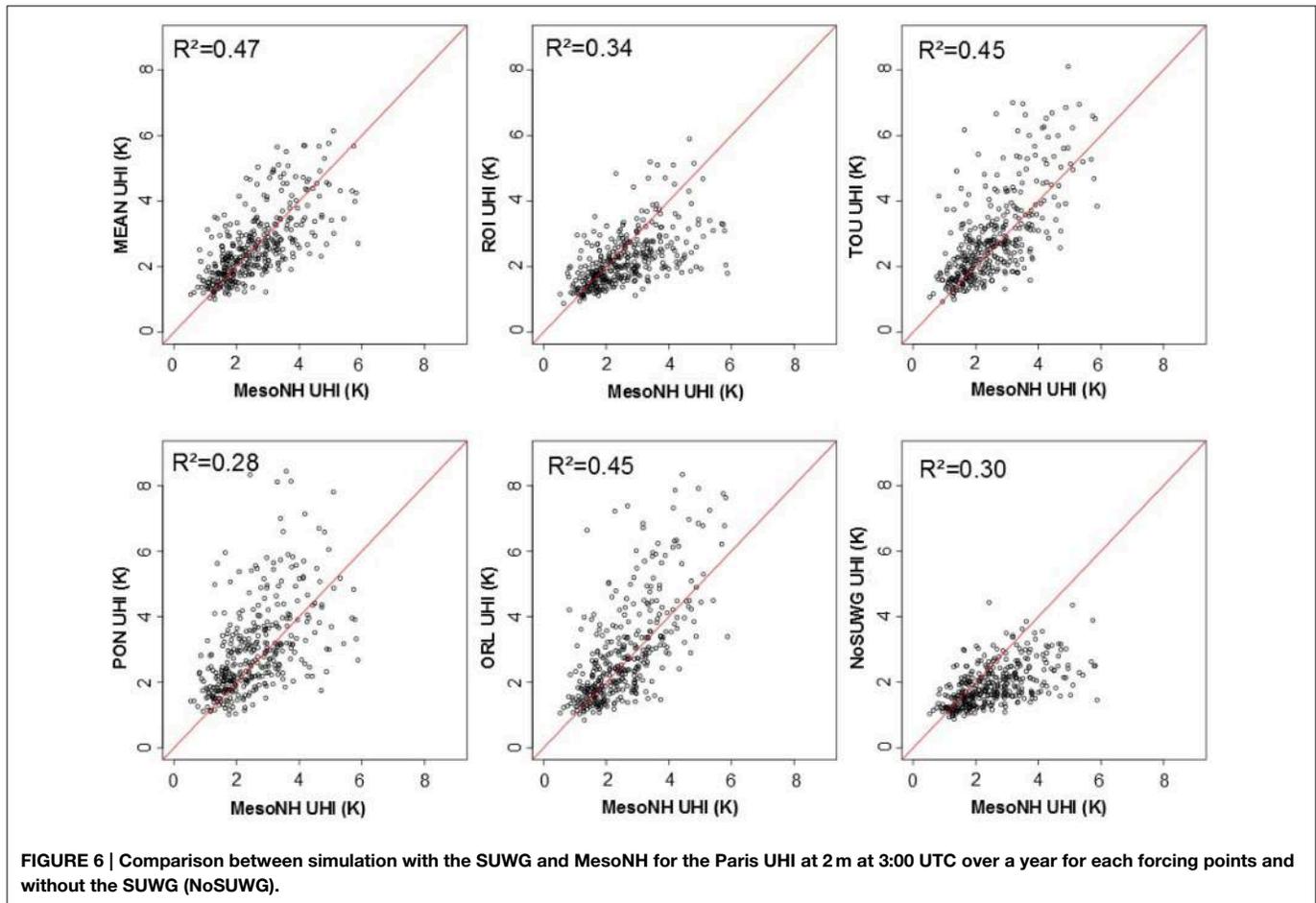
2.2.7. Limits of the Methodology

One of the limits of the methodology is the attribution of all the measured parameters of the operational weather station at each grid mesh. It could be a problem for precipitation for example. During a night or a day for precipitation can be very local. Considering a single operational station as representative of the synoptic conditions is a strong hypothesis. How to reduce the error caused by this hypothesis will be discussed in the next part.

3. Results

3.1. Model Intercomparison

The reference simulation is computed with a full atmospheric model, MesoNH used for the research project CO2-MegaParis (Lac et al., 2013). MesoNH integrates effects of radiation, turbulence, clouds and shallow convection on the atmosphere. The atmosphere is divided in 46 levels vertically (the resolution is minimum near the surface and 2 km at the top of the domain above 20 km). As for the SUWG, the surface model of MesoNH is SURFEX, including TEB and ISBA. The simulation is a 1 year simulation (from 1 August 2010 to 31 July 2011) with a 2 km horizontal resolution over Paris and its suburbs. The reference simulation and the simulation with the SUWG are



computed on the same grid. Each day of the reference simulation is simulated by a single run, initialized and coupled with Meteo France forecast model. In order to compare the UHI effect only, the synoptic effect is removed from the reference simulation with a method described in Annex 2 in Supplementary Materials.

To analyze the impact of the location of the rural boundary layer atmospheric data, that is used in step 1 to afterwards force the spatialized 2D integral boundary layer model (step 2), four operational weather stations have been chosen in four different places in Paris rural suburbs: Toussus-Le-Noble airport (TOU), in the south-west, Roissy airport (ROI) in the north-east, Orly airport (ORL) in the south-east and Pontoise airport (PON) in the north-east.

Six simulations are computed over a year: one with data from each stations (TOU, ROI, ORL, and PON), one is performed with data resulting from the average data of the four stations (MEAN) and the last one is a simulation with the average data but without taking account the SUWG (NoSUWG): the two dimensional forcing of the SURFEX model is made with homogeneous forcing files with an unique countryside temperature imposed over the whole domain.

In order to study the UHI at 2 m on the domain, the temperature at 2 m, computed by the surface model SURFEX, step 3 of the SUWG, with the forcing data resulting from step 2 of the SUWG, is considered. The UHI at 2 m in Paris is defined as the average of the temperature of the grid mesh points inside Paris from which the countryside temperature is subtracted. The countryside temperature is defined as the average of the grid mesh points with a 0% town fraction located at 30 km and more of the center of Paris. For the validation, the UHI at 2 m at 3:00 UTC in Paris is compared in each simulation with the reference simulation.

3.1.1. Results Over 1 Year

The scores of the simulations over a year are presented in **Table 1** and **Figure 6**. Without the SUWG (simulation NoSUWG), the UHI computed is too weak for the highest values of UHI. With the UWG, the UHI is too high for every seasons, because of the fixed values of the boundary layer height. The mean bias error is negative and the largest in magnitude of all simulations. This shows the necessity to simulate the city-scale component of the UHI, as with the SUWG. Three simulations (TOU, PON, and ORL) have a too high mean bias error (MBE), i.e., more

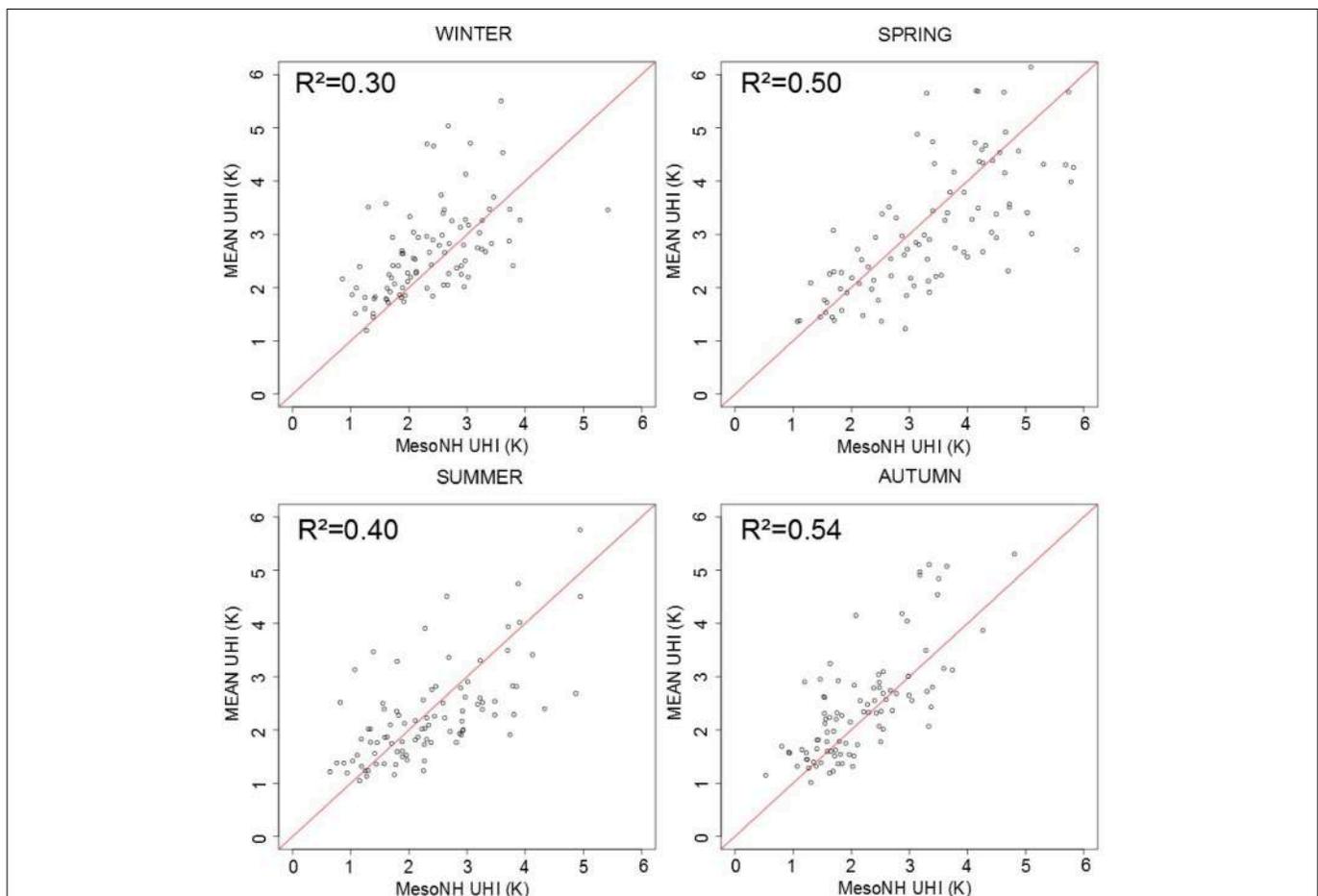


FIGURE 7 | Comparison by season of the UHI at 2 m at 3:00 a.m. UTC in Paris computed by the SUWG forced with an average of data files from four different airports around Paris and a full atmospheric model MesoNH simulation.

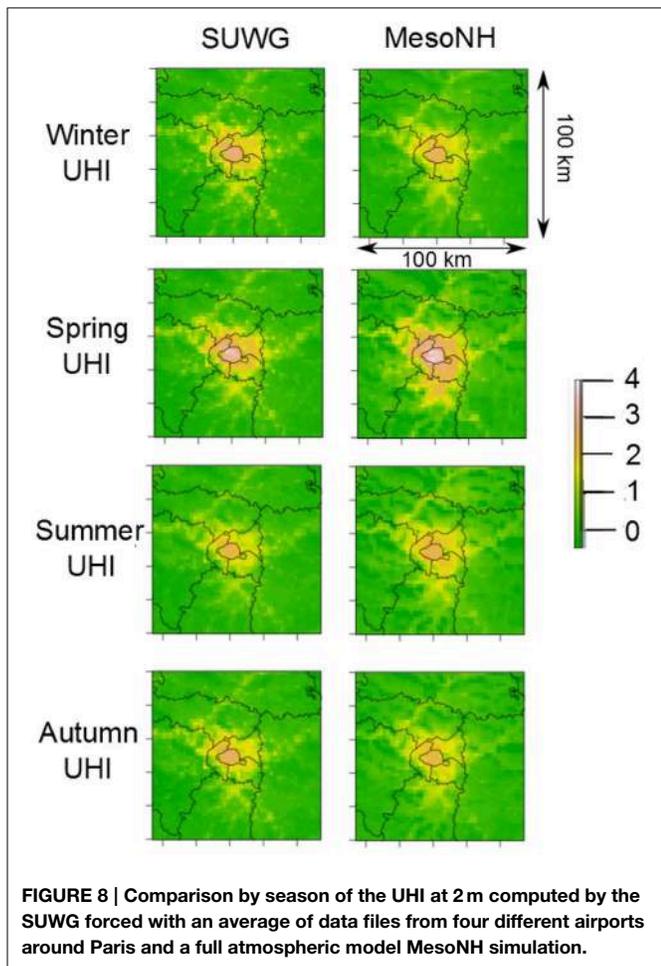


FIGURE 8 | Comparison by season of the UHI at 2m computed by the SUWG forced with an average of data files from four different airports around Paris and a full atmospheric model MesoNH simulation.

TABLE 2 | Statistical evaluation of the predicted urban heat island at 2m in Paris with the SUWG in comparison with a reference simulation MesoNH with the MEAN simulation for each season.

	Winter	Spring	Summer	Autumn
UHI (K)	2.66	3.08	2.25	2.43
MBE (K)	0.19	-0.39	-0.13	0.19
RMSE (K)	0.79	0.99	0.81	0.68

than 0.2 K. This is due to some days where the simulation gives UHI larger than 6 K when the reference is smaller than 5 K. These days, the synoptic conditions are not homogeneous. The weather at these stations is not representative of the weather at the domain scale. The ROI simulation gives too small values. The location of the forcing point is then important. Consequently we run a simulation with the average of all the forcing files (MEAN simulation). The best scores are obtained by this simulation with a mean bias error (MBE) of -0.04 K and a root mean square error (RMSE) of 0.83 K. The extreme values of the other simulations are corrected: these values were due to meteorological data which were not representative of the synoptic conditions. In the following sections of the article, one will consider only the MEAN simulation.

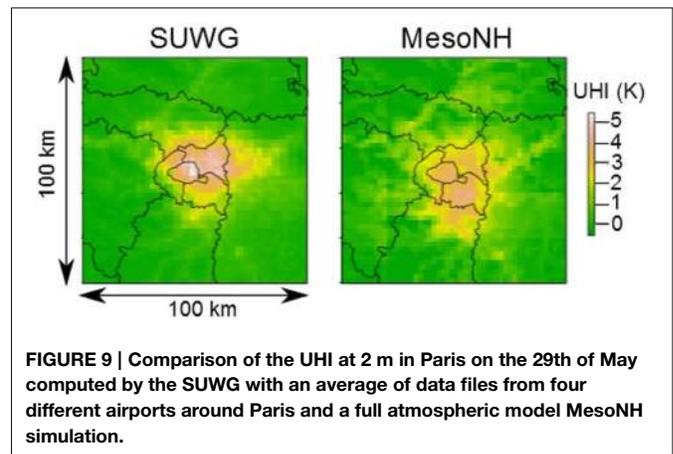


FIGURE 9 | Comparison of the UHI at 2m in Paris on the 29th of May computed by the SUWG with an average of data files from four different airports around Paris and a full atmospheric model MesoNH simulation.

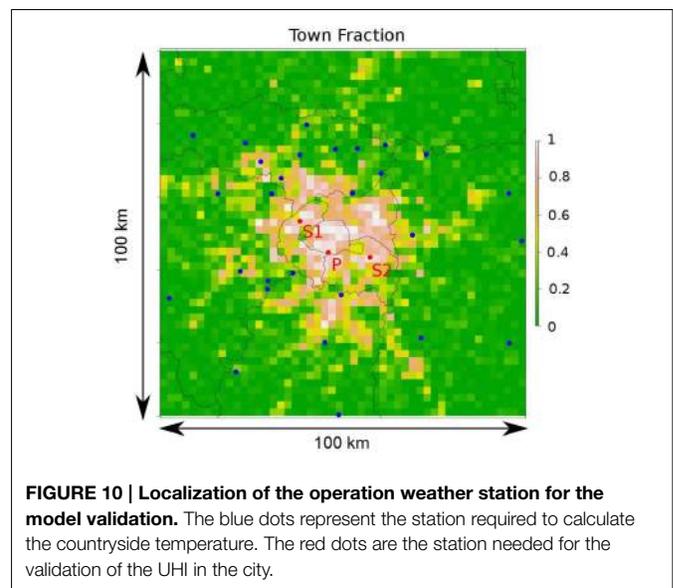


FIGURE 10 | Localization of the operation weather station for the model validation. The blue dots represent the station required to calculate the countryside temperature. The red dots are the station needed for the validation of the UHI in the city.

TABLE 3 | Comparison of the scores of the nighttime urban heat island at 2m in Paris and its suburbs given by the models (MesoNH and SUWG) with the data from measurement points (Mean Bias Error (MBE) (Model-Data) and Root Mean Square Error (RMSE) in K).

Location	Paris (P)		Suburb (S1)		Suburb (S2)	
	SUWG	MesoNH	SUWG	MesoNH	SUWG	MesoNH
MBE (K)	0.24	0.21	0.64	0.10	0.97	0.70
RMSE (K)	0.98	0.88	1.14	0.93	1.32	0.99
Data UHI (K)	1.85		1.68		0.87	

3.1.2. Seasonal Results

In order to validate the SUWG, the seasonal results are plotted in Figures 7, 8 and the scores are presented in Table 2. For each season, the MBE and the RMSE are satisfactory. The summer has the lowest UHI this year because of terrible weather conditions on Paris area and this is well reproduced by the generator. The choices for

the boundary layer height depending on the precipitation, wind speed and cloud cover fraction are relevant. The spatial extension of the UHI is well reproduced for each season.

3.1.3. Comparison with the UWG

A simulation with the UWG and the average data from the four airports has been performed. The MBE and the RMSE between the UWG and MesoNH are respectively 0.35 K and 1.01 K. These

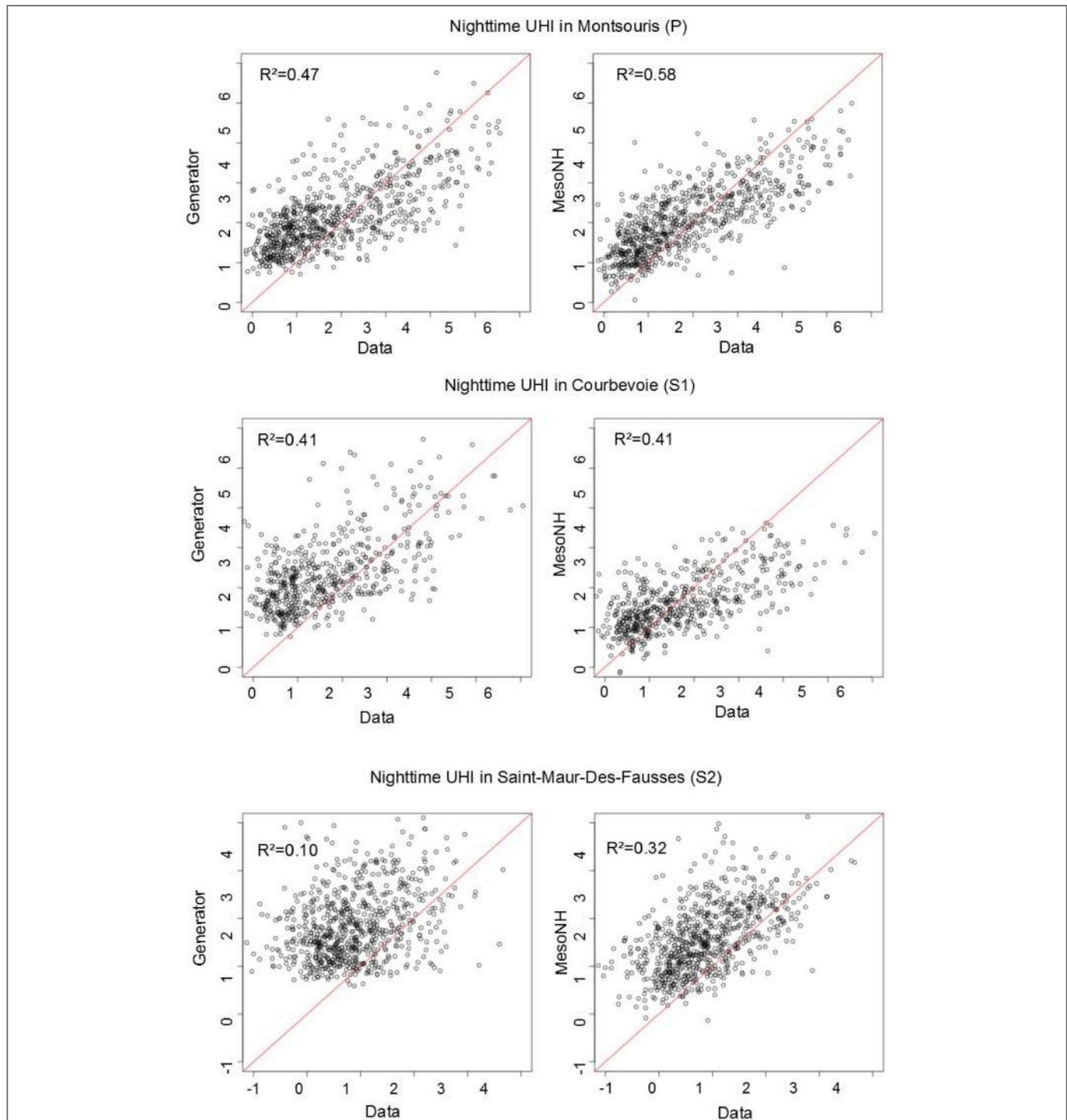


FIGURE 11 | Comparison of the UHI at 2 m in Paris during the night (0:00 and 3:00 A.M. UTC) over a year of the data of three operational weather stations with simulations computed by the

SUWG forced with an average of data files from four different airports around Paris and a full atmospheric model MesoNH simulation.

values are higher than the values given by the SUWG. The main default of the UWG is its fixed values of the boundary layer height, which gives too high values of UHI in all seasons. The MBE between the UWG and MesoNH is higher than 0.2 K for each season (0.24 K in winter, 0.36 K in spring and summer and 0.44 K in autumn).

3.1.4. Daily Results

Day by day, the shape of the UHI is well reproduced if the wind at the reference station is representative of the synoptic conditions. Such a representative day, the 29th May is illustrated in the **Figure 9**. In both simulation the wind comes from the west. The spatial extension to the east of the UHI is the same with the SUWG and MesoNH. The advection model and the boundary layer height model are well parametrized. However, this also shows one of the weakness of the model. If the wind at the operational weather station is not representative of the synoptic conditions, the spatial extension of the UHI could be wrong.

3.1.5. Results for High UHI

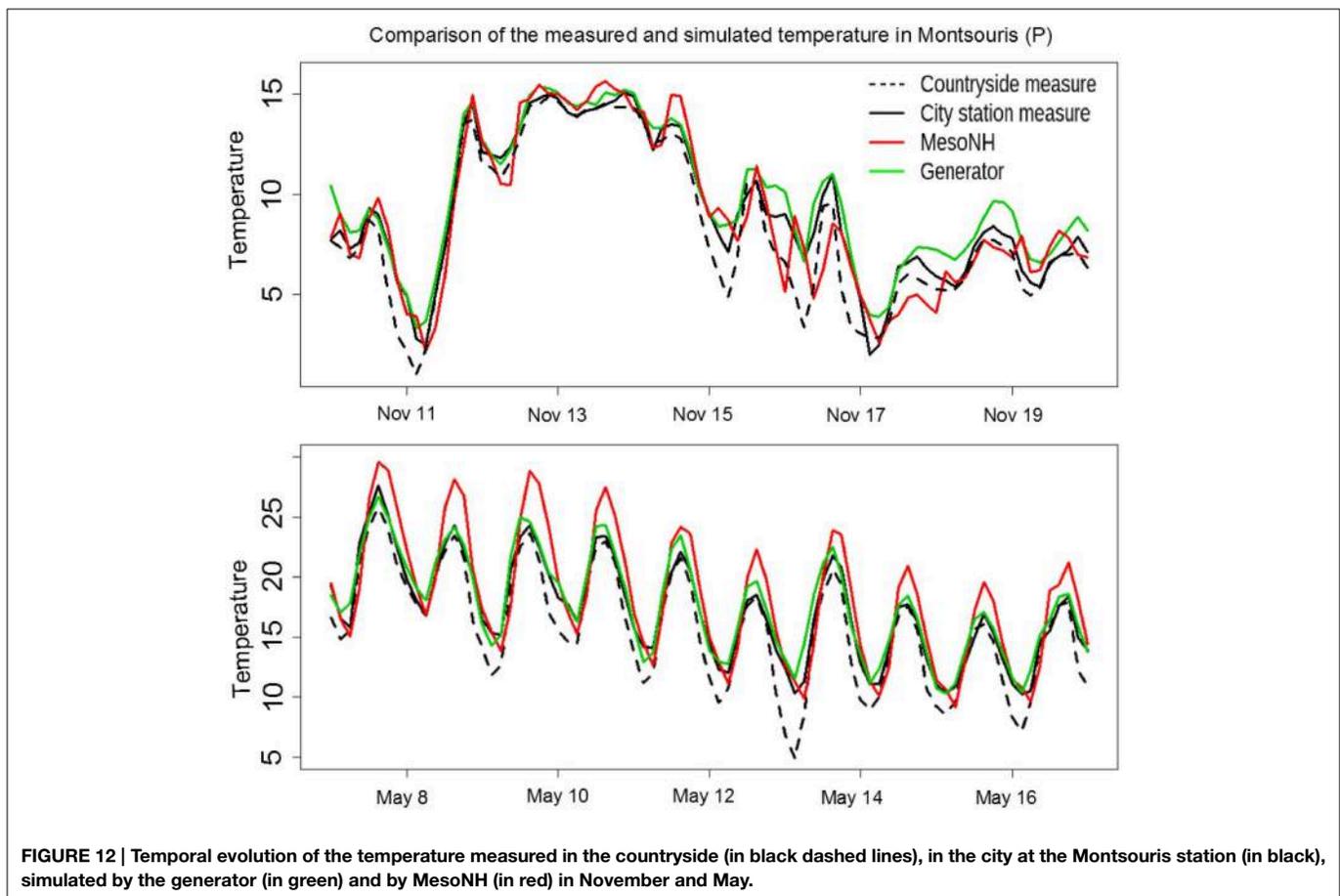
Statistics have been performed on night with a UHI larger than 4K (39 nights during the year of simulation). The MBE between the UWG and MesoNH is -0.5 K and the RMSE 1.3 K for an average MesoNH UHI of 4.73 K. By comparison, without the

UWG, the MBE, and the RMSE are respectively 2.2 K and 2.4 K. The SUWG reproduces well the high UHI episodes and is necessary to reproduce these episodes. Heat waves impact studies on cities and its inhabitants can therefore be modeled by the SUWG.

3.2. Comparison with Data

In order to validate the SUWG against operational data, in addition to the full atmospheric model, 31 operational measurement stations in the Paris area are used: 28 in the countryside (in blue dots), two in the near suburb of Paris (S1 in Courbevoie in and S2 in Saint-Maur-des-Fosses in red) and one in Paris (Montsouris park, P in red), see **Figure 10**.

Here, the countryside temperature is defined as the mean temperature of the 28 countryside stations. For the models (SUWG and MesoNH), the countryside temperature is the mean temperature of the 28 grid meshes containing the stations and the temperature for Paris and the suburb is the temperature of the grid mesh containing the stations. Note that for this validation, the synoptic signal has not been removed from the MesoNH simulation as in Section 3.1. The results are presented in **Table 3** and **Figure 11**. The mean bias error and the root mean square error are similar between the SUWG and the full atmospheric model for the temperature inside the city and in its suburbs. The



full atmospheric model has a better RMSE and R^2 in both case, but the scores of the SUWG are comparable to MesoNH. One reason for the too high MBE and low R^2 for both simulations is that the stations are located in parks, which are colder places than the built areas and not representative of the grid mesh in which they are located.

In **Figure 12**, the evolution of the temperature at the (P) station is represented in November and in May. This confirms that the generator gives an accurate representation of the temperature and the urban heat island in May when the amplitudes of temperature are important and in November when the diurnal cycle is less important.

4. Discussion

A new urban weather generator has been developed from the model developed by Bueno et al. (2013). The spatialized urban weather generator works with only one forcing point, coming from meteorological weather station outside of the city. However, it has been shown that for better simulations and a better representativeness of the synoptic conditions, an average of different stations around the area studied gives better results. First, the data from the operational weather stations is extrapolated at 30 m above the canopy layer. Then, the UHI is calculated on a grid above the mean height of the buildings by a simple boundary layer model. The boundary layer height is prescribed by a statistical model depending on the meteorological conditions and the built fraction of each grid mesh. Then an energy budget is solved in each boundary layer box with the heat flux provided by a surface model (here SURFEX, including ISBA, and TEB model) and a two dimensional lagrangian advection model. This methodology allows to simulate the intimate link between UHI and the surface fluxes of the urban area. Finally the

meteorological parameters calculated at 30 m force the surface model, in order to obtain for example temperature at 2 m. The SUWG is therefore adapted for building energy consumption studies or pedestrian comfort studies. The generator has been validated against a 1 year simulation over the Paris area with the full atmospheric model MesoNH and against data of three measurement points in Paris and its near suburbs. The comparison between the SUWG and MesoNH provides accurate results and better score than the previous version, the UWG. However, the comparison of both models with the data from operational weather stations provides modest results. This is due to the location of the operational weather stations in Paris, which are often located in parks and are not representative of the 4 km² grid mesh. The SUWG model results have to be compared with data from a station representative of an urban temperature. The model has been also validated on each season. Consequently long term or seasonal urban studies can be performed with the SUWG. The interaction between the surface model and the boundary layer model will allow for studying for urban planning scenarios because the UHI calculated above the mean level of the building depends on the description of the surface. The SUWG has only been studied on one city (Paris), surrounded by plains. We recommend further SUWG model evaluation for cities beyond the Paris agglomeration. Moreover, a lot of megacities are coastal cities or surrounded by mountains. The SUWG has to be adapted in order to take into account the sea breeze or effects of orography.

Supplementary Material

The Supplementary Material for this article can be found online at: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2015.00027/abstract>

References

- Belcher, S., Hacker, J., and Powell, D. (2005). Constructing design weather data for future climates. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 26, 49–61. doi: 10.1191/0143624405bt112oa
- Bueno, B., Hidalgo, J., Pigeon, G., Norford, L., and Masson, V. (2013). Calculation of air temperatures above the urban canopy layer from measurements at a rural operational weather station. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 52, 472–483. doi: 10.1175/JAMC-D-12-083.1
- Bueno, B., Pigeon, G., Norford, L., and Zibouche, K. (2011). Development and evaluation of a building energy model integrated in the teb scheme. *Geosci. Model Dev. Discuss.* 4, 2973–3011. doi: 10.5194/gmdd-4-2973-2011
- Chang, C. H., and Goh, K. C. (1999). The relationship between height to width ratios and the heat island intensity at 22:00 h for singapore. *Int. J. Climatol.* 19, 1011–1023. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(199907)19:9<1011::AID-JOC411>3.0.CO;2-U
- De Munck, C., Lemonsu, A., Bouzouidja, R., Masson, V., and Claverie, R. (2013). The greenroof module (v7. 3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within teb. *Geosci. Model Dev. Discuss.* 6, 1127–1172. doi: 10.5194/gmdd-6-1127-2013
- Eller, E., and Williamson, T. (2006). Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station. *Int. J. Climatol.* 26, 1671–1694. doi: 10.1002/joc.1328
- Fortuniak, K. (2003). “An application of the urban energy balance scheme for a statistical modeling of the uhi intensity,” in *Proceedings of the 5th International Conference on Urban Climate*, Vol. 1 (Łódź), 59–62.
- Grimmond, C., and Oke, T. R. (1999). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *J. Appl. Meteorol.* 38, 1262–1292. doi: 10.1175/1520-0450(1999)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2
- Grimmond, C., and Oke, T. R. (2002). Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (lumps). *J. Appl. Meteorol.* 41, 792–810. doi: 10.1175/1520-0450(2002)041<0792:THFUA>2.0.CO;2
- Gromke, C., Buccolieri, R., Di Sabatino, S., and Ruck, B. (2008). Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations—evaluation of cfd data with experimental data. *Atmos. Environ.* 42, 8640–8650. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.08.019
- Hidalgo, J., Masson, V., and Gimeno, L. (2010). Scaling the daytime urban heat island and urban-breeze circulation. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 49, 889–901. doi: 10.1175/2009JAMC2195.1
- Kershaw, T., Sanderson, M., Coley, D., and Eames, M. (2010). Estimation of the urban heat island for uk climate change projections. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 31, 251–263. doi: 10.1177/0143624410365033
- Laaidi, M., Zeghnoun, A., Dousset, B., Bretin, P., Vandentorren, S., Giraudet, E., et al. (2012). The impact of heat islands on mortality in paris during the august 2003 heat wave. *Environ. Health Perspect.* 120, 254. doi: 10.1289/ehp.1103532

- Lac, C., Donnelly, R., Masson, V., Pal, S., Riette, S., Donier, S., et al. (2013). Co 2 dispersion modelling over paris region within the co 2-megaparis project. *Atmos. Chem. Phys.* 13, 4941–4961. doi: 10.5194/acp-13-4941-2013
- Lemonsu, A., and Masson, V. (2002). Simulation of a summer urban breeze over paris. *Boundary-Layer Meteorol.* 104, 463–490. doi: 10.1023/A:1016509614936
- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., and Pearlmutter, D. (2012). Inclusion of vegetation in the town energy balance model for modelling urban green areas. *Geosci. Model Dev.* 5, 1377–1393. doi: 10.5194/gmd-5-1377-2012
- Martilli, A., Clappier, A., and Rotach, M. W. (2002). An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorol.* 104, 261–304. doi: 10.1023/A:1016099921195
- Masson, V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol.* 94, 357–397. doi: 10.1023/A:1002463829265
- Masson, V., Bonhomme, M., Salagnac, J.-L., Briottet, X., and Lemonsu, A. (2014). Solar panels reduce both global warming and urban heat island. *Atmos. Sci.* 2:14. doi: 10.3389/fenvs.2014.00014
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., et al. (2013). The surfexv7. 2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geosci. Model Dev.* 6, 929–960. doi: 10.5194/gmd-6-929-2013
- Moonen, P., Defraeye, T., Dorer, V., Blocken, B., and Carmeliet, J. (2012). Urban physics: effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. *Front. Archit. Res.* 1, 197–228. doi: 10.1016/j.foar.2012.05.002
- Noilhan, J., and Planton, S. (1989). A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weather Rev.* 117, 536–549. doi: 10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.* 7, 769–779. doi: 10.1016/0004-6981(73)90140-6
- Park, H.-S. (1986). Features of the heat island in seoul and its surrounding cities. *Atmos. Environ.* 20, 1859–1866. doi: 10.1016/0004-6981(86)90326-4
- Prata, A. (1996). A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 122, 1127–1151. doi: 10.1002/qj.49712253306
- Remund, J. (2008). Quality of meteornorm version 6.0. *Europe* 6.
- Ren, Z., Wang, X., Chen, D., Wang, C., and Thatcher, M. (2012). Constructing weather data for building simulation considering urban heat island. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 35, 69–82. doi: 10.1177/0143624412467194
- Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Vol. 13. Springer Science & Business Media.
- Takahashi, K., Yoshida, H., Tanaka, Y., Aotake, N., and Wang, F. (2004). Measurement of thermal environment in kyoto city and its prediction by cfd simulation. *Energy Build.* 36, 771–779. doi: 10.1016/j.enbuild.2004.01.033
- Toparlar, Y., Blocken, B., Vos, P., van Heijst, G., Janssen, W., van Hooff, T., et al. (2015). Cfd simulation and validation of urban microclimate: a case study for bergpolder zuid, rotterdam. *Build. Environ.* 83, 79–90. doi: 10.1016/j.buildenv.2014.08.004
- Wilcox, S., and Marion, W. (2008). *Users Manual for TMY3 Data Sets*. National Renewable Energy Laboratory Golden, CO.
- Zhang, D.-L., Shou, Y.-X., Dickerson, R. R., and Chen, F. (2011). Impact of upstream urbanization on the urban heat island effects along the washington-baltimore corridor. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 50, 2012–2029. doi: 10.1175/JAMC-D-10-05008.1

Conflict of Interest Statement: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2015 Le Bras and Masson. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.



Supplementary Material: A fast and spatialized urban weather generator for long-term urban studies at the city-scale

Julien Le Bras^{1,*}, Valéry Masson¹

¹*Groupe d'Etudes de l'Atmosphère Météorologique, Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France Centre National de la Recherche Scientifique, Toulouse, France*

Correspondence*:

Julien Le Bras

Groupe d'Etudes de l'Atmosphère Météorologique, Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France Centre National de la Recherche Scientifique, 42, avenue Coriolis 31057 Cedex 1, Toulouse, France, julien.le-bras@meteo.fr

ANNEX 1 : DATA EXTRAPOLATION TO 30 METERS

The first step of the method is the data extrapolation at 30m. The data from operational meteorological stations are often available at 2m and 10m for the wind. The goal is to extrapolate them above the building mean level, at 30 meters. In (Bueno et al. 2013), the authors use a vertical diffusion model (VDM) in order to extrapolate the data. Here, an iterative method has been chosen, in order to avoid the complexity of the VDM. The data extrapolated are the wind speed, the temperature, the humidity. The long-wave flux is recalculated with the Prata (1996) formulation with the extrapolated values and the formulation is adapted for cloudy condition: a long-wave flux is added, calculation on the radiation emitted by clouds, depending on cloud fraction and cloud temperature. The iterative method has 3 steps:

1. The surface model is forced at 30 meters with the observed data.
2. The results of the simulation are compared with the observation.
3. The difference between the results and the observation is applied to the forcing files.

Then, another simulation is computed with the new forcing files. Four iterations are recommended in order to have a root mean square error inferior to 0.01K between the observation and the simulation with the modified forcing files.

In order to validate the method, a validation has been performed with a station having also an instrumental 30m tower, at Roissy airport. This data contain all the parameters needed in order to force the surface model and the temperature at 30m. After four iterations, the root mean square error between the 30m-temperature simulated and observed is 1.01K and the mean bias error 0.4K (see **Figure 1**).

ANNEX 2 : CORRECTION OF THE SYNOPTIC SIGNAL OF MESONH SIMULATIONS

The spatialized urban weather generator can only compute UHI. It is not able to reproduce a temperature signal caused by a cloud cover which could recover for example the half of the studied area. But the

atmospheric model MesoNH can. If only the UHI signal is studied, it is necessary to remove the synoptic temperature signal in order to just compare the UHI effect on the area. For this, the idea used here is to remove the synoptic horizontal temperature gradient on the area. For this the MesoNH temperature field is aggregated on grid meshes with a 20km horizontal resolution. Then on each line of the grid, the temperature gradient is removed and the same work is made after on each column. The temperature field resulting is then considered as a temperature anomaly field by removing the lowest temperature of the grid to each grid mesh. Then this anomaly signal is subtracted to the original temperature field (see **Figure 2**).

FIGURES

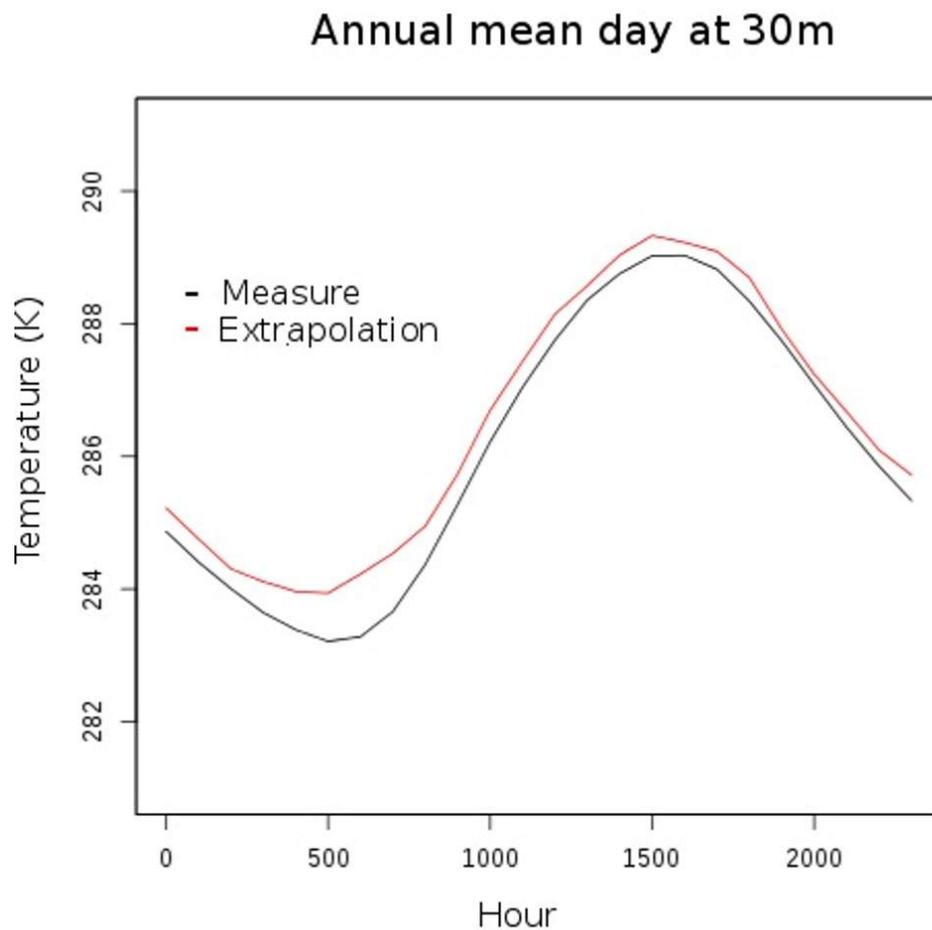


Figure 1. Annual mean day of the data at 30m of the Roissy measurement tower and the forcing file obtained after four iterations of the method.

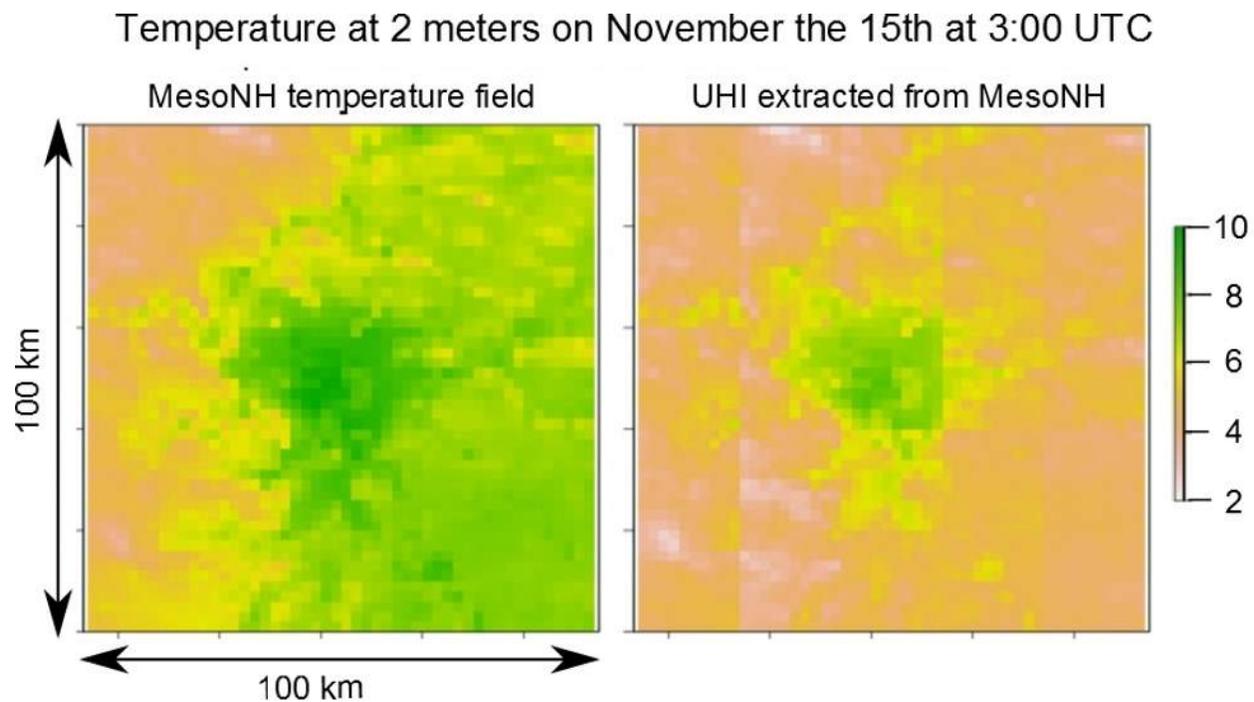


Figure 2. Temperature at 2 meters on the November 15th with the MesoNH model on the left and the UHI extracted from the MesoNH model on the right.

2.5 Conclusion

Le générateur de climat urbain spatialisé est un outil adapté pour des études de consommation énergétique ou d'aménagement urbain sur le long terme. Il a d'ailleurs déjà été utilisé pour l'étude du développement des panneaux solaires en région parisienne (MASSON et al. 2014b) ou dans le cadre des projets MUSCADE et ACCLIMAT qui étudient l'évolution des villes et de leur consommation énergétique avec le changement climatique (MASSON et al. 2014a). Néanmoins, le générateur spatialisé doit être adapté pour des villes entourées de montagnes ou pour les villes côtières, car bon nombre de mégapoles comme New York, Singapour, Barcelone ou Marseille sont des villes qui subissent une influence forte de la brise de mer qui n'est pas paramétrée dans le modèle.

De plus, le générateur spatialisé est limité en résolution par TEB. En effet, TEB repose sur l'hypothèse de rue canyon, ce qui limite sa résolution à environ 200 mètres. L'objectif de cette thèse étant de développer un modèle de climat urbain à l'échelle de la rue, il est nécessaire de mettre en place une paramétrisation sous-maille dans TEB. La description du bâti et de l'occupation du sol à haute résolution sont des données disponibles et faciles à placer en entrée de TEB. Il faut donc trouver des relations entre la variabilité de la température à l'échelle de la rue avec la description à haute résolution de la ville. Pour cela, des campagnes de mesures ont été effectuées dans trois quartiers à Paris, Marseille et Toulouse dans le cadre du projet EUREQUA qui sera présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Mesures de la variabilité climatique à l'échelle du quartier

3.1 Introduction

L'objectif de la thèse est de développer une chaîne de modélisation permettant de simuler la variabilité de la température en ville à l'échelle de la rue. Or, le modèle TEB est limité en résolution à quelques centaines de mètres à cause de l'hypothèse de rue canyon sur laquelle il repose. Le projet exploratoire ANR PIRVE (Projet Interdisciplinaire de Recherche Ville et Environnement, Formes urbaines, modes d'habiter et climat urbain dans le périurbain toulousain, 2008-2009) qui s'est déroulé sur 18 mois en 2008 - 2009 a mis en évidence sur un quartier de Toulouse à l'aide de mesures à vélo que la variabilité de la température au sein d'un quartier peut être de la même amplitude que l'ICU à l'échelle de l'agglomération (voir Figure 3.1).

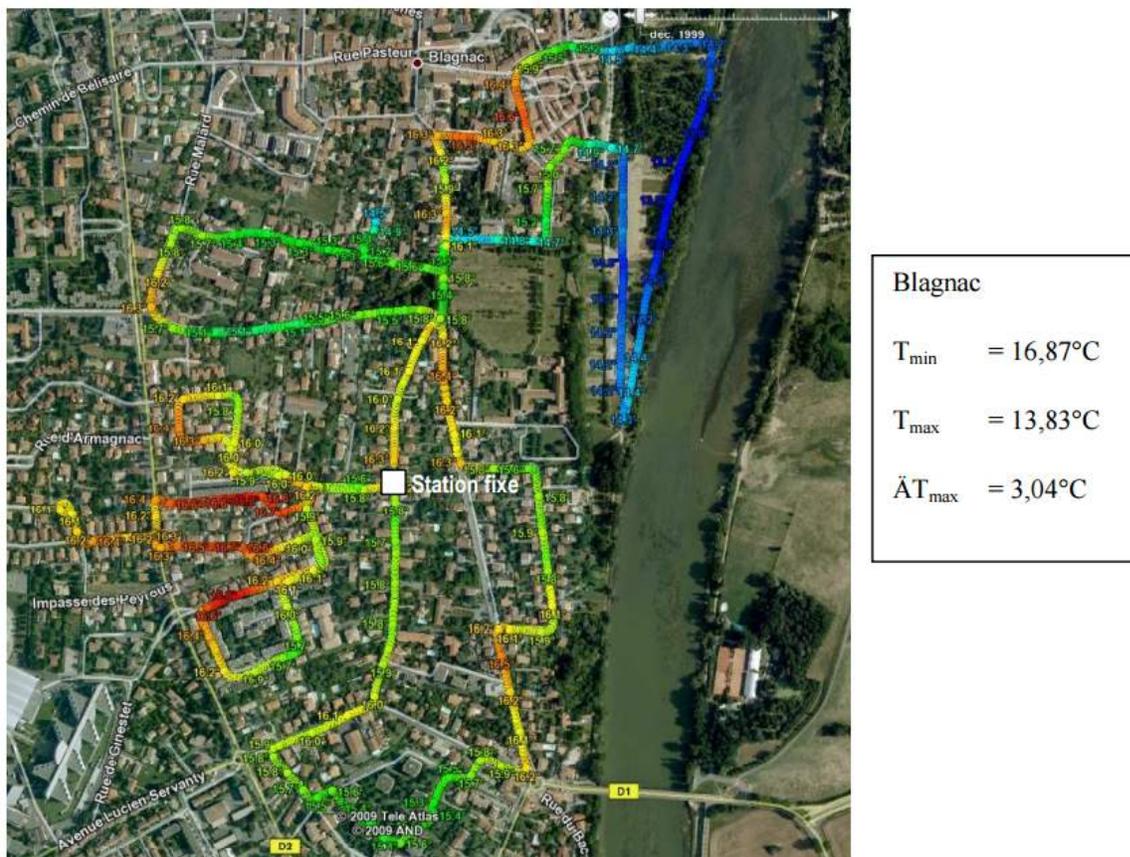


FIGURE 3.1 – Température à Blagnac sur un parcours à vélo le 3 juin 2009 le matin. Source : rapport final du projet PIRVE.

L'une des idées de ce projet était de lier cette variabilité de température aux caractéristiques d'occupation du sol et morphologiques du quartier étudié. Cette approche a été approfondie dans un des volets du projet interdisciplinaire EUREQUA qui fait l'objet de ce chapitre. Dans le projet EUREQUA, les zones d'études ont été restreintes de manière à pouvoir étudier la variabilité de la température à l'échelle de la rue. Pour cela, une station mobile piétonne a été développée au

CNRM-GAME. Cette station mobile est nouvelle et permet de calculer les indices de confort grâce aux instruments de mesures qui la composent. Couplée aux mesures d'un réseau fixe, nous obtenons donc des mesures à très haute résolution au sein d'un même quartier. Ces mesures ont eu lieu dans trois villes, Paris, Marseille et Toulouse et sur toutes les saisons (une saison par ville sauf à Toulouse où des mesures ont eu lieu de janvier à juin 2014).

J'ai activement participé à la préparation et la réalisation des campagnes de mesure de Marseille et Toulouse mais celle sur laquelle j'ai été le plus impliqué est celle de Paris. J'ai coordonné avec Isabelle Richard du LAVUE cette campagne. J'ai ainsi dû identifier les endroits où placer les stations du réseau fixe et rendre visite aux habitants sur le terrain pour leur demander l'autorisation d'installer le matériel de mesures chez eux. J'ai aussi décidé des parcours de mesure effectués en prenant en compte la variété des paysages urbains du quartier.

3.2 Présentation du projet EUREQUA

Le projet EUREQUA (Evaluation mUltidisciplinaire et Requalification Environnementale des QUARtiers) est un projet ANR dans le cadre du programme Bâtiments et villes durables de 2011 d'une durée de 4 ans (ANR 2011). Il questionne les enjeux de la requalification environnementale du cadre de vie urbain à l'échelle du quartier. Le but de ce projet est de faire émerger une conception de la qualité du cadre de vie s'articulant autour de la matérialité de l'environnement urbain et d'approches sensibles et sociale de la relation à l'environnement. Les différents partenaires du projet sont associés dans un but d'interdisciplinarité radicale, entre équipes de recherches en sciences humaines et sociales, en architecture ou en sciences physiques pour l'environnement, urbanistes et acteurs locaux. Les partenaires sont les suivants :

- **Sciences humaines et sociales**
 - LISST (Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires), unité mixte de recherche CNRS - Université de Toulouse Jean Jaurès, coordinateur du projet, spécialisé en géographie et aménagement.
 - LPED (Laboratoire Population Environnement Développement), laboratoire de Marseille, commun entre l'Université de Provence et l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) spécialisé en géographie.
 - LAVUE (Laboratoire Architecture Ville Urbanisme Environnement), unité mixte de recherche CNRS à Paris, spécialisé en géographie, urbanisme et architecture.
 - LRA (Laboratoire de Recherches en Architecture), laboratoire de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse.
- **Sciences physiques pour l'environnement**
 - CNRM/GAME (Centre National de Recherches Météorologiques/Groupe d'Etudes de l'Atmosphère Météorologiques), unité mixte de recherche CNRS et Météo France à Toulouse, spécialisé en climat urbain.
 - CEREAS (Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique), laboratoire commun entre l'École des Ponts ParisTech et EDF à Paris, spécialisé en écoulement atmosphérique à fine échelle.
 - IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux), établissement public à caractère scientifique et technologique à Nantes, spécialisé en acoustique.
- **Urbanistes**
 - Ateliers Yves LION, agence d'architectes, urbanistes et paysagistes.
 - IAU - IDF, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile de France.
- **Partenaires locaux**
 - Ville de Marseille
 - Ville de Paris
 - Communauté Urbaine du Grand Toulouse

3.2.1 Objectifs du projet

Les objectifs scientifiques du projet sont multiples :

1. **Améliorer, par la mesure et la modélisation, la compréhension du couplage entre phénomènes physiques, en lien avec certaines pratiques des habitants/usagers.** Les phénomènes physiques étudiés se concentrent sur le microclimat urbain, la propagation acoustique et la qualité de l'air. Ces paramètres ont été retenus car ils sont étroitement reliés à la notion de confort ou nuisance pour les habitants. Ces paramètres physiques sont mis en perspective avec les perceptions des habitants pour caractériser la qualité environnementale d'un quartier. Enfin, certaines représentations des comportements des habitants/usagers seront pris en compte dans les modèles physiques.
2. **Étudier la dimension subjective de la qualité environnementale, fondée sur des perceptions et représentations, faisant appel à la notion d'ambiance ou d'autres dimensions sociales et politiques.** Cela permet ensuite de caractériser les référentiels d'action des acteurs responsables du cadre de vie (élus locaux ou urbanistes par exemple).
3. **Concevoir et tester un dispositif d'aide à la décision participatif et interdisciplinaire destiné aux acteurs responsables de l'amélioration du cadre de vie.** Pour cela, des scénarios de requalification des quartiers seront générés de manière participative en prenant en compte les attentes des habitants, les recommandations scientifiques et les contraintes des acteurs locaux.

Pour les campagnes de mesures physiques, qui vont constituer le cœur du chapitre suivant, les objectifs sont de :

1. Caractériser la variabilité spatio-temporelles des paramètres physiques étudiés.
2. Documenter les interactions entre les différents processus.
3. Constituer une base de données pour la validation des modèles numériques.
4. Contribuer expérimentalement au diagnostic de la qualité environnementale.

3.2.2 Méthodologie

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie a été mise en place. Dans un premier temps, deux quartiers dans chaque ville d'étude (Marseille, Paris et Toulouse), ont été sujet à une étude préliminaire afin de cibler les enjeux. Au final, un quartier a été choisi par ville. Ensuite des campagnes de mesures physiques, couplées à des enquêtes auprès des usagers et des habitants, ont été réalisées sur une période de plus d'un an. Les résultats de ces campagnes ont ensuite été traités de manière disciplinaire et interdisciplinaire. En parallèle des campagnes de terrain, un travail est effectué sur le couplage entre modèles physiques. Les mesures permettent de définir certains paramètres d'entrée des modèles et de valider ces modèles. Enfin, à partir d'une démarche participative, des scénarios d'aménagement sont proposés. Ces scénarios sont simulés et évalués par les modèles physiques. L'ensemble des études sur les quartiers et les simulations permettront de construire un guide méthodologique à l'intention des acteurs locaux pour évaluer la qualité environnementale des quartiers.

La méthodologie globale est résumée dans la figure [3.2](#).

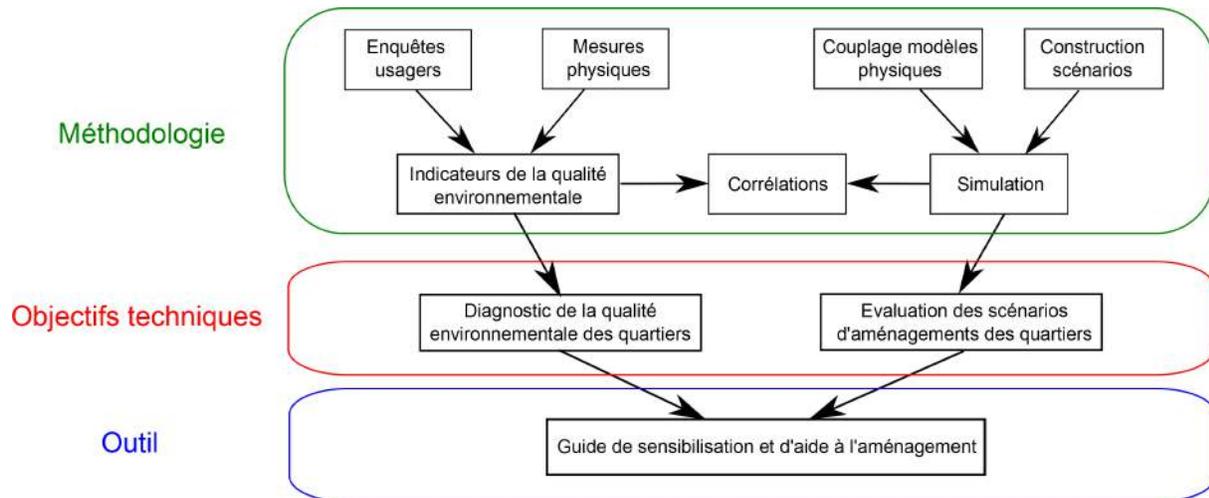


FIGURE 3.2 – Méthodologie globale du projet EUREQUA.

3.3 Terrains expérimentaux choisis

Les différents quartiers d'études choisis pour les campagnes de mesures et les études sociologiques sont les suivants :

- Le quartier de la Valbarelle à Marseille, dans le 11ème arrondissement.
- Le quartier de la porte de Bagnolet à Paris, dans le 20ème arrondissement.
- Le quartier de la cité Tabar à Toulouse.

Ces quartiers, tous en périphérie des villes concernées, ont en commun plusieurs caractéristiques essentielles pour le projet EUREQUA. Ils ont tous une grande diversité au niveau du bâti. Dans chaque quartier, des maisons individuelles côtoient à quelques dizaines de mètres des barres d'immeubles. Chaque terrain d'étude est situé au bord d'un grand axe routier, permettant l'étude de l'impact des nuisances (sonores et sur la qualité de l'air) engendrées par ces axes. De plus la diversité sociale est aussi très prononcée dans chacun des quartiers. Enfin, ces quartiers sont potentiellement sujets à des réhabilitations environnementales ou des aménagements urbains de grande envergure, ce qui n'aurait pas été possible sur des quartiers de centre ville historique. Le choix de quartiers se ressemblant entre chaque ville est un choix fort permettant une intercomparaison entre les différentes villes étudiées.

Les domaines choisis pour les études sur chaque quartier sont de la taille d'un carré d'environ 500 mètres de côté. Cette taille de domaine est adaptée à la taille maximale pour des simulations de propagation acoustique pour le modèle choisi. De plus, cette taille de domaine permet d'y effectuer des parcours de mesures et d'enquêtes adaptés pour les protocoles mis en place (trajet d'environ 3 km au sein de chaque quartier).

3.3.1 Description du terrain à Marseille

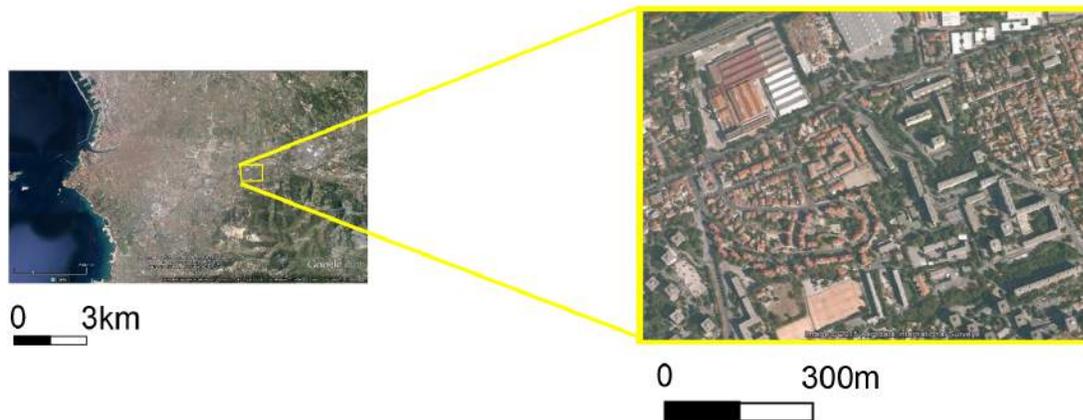


FIGURE 3.3 – Localisation du terrain à Marseille à gauche et zoom sur le quartier d'étude à droite. Images satellites issues de Google Earth.

Le quartier d'étude choisi à Marseille est situé dans le 11ème arrondissement de la ville (voir Figure 3.3). Ce quartier est situé sous influence de la brise de mer mais aussi du massif de Saint-Cyr au sud-est de la ville. Par ailleurs, il se trouve dans la vallée de l'Huveaune, au bord de laquelle se trouve plusieurs industries. L'autoroute A50 avec un fort trafic se trouve au nord du terrain d'étude. Le terrain expérimental en lui-même est très varié. Dans sa moitié ouest se trouve un lotissement de maisons individuelles avec jardin. Le nord est composé d'entrepôts. La moitié ouest est une zone résidentielle composée d'espaces verts et de barres d'immeubles d'une dizaine d'étages. Au sud du domaine se trouve un canal ombragé par des arbres et un stade. Il y a donc sur ce terrain des tissus urbains très variés, avec des enjeux environnementaux forts. La campagne d'étude sur Marseille a été faite en juin 2013.

3.3.2 Description du terrain à Paris

Le quartier d'étude parisien se trouve dans le 20ème arrondissement à l'est de Paris (voir Figure 3.4). Ce terrain a été choisi pour sa grande diversité sociale et architecturale. En effet, à l'est du domaine se trouvent les bâtiments HLM de la cité Python au bord du périphérique. Autour des axes (boulevard Davout et rue de Bagnole), les immeubles sont d'architecture Haussmanienne. Au sud-ouest du domaine se trouvent différents parcs et une maison de retraite. Enfin, au nord-ouest du domaine, un ensemble de maisons individuelles, "la campagne à Paris", se niche sur une légère colline. Ce quartier subit une forte influence du périphérique à l'est ainsi que de l'échangeur de la porte de Bagnole. Le trafic y est très intense aux heures de pointes et est une source de nuisance très forte pour les habitants. Des projets de requalification sont déjà en cours dans les barres HLM situées en bordure du périphérique, qui seront détruites pour certaines. Nos outils

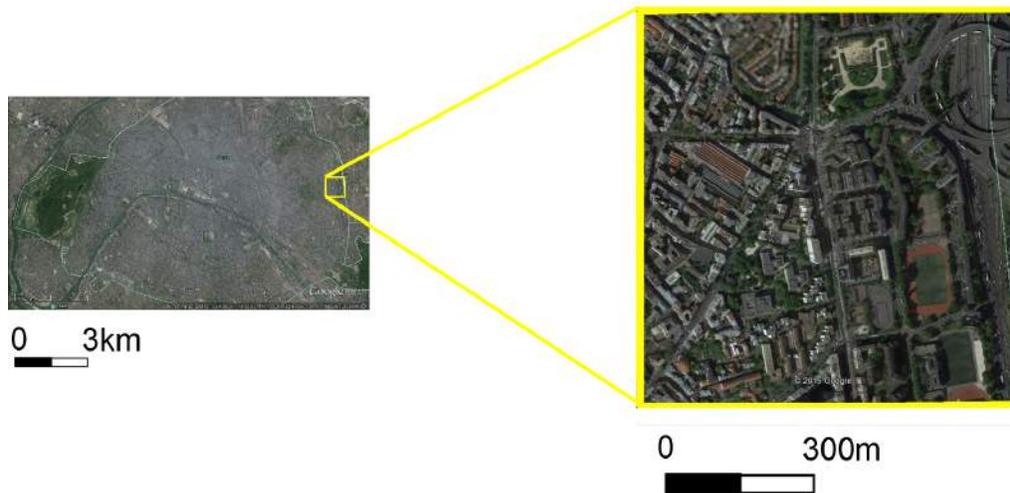


FIGURE 3.4 – Localisation du terrain à Paris à gauche et zoom sur le quartier d'étude à droite. Images satellites issues de Google Earth.

de modélisation seront donc utiles pour évaluer l'impact de cette destruction. La campagne de mesure à Paris a eu lieu en octobre 2013.

3.3.3 Description du terrain à Toulouse

Le quartier d'étude à Toulouse se trouve dans le sud de la ville de part et d'autre de la rocade (voir Figure 3.5). Cette dernière, en plus des avions passant régulièrement au-dessus du domaine, constitue ici aussi la principale cause de nuisance. Le quartier est constitué comme à Paris d'une cité, la cité Tabar, située au bord de la rocade. À l'est de cette cité se trouve la résidence privée des tours de Seysses, constituées d'une dizaine de grandes tours d'une vingtaine d'étages. Cette résidence est très végétalisée. Juste au nord de cette résidence se trouve un quartier composé uniquement de maisons individuelles. À Toulouse aussi, dans un domaine très restreint se côtoient des typologies de bâtiments très différentes. C'est ce qui nous intéressera dans le prochain chapitre de la thèse.

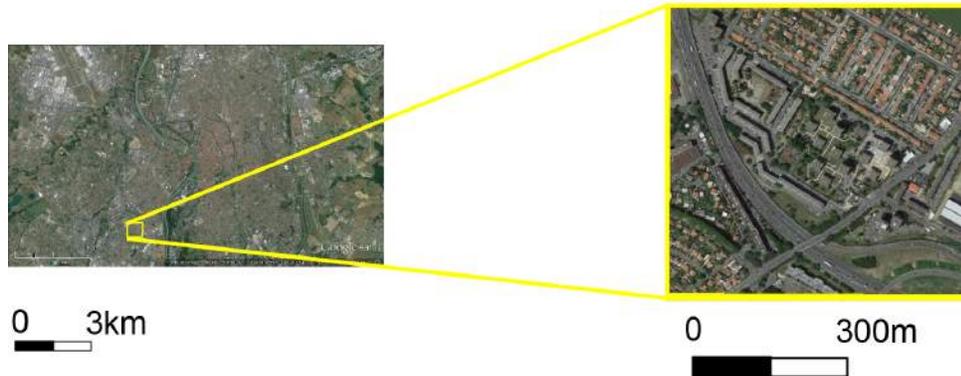


FIGURE 3.5 – Localisation du terrain à Toulouse à gauche et zoom sur le quartier d'étude à droite. Images satellites issues de Google Earth.

3.4 Moyens expérimentaux mis en œuvre

Chaque campagne de mesures se compose d'une période longue sur laquelle un réseau fixe est installé au sein du quartier et d'une période d'observation intensive de trois jours pendant la période longue.

3.4.1 Le réseau fixe

Le réseau fixe a été installé pour une période de deux semaines à Marseille et Paris et sur six mois à Toulouse. Le réseau de mesures météorologiques se compose de dix stations fixes situées sur des balcons, sur des toits ou dans des jardins (voir Figure 3.6). Ces stations prennent des mesures de vent (vitesse et direction), de température et d'humidité. Les mesures de vent ne seront pas considérées comme représentatives pour les stations situées sur des balcons trop encastrés. La configuration des stations est identique aux stations automatiques opérationnelles de Météo France. Ces dix stations sont accompagnées d'une station météorologique de référence (voir Figure 3.6), située sur un toit dans le domaine.

Cette station fait des acquisitions du vent (vitesse et direction) sur un mât de 10 mètres, de rayonnement solaire et infra-rouge, de température, de pression et d'humidité. Les stations sont synchronisées en temps par rapport à la station de référence et ont été calibrées ensemble avant les campagnes. Les caractéristiques des stations et tous les paramètres mesurés sont résumés dans les tableaux 3.1 et 3.2.



Station fixe



Mât de la station de référence



Radiomètre de la station de référence

FIGURE 3.6 – Stations de mesures du réseau fixe météorologique. À gauche, une station du réseau fixe, au centre le mât de mesure de la station de référence et à droite le radiomètre de la station de référence. Source : Dominique Legain.

Capteur	Variable mesurée	Fabricant	Type	Hauteur Conditionnement	Échantillonnage / Stockage	Précision	Temps de réponse
Hygromètre	Humidité relative	Vaisala	HMP45D	1.8 m dans abri Socrima	10 s / moyenne 1 min.	6% (Effets de l'abri inclus)	30s
Thermomètre	Température	Atexis	Sonde platine PT1000 classe A	1.8 m dans abri Socrima	10 s / moyenne 1 min.	-0.55 K +0.85 K intervalle à 95% (Effets de l'abri inclus)	1 min
Anémomètre Girouette	Force et direction du vent	Young	Wind monitor 05103	2.2 m	2 s / 1 min.	3° et 0.3 m/s	2s

TABLE 3.1 – Caractéristiques des capteurs installés sur les stations fixes du réseau.

Capteur	Variable mesurée	Fabricant	Type	Hauteur Conditionnement	Échantillonnage / Stockage	Précision	Temps de réponse
Hygromètre	Humidité relative	Vaisala	HMP45D	1.8 m dans abri Socrima	10 s / moyenne 1 min.	6% (Effets de l'abri inclus)	30s
Thermomètre	Température	Atexis	Sonde platine PT1000 classe A	1.8 m dans abri Socrima	10 s / moyenne 1 min.	-0.55 K +0.85 K intervalle à 95% (Effets de l'abri inclus)	1 min
Anémomètre Girouette	Force et direction du vent	Young	Wind monitor 05103	8 m	2 s / 1 min.	3 ° et 0.3 m/s	2s
Radio-mètre	Flux radiatifs incidents et remontants	Kipp et Zonen	CNR1		10 s / 1 min.	10% du total journalier	10s
Baromètre	Pression	Vaisala	PTB210	0.3m	10 s / 1 min.	0.3hPa	10s

TABLE 3.2 – Caractéristiques des capteurs installés sur la station de référence du réseau.

À ce réseau de mesures météorologiques sont associés deux sonomètres, le premier dans une zone calme comme un jardin et le second dans une zone plus bruyante. Un réseau de capteur de pollution est aussi déployé au sein du quartier avec cinq capteurs de NO_2 déployés à chaque campagne.

3.4.2 Les périodes d'observation intensive

Les périodes d'observations intensives (POI) sont déclenchées au cours des deux semaines de mesures à Paris et Marseille et une fois par saison à Toulouse (en janvier, avril et juin 2014). Elles sont choisies à partir de prévisions météorologiques favorables (beau temps et vents favorables à la dispersion de polluants sur la zone d'étude). Pour les mesures physiques, un circuit fixé au sein du quartier est parcouru toutes les trois heures de 6h00 à 21h00 heure locale. Des circuits sont aussi effectués la nuit (à 0h00 et 3h00) une fois par POI. Au cours de ces circuits d'une durée d'une heure environ, des arrêts d'une minute sont marqués pour y effectuer des mesures plus stables en météo, des mesures plus fines en acoustique et des mesures infra-rouges de la température des murs à l'aide d'une caméra thermique. Les mesures météorologiques sont effectuées à l'aide d'une station mobile confectionnée par l'équipe GMEI/4M du CNRM à Météo-France (voir Figure 3.7).

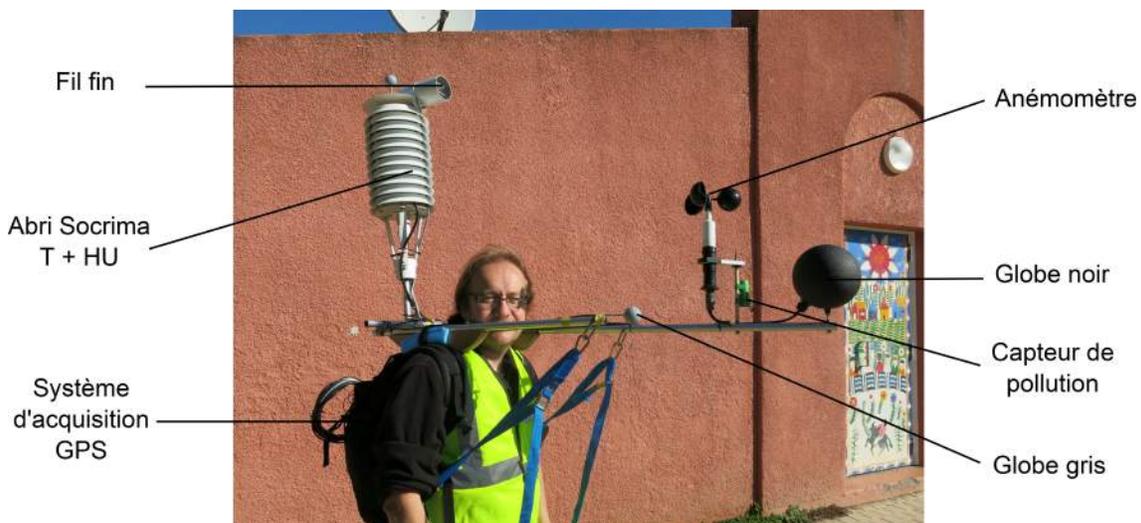


FIGURE 3.7 – Station mobile développée par le CNRM/GAME lors de la campagne d'avril à Toulouse.

Cette station est équipée d'un GPS, de capteurs de température, humidité et vent, ainsi que de globes noirs et gris permettant d'avoir une image de la température radiante. Le globe noir a été installé pour la première campagne de mesure à Marseille. Mais j'ai constaté que son temps de réponse était beaucoup trop grand pour des mesures en extérieur. Pour les campagnes suivantes, après que j'ai réalisé une étude bibliographique sur le sujet, des globes gris ont été installés à différentes hauteurs sur la station. Ces globes gris sont construits d'après les recommandations de THORSSON et al. (2007). Ils sont composés d'une balle de tennis de table de 3.8 mm de diamètre et d'épaisseur de 1 mm recouverte de peinture mat grise (RAL 7001). Au coeur de ce globe est placé une sonde de température Pt1000. Ce dispositif permet d'obtenir un temps de réponse

beaucoup plus adapté aux études en extérieur (de l'ordre de quelques minutes) et la couleur grise permet de ne pas surestimer l'émissivité d'un individu. Ainsi, avec tous ces capteurs associés dans une même station, il est possible de calculer directement l'indicateur de confort UTCI (Universal Thermal Climate Index) aux points d'arrêt du parcours.

Par ailleurs, le capteur de température étant composé d'un fil fin de platine nu ($7\mu m$), les mesures de températures le long du trajet sont faites à haute fréquence (10 Hz) et permettent d'avoir un temps de réponse suffisamment rapide pour étudier la variabilité de la température tout au long d'un parcours. Cependant, un tel capteur ne constitue qu'un détecteur rapide des variations de température et n'est pas une mesure absolue. Pour les mesures absolues, un thermomètre à fil de platine 1000Ω est placé dans un abri Socrima pour avoir le même protocole de mesure que les stations fixes. De plus, un thermomètre à fil de platine 100Ω est placé dans un abri spécifiquement réalisé par le CNRM pour cette station mobile. Cet abri est composé de deux tubes concentriques dont l'ouverture est dans le sens du déplacement afin d'assurer une bonne ventilation. Les mesures de température sont calibrées de la manière suivante :

- Le thermomètre intermédiaire, dans l'abri du CNRM, est calibré avec le thermomètre lent situé dans l'abri Socrima.
- Le thermomètre rapide est calibré avec le thermomètre intermédiaire. Ces deux capteurs sont situés dans l'abri CNRM.
- Ce processus de calibration est réalisé sur chaque parcours.

L'ensemble des capteurs météorologiques disponibles sur la station mobile avec leurs caractéristiques sont décrits dans le tableau 3.3. De plus un capteur de pollution au NO_2 a été placé sur la station.

Lors des circuits de mesures physiques, le porteur de la station est accompagné d'un acousticien portant un sonomètre (voir Figure 3.8a) et notant les différents bruits entendus au court du parcours, ainsi que d'une personne portant une caméra thermique infra-rouge (voir Figure 3.8b). À chaque point d'arrêt, une image infra-rouge est prise dans 8 directions autour du point d'arrêt afin d'obtenir la température de surface des bâtiments. Ces mesures serviront ensuite pour la validation des modèles physiques. Les parcours physiques ont été établis de manière à durer environ une heure. Cette durée est acceptable pour considérer une certaine stationnarité des conditions météorologiques sur la durée globale d'un parcours (cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée mais nous verrons dans le prochain chapitre comment s'affranchir de la variabilité des conditions synoptiques sur un parcours).

En parallèle des circuits de mesures physiques, une voiture instrumentée a effectué des circuits à Paris et Toulouse dans et autour de la zone d'étude (voir Figure 3.9). Un partenariat avec le CEREMA (Centre d'Études et d'Expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) de Nancy a permis l'utilisation de cette voiture. Celle-ci est équipée de capteurs de température, humidité, vent, rayonnement infra-rouge et global, de capteurs de polluants, de température de surface et infra-rouge ainsi que d'un GPS. L'idée est d'obtenir des conditions aux limites du domaine étudié et au-delà. Les parcours de la voiture instrumentée, d'une dizaine de kilomètres, ont été effectués en même temps que les parcours de mesures physiques.

Pour les circuits enquêtes, la même équipe de mesure physique est engagée. Le circuit est réduit d'un kilomètre et les points d'arrêts réduits à 5 ou 6. À chaque point d'arrêt, des enquêtés répondent à un questionnaire (voir Figure 3.8 d) mis au point pour le projet EUREQUA, les interrogeant sur leur ressenti (thermique, acoustique ou sur la pollution) ainsi que sur leur ressenti plus général (qualité du décor, appréciation globale du lieu sur sa beauté ou la sécurité). Le



a. Sonomètre



b. Caméra thermique



c. Radiosondage



d. Enquêtés lors d'un parcours à Marseille

FIGURE 3.8 – a. Sonomètre lors d'une POI de nuit, b. Caméra thermique à Toulouse, c. Radiosondage à Marseille, d. Enquêtés lors de la POI marseillaise.



FIGURE 3.9 – Voiture instrumentée du CEREMA de l'est.

questionnaire global se trouve dans l'annexe [A](#). Ce questionnaire permet de définir la qualité environnementale ressentie mais aussi de comparer le ressenti des usagers ou habitants aux mesures effectuées.

Enfin, des lâchers de ballon équipés d'une radiosonde sont effectués plusieurs fois au cours de chaque POI au départ de certains parcours de mesures physiques (voir Figure [3.8 c](#)). Les radiosondes sont des sondes Vaisala équipées de capteurs de température, humidité et pression, accompagnés d'un GPS. Ces lâchers de ballon nous renseignent sur la structure de l'atmosphère au moment des parcours, ce qui sera utile pour les modèles physiques de météorologie ou de CFD.

Capteur	Variable mesurée	Fabricant	Type	Hauteur Conditionnement	Échantillonnage / Stockage	Précision	Temps de réponse
GPS	Latitude, Longitude, cap, vitesse	Lextronic	EM406		1 s / 1 s	5 m / 1 m/s	1 s
Hygromètre	Humidité relative	Vaisala	HMP45D	1.6 m dans abri Socrima	10 s / moyenne 1 min.	6% (Effets de l'abri inclus)	30s
Thermomètre à faible temps de réponse	Température	Atexis	Sonde platine PT1000 classe A	1.6 m dans abri Socrima	1 s / 1 s	-0.55 K +0.85 K intervalle à 95% (Effets de l'abri inclus)	1 min
Thermomètre à temps de réponse intermédiaire	Température	Loreme	Sonde platine PT1000 classe A	1.8 m dans abri CNRM	1 s / 1 s	-0.55 K +0.85 K intervalle à 95% (Effets de l'abri inclus)	10 s
Thermomètre rapide	Fluctuation de température	Météo France CNRM	Fil de platine fin et nu ($7\mu m$)	1.8 m dans abri CNRM	0.1s et 1s pour les écarts type	-0.55 K +0.85 K intervalle à 95% (Effets de l'abri inclus)	0.1 s
Anémomètre	Force du vent	Young	3 cup 12102	1.2 m	1 s	0.3 m/s	1s
Globe gris	Température radiante	Météo France CNRM	Balle de ping-pong gris mat (RAL 7001) avec sonde PT1000 classe A	1 m	1 s	0.5 ° hors effet d'exposition	20s
Globe noir	Température radiante	Campbel Scientific	Globe noir Thermistance	1.1 m	1 s	0.5 ° hors effet d'exposition	10min

TABLE 3.3 – Caractéristiques des capteurs installés sur la station de mesures mobile.

3.5 Déroulement des campagnes de mesures

Les campagnes de mesures de Toulouse, Paris et Marseille ont été coordonnées pour la partie mesure physique par le CNRM/GAME. Celle de Marseille a été prise en charge par Aude Lemonsu, celle de Toulouse par Noémie Gaudio et je me suis occupé de celle de Paris. La campagne de Paris bien que consécutive à celle de Marseille va donc être développée en premier. Celles de Marseille et Toulouse seront ensuite présentées plus brièvement, car l'installation du réseau répond aux mêmes problématiques dans chaque ville.

3.5.1 Paris

La campagne de mesure parisienne a eu lieu du 2 au 22 octobre 2013. Le réseau fixe a été installé en premier en essayant de suivre plusieurs contraintes :

- Placer les stations dans différents types de bâti à travers le domaine.
- Placer des stations au cœur du domaine mais aussi en ses bords pour avoir les conditions aux limites du domaine.
- Varier les emplacements entre jardins, toits et balcons.
- Trouver des habitants disponibles pour placer des stations à leur domicile.
- Pour la station de référence, trouver un toit accessible, élevé et plat pour placer le mât de mesure.
- Pour les radiosondages, trouver des emplacements dégagés pour effectuer des sondages quelque soit le temps (grande sensibilité notamment au vent).

La figure 3.10 montre les emplacements choisis pour les différentes stations et le tableau 3.4 décrit ces emplacements.

Station	Emplacement	Altitude
Réf	Toit maison de retraite	91 m
A	Jardin	74 m
B	Balcon 5ème étage exposé Est	6 9m
C	Jardin	98 m
D	Jardin	75 m
E	Balcon encastré 5ème étage exposé Ouest	80 m
F	Balcon 2ème étage	74 m
G	Balcon 2ème étage exposé Est	78 m
H	Jardin sous les arbres	75 m
I	Balcon 2ème étage exposé Est	72 m
J	Balcon 5ème étage exposé Est	72 m

TABLE 3.4 – Stations fixes installées à lors de la campagne parisienne.



FIGURE 3.10 – Installation du réseau fixe météorologique à Paris. En étiquette rouge, les stations fixes, en vert le lieu de lancement des radiosondages et en bleu le mât de mesure avec la station de référence. Le parcours de mesures physiques est représenté en ligne rouge.

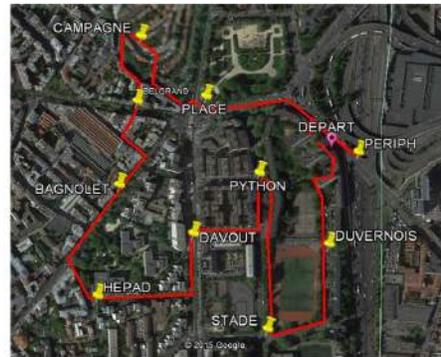
Les stations ont effectivement été positionnées en essayant de respecter ces contraintes. Par ailleurs, les stations E et J ont été placées de part et d'autre d'une barre d'immeuble pour étudier les différences d'exposition. La station C a été placée dans un jardin du petit ensemble "La campagne à Paris" composé d'anciennes maisons d'ouvriers situées sur une légère colline surplombant le quartier. Les stations A et B pourront servir pour l'étude des conditions aux limites du domaine.

Le mât et la station de référence ont été placés sur le toit d'une maison de retraite au sein du quartier. La bâtiment sur lequel la station a été posée est légèrement au-dessus de la hauteur moyenne des bâtiments. Ce qui nous permet de faire l'hypothèse que les mesures faites par cette station sont représentatives de la température au-dessus de la canopée du domaine.

Les radiosondages sont effectués depuis un jardin isolé d'un grand hangar RATP. L'absence d'arbre dans ce jardin et les bâtiments de hauteur modérée (moins de 20 mètres) autour ont permis des lancements dans des conditions optimales.

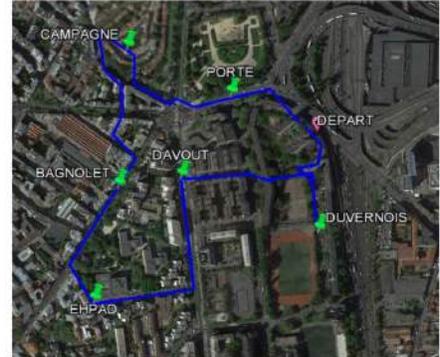
Les différents parcours ont ensuite été construits de manière à traverser le plus possible de différents paysages urbains. Le parcours de mesures physiques (Figure 3.11.a) a une longueur de 2,8km et est composé de dix points d'arrêts d'une minute. Ces arrêts sont répartis dans la partie dense du domaine, mais aussi autour d'un stade, en bord de parc, au-dessus du périphérique et au sein de "la campagne à Paris". Le parcours enquête (Figure 3.11.b) est lui un peu plus court, 2,2km et avec seulement 6 points d'arrêts. Mais les enquêtés devant répondre à un questionnaire complet à chaque arrêt, ces parcours ont eu tendance à durer entre 1h30 et 2h. Enfin le parcours voiture (Figure 3.11.c) a été établi de manière à passer dans le domaine d'étude mais aussi au loin autour du domaine, notamment de l'autre coté du périphérique.

a .Parcours mesures physiques



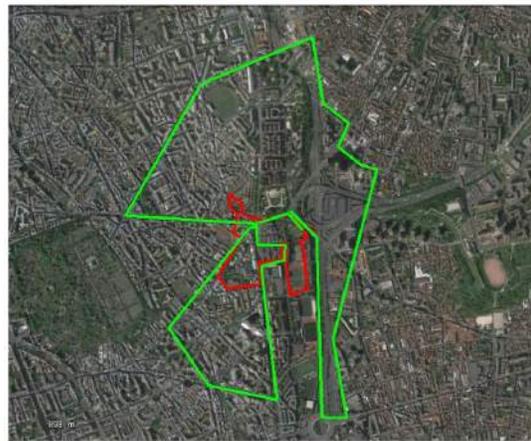
0 m 300 m

b .Parcours enquête



0 m 300 m

c. Parcours voiture



0 m 900 m

FIGURE 3.11 – Paris : a. Tracé du parcours mesures physiques (ligne rouge) et points d'arrêts (épingles jaunes). b. Tracé du parcours enquête (ligne bleue) et points d'arrêts (épingles vertes). c. Tracé du parcours de la voiture instrumentée (vert) et parcours mesures physiques (rouge).

La POI parisienne a été déclenchée le lundi 7 octobre 2013 après-midi pour profiter des bonnes conditions météorologiques du début de semaine et s'est arrêtée le jeudi 10 octobre après-midi. Les mesures de nuit de 0h et 3h ont été effectuées dans la nuit du 7 au 8 octobre. Les conditions météorologiques, résumées dans la figure 3.12 et issues des mesures de la station de référence, se sont ensuite dégradées pour donner un temps couvert et humide. Ce changement de temps se retrouve dans la baisse de la pression et l'augmentation de la vitesse du vent au cours de la POI.

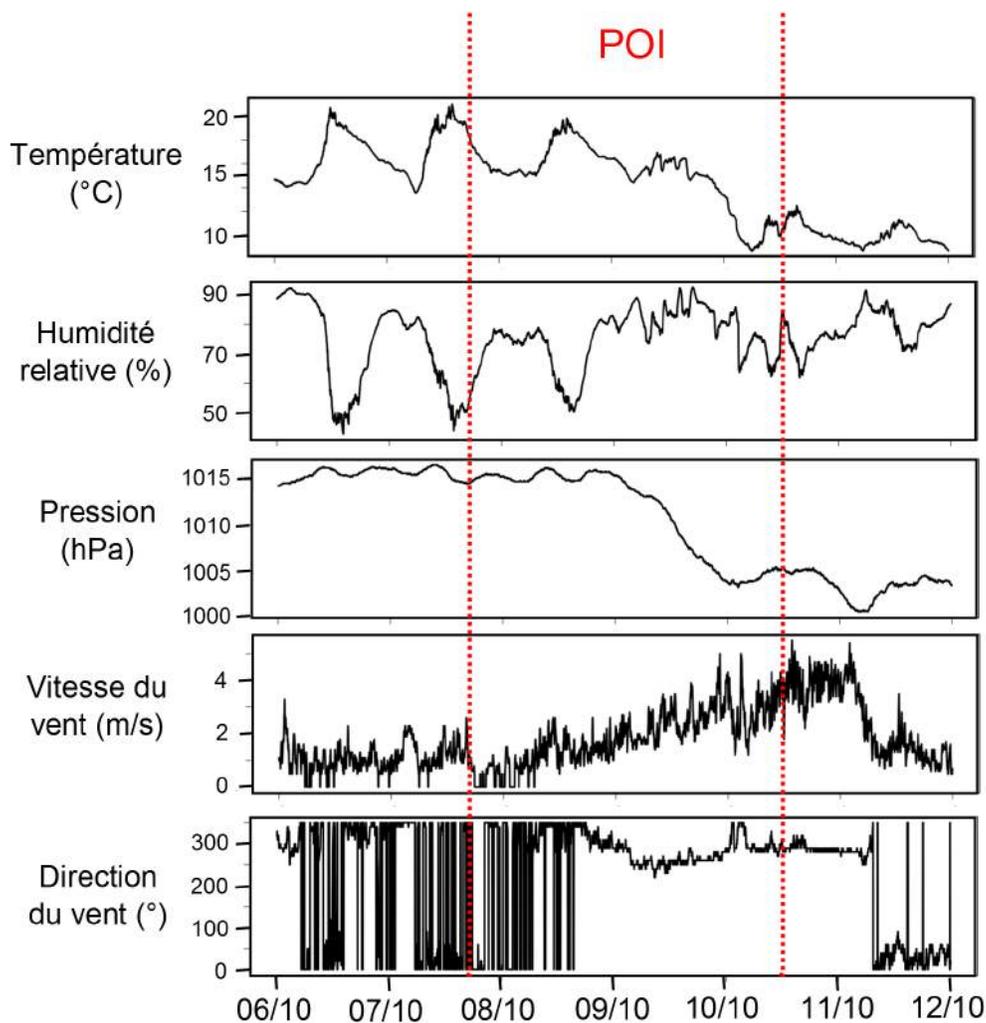


FIGURE 3.12 – Résumé des conditions météorologiques au moment de la POI parisienne issues de la station de référence.

Les parcours de mesures physiques ont eu lieu toutes les 3 heures de 6h à 21h le 8 et le 9 octobre et à 6h et 9h le 10. Six parcours enquête se sont déroulés le 8 à 10h et 19h, le 9 à 10h, 16h et 19h et le 10 à 10h. Cinq radiosondages ont été effectués lors de cette POI, le premier le 7 octobre à 21h et les quatre suivants le 8 à 3h, 12h, 18h et 21h.

3.5.2 Marseille

La campagne de mesure de Marseille s'est déroulée du 11 juin au 2 juillet 2013. Les stations fixes du réseau à Marseille ont été placées avec les mêmes contraintes qu'à Paris (voir Figure 3.13 et Tableau 3.5) mais ici, plus de stations se trouvent en dehors du parcours de mesures physiques. Les radiosondages ont été effectués au point de départ des parcours, qui est un site adapté.

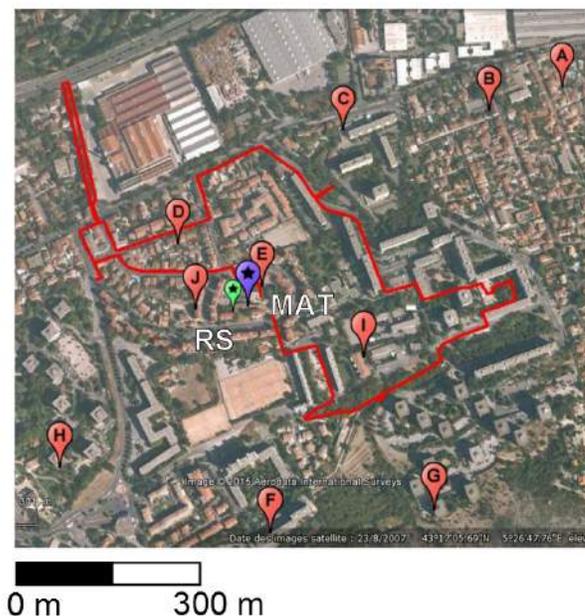


FIGURE 3.13 – Installation du réseau fixe météorologique à Marseille. En étiquette rouge, les stations fixes, en vert le lieu de lancement des radiosondages et en bleu le mât de mesure avec la station de référence. Le parcours de mesures physiques est représenté en ligne rouge.

Les parcours de mesures physiques et enquête (voir Figure 3.14) ont été construits de manière à traverser le plus de différents bâtis. Il est à noter qu'à Marseille, le circuit passe au sud dans un passage arboré en bord de canal, très différent de la zone urbaine et donc source de rafraîchissement sur un parcours. Dix-sept points d'arrêt ont été définis à Marseille. Cependant, il s'est avéré que ce nombre était excessif pour réaliser un parcours en moins d'une heure pour les mesures à la caméra thermique. Ce nombre a donc été réduit à une dizaine à Paris et Toulouse. De plus, à Marseille, seul le globe noir était installé sur la station mobile. Mais à cause de son temps de réponse, cet instrument n'était pas adapté à la mesure de température radiante en extérieur sur un parcours piéton. Le temps de réponse de ce capteur est en effet d'environ 20 minutes. Les globes gris ont donc été installés après cette campagne de mesures. Par ailleurs, le partenariat avec le CEREMA n'ayant pas encore été conclu pour la POI marseillaise, les parcours avec la voiture instrumentée n'ont pas pu être réalisés durant cette campagne.

La POI de Marseille a été déclenchée du mardi 18 au jeudi 20 juin. Si les journées du 18 et du 20 ont été des journées de beau temps, la journée du 19 juin a été plus mitigée, avec un temps couvert et quelques pluies, comme le montrent les mesures de la station de référence dans

Station	Emplacement	Altitude
Réf	Toit bâtiment collectif	72 m
A	Dans une cour	53 m
B	Cour sur herbe	54 m
C	Terrasse au 2ème étage	50 m
D	Terrasse 1er étage exposé Sud	49 m
E	Jardins partagés	58 m
F	Balcon 3ème étage exposé Nord	81 m
G	Balcon encastré 1er étage exposé Ouest	109 m
H	Balcon encastré 2ème étage exposé Sud-Ouest	68 m
I	Balcon 2ème étage exposé Est	71 m
J	Balcon 3ème étage exposé Ouest	56 m

TABLE 3.5 – Stations fixes installées à lors de la campagne marseillaise.

a .Parcours mesures physiques



0 m 300 m

b .Parcours enquête



0 m 300 m

FIGURE 3.14 – Marseille : a. Tracé du parcours mesures physiques (ligne rouge) et points d'arrêts (épingles jaunes). b. Tracé du parcours enquête (ligne bleue) et points d'arrêts (épingles vertes). c. Tracé du parcours de la voiture instrumentée (vert) et parcours mesures physiques (rouge).

la figure 3.15. Les mesures de vent de la station de référence ont rencontré un problème au milieu de la POI : le mât a pris la foudre dans la nuit du 18 au 19 juin, grillant le capteur de direction du vent. Une fois ce problème identifié, la station B a été déplacée sur le toit. Cette station étant située dans un petit jardin avec des vents tourbillonnants, il a été décidé de la choisir car ses mesures étaient peu représentatives du lieu dans lequel elle se situait.

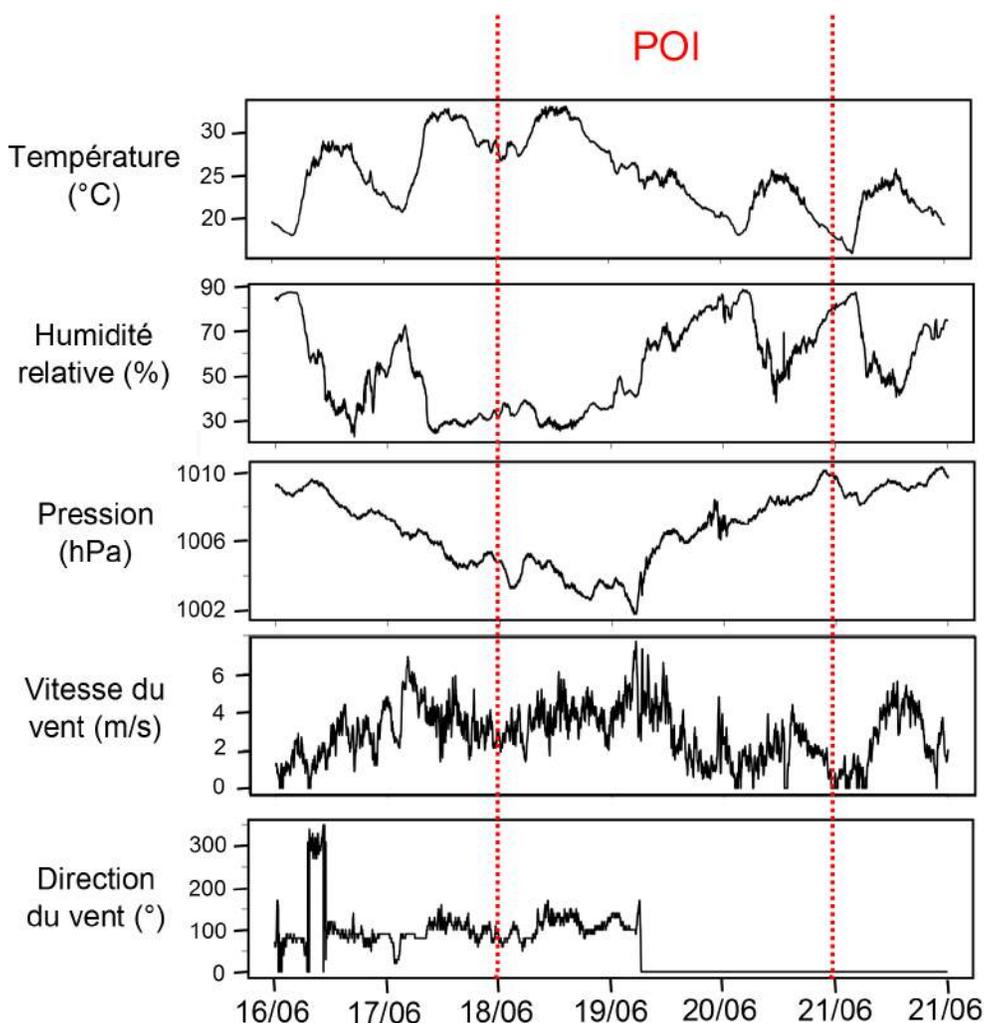


FIGURE 3.15 – Résumé des conditions météorologiques au moment de la POI marseillaise issues de la station de référence.

Les parcours de mesures physiques ont été réalisés toutes les 3 heures de 6h à 21h sur les trois jours de POI et à 0h et 3h dans la nuit du 18 au 19 juin. Les parcours enquêtes ont au lieu sur la journée du 19 juin à 10h, 16h et 19h.

3.5.3 Toulouse

La campagne de mesures de Toulouse a été la plus longue du projet car les stations fixes ont été installées sur le terrain d'étude du 16 décembre 2013 au 15 juillet 2014. Les stations ont été installées avec les mêmes objectifs qu'à Paris et Marseille, à savoir installées dans des tissus urbains variés dans et autour du domaine.

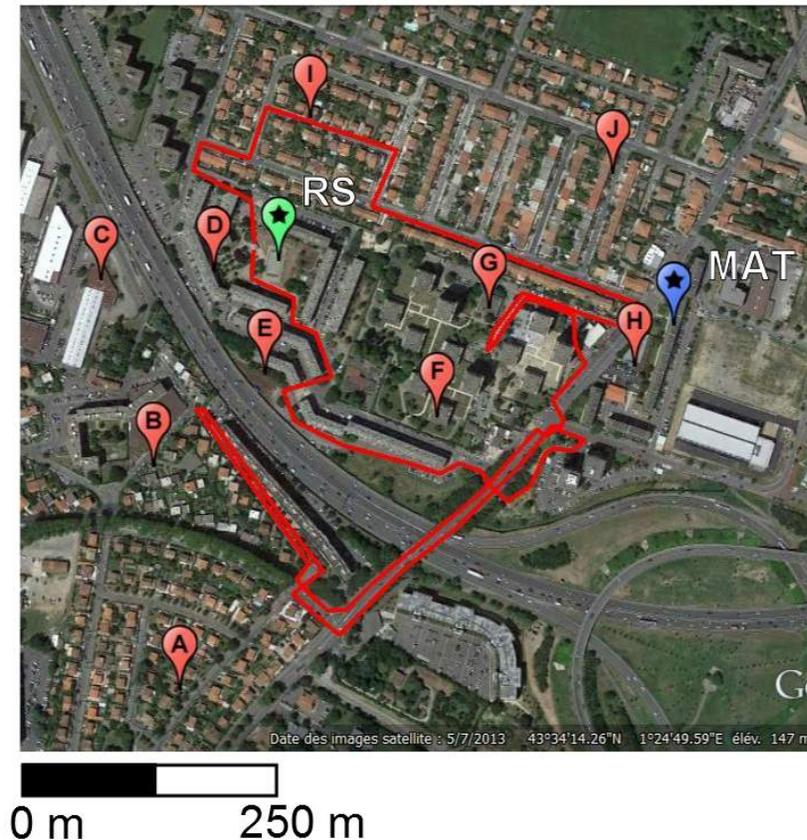


FIGURE 3.16 – Installation du réseau fixe météorologique à Toulouse. En étiquette rouge, les stations fixes, en vert le lieu de lancement des radiosondages et en bleu le mât de mesure avec la station de référence. Le parcours de mesures physiques est représenté en ligne rouge.

Trois POI ont été déclenchées à Toulouse :

- en hiver, du 28 au 30 janvier, de 6h à 0h tous les jours sauf le 30.
- au printemps, du 8 au 10 avril, de 6h à 21h tous les jours et une nuit à 0h et 3h du 9 au 10 avril.
- en été, du 17 au 19 juin, de 6h à 21h tous les jours et une nuit à 0h et 3h du 18 au 19 juin.

Les parcours enquête ont eu lieu pour chaque saison chaque jour de la POI à 10h, 16h et 19h, ce qui fait de Toulouse la ville sur laquelle le plus d'enquêtes ont été réalisées. Le fait d'avoir fait trois POI permet d'étudier la variabilité des signaux en fonction des saisons. Sur la POI de janvier, la météo a été belle (voir Figure 3.17) mais la station de référence a connu des problèmes

Station	Emplacement	Altitude
Réf	Toit 5ème terrasse étage	160 m
A	Jardin	146 m
B	Cour	148 m
C	Toit terrasse 1er étage	148 m
D	Toit terrasse d'un jardin	148 m
E	Terrasse en RDC	146 m
F	Toit terrasse 10ème étage	160 m
G	Jardin	146 m
H	Toit terrasse au 1er étage	152 m
I	Jardin	146 m
J	Jardin	144 m

TABLE 3.6 – Stations fixes installées à lors de la campagne toulousaine.

d'acquisition. Cela explique l'absence de mesures de pression sur cette période. La station la plus semblable, après tests statistiques, est la station F située sur le toit d'une tour de la résidence dite des "Tours de Seysses". Ce sont donc ses mesures qui sont utilisées dans la figure 3.17 pour le mois de janvier. La POI d'avril a connu un premier jour pluvieux avant un retour du beau temps pour les deux jours suivants. En juin, les trois jours de POI ont été beaux à part sur la soirée du premier jour.

Les parcours de la voiture instrumentée (voir Figure 3.18.c) ont eu lieu sur les trois saisons en parallèle des parcours de mesures physiques. Ce parcours, d'une longueur de 8,5km, a été tracé avec les mêmes objectifs qu'à Paris, à savoir faire des mesures au sein du domaine mais surtout au-delà pour agrandir la zone d'étude et travailler à plus grande échelle que celle très locale du quartier.

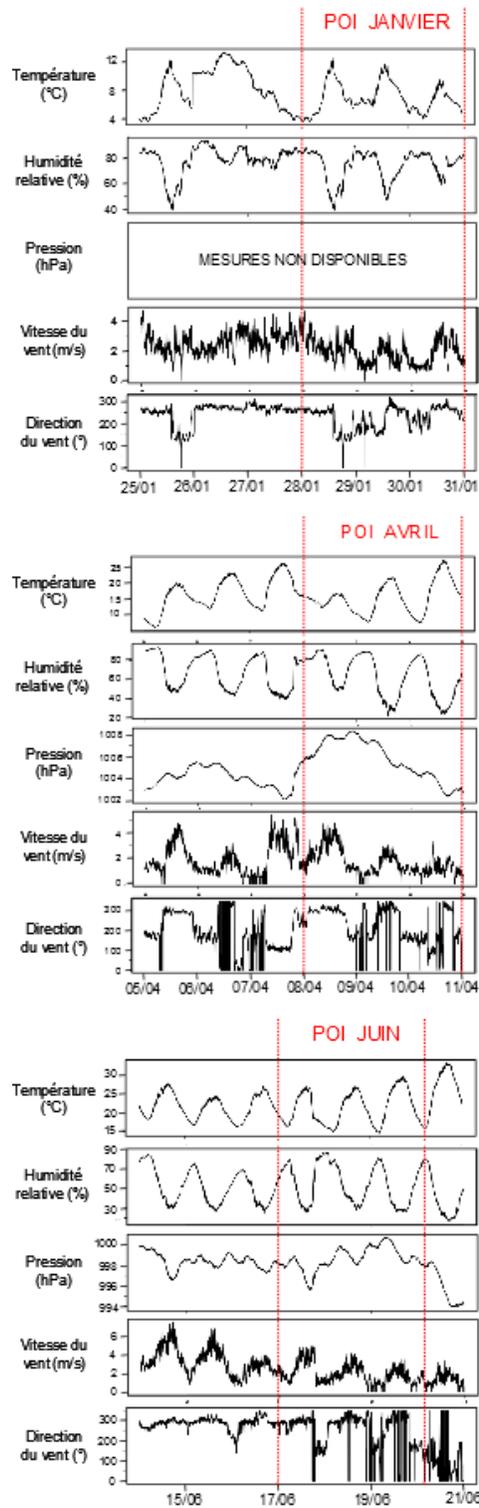


FIGURE 3.17 – Résumé des conditions météorologiques au moment des POI toulousaines issues de la station de référence.

a .Parcours mesures physiques



0 m 250 m

b .Parcours enquête



0 m 250 m

c. Parcours voiture



0 m 700 m

FIGURE 3.18 – Toulouse : a. Tracé du parcours mesures physiques (ligne rouge) et points d'arrêts (épingles jaunes). b. Tracé du parcours enquête (ligne bleue) et points d'arrêts (épingles vertes). c. Tracé du parcours de la voiture instrumentée (vert) et parcours mesures physiques (rouge).

3.6 Conclusion

Les campagnes de mesures du projet EUREQUA nous fournissent une banque de données de mesures de la variabilité de la température sur trois quartiers de trois villes différentes. Sur toutes les mesures, celles qui vont nous intéresser dans le chapitre suivant sont celles issues de la station mobile lors des parcours de mesures physiques ainsi que celles de la station de référence. Les mesures de température ayant lieu à haute fréquence et en balayant un parcours complet, ce sont celles qui donnent une meilleure représentativité des lieux parcourus, contrairement aux stations fixes qui sont sensibles à leur environnement proche.

Chapitre 4

Analyse croisée de la variabilité de température à l'échelle du quartier et des paramètres descriptifs du tissu urbain

4.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de croiser les mesures issues du projet EUREQUA avec des données de morphologie et d'occupation du sol traitées via un système d'information géographique (SIG). Ces données géographiques décrivant la ville sont des données qui sont souvent disponibles à haute résolution dans les villes. Même si elles ne peuvent expliquer la totalité de la variabilité du climat urbain, comme je l'ai expliqué dans le chapitre 1, je vais essayer dans ce chapitre de quantifier leur influence sur la variabilité de la température à l'échelle de la rue.

Pour cela, l'approche sous forme de zone tampon va être appliquée autour de chaque point de mesures. Le principe est de moyenniser différents indicateurs urbains, définis dans la deuxième section de ce chapitre, dans une zone tampon de rayon variable centrée sur les points de mesures. Cette approche a déjà été proposée notamment par PETRALI et al. (2014) mais dans le but de quantifier la variabilité du climat urbain à l'échelle du quartier, donc avec des zones tampons allant jusqu'à 1000 mètres. Mon but étant d'étudier l'influence micro-échelle des indicateurs urbains, les zones tampons auront des diamètres allant de 10 à 100 mètres. L'approche de zonage climatique, la LCZ définie par STEWART (2011) n'est pas applicable dans cette étude car il est préconisé pour les LCZ d'avoir des zones homogènes d'un rayon d'environ 200 mètres. Or, les zones d'études à Paris, Marseille et Toulouse sont de la taille d'une LCZ tout en présentant une forte variabilité au niveau du bâti et de l'occupation du sol en leur sein.

L'originalité de ce travail est d'appliquer à l'échelle de la rue des méthodes utilisées dans la littérature habituellement à l'échelle de la ville ou du quartier. Le but est donc d'étudier les facteurs météorologiques et urbains qui peuvent influencer la variabilité des paramètres météorologiques à l'échelle du quartier, de quantifier le rayon d'influence des indicateurs urbains, d'étudier le comportement de ces indicateurs en fonction des villes et des saisons et de mettre en place une loi statistique permettant de relier la variabilité thermique à fine échelle en fonction des paramètres météorologiques et urbains. L'idée est d'essayer d'obtenir une loi qui serait adaptée pour toutes les saisons et toutes les villes.

4.2 Traitement des mesures météorologiques

La première partie du travail pour croiser les données météorologiques avec les données morphologiques est de traiter les données de température des parcours. Notre but étant d'étudier la variabilité de la température engendrée par des variations de la morphologie du site, il est important de faire l'hypothèse que les températures en début et en fin de circuit sont identiques car le point de départ et d'arrivée le sont. Or, sur un parcours matinal ou en soirée, la température synoptique augmente ou diminue sur une heure de plus de 1°C qui est l'ordre de grandeur de l'amplitude de la variabilité de la température observée sur un parcours. De même, un passage nuageux peut faire chuter la température au milieu d'un parcours. Pour corriger la variation synoptique de la température, j'ai retiré le signal de la température enregistré par la station de référence de chaque campagne de mesure.

La méthodologie pour retirer ce signal est expliquée ci-après.

1. Le signal est coupé en début et en fin de parcours pour retirer le temps de réponse du capteur en entrée et sortie du local où est placée la station (normalement très court pour un fil fin) et le temps nécessaire pour la ventilation du capteur.
2. Le signal de la température de la station de référence est lissé sur cinq minutes.
3. La valeur initiale de la température de la station de référence est retirée au signal complet de manière à ne considérer qu'une variation de température.
4. La variation de température de la station de référence est retirée au signal de la station de mesure mobile.
5. Si la température en fin et en début de parcours ne sont pas identiques, une correction linéaire est appliquée au signal de la station mobile de manière à corriger ce biais.

Considérons le cas du parcours de 9 heures le 10 avril à Toulouse pour illustrer ce travail. Le signal brut complet est tracé en noir dans la figure 4.1.a. Sur la durée totale du parcours, la température augmente de $2,5^{\circ}\text{C}$. Il est donc nécessaire de corriger ce signal. Un plateau de température apparaît sur les 200 premières secondes du parcours (en rouge) suivi d'une chute rapide de la température. Cette chute correspond au début de la marche sur le parcours et donc à une ventilation suffisante du système. Les 200 premières secondes sont donc retirées pour le traitement.

Ensuite, dans la figure 4.1.c, le signal traité de la station de référence (en vert), est retiré au signal de la station mobile (en noir), pour donner une première correction du signal en bleu.

Comme la température en début et fin de parcours ne sont pas identiques (la droite orange représente la température du début du circuit dans la figure 4.1.d), une correction linéaire est appliquée au signal. Le signal final est en rouge dans la figure.

Le travail de correction est effectué uniquement à partir de la station de référence. Il aurait pu être envisagé d'effectuer une correction par rapport au signal des autres stations fixes. Cependant, il s'avère que le signal de la station de référence est le seul à enregistrer des variations synoptiques correspondant à celle de la station mobile. En effet, les autres stations, souvent situées sur des balcons ou dans des jardins peuvent être influencées par leur environnement direct (ombrage, température du bâtiment le plus proche par exemple) et ne pas montrer des variations synoptiques cohérentes avec les signaux de la station mobile ou de la station de référence.

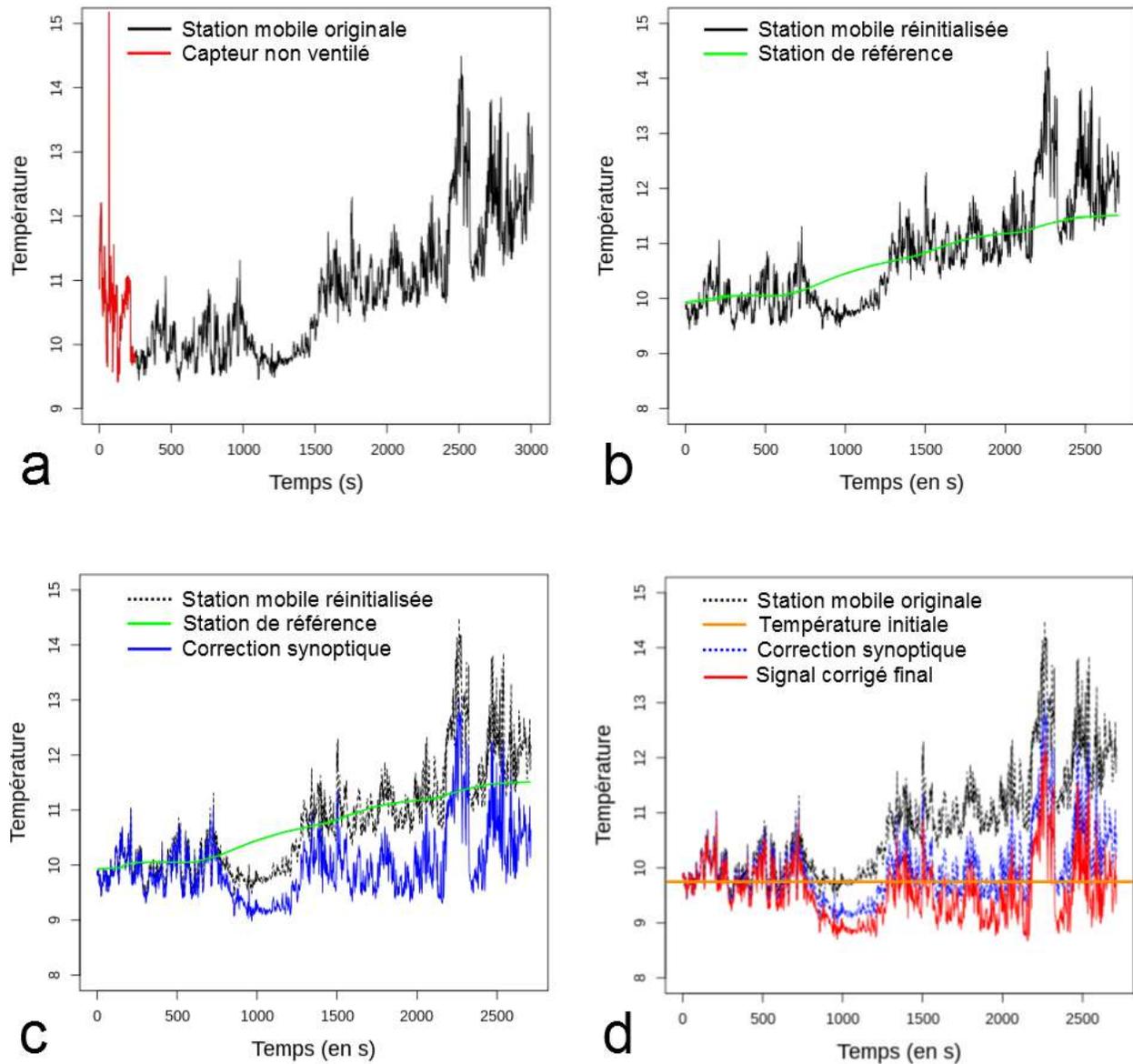


FIGURE 4.1 – Exemple de traitement du signal de température de la station mobile sur le parcours du 10 avril à 9h00 à Toulouse : a. Le signal correspondant au signal du capteur non ventilé (en rouge) est retiré du signal global (en noir). b. Signal de la station mobile réinitialisé (sans la partie non ventilée) en noir et signal de la station de référence lissé sur 5 minutes en vert . c. Signal de la station mobile réinitialisé (en pointillés noirs), signal de la station de référence lissé en vert et signal de la station mobile corrigé de la tendance de la station de référence en bleu. d. Signal de la station mobile réinitialisé (en pointillés noir), température initiale du parcours en orange, signal de la station mobile corrigé de la tendance de la station de référence en pointillés bleus et signal final corrigé linéairement en rouge.

4.2.1 Projection sur un parcours théorique

Pour chaque campagne de mesure un parcours idéal a été défini. Ce parcours est composé de points distants de 20 mètres tout le long du parcours. La station mobile effectuant une acquisition de température toutes les secondes, il est important de réduire le nombre de points de données d'un parcours. Ainsi, avec le parcours théorique, le nombre de points de données est réduit à environ 160 pour chaque parcours. Par ailleurs, le but du projet EUREQUA étant de croiser les signaux de différents phénomènes physiques, il est important que chaque équipe participant au projet travaille avec les mêmes outils. Le fait que tout le monde travaille sur le même parcours théorique permet de faciliter le croisement des données. Les parcours théoriques définis pour chaque ville sont représentés dans la figure 4.3.

Dans un premier temps, la méthode envisagée pour projeter les données sur le parcours était de moyenner tous les points de mesure se situant dans un rayon de 20 mètres autour de chaque point théorique. Cependant, le signal GPS enregistré par la station mobile n'est pas toujours très fiable, notamment à Paris au moment de passer dans des zones denses avec de hauts bâtiments. Le signal GPS peut y être distant de plus de 20 mètres du tracé théorique.

J'ai donc développé une méthode permettant de prendre en compte tous les points de mesures d'un parcours et de corriger la trace GPS pour la projeter sur le parcours théorique. La méthodologie de cette projection est la suivante.

1. Repérer les points d'arrêts d'un parcours grâce à la donnée de vitesse issue du GPS.
2. Associer à chaque point d'arrêt théorique un temps et une durée grâce aux données GPS.
3. Interpoler entre chaque point d'arrêt le temps sur chaque point du parcours.
4. Associer à chaque point théorique les points temporels les plus proches.

Les résultats de cette méthode sont illustrés sur le parcours du 8 octobre à 21 heures à Paris dans la figure 4.2.

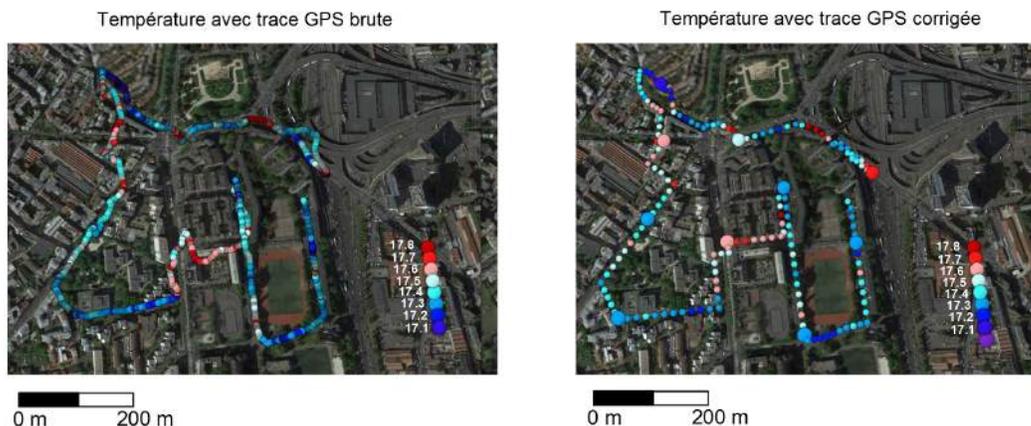


FIGURE 4.2 – Exemple de correction de la trace GPS pour le parcours du 8 octobre à 21h à Paris.

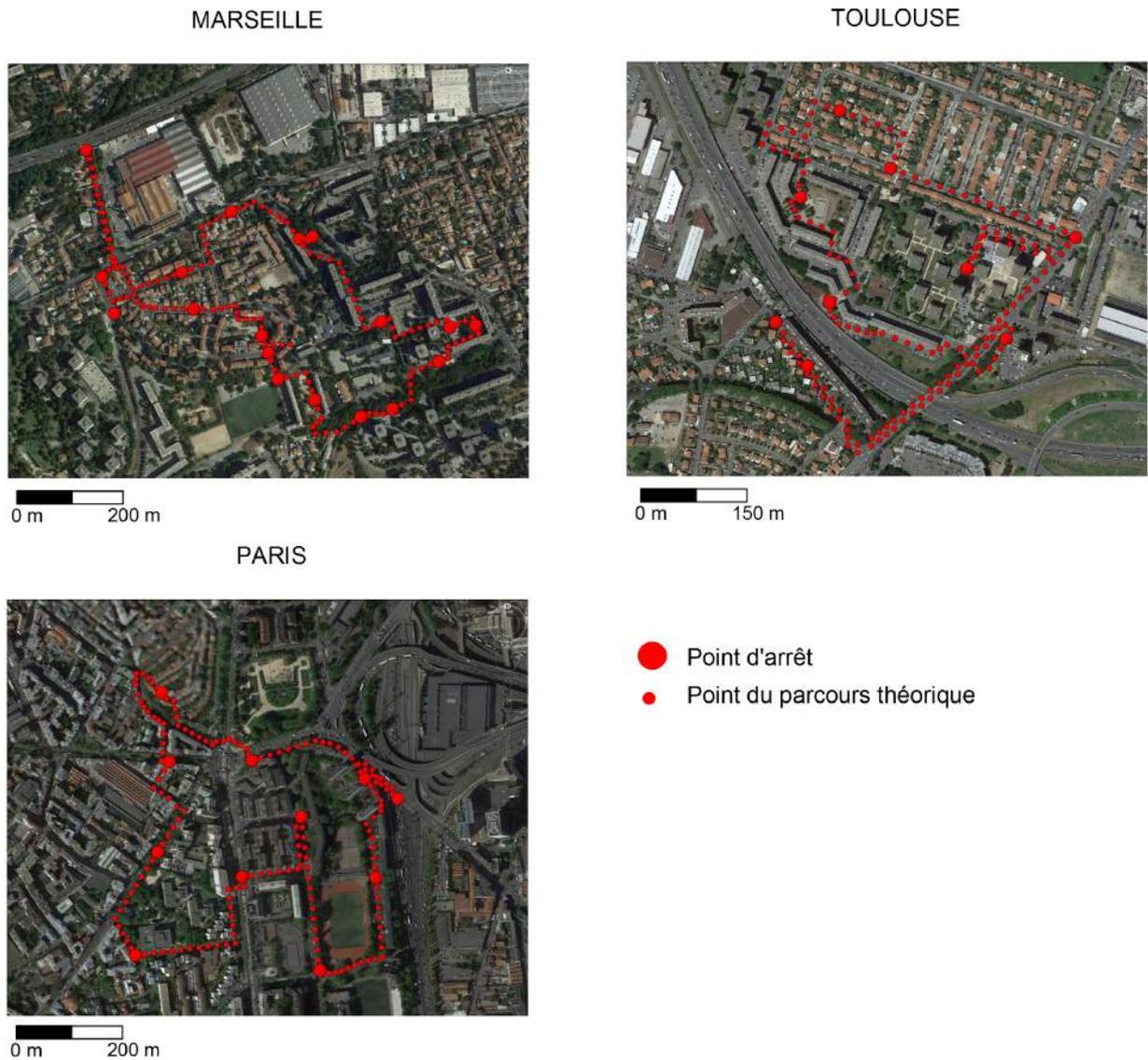


FIGURE 4.3 – Parcours théoriques de mesures physiques de Marseille, Paris et Toulouse. Tous les points sont distants de 20 mètres.

4.3 Analyse des quartiers par différents indicateurs urbains

Le but de ce chapitre est de croiser la variabilité de la température à l'échelle du quartier avec les caractéristiques et les hétérogénéités du paysage urbain. Pour cela, ces hétérogénéités vont être définies à partir d'indicateurs urbains obtenus via une analyse SIG (Systèmes d'Information Géographiques). Ce travail a été fait par Lina Quinteiro lors d'un stage de M2 effectué dans notre

équipe de mars à septembre 2014. Lina a mis en place la méthodologie et a effectué le travail sur les bases de données pour que je puisse ensuite effectuer le croisement entre les données géographiques et la variabilité de la température. Elle a fait ce travail pour les villes de Paris et Marseille. Noémie Gaudio, post-doctorante dans notre équipe, a ensuite repris la méthodologie de Lina pour l'appliquer au cas de Toulouse.

4.3.1 Choix des indicateurs urbains

Les indicateurs urbains sont des paramètres représentant le tissu urbain d'un point de vue morphologique ou d'occupation du sol. La morphologie urbaine influence la température à fine échelle en interagissant avec le rayonnement. En effet, les bâtiments et les rues piègent ces rayonnements, stockent la chaleur et la restituent la nuit. La hauteur des bâtiments peut aussi donner des ombres portées et donc influencer directement sur la température et le confort thermique. Les indicateurs morphologiques choisis sont la densité de bâti, la densité de surface de mur et la hauteur moyenne de bâtiment. La définition précise de ces indicateurs est donnée dans le tableau 4.1. Un facteur morphologique souvent utilisé dans la littérature est le facteur de vue du ciel (sky view factor en anglais). Il n'est pas utilisé ici car impossible à calculer aisément sur un parcours complet à partir des données disponibles. Néanmoins, à l'échelle de la rue ou du quartier sur laquelle nous travaillons, le facteur de vue du ciel n'est pas indispensable au vue des indicateurs morphologiques déjà choisis. Par exemple, la densité de surface de murs correspond à la concentration de murs pouvant capter le rayonnement solaire et donc stocker de la chaleur pendant la journée et la rejeter la nuit. Ce rôle est à peu près identique à celui du facteur de vue du ciel et à l'avantage d'être une entrée directe du modèle TEB.

Les modes d'occupation du sol jouent sur la variabilité de la température car la distribution de surfaces végétales et urbanisées influence les échanges de chaleur et d'humidité entre la surface et l'atmosphère. Les différents modes d'occupations choisis sont la fraction d'eau, de sol nu, de route, de végétation et de parkings et trottoirs. Les fractions de route, de parkings et de trottoirs seront regroupés sous le terme de fraction de surface artificielle imperméable. La fraction de végétation a été d'abord décomposée en trois strates : la strate herbacée, arbustive et arborée car chacun de ces types de végétations peut avoir une influence différente sur le climat urbain. Chaque strate a une hauteur caractéristique différente ce qui rend l'influence de chacune d'elle particulière. L'herbe permet de stocker moins de chaleur en surface et ne modifie que très peu l'écoulement de l'air dans la rue. Les arbustes ont une hauteur caractéristique d'environ un mètre. Leur présence impacte l'écoulement d'air dans la rue et l'évapotranspiration sur le feuillage se fait à hauteur de piéton, ce qui permet de rafraîchir plus efficacement l'air. Les arbres modifient sensiblement l'écoulement de l'air dans la rue et projette des ombres ce qui rafraîchit la température. Il a été choisi de séparer les arbres de rue des arbres de jardin ou de parc. En effet, un arbre de rue modifie la température de la rue en projetant une ombre. Les arbres de jardin sont des indicateurs de surfaces végétalisées et l'influence de cet indicateur se fait donc à plus grande échelle qu'une ombre portée. Les différents modes d'occupation du sol sont renseignés dans le tableau 4.1.

Les indicateurs que nous avons choisi sont semblables aux indicateurs choisis par PETRALLI et al. (2014). Nous avons néanmoins ajouté quelques paramètres comme la surface arbustive, la surface d'eau et de sol nu ainsi que la hauteur moyenne des bâtiments. Par ailleurs, d'autres paramètres explicatifs peuvent être choisis comme la topographie, utilisée par WONG (2014) mais nous avons estimé que sur nos terrains d'études, relativement plats, la topographie ne jouerait

Indicateur		Calcul
Occupation du sol	Fraction de sol nu	Surface d'occupation du sol de la couche considérée divisée par la surface totale de la zone de référence au sol (en %)
	Fraction de strate herbacée	
	Fraction de strate arbustive	
	Fraction de strate arborée (rue)	
	Fraction de strate arboré (privé)	
	Fraction de strate végétale	
	Fraction de routes	
	Fraction de bâtiment	
	Fraction d'eau	
Fraction de trottoirs et parkings		
Morphologie urbaine	Densité de bâti	Volume total de bâtiments intersectés dans la zone de référence divisé par la surface totale de la zone de référence (m^3/m^2)
	Densité de surface de murs	Surface totale de murs de bâtiments intersectés dans la zone de référence divisée par la surface totale de la zone de référence (m^2/m^2)
	Hauteur moyenne des bâtiments	Volume de bâtiments intersectés dans la zone référence divisée par la surface totale de ces bâtiments (m)

TABLE 4.1 – Indicateurs d'occupation du sol et de morphologie urbaine choisis pour l'étude.
Source : Lina Quinteiro.

pas un grand rôle pour l'explication de la variabilité de la température.

La présence et l'intensité de trafic est aussi un indicateur relevé par WONG (2014). Des données de trafic ont effectivement été relevées au cours des campagnes de mesures EUREQUA, mais elles n'ont pas été utilisées dans cette étude car elles n'étaient pas disponibles sur l'ensemble des parcours de mesures physiques.

Enfin, un des paramètres important pouvant impacter la température à fine échelle est la propriété thermique et radiative des matériaux de construction et du sol. En effet, cette propriété influence la capacité de stockage de chaleur des infrastructures urbaines ainsi que la réflexion du rayonnement solaire. Ces paramètres ne seront pas pris en compte dans cette étude, car non disponibles dans notre base de données et leur absence constituera une des sources d'incertitude des résultats.

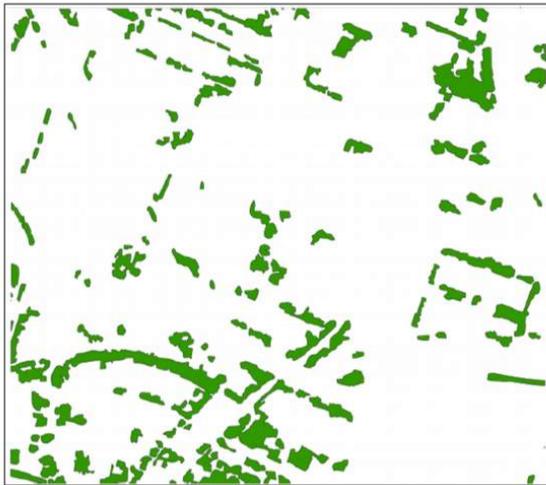
4.3.2 Mise en forme des données SIG

Les données disponibles pour l'analyse SIG sont les bases de données de l'IGN (Institut Géographique National) : la BD TOPO de 2013 et la BD ORTHO de 2011. La BD TOPO contient des informations sous forme de vecteurs concernant entre autres le réseau routier, les bâtiments et la végétation. Cependant, pour une étude à l'échelle de la rue, la précision concernant la couche de végétation fournie par l'IGN n'est pas suffisante. En effet, pour les données des villes de Paris et Toulouse, une seule couche de végétation est disponible, alors qu'une distinction entre végétation herbacée, arbustive et arborée est nécessaire pour l'étude. De plus, la végétation n'est présente dans la base de données que dans les espaces publics et non dans les jardins privés. Pour Marseille et Toulouse, la BD TOPO fournit la végétation par typologie de classe, ce qui a simplifié en partie le travail. Pour compléter ces bases de données, des données de la ville de Toulouse ou de Paris ont été utilisées pour en extraire par exemple la position des arbres de rue.

Un important travail de numérisation a donc dû être effectué pour compléter les données et séparer la couche de végétation en couches arborées, arbustives, herbacées et en sol nu. Cette tâche demandant une précision importante, elle a dû être effectuée manuellement. Il a été envisagé de la faire automatiquement par des logiciels de télédétection. Cependant, cela aurait été trop complexe pour la prise en compte des arbres de rue et le choix a été fait de ne travailler qu'avec des logiciels libres sous Linux. Ce travail a donc été effectué avec le logiciel OrbisGIS (www.orbisgis.org) développé par l'IRSTV (Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville) de Nantes. Ce logiciel est particulièrement adapté pour la modélisation scientifique en ville et est utilisé par toutes les équipes de recherche du projet EUREQUA. Ce travail manuel est acceptable car les zones d'études ont une surface d'environ $2km^2$.

Au final, après traitement, par exemple pour Toulouse, la différence entre la couche initiale et la couche finale réalisée manuellement est nette (voir Figure 4.4). Statistiquement, sur le domaine, cela se traduit par un gain d'environ 30 ha sur une surface initiale de végétation de 10 ha (voir le tableau se trouvant dans la figure 4.4).

Couche de végétation donnée par la BD TOPO



■ Végétation totale

Couche de végétation numérisée manuellement



■ Arbres
■ Herbe

■ Sol nu
■ Arbustes

Strate	BD TOPO		Numérisé	
	(Aire m ²)	(%)	(Aire m ²)	(%)
Arbres de jardin	Pas de distinction		42 129	4,86
Arbres d'alignement			75 948	8,77
Arborée totale	97 075	11,21	118 077	13,63
Arbustive			42 161	4,87
Herbacée			183 367	21,17
Sol nu			72 872	7,41
Total	97 075	11,21	416 477	47,08

FIGURE 4.4 – Bilan de la numérisation pour la couche SIG de végétation, Toulouse. Source : Noémie Gaudio.

Ensuite, pour obtenir l'ensemble des couches nécessaires au calcul des indicateurs, différentes opérations ont été réalisées sur l'information fournie par la BD TOPO et sont décrites dans la figure 4.5. Ce travail a été effectué à l'IRSTV par Camille Briend en stage sous la direction de Gwendall Petit.

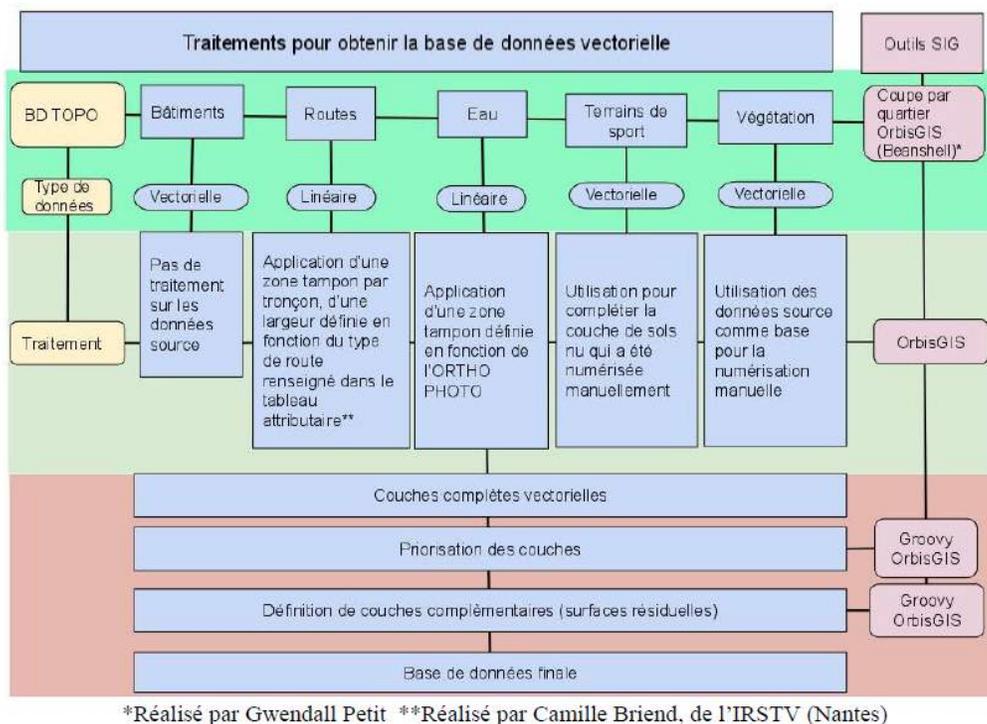


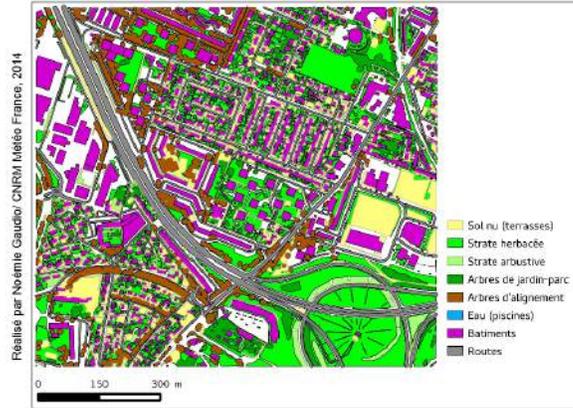
FIGURE 4.5 – Traitement pour obtenir les bases de données vectorielles. Source : Lina Quinteiro.

Comme les différentes couches de la base de données peuvent se superposer, il est important de définir quelques règles de priorité. Ainsi les surfaces de routes et de végétation se superposant au bâti sont supprimées car nous considérons que la forme et le signal donné par un bâtiment est le plus important au niveau du signal thermique. Dans la même logique, les surfaces de routes se superposant à de la végétation sont aussi supprimées.

Le résultat final pour chaque ville est représenté dans la figure 4.6.

Les zones ne contenant pas de polygones ou d'information et laissées en blanc sont renseignées comme de l'indéfini. Après analyse avec la BD ORTHO (voir Figure 4.7), ces zones correspondent principalement à des trottoirs ou des parkings, donc des surfaces artificielles imperméables. Elles seront donc associées à la surface occupée par la route pour former une couche de surface artificielle imperméable.

Toulouse



Paris



Marseille

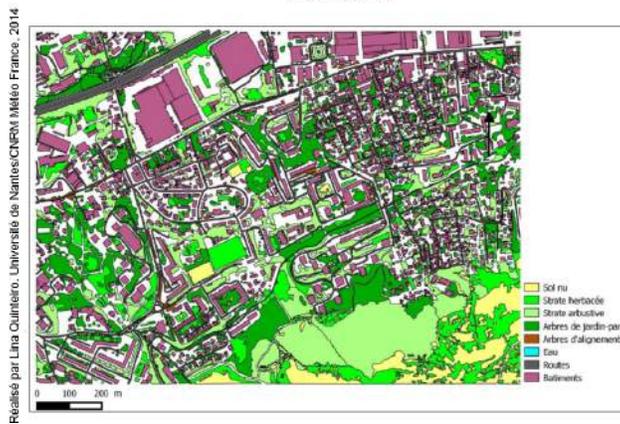


FIGURE 4.6 – Couches BD TOPO et BD TOPO 'enrichie' de Toulouse, Marseille et Paris.
Source : Lina Quinteiro et Noémie Gaudio.

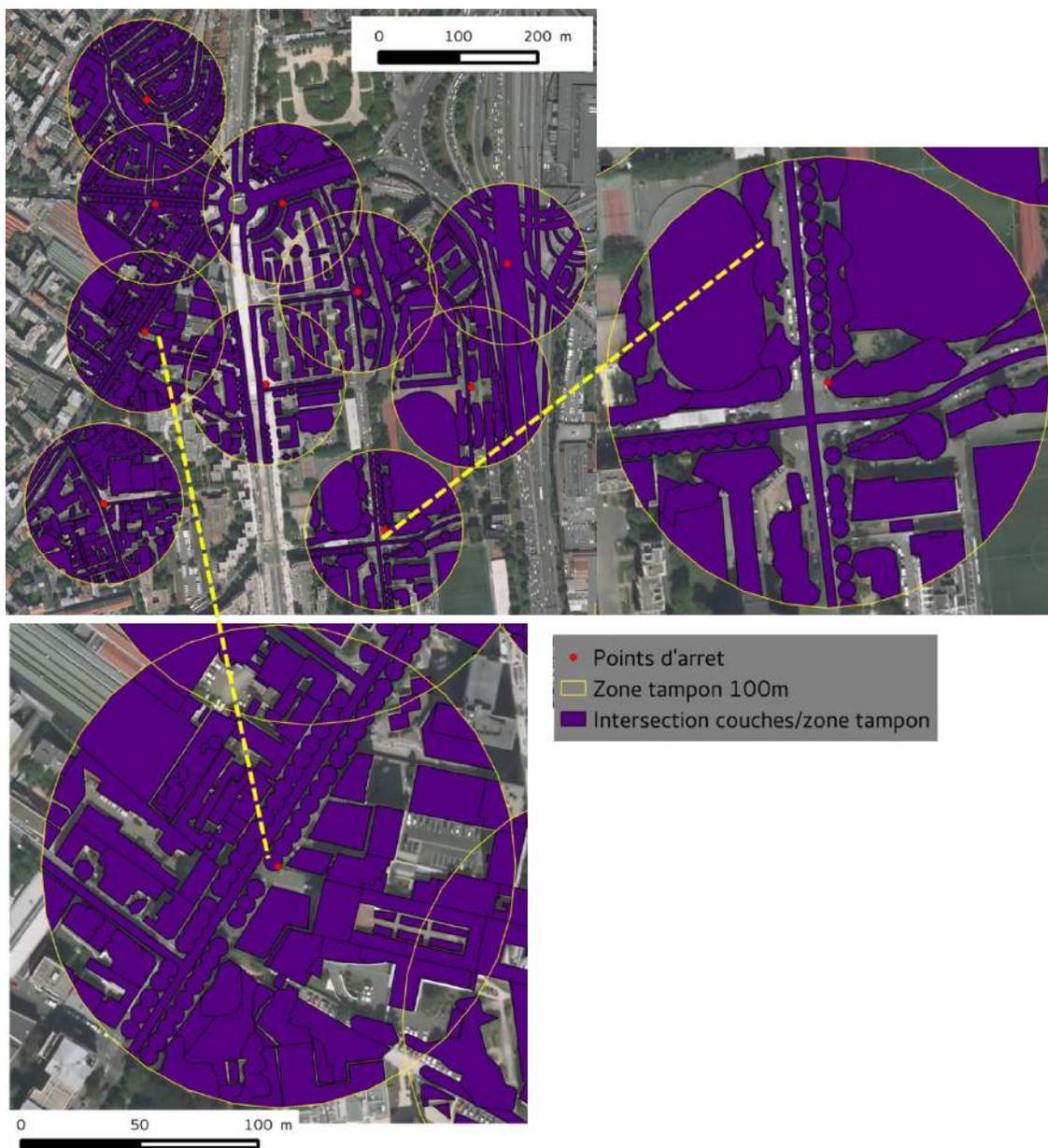


FIGURE 4.7 – Identifications de zones vides avec l'ORTHO PHOTO autour des points d'arrêt à Paris. Source : Lina Quinteiro.

4.3.3 Agrégation des indicateurs dans des zones tampons

4.3.3.1 Méthodologie

Des zones tampons circulaires, de rayon allant de 10 à 100 mètres par pas de 10 mètres, ont été définies autour des points des parcours théoriques et des stations fixes. Sur chaque zone tampon (ou buffer), les indicateurs urbains définis précédemment sont agrégés afin d'étudier leur influence éventuelle sur la variabilité de la température.

Pour les paramètres d'occupation du sol, l'agrégation se fait simplement en divisant la surface occupée par le paramètre dans la zone tampon par la surface totale de la zone tampon.

Pour les paramètres morphologiques, la procédure est la même pour chaque paramètre. Par exemple, pour la densité de bâti, qui représente le volume de bâtiment intersecté sur la zone tampon divisé par la surface de la zone (exprimée en m^3/m^2), la méthodologie suivante est appliquée.

1. Calcul de la surface de bâtiments intersectés par polygone.
2. Multiplication de la surface du polygone intersecté par sa hauteur.
3. Somme des volumes calculés précédemment.
4. Division du volume total de bâtiments par la surface de la zone tampon.

Cette méthodologie est illustrée dans la figure 4.8. Ainsi, nous avons à disposition pour les

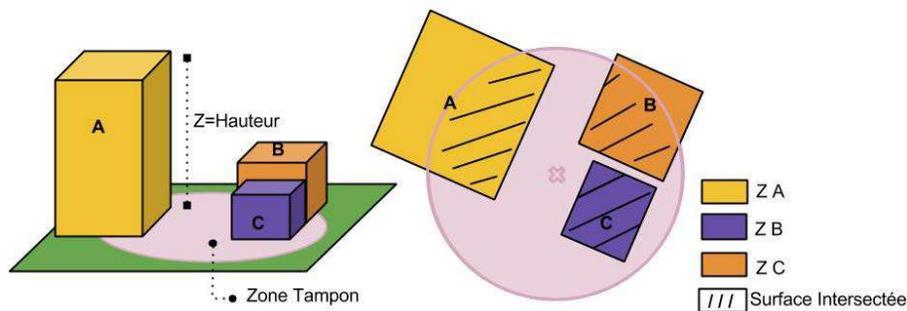


FIGURE 4.8 – Identifications de zones vides avec l'ORTHO PHOTO autour des points d'arrêt à Paris. Source : Lina Quinteiro.

trois villes les données d'occupation du sol et morphologiques dans des zones tampons circulaires de rayon allant de 10 à 100 mètres par pas de 10 mètres centrés sur chaque point des parcours théoriques et sur chaque station fixe.

4.3.3.2 Illustrations des indicateurs par points d'arrêts

Pour illustrer les résultats de l'agrégation des indicateurs dans chaque zone tampon, les paramètres d'occupation du sol sont représentés pour des buffers de 20, 50 et 100 mètres autour de chaque point d'arrêt du parcours parisien dans la figure 4.9. L'importance de la taille de la zone tampon est bien illustrée par le tampon 2 par exemple, composé uniquement de surface imperméable à 20 mètres et qui fait apparaître une plus grande variété de sols à 50 et 100 mètres

comme le sol nu ou la végétation. La première étape du travail d'analyse sera donc de trouver la distance pertinente pour l'influence de chaque indicateur urbain.

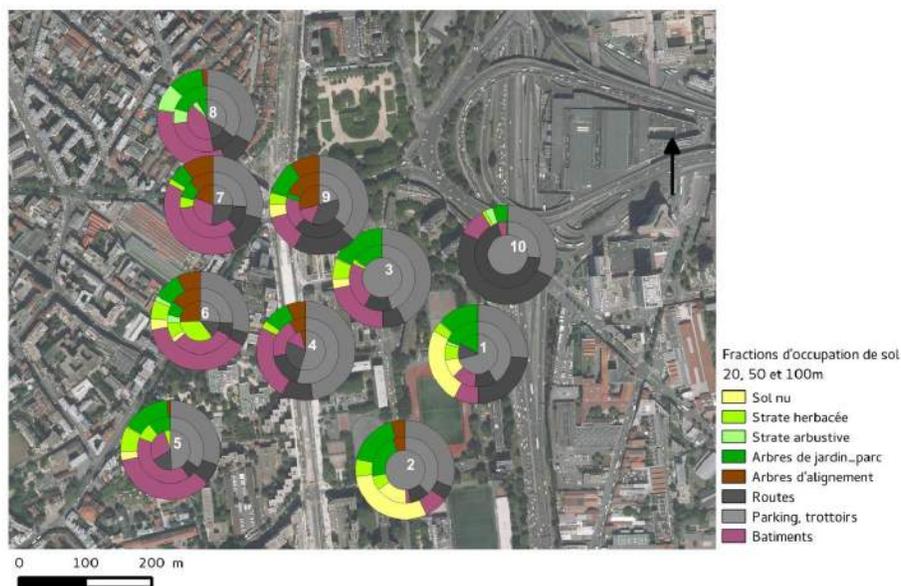
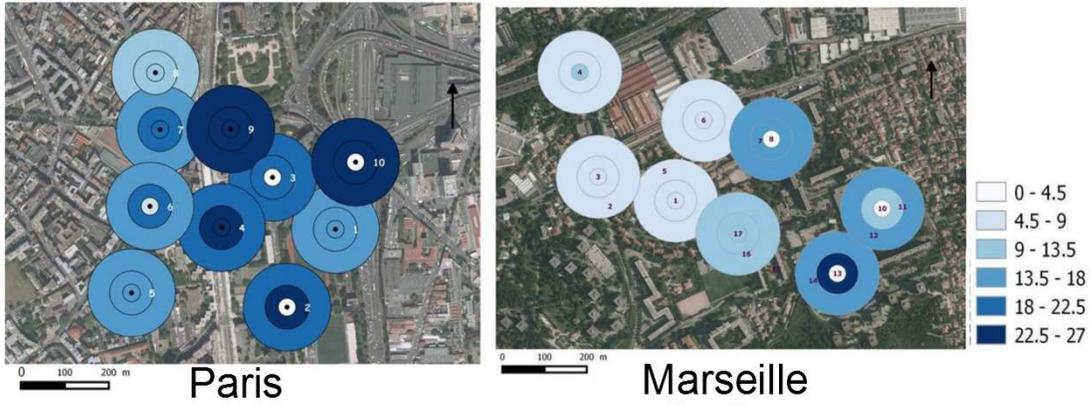


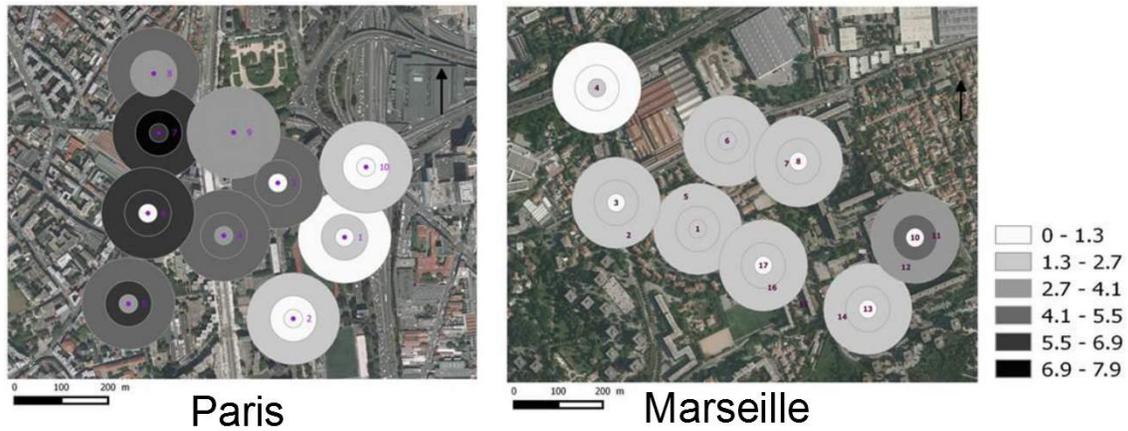
FIGURE 4.9 – Fractions d'occupation du sol calculées pour les zones tampon de 20, 50 et 100 m autour des points d'arrêt du parcours à Paris. Source : Lina Quinteiro.

Pour les paramètres morphologiques, une comparaison entre les villes de Paris et Marseille est illustrée pour chaque paramètre dans la figure 4.10. On constate que le quartier parisien est en moyenne beaucoup plus dense que le quartier marseillais et que les bâtiments y sont en moyenne plus hauts. Par ailleurs, on remarque aussi que les zones où les bâtiments sont les plus hauts ne sont pas nécessairement celles où la densité de bâti est la plus forte, comme à l'est du quartier parisien où les bâtiments sont élevés mais dispersés. Pour Marseille, la densité de surface de mur semble être à peu près homogène sur l'ensemble du terrain d'étude alors qu'à Paris, il existe un fort gradient est-ouest, expliqué par la présence de terrains de sport et du périphérique à l'est du domaine.

Hauteur moyenne des bâtiments (m)



Densité bâtie (m^3/m^2)



Densité de surface de murs (m^2/m^2)

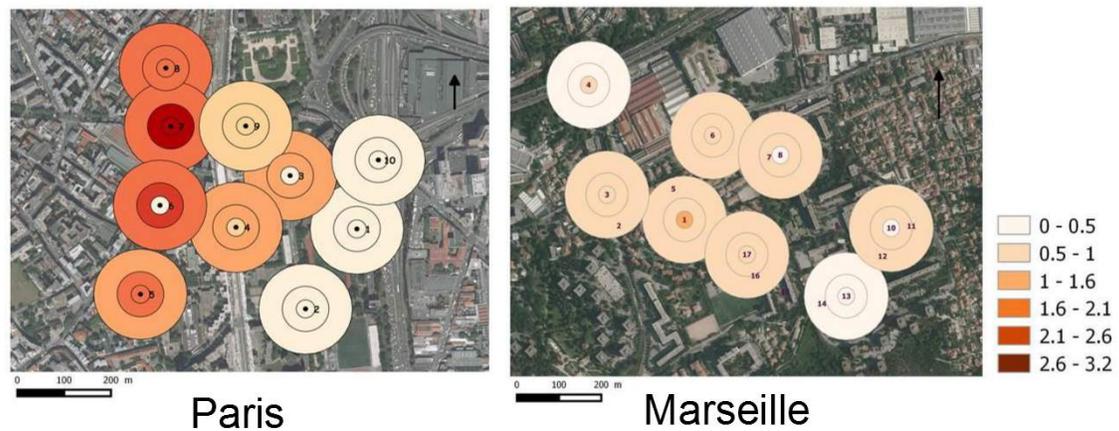


FIGURE 4.10 – Paramètres morphologiques calculés pour les zones tampon de 20, 50 et 100 m autour des points d'arrêt du parcours à Paris et Marseille. Source : Lina Quinteiro.

4.4 Croisement des indicateurs urbains et de la variabilité de la température

4.4.1 Méthodologie

L'hypothèse de travail que j'ai fixée pour traiter la variabilité de la température et la croiser avec les données SIG est de considérer que l'amplitude du signal sur un parcours était due aux conditions météorologiques (rayonnement solaire, température, vent, etc...) et que la variabilité spatiale du signal était due aux variabilités morphologiques et d'occupation du sol (voir Figure 4.11).

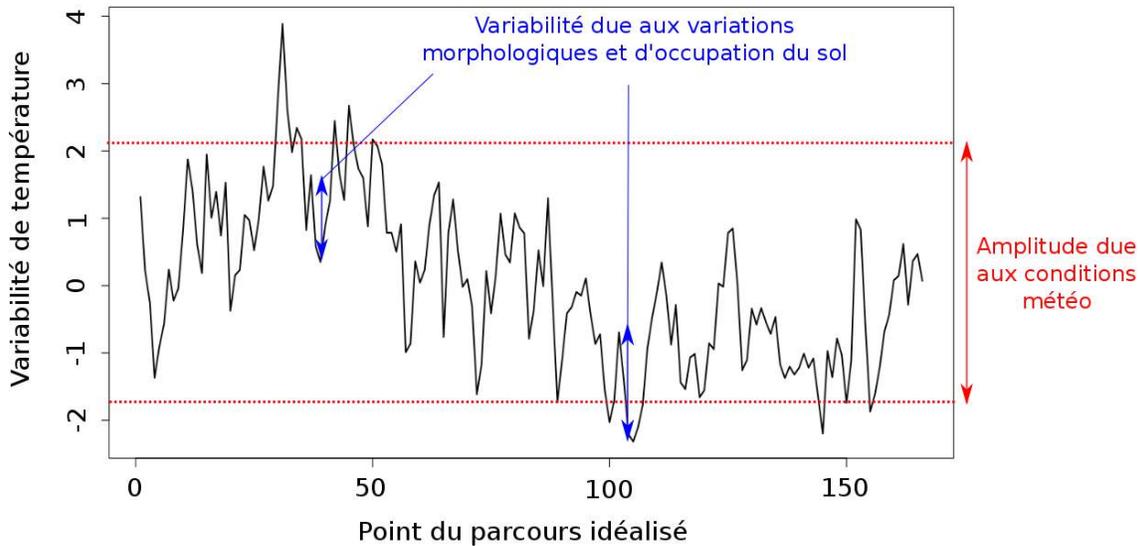


FIGURE 4.11 – Variabilité de température sur parcours idéalisé à Marseille le 19 juin à 15 heures (la valeur médiane a été ôtée au signal de température traité).

Cette hypothèse est une hypothèse très forte. Plusieurs causes de la variabilité de température sont mises de côté, notamment l'advection due au vent et aux flux turbulents qui sont modélisés en CFD et peuvent être importants à cette échelle ou la nature des matériaux qui composent les bâtiments ou la route, qui n'était pas disponible dans nos bases de données.

Dans le modèle fixé, la variabilité $\Delta T_t(x)$ de la température (qui est définie comme la température sur un parcours à laquelle j'ai ôté la valeur médiane) s'écrit donc :

$$\Delta T_t(x) = Amp(t) \times Var(x) \quad (4.1)$$

avec t l'heure du parcours, qui correspond en fait plutôt aux conditions climatiques, x la localisation du point qui s'exprime en fonction des indicateurs urbains, Amp qui traduit l'amplitude thermique du parcours et Var sa variabilité spatiale. Le but est d'essayer de trouver une loi qui soit applicable sur toutes les villes.

4.4.2 Influence des conditions météorologiques

Dans un premier temps, l'amplitude du signal en fonction des conditions météorologiques va être étudiée en prenant tous les parcours de chaque ville. Pour cela, j'ai choisi une méthode de régression linéaire multiple dite 'forward'. Le principe de cette régression est de trouver parmi une liste de critères ceux qui sont explicatifs statistiquement. Pour cela une régression linéaire est appliquée pour chaque paramètre. Celui qui minimise l'AIC le critère d'information d'Akaike (AIC) et qui valide le test t de Student avec un critère fixé 0,1, qui signifie qu'une variable est significative à 90% est retenu. Ensuite une régression linéaire se fait en superposant la variable retenue et les variables restantes. La variable qui minimise encore l'AIC et qui se soumet au test t de Student est retenue. La méthode est appliquée jusqu'à ce que les variables restantes ne permettent plus d'abaisser la valeur de l'AIC ou qu'elles ne remplissent plus le critère de Student.

Les variables explicatives retenues pour expliquer l'amplitude thermique sont les paramètres mesurés avec principalement la station de mesure de référence et avec la station mobile : le rayonnement solaire descendant, la température médiane du parcours, l'humidité médiane du parcours, la vitesse du vent, la couverture nuageuse, le flux infra-rouge descendant, le rayonnement solaire intégré sur douze heures précédant le parcours (pour avoir une estimation de la chaleur stockée). Ces valeurs sont prises au début de chaque parcours car les parcours sont corrigés de manière à avoir les mêmes valeurs à leur début et à leur fin.

Différentes définitions de l'amplitude ont été testées : l'amplitude entre la valeur maximale et la valeur minimale du parcours (Amp_{tot}), mais aussi l'amplitude entre la valeur maximale et la valeur minimale du parcours ôté de ces 5% (Amp_{90}) et 10% (Amp_{80}) de valeurs les plus fortes et les plus faibles. Le fait de retirer les valeurs extrémales permet de s'affranchir d'effets très locaux qui ne seraient pas représentatifs de la variabilité à l'échelle du parcours.

Les paramètres retenus par la régression multiple pour chaque amplitude sont à chaque fois le rayonnement global Ray , la température médiane T_{med} , la vitesse du vent V_s et la couverture nuageuse $Couv$. L'humidité ne remplit pas le test t de student et les autres paramètres ne minimisent pas l'AIC.

L'amplitude Amp_{90} donne un nettement meilleur R^2 que l'amplitude totale Amp_{tot} (respectivement 0,78 contre 0,57), et le R^2 donné pour Amp_{80} et Amp_{90} sont quasiment identiques (0,776 et 0,779 respectivement), justifiant le fait de faire abstraction des valeurs extrémales de chaque parcours. Les résultats pour Amp_{90} sont présentés dans le tableau 4.4.2. Les signes des coefficients de chaque paramètre sont intuitifs. Plus le rayonnement est fort et plus la température est élevée plus l'amplitude thermique est forte. La couverture nuageuse et le vent ont au contraire tendance à faire baisser cette amplitude.

Le modèle donnant l'amplitude thermique d'un parcours en fonction des paramètres climatiques s'écrit donc :

$$Amp_{90} = 0,58 + 0,0015Ray + 0,053T_{med} - 0,16V_s - 0,041Couv \quad (4.2)$$

La figure 4.12 compare les valeurs mesurées avec celles de la modélisation avec une couleur différente par ville.

L'hypothèse d'attribuer l'amplitude aux paramètres météorologiques est donc confirmée par les résultats issus de la régression linéaire multiple. J'étudierai par la suite la variabilité de température normalisée par son amplitude. Cela permettra de pouvoir comparer entre eux tous les parcours indépendamment des conditions météorologiques.

Paramètre	Coefficient	$P(> t)$
Ray	0,0015	2.10^{-15}
T_{med}	0,053	3.10^{-10}
V_s	-0,16	7.10^{-4}
$Couv$	-0,041	2.10^{-2}
Intercept	0,58	2.10^{-4}

TABLE 4.2 – Résultat de la régression linéaire multiple pour l'amplitude Amp_{90} . Le coefficient R^2 pour cette régression est de 0,78.

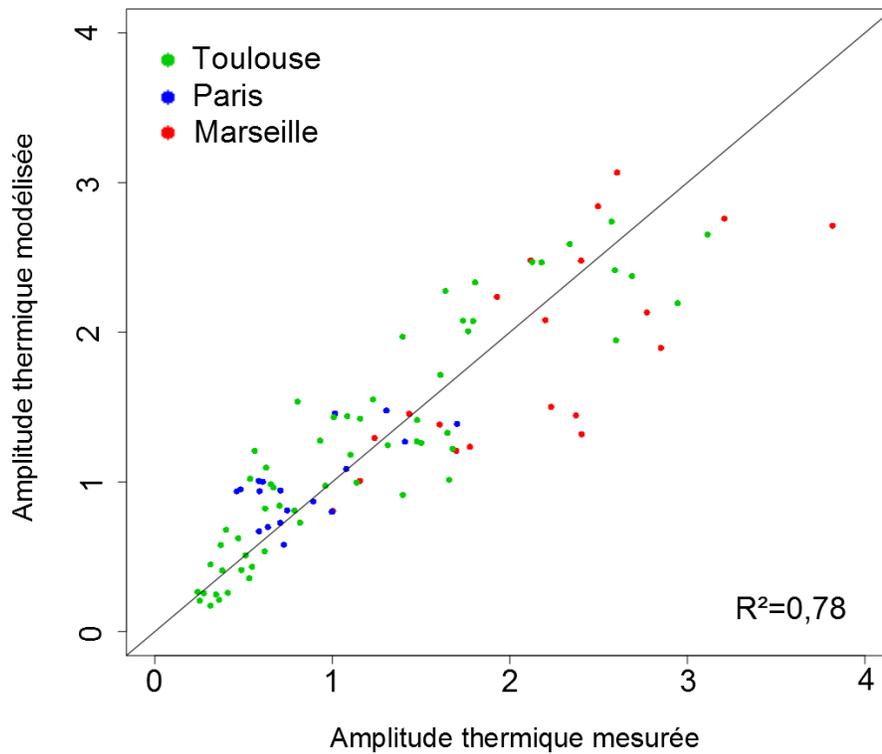


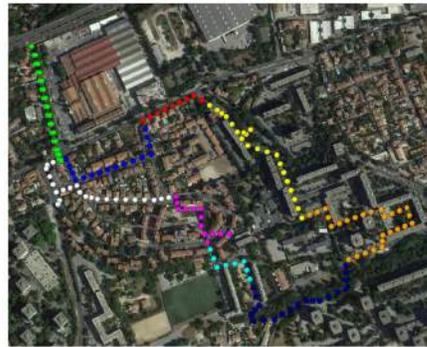
FIGURE 4.12 – Comparaison de l'amplitude Amp_{90} mesurée et modélisée pour toutes les villes étudiées.

4.4.3 Zonages sur le parcours réduit

Les premières tentatives de régressions multiples linéaires pour trouver un lien entre variabilité normalisée et indicateurs urbains ont donné des résultats statistiques très faibles. En effet, sur un parcours idéalisé, le signal est très bruité, à cause d'effets très locaux (ombrages ponctuels, flux turbulents à fine échelle entre autres). J'ai donc décidé de créer de manière 'experte' 9 zones pour chaque ville contenant entre 5 et 30 points de parcours idéalisé. Ces zones sont choisies par typologie de paysages (passant près d'un parc, d'un stade, sous des arbres, au milieu d'immeuble, le long d'une route passante ou au milieu d'une zone dense). Les zones choisies et regroupées sont illustrées dans la figure 4.13. L'approche LCZ n'a pas pu être appliquée ici car la zone est très diversifiée sur une zone trop restreinte. STEWART et al. (2012) recommande en effet qu'une LCZ ait un rayon minimum d'environ 200 mètres, ce qui fait une surface qui recouvre entièrement les zones d'études.

Pour avoir un aperçu des caractéristiques morphologiques de chaque zone construite, j'ai choisi d'agréger les indicateurs urbains dans une zone tampon de 50 mètres. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.3 en anomalie d'indicateur par rapport à la moyenne sur le parcours. Cela permet de comparer les villes entre elles, en faisant l'hypothèse que ce qui caractérise la variabilité de température au sein d'un quartier est par exemple l'anomalie de la fraction de végétation par rapport à sa moyenne et non sa valeur absolue. Ainsi, une zone ayant une fraction de végétation moyenne de 30% dans le quartier parisien végétalisé à environ 15% , pourra être comparée à une zone végétalisée à 40% à Toulouse où la moyenne est de 20%. Le rayon d'influence de chaque paramètre sera déterminé dans le paragraphe suivant. Dans l'annexe B, chaque zone est présentée par une vue aérienne, une vue depuis la rue et les indicateurs urbains agrégés dans un rayon de 50 mètres.

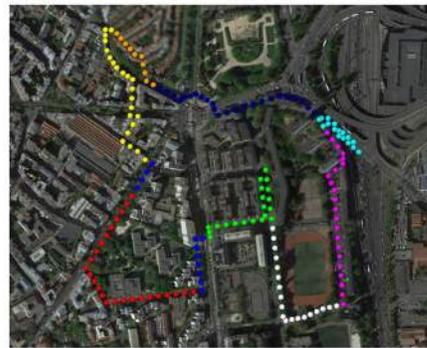
Marseille



0 m 200 m

- Jardins partagés (JARD)
- Rue de Vienne (VIEN)
- Pont (PONT)
- Rue de Miramar (MIRA)
- Boulevard Valbarelle (VALB)
- Château Saint-Jacques (STJA)
- Ilots (ILOT)
- Canal (CANA)
- Stade (STAD)

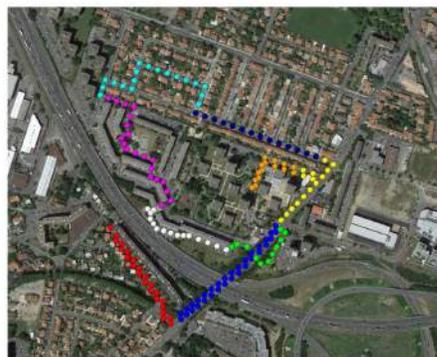
Paris



0 m 200 m

- Cité Python (PYTH)
- Stade (STAD)
- Rue Veber (VEBE)
- Grands boulevards (GRDB)
- EHPAD (EHPA)
- Rue de la Py (RUPY)
- Campagne à Paris (CAMP)
- Porte de Bagnolet (BAGN)
- Périphérique (PERI)

Toulouse



0 m 200 m

- Cité Tabar (CITE)
- Mur anti-bruit (MURA)
- Bordelongue (BORD)
- Pont rocade (PONT)
- Rue de Bruxelles (BRUX)
- Route de Seysses (SEYS)
- Tours de Seysses (TOUR)
- Rue de la Vendée (VEND)
- Rue de la Vienne (VIEN)

FIGURE 4.13 – Zones choisies par expertise pour chaque ville sur chaque parcours idéalisé.

Ville	Lieux	VEGE	ARBUS	HERB	AR_JAR	AR_ALI	SOLNU	ROUTE	BATI	DB	DSM	HM
Marseille	JARD	-6,4	-4,8	5,8	-7,4	0,1	-0,4	10,1	-3,0	-0,02	0,01	0,7
	VIEN	-18,2	-8,1	-1,6	-8,6	-0,3	-0,4	9,2	9,8	-0,32	0,08	-6,0
	PONT	-5,3	0,2	-2,8	-2,7	-0,3	-0,4	6,7	-0,4	-0,51	-0,02	-4,0
	MIRA	-8,0	-0,9	-2,2	-4,9	-0,3	-0,4	-3,9	12,8	0,26	0,38	-4,8
	VALB	4,7	4,9	0,3	-0,6	-0,3	-0,4	-4,6	0,3	-0,48	-0,04	-4,2
	STJA	5,0	-7,6	0,5	12,1	0,1	-0,4	0,2	-4,5	0,75	0,00	7,0
	ILOT	1,5	-2,0	-0,6	4,2	1,2	2,4	-8,4	3,1	1,17	0,10	3,3
	CANA	24,1	13,4	4,0	6,6	-0,3	-0,4	-13,4	-11,5	-0,81	-0,33	5,2
	STAD	3,5	14,3	2,4	-13,2	-0,3	-0,4	3,4	-5,8	-0,05	-0,06	2,9
	Moyenne	27,2	10,4	2,8	14	0,27	0,4	53	18,7	1,98	0,72	11,8
Paris	PYTH	5,5	-0,6	0,6	5,5	-5,3	7,1	1,9	-9,2	-1,62	-0,72	-3,2
	STAD	2,8	-1,2	0,3	3,6	-1,2	16,4	-1,6	-16,4	-3,23	-1,02	-6,5
	VEBE	-8,0	-1,1	-1,7	-5,1	-1,6	-4,1	9,6	4,1	1,60	0,30	4,2
	GRDB	-7,0	1,5	-1,6	-6,9	8,4	-4,1	-3,0	5,8	1,40	0,54	2,0
	EHPA	12,6	-1,0	6,6	7,0	-0,2	-1,3	-20,1	9,0	0,71	0,29	-2,7
	RUPY	-1,0	0,4	-0,6	-0,8	-0,8	-4,1	-12,2	18,2	3,36	1,22	0,5
	CAMP	10,0	8,3	-2,8	4,5	-5,1	-4,1	-9,3	8,4	-0,13	0,70	-5,5
	BAGN	-4,8	-1,1	-1,8	-1,9	7,7	-2,0	9,2	-10,2	-1,57	-0,55	3,2
	PERI	-9,4	0,3	-1,4	-8,3	-5,3	-4,1	27,2	-8,3	-1,24	-0,48	3,6
	Moyenne	16,5	1,1	2,8	12,6	5,3	4,1	53,9	20,1	3,77	1,18	18
Toulouse	CITE	-11,2	-0,9	-8,0	-2,2	6,9	5,7	-8,7	5,6	1,15	0,28	1,6
	MURA	-7,7	-3,4	-2,5	-1,7	-1,2	-6,8	11,4	-5,6	-0,13	-0,12	3,8
	BORD	-7,3	-3,7	-2,7	-0,9	15,5	4,9	0,4	-12,1	-0,74	-0,22	8,3
	PONT	-2,6	-4,1	3,3	-1,8	9,2	-3,0	10,1	-13,2	-1,53	-0,41	-1,8
	BRUX	-3,0	3,8	-6,8	0,0	0,1	3,0	0,5	4,1	0,99	0,15	1,9
	SEYS	-3,4	-1,9	0,5	-1,9	-6,4	-2,9	0,6	5,8	0,74	0,15	0,3
	TOUR	20,5	1,6	11,3	7,6	-14,4	-3,4	-7,9	3,7	0,82	0,21	1,5
	VEND	7,5	3,7	0,5	3,3	-14,2	3,3	-4,5	10,1	-0,43	-0,02	-6,4
	VIEN	16,4	7,0	8,4	1,0	-9,9	2,8	-7,9	8,1	-0,22	0,10	-5,0
	Moyenne	21,3	4,5	13,8	2,9	14,4	8,1	38,8	17,4	2,01	0,58	12,1

TABLE 4.3 – Anomalies par rapport à la moyenne des indicateurs urbains pour chaque zone de chaque ville du projet EUREQUA.

4.4.4 Signal thermique des zones choisies

Pour chaque zone déterminée au paragraphe précédent, j’ai tracé la variabilité de température normalisée pour chaque parcours. STEWART (2011) recommande pour étudier le signal thermique d’une LCZ de s’affranchir des données en bord de LCZ qui peuvent être influencées par flux turbulent par la zone adjacente. J’ai appliqué cette recommandation pour moyenniser la température sur chaque zone en m’affranchissant des données des deux points de bord de chaque entrée et sortie de zone. Les graphes représentant la variabilité de température normalisée en fonction de l’heure pour chaque POI ont été placés dans l’annexe C. À la lecture de ces graphes, j’ai décidé de regrouper les températures en deux groupes temporels :

- le jour, qui regroupe les données des parcours de 9h à 18h ;
- la nuit, qui regroupe les données de 21h à 6h.

L’idée derrière cela est de considérer que certains paramètres comme la densité de bâti ou la végétation haute n’ont pas le même rôle ni les mêmes effets le jour et la nuit. Sur certains lieux, comme la rue de Bruxelles (BRUX) à Toulouse ou la rue de la Py à Paris (RUPY), des effets d’ombrages se distinguent nettement le matin et l’après-midi respectivement. J’ai décidé de ne pas prendre en compte ces mesures dans la suite de mon étude statistique car elles donnent une variabilité négative à un lieu qui a une variabilité positive le reste de la journée. J’expliquerai dans le chapitre 5 comment prendre en compte physiquement les effets d’ombrage avec le modèle TEB. Le passage le long du canal à Marseille (CANA) est un passage ombragé sous les arbres, mais il est aussi très végétalisé. J’ai pris la décision de le laisser tel quel dans le traitement des données en partant de l’idée que la végétation y jouait un rôle prépondérant. Un terme dû à l’ombrage pourra être ajouté si nécessaire.

Pour visualiser la caractérisation thermique de chaque zone, j’ai tracé des boîtes à moustache le jour et la nuit pour chaque zone. Les couleurs pour chaque boîte correspondent aux couleurs utilisées dans la figure 4.13.

4.4.4.1 Marseille

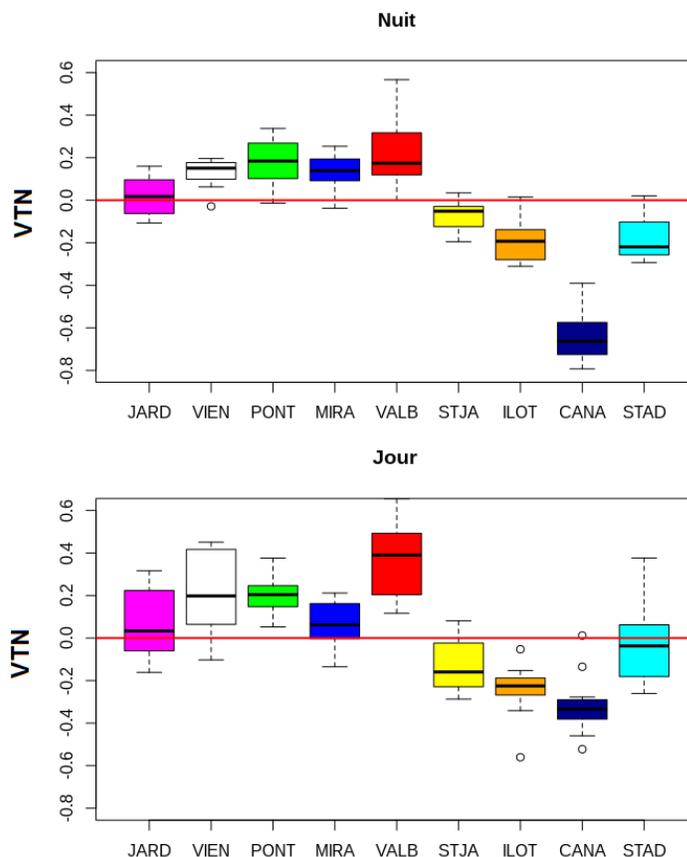


FIGURE 4.14 – Boîtes à moustache représentant la variabilité de température normalisée (VTN) pour chaque zone du parcours à Marseille la nuit et le jour.

La figure 4.14 montre un comportement thermique sensible pour chaque zone le jour et la nuit. Les zones les plus végétalisées et constituées de grandes tours espacées (STJA, ILOT, CANA et STAD) montrent une variabilité négative. Cette variabilité négative est plus prononcée la nuit que le jour. La zone VALB qui se trouve long du boulevard de la Valbarelle qui est assez passant semble être assez végétalisée et est pourtant la zone la plus chaude du parcours le jour et la nuit. Cela est dû au fait que les zones végétalisées dans un diamètre de 50 mètres autour des points le long du boulevard se trouvent dans des jardins qui finalement ne peuvent influencer la route à cause des maisons se trouvant entre la route et ces jardins. On aborde ici une des limites de la méthode des zones tampons.

Les zones les plus chaudes sont les premières zones du parcours, qui sont plus denses et imperméables. Le comportement jour/nuit de chaque zone est à peu près identique sur cette campagne.

4.4.4.2 Paris

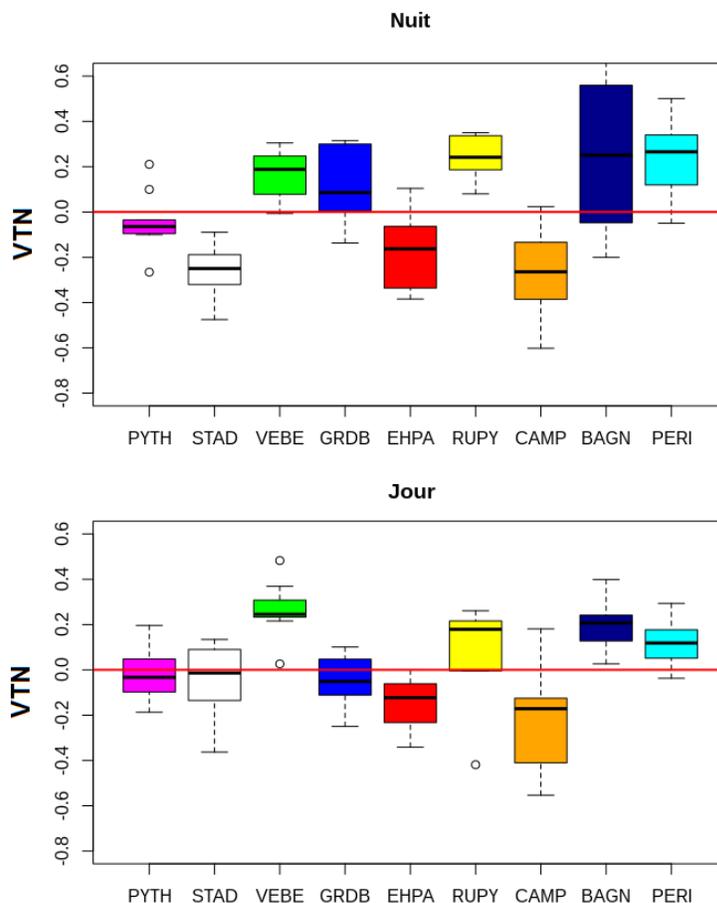


FIGURE 4.15 – Boîtes à moustache représentant la variabilité de température normalisée (VTN) pour chaque zone du parcours à Paris la nuit et le jour.

Pour Paris (voir Figure 4.15), les zones sont aussi contrastées thermiquement. Comme à Marseille, les zones végétalisées (EHPA et CAMP) montrent une variabilité négative le jour et la nuit et celles qui sont plus denses et plus bâties (VEBE, GRDB, BAGN et PERI) sont plus chaudes.

La zone STAD a un comportement plus contrasté jour/nuit puisqu'elle semble plus fraîche la nuit que le jour, ce qui peut être dû à la hauteur moyenne faible et peu dense de la zone sans être particulièrement végétalisée, ce qui permet un refroidissement plus rapide. La forte présence de sol nu permet à cette zone d'accumuler moins de chaleur le jour.

4.4.4.3 Toulouse

Les trois campagnes de Toulouse permettent d'étudier la variabilité saisonnière thermique des zones choisies. Pour étudier cette variabilité, les boîtes à moustaches de variabilité de température normalisée pour chaque saison sont tracées dans la figure 4.17. Pour plus de clarté, les histogrammes des valeurs moyennes de chaque zone et chaque saison sont tracés dans la figure 4.16.

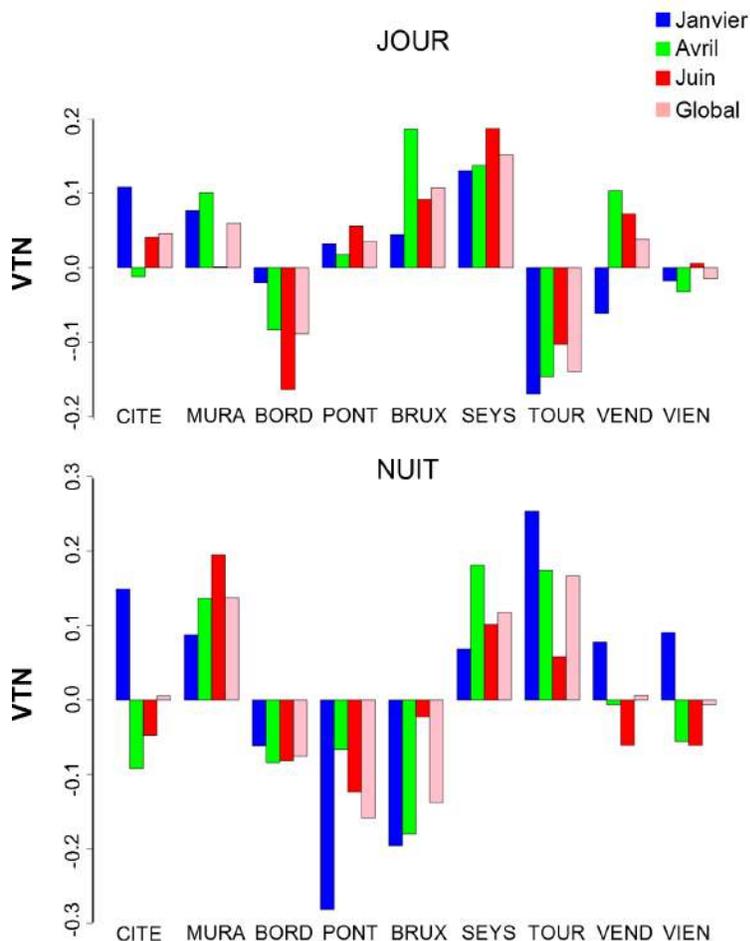


FIGURE 4.16 – Histogrammes représentant la variabilité de température normalisée (VTN) pour chaque zone du parcours de Toulouse en janvier, avril, juin et sur toute les saisons la nuit et le jour.

La différence entre la campagne toulousaine, quelle que soit la saison, et les campagnes parisiennes et marseillaises est que le contraste thermique entre chaque zone le jour est sensiblement moins marqué. La zone la plus végétalisée des tours de Seysse (TOUR) a aussi une originalité dans son comportement thermique. Elle est plus fraîche le jour mais plus chaude la nuit, ce qui diffère des zones végétalisées des autres villes.

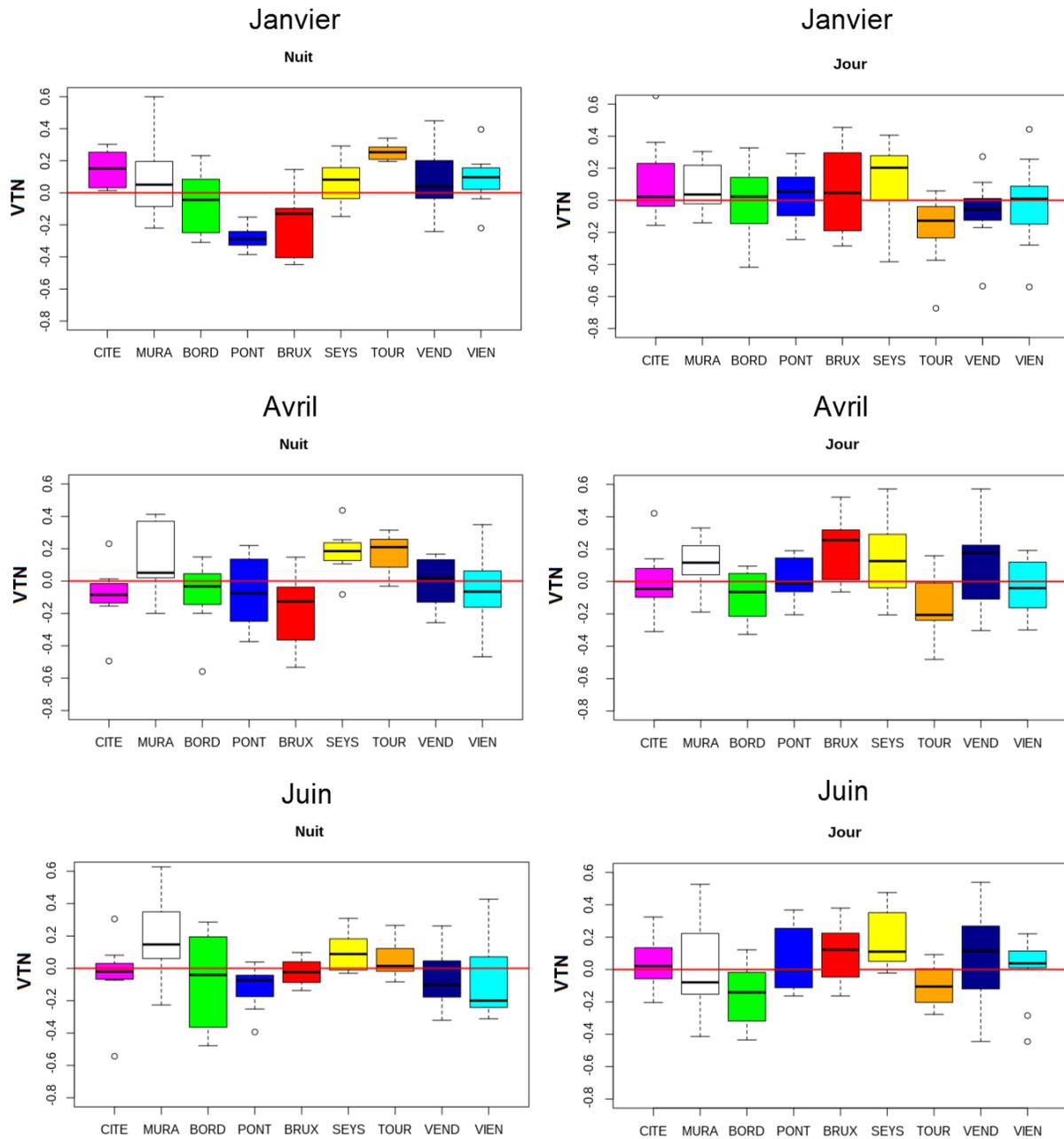


FIGURE 4.17 – Boîtes à moustache représentant la variabilité de température normalisée (VTN) pour chaque zone du parcours de Toulouse en janvier, avril et juin la nuit et le jour.

La zone PONT, qui correspond au passage de la route de Seysse (zone SEYS) au-dessus de la rocade montre la nuit une variabilité négative car c'est une zone très ouverte qui peut donc se refroidir plus rapidement que les zones comportant des bâtiments.

Pour chaque zone, le comportement thermique est globalement le même à quelques exceptions près où le changement dans la végétation entre l'hiver le printemps peut expliquer des différences sensibles. Par exemple, les zones CITE et BORD sont des zones qui présentent une forte fraction d'arbre d'alignement sous lesquels le parcours idéal passe. Or en hiver, les arbres n'avaient plus de feuille, ce qui fait qu'en cette saison, ces zones étaient, comparativement aux autres, plus chaudes que le reste de l'année.

Il existe donc une variabilité saisonnière sur le signal thermique normalisé, essentiellement dû à la végétation.

4.4.5 Rayon d'influence des indicateurs urbains

Pour déterminer le rayon d'influence de chaque paramètre d'occupation du sol et de morphologie, une régression linéaire est effectuée entre la variabilité de température normalisée le jour et la nuit pour chaque POI et pour chaque taille de rayon. Le coefficient de corrélation R^2 est retenu à l'issue de chaque régression. Le rayon d'influence d'un paramètre est le rayon pour lequel le coefficient R^2 est maximal. Dans l'annexe D, les valeurs de R^2 calculées pour chaque indicateur pour toutes les POI de jour et de nuit sont représentées en fonction des différentes tailles de zone tampon.

Dans le tableau 4.4, tous les rayons choisis et les valeurs R^2 sont inscrits pour toutes les campagnes de mesure. La ligne 'Toulouse' correspond aux résultats obtenus en agrégeant les parcours des campagnes toulousaines de chaque saison. La ligne 'Global' correspond aux parcours agrégés de toutes les campagnes. Sont inscrits en gras les rayons pour lesquels le coefficient R^2 est supérieur à 0,3.

Ville	Jour/Nuit	ROUTE	BATI	DB	DSM	HM	HERB	ARBUS	AR_JAR	VEGE	SOLNU	AR_ALI
Marseille	Jour	40 (0,43)	80 (0,61)	50 (0,15)	10 (0,25)	70 (0,74)	80 (0,15)	20 (0,1)	40 (0,25)	50 (0,37)	70 (0,22)	70 (0,25)
	Nuit	40 (0,44)	80 (0,74)	10 (0,27)	70 (0,54)	60 (0,61)	80 (0,41)	70 (0,33)	40 (0,17)	50 (0,63)	40 (0,17)	20 (0,04)
Paris	Jour	40 (0,48)	80 (0,09)	10 (0,03)	80 (0,06)	60 (0,74)	40 (0,15)	40 (0,32)	40 (0,48)	50 (0,64)	20 (0,2)	70 (0,06)
	Nuit	70 (0,38)	10 (0,04)	40 (0,16)	40 (0,04)	50 (0,84)	50 (0,16)	50 (0,14)	50 (0,61)	60 (0,74)	20 (0,42)	70 (0,13)
Toulouse Janvier	Jour	40 (0,27)	10 (0,11)	10 (0,17)	80 (0,06)	20 (0,03)	80 (0,36)	10 (0,47)	50 (0,76)	10 (0,66)	80 (0,07)	80 (0,3)
	Nuit	80 (0,19)	80 (0,44)	80 (0,56)	80 (0,65)	20 (0,2)	20 (0,22)	80 (0,12)	40 (0,25)	20 (0,28)	40 (0,01)	40 (0,34)
Toulouse Avril	Jour	50 (0,23)	20 (0,09)	20 (0,09)	20 (0,07)	80 (0,2)	80 (0,31)	10 (0,04)	20 (0,47)	80 (0,28)	70 (0,07)	20 (0,02)
	Nuit	10 (0,66)	80 (0,09)	80 (0,34)	80 (0,26)	20 (0,07)	20 (0,3)	30 (0,07)	20 (0,14)	20 (0,12)	40 (0,61)	10 (0,34)
Toulouse Juin	Jour	10 (0,24)	80 (0,16)	40 (0,02)	40 (0,05)	70 (0,34)	80 (0,11)	10 (0,01)	20 (0,24)	80 (0,1)	10 (0,1)	10 (0,15)
	Nuit	40 (0,33)	30 (0,05)	80 (0,29)	30 (0,17)	20 (0,48)	10 (0,11)	30 (0,05)	20 (0,03)	10 (0,04)	70 (0,54)	40 (0,13)
Toulouse	Jour	70 (0,16)	40 (0,08)	30 (0,15)	20 (0,13)	80 (0,16)	80 (0,5)	10 (0,02)	40 (0,45)	80 (0,46)	70 (0,02)	80 (0,04)
	Nuit	10 (0,35)	80 (0,35)	80 (0,56)	80 (0,51)	20 (0,27)	20 (0,27)	30 (0,01)	20 (0,18)	20 (0,19)	40 (0,27)	40 (0,35)
Global	Jour	50 (0,18)	10 (0,04)	10 (0,02)	10 (0,01)	40 (0,04)	40 (0,04)	50 (0,04)	40 (0,24)	50 (0,3)	70 (0,02)	80 (0,01)
	Nuit	50 (0,19)	40 (0,12)	10 (0,11)	40 (0,07)	10 (0,16)	80 (0,04)	70 (0,18)	40 (0,17)	50 (0,28)	50 (0,13)	10 (0,02)

TABLE 4.4 – Rayon d’influence et coefficient R^2 associé entre parenthèse pour toutes les campagnes de mesure, sur Toulouse (agrégation de chaque saison) et sur toutes les villes (en agrégeant toutes les campagnes).

Dans un premier temps, les résultats qui ressortent globalement du tableau seront analysés. Ensuite, une analyse ville par ville sera faite.

4.4.5.1 Analyse globale

En analysant ce tableau globalement, plusieurs phénomènes listés ci-dessous apparaissent.

1. **Il n'existe, pour aucun paramètre, un rayon d'influence qui soit commun de jour ou de nuit aux trois villes.** En effet, à la lecture du tableau, pour chaque paramètre, le rayon d'influence semble osciller entre 20 et 80 mètres. Cela se traduit dans l'agrégation de tous les parcours 'Global' qui ne donne quasiment aucun R^2 supérieur à 0,3. Seule la végétation donne des résultats quelque peu satisfaisants avec un R^2 autour de 0,3 de jour comme de nuit pour un rayon de 50 mètres. Ce résultat montre qu'au contraire de l'amplitude sur les parcours, il va être difficile de mettre au point une loi statistique performante et unique pour chaque ville.
2. **Le pourcentage de surface imperméable (ROUTE), le pourcentage de végétation (VEGE) et la hauteur moyenne des bâtiments (HM) semblent être les paramètres influents les plus récurrents.** À Marseille et Paris notamment, ces paramètres donnent de très bons scores. Pour la hauteur moyenne, son sens sera discuté dans les paragraphes consacrés à chaque ville.
3. **Les coefficients de corrélation des paramètres de morphologie que sont la densité de bâti (DB) et la densité de surface de mur (DSM) sont presque systématiquement plus élevés la nuit que le jour.** Ce résultat est très important car il montre l'importance de la morphologie de la ville la nuit et est donc un signe du flux de chaleur stockée par le milieu urbain. Le sol nu montre le même comportement (sauf à Marseille mais sa fraction moyenne y est quasiment nulle) ce qui montre là aussi son impact sur la manière de stocker la chaleur le jour.
4. **Les trois strates de végétation (HERB, ARBUS, AR_JAR et AR_ALI) ont pour toutes les villes des rayons d'influence différents et/ou des coefficients de corrélation distincts.** Ceci valide le choix d'avoir séparé la végétation globale en différentes couches et d'avoir dissocié les arbres de jardin (AR_JAR) des arbres d'alignement (AR_ALI). Les arbres de jardin semblent néanmoins avoir le signal de corrélation le plus fort de toutes les strates à la vue des résultats sur chaque POI. Cela semble plutôt intuitif car les arbres de jardin sont indicateurs de jardins ou de parcs qui sont des zones ayant des effets sensibles sur l'environnement alors que l'herbacé ou l'arbustif peut se trouver de manière isolée des autres types de végétation dans le tissu urbain.

4.4.5.2 Marseille et Paris

Le croisement sur les campagnes de Paris et Marseille donne des résultats que l'on peut mettre en parallèle. Sur ces deux villes, le pourcentage de surface imperméable (ROUTE), la végétation et la hauteur moyenne des bâtiments donnent des coefficients de corrélation élevés.

Pour le pourcentage de surface imperméable, qui regroupe la route, les trottoirs et les parkings, le rayon d'influence maximale ressort assez nettement le jour et la nuit à Marseille et Paris (voir Figure 4.18).

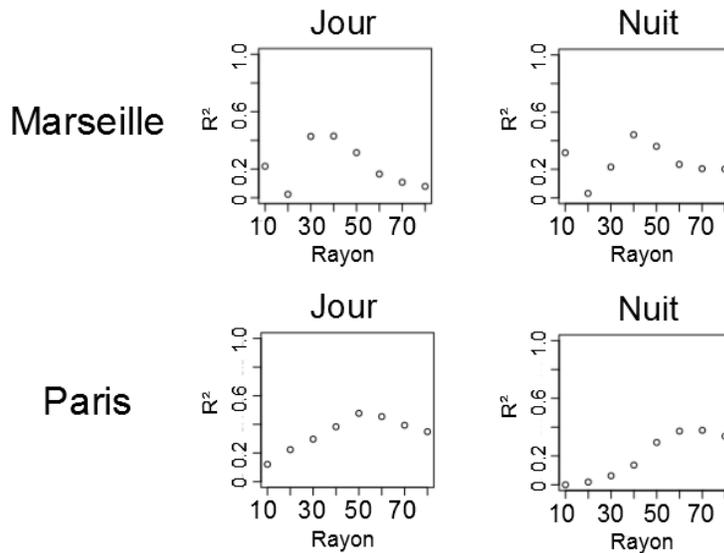


FIGURE 4.18 – Coefficient R^2 issu d’une régression linéaire entre la variabilité de température normalisée et le paramètre ROUTE en fonction du rayon choisi pour la zone tampon à Paris et Marseille la nuit et le jour.

Le rayon d’influence semble être un peu plus long à Paris et il semble n’exister qu’un pic unique sur chaque graphe. À Marseille, le comportement semble un peu différent puisque le rayon très court de 10 mètres a un rayon d’influence plus marqué qu’à 20 et 30 mètres. Ceci peut être dû au tracé des parcours. En effet, à Paris, le parcours passe exclusivement sur des trottoirs et routes bétonnées alors qu’à Marseille, le parcours passait par moment sur un chemin de terre, notamment dans la zone arborée. Ainsi le signal thermique a pu être influencé par une variation du type de sol sur lequel l’expérimentateur marchait alors que cela n’a pas pu être le cas à Paris. Le coefficient directeur issu des régressions linéaires pour le pourcentage de route est positif le jour et la nuit à Paris et Marseille ce qui montre bien une influence vers le réchauffement lorsque le pourcentage de surface imperméable augmente.

Pour la végétation, le comportement à Paris et Marseille diffère un peu. Le coefficient directeur de jour et de nuit à Marseille et Paris est négatif ce qui confirme bien l’effet rafraîchissant de la végétation urbaine de jour et de nuit. En revanche, à Paris, le rayon maximal se remarque par un pic d’influence quand, à Marseille, cette valeur maximale est atteinte par un pallier pour des rayons allant de 40 à 80 mètres (voir Figure 4.19).

Cet effet peut être dû au fait que le terrain de Marseille était beaucoup moins dense au niveau du bâti et plus ouvert. La végétation pourrait avoir un effet sur un rayon beaucoup plus grand qu’à Paris.

La hauteur moyenne des bâtiments sur une zone tampon (HM) donne des coefficients de corrélation très élevés à Paris et Marseille. Cependant le coefficient directeur issu des régressions linéaires est différent à Paris et Marseille. Alors qu’il est positif à Paris (les zones ayant les bâtiments les plus hauts sont les plus chaudes), il est négatif à Marseille. Il n’y a donc pas d’effet physique dû à la hauteur des bâtiments (les effets d’ombrage étant mis de côté) mais juste une

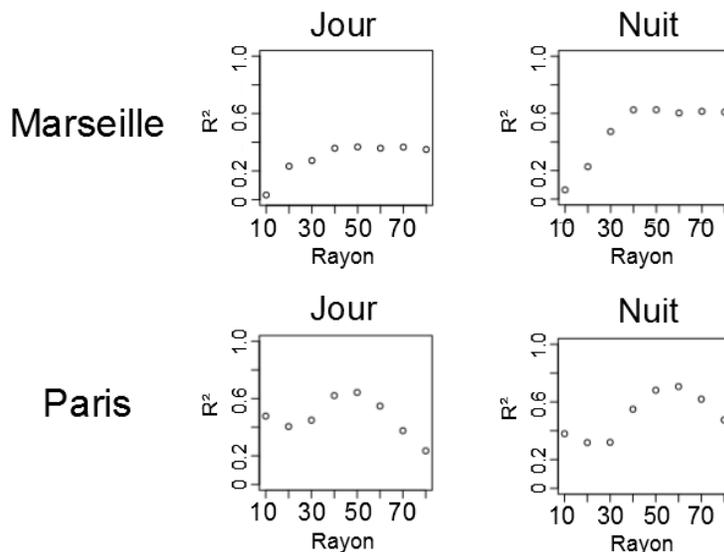


FIGURE 4.19 – Coefficient R^2 issu d’une régression linéaire entre la variabilité de température normalisée et le paramètre VEGE en fonction du rayon choisi pour la zone tampon à Paris et Marseille la nuit et le jour.

relation statistique fortuite. Il s’avère en effet qu’à Paris, les zones les plus végétalisées ont les bâtiments les moins hauts et inversement à Marseille où la grande résidence de château Saint-Jacques est composée de bâtiments d’une dizaine d’étages mais est très verte. La hauteur moyenne des bâtiments est donc un facteur morphologique qui ne sera pas conservé par la suite.

On constate aussi que l’influence de la densité de bâti la nuit est plus importante à Marseille qu’à Paris. Cela s’explique par le fait que le temps à Paris était globalement couvert et donc peut propice au développement d’ICU par stockage de chaleur dans les murs.

4.4.5.3 Toulouse

L’analyse des campagnes de Toulouse permet de traiter la variabilité saisonnière du signal. L’hiver semble avoir un comportement assez semblable aux campagnes de Paris et Marseille. La route et la végétation ont une importance significative le jour et la morphologie (BATI, DB et DSM) la nuit. Le rayon d’influence de la végétation ne se distingue pas nettement, ce qui est d’ailleurs aussi le cas en avril et en juin. Pour ces deux dernières saisons, il est difficile de distinguer un comportement net. Les coefficients de corrélation ne sont pas très élevés et les rayons d’influence ne se distinguent pas nettement. Il doit donc y avoir sur ces saisons d’autres phénomènes qui entrent en jeu dans la variabilité de température sur ce domaine, comme l’advection due aux vents. Autant au mois d’avril, la première journée avait été pluvieuse et une forte variabilité du temps pourrait expliquer le fait qu’il n’y ait pas d’influence au premier ordre des indicateurs urbains mais en juin, le temps était globalement beau et découvert pendant 3 jours et peu de choses se dégagent du croisement à part l’augmentation de l’influence des paramètres morphologiques la nuit.

Les campagnes d'avril et juin illustrent donc les limites de la méthode pour l'explication de la variabilité de la température uniquement par les paramètres d'occupation du sol et de morphologie. Néanmoins, si les rayons ne se distinguent pas clairement, une loi statistique pourra tout de même être calculée.

4.4.6 Relations statistiques liant la température et les indicateurs urbains

Une fois les rayons d'influence choisis pour tous les indicateurs urbains de chaque POI le jour et la nuit, une régression linéaire multiple en approche forward est lancée pour déterminer le paramètre Var de l'équation

$$\Delta T_t(x) = Amp(t) \times Var(x) \quad (4.3)$$

comme pour le paramètre d'amplitude Amp . Cependant, pour obtenir des termes qui soient significatifs, certains rayons d'influence ont légèrement été modifiés si la diminution du coefficient de corrélation n'était pas trop importante. La hauteur moyenne a aussi été exclue des études, en suivant les arguments de l'analyse faite au paragraphe 4.4.5.2. J'ai aussi décidé d'effectuer les régressions soit avec les trois strates de végétations séparées, soit avec le paramètre de végétation globale de manière à ne pas avoir des paramètres trop corrélés entre eux. De même, si des paramètres morphologiques ou d'occupation du sol sont trop corrélés, ils sont exclus de la régression.

Pour Marseille, les régressions linéaires multiples donnent pour le variabilité au sein du quartier Var :

$$\begin{cases} 0,0055Bati_{70} + 0,011Route_{40} - 0,18Db_{50} + 0,32Dsm_{10} - 0,0055Ar_jar_{40} - 0,01 & (R^2 = 0,99) \text{ le jour,} \\ 0,022Bati_{70} + 0,017Route_{40} + 0,15Db_{10} - 0,057 & (R^2 = 0,95) \text{ la nuit.} \end{cases} \quad (4.4)$$

Pour Paris :

$$\begin{cases} -0,051Arbus_{40} - 0,032Herb_{40} - 0,022Solnu_{40} + 0,037 & (R^2 = 0,92) \text{ le jour,} \\ 0,013Route_{60} + 0,060Db_{40} + 0,023Ar_ali_{70} + 0,038 & (R^2 = 0,90) \text{ la nuit.} \end{cases} \quad (4.5)$$

Pour Toulouse en janvier :

$$\begin{cases} -0,034Ar_jar_{50} + 0,21Dsm_{80} - 0,0076Arbus_{10} - 0,0044Ar_ali_{80} + 0,0062 & (R^2 = 0,98) \text{ le jour,} \\ 0,72Dsm_{80} + 0,0083 & (R^2 = 0,65) \text{ la nuit.} \end{cases} \quad (4.6)$$

Pour Toulouse en avril :

$$\begin{cases} -0,012Vege_{80} - 0,009Ar_ali_{20} - 0,097Dsm_{20} + 0,028Solnu_{70} + 0,0085Route_{50} + 0,031 & (R^2 = 0,99) \text{ le jour,} \\ 0,0033Route_{20} + 0,097Db_{80} - 0,011Arbus_{30} + 0,015Herb_{20} - 0,0094 & (R^2 = 0,97) \text{ la nuit.} \end{cases} \quad (4.7)$$

Pour Toulouse en juin :

$$\begin{cases} -0,015Ar_jar_{20} + 0,0034Route_{10} + 0,19Dsm_{40} + 0,016 & (R^2 = 0,79) \text{ le jour,} \\ -0,023Solnu_{70} + 0,18Dsm_{30} - 0,0049 & (R^2 = 0,80) \text{ la nuit.} \end{cases} \quad (4.8)$$

Pour Toulouse en agrégeant toutes les saisons :

$$\begin{cases} -0,021Ar_jar_{40} + 0,0057Bati_{40} + 0,023 & (R^2 = 0,74) \text{ le jour,} \\ 0,15Db_{80} + 0,018Herb_{20} - 0,011Arbus_{30} - 0,0073Ar_jar_{20} - 0,017 & (R^2 = 0,96) \text{ la nuit.} \end{cases} \quad (4.9)$$

En global, en agrégeant toutes les campagnes :

$$\begin{cases} -0,0096Vege_{50} - 0,023 & (R^2 = 0,36) \text{ le jour,} \\ 0,012Route_{50} + 0,013Bati_{40} - 0,0045 & (R^2 = 0,50) \text{ la nuit.} \end{cases} \quad (4.10)$$

Le choix de la formule

$$\Delta T_t(x) = Amp(t) \times Var(x) \quad (4.11)$$

définie au départ en prenant l'équation 4.2 définissant l'amplitude $Amp(t)$ et les équations précédentes doit être validé. Les scores pour chaque modélisation statistique sont présentés dans le tableau 4.5.

Ville	Modèle	R ²	RMSE	MBE
Marseille	Marseille	0,68	0,33	0,01
	Global	0,29	0,50	-0,04
Paris	Paris	0,45	0,16	0,01
	Global	0,37	0,18	-0,02
Toulouse Janvier	Toulouse 01	0,12	0,15	0,01
	Global	0,10	0,16	-0,02
Toulouse Avril	Toulouse 04	0,14	0,32	0,01
	Global	0,06	0,34	-0,04
Toulouse Juin	Toulouse 06	0,14	0,35	-0,01
	Global	0,02	0,45	-0,2

TABLE 4.5 – Résultats de la comparaison entre la modélisation choisie et les anomalies de température mesurées. R^2 est le coefficient de corrélation issu de la régression linéaire entre la modélisation et les mesures, RMSE l'erreur quadratique moyenne et MBE le biais moyen.

La figure 4.20 présente pour Marseille, Paris et Toulouse en avril la représentations de la variabilité de température, toutes zones et parcours confondus, mesurée et modélisée par la relation statistique trouvée pour la ville concernée et en global.

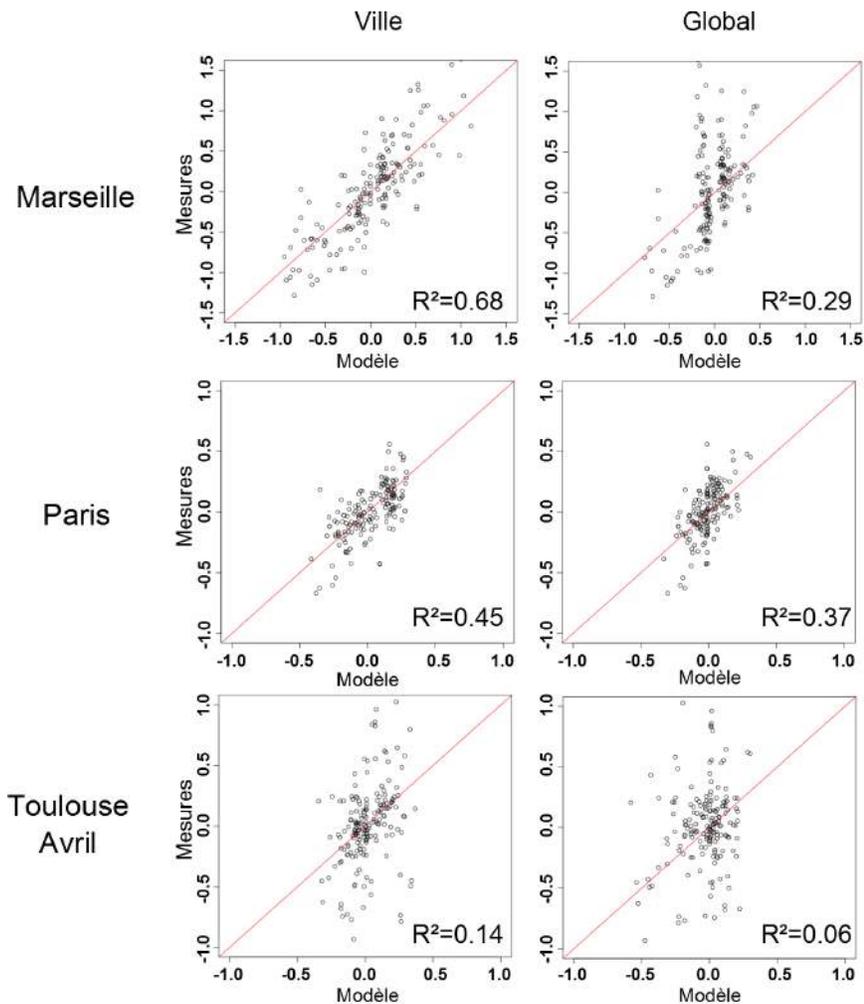
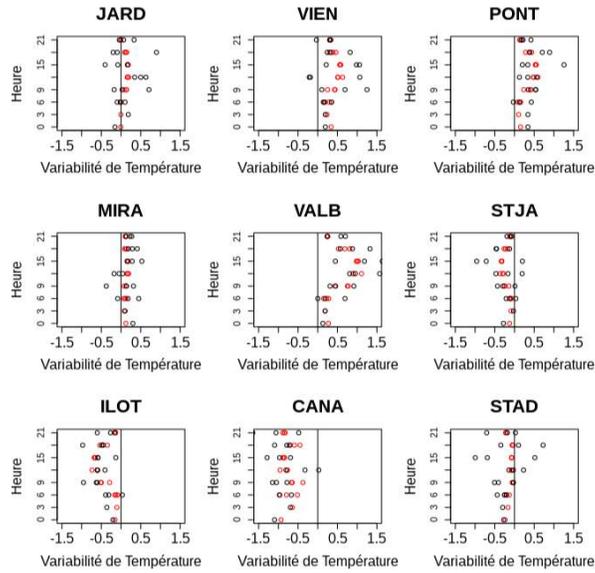


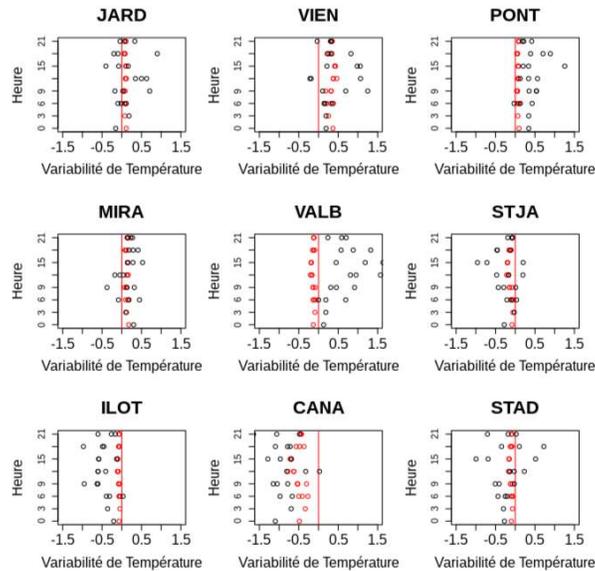
FIGURE 4.20 – Variabilité de température toutes zones et parcours confondus mesurée en fonction de celle modélisée par la relation spécifique à la ville à gauche et la relation globale à droite, pour les campagnes de Marseille, Paris et Toulouse en Avril.

Pour Marseille, le choix de modélisation semble être pertinent car le coefficient R^2 , le biais moyen et l'erreur quadratique donnent des scores statistiques corrects. La modélisation avec la relation globale donne des score plus faibles. La figure 4.21 illustre parcours par parcours et zone par zone les résultats donnés par la simulation statistique (en rouge) et ceux donnés par les mesures. Le modèle statistique de Marseille reproduit toutes les tendances pour chaque zone le jour et la nuit. Le modèle global en revanche, n'arrive pas à renvoyer une variabilité positive sur les zones les moins végétalisées (VIEN, PONT et VALB) et ne donne pas une variabilité assez négative des zones les plus végétalisées (ILOT et CANA). En effet, par exemple le jour, le modèle statistique global ne dépend que de la fraction de végétation avec un coefficient directeur trop faible pour reproduire l'anomalie négative des zones végétalisées et une ordonnée à l'origine trop négative pour être compensée dans les zones les plus urbanisées. L'utilisation de la relation statistique appliquée à la ville-même est donc nécessaire pour le cas de Marseille.

Modélisation Marseille



Modélisation globale



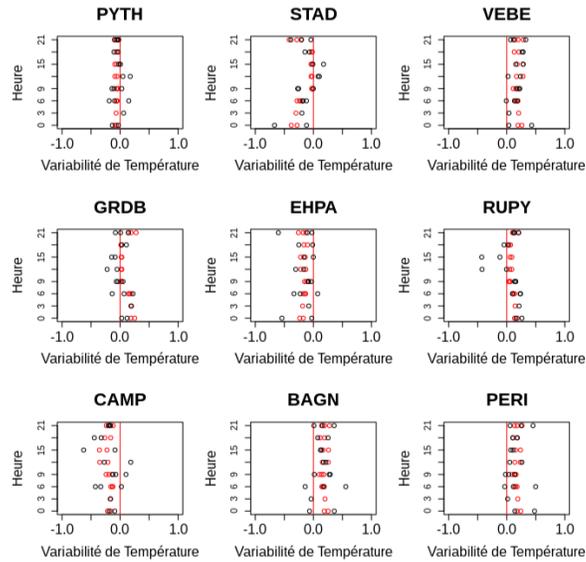
○ Mesure ○ Modélisation

FIGURE 4.21 – Variabilité de température en fonction de l’heure de chaque parcours à Marseille avec en noir les points issus des mesures et en rouge ceux issus de la relation statistique particulière à Marseille à gauche et la relation statistique globale à droite.

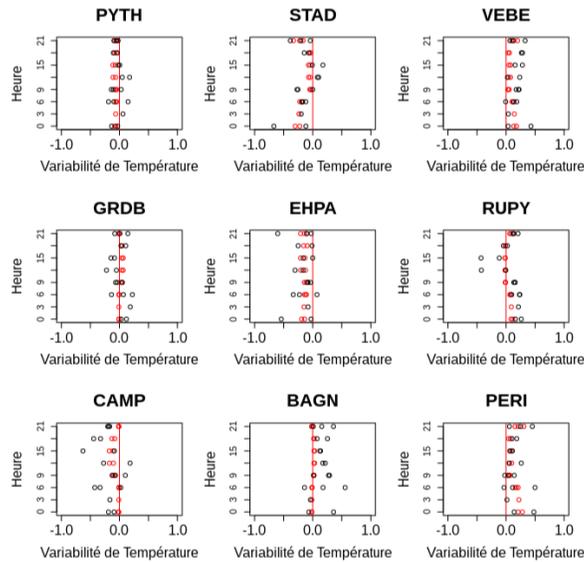
Pour le cas de Paris, les résultats concernant le coefficient R^2 sont moins bons qu'à Marseille. Cela est dû aux amplitudes plus faibles de température à Paris dues à la saison (automne à Paris et l'été à Marseille). Les défauts du modèle global à Paris sont les mêmes qu'à Marseille pour les zones les moins végétalisées comme BAGN et VEBE qui ne présentent aucune anomalie positive avec ce modèle (voir Figure 4.22). En revanche, les zones végétalisées (STAD, CAMP et EHPA) semblent mieux reproduites avec le modèle global à Paris qu'à Marseille.

À Toulouse, quelle que soit la saison, les coefficients de corrélation sont très faibles. Les moyennes de variabilité de température trouvées pour chaque zone de jour et de nuit sont inférieures en valeur absolue à $0,2^\circ C$. Donc en multipliant par un facteur d'amplitude correct pour la zone, il est difficile de renvoyer une variabilité de température supérieure à $0,5^\circ C$ (voir Figure 4.20). Cela signifie qu'à Toulouse, la méthode ne permet pas d'expliquer la variabilité de température au sein du quartier choisi et de mettre en place une modélisation statistique. Cela peut s'expliquer en analysant la végétation et la densité du bâti du quartier en comparaison avec ceux de Paris et Marseille. À Paris, une grande partie du signal peut être expliquée par la variabilité de la densité de surface de mur qui y est très importante (entre 0,2 et 2,4 à Paris et entre 0,2 et 1 à Toulouse). Les zones les plus ouvertes sont les plus fraîches (STAD, EHPA ou CAMP sont peut denses) et les plus denses les plus chaudes (VEBE et RUPY). À Toulouse, la densité de surface de mur varie peu car les bâtiments les plus hauts sont espacés (voir TOUR et CITE). À Marseille le bâti a la même structure qu'à Toulouse, mais la variabilité de température s'y explique par une forte variation de la végétation. Les zones les plus chaudes y sont les moins végétalisées (VIEN, MIRA ou VALB) et les plus fraîches les plus arborées (CANA ou ILOT). À Toulouse, les zones les plus végétalisées le sont surtout par de l'herbacé (TOUR) ou des jardins fermés (VIEN et VEND). L'influence de la végétation y est donc réduite par rapport à une zone ombragée par des arbres ou longeant un parc. Par exemple dans la zone des tours de Seysse (TOUR), l'effet de rafraîchissement nocturne de la végétation n'est pas observé contrairement à Paris ou Toulouse. Cela peut s'expliquer par le fait que le parcours ne passait qu'au-dessus de la route et proche des bâtiments. Les zones herbacées, pourtant assez vastes étaient peu visibles et situées de l'autre côté des tours. L'influence des zones herbacées n'était pas assez grande pour être mesurée par la station mobile. Il est donc possible que dans le quartier de Toulouse, les écoulements d'air et les flux turbulents, qui pourraient être représentés par un modèle de CFD, soient prépondérants ou que les matériaux composant le tissu urbain, paramètre non pris en compte dans l'étude, jouent un rôle important.

Modélisation Paris



Modélisation globale



○ Mesure ○ Modélisation

FIGURE 4.22 – Variabilité de température en fonction de l’heure de chaque parcours à Paris avec en noir les points issus des mesures et en rouge ceux issus de la relation statistique particulière à Marseille à gauche et la relation statistique globale à droite.

4.5 Comportement des mesures des réseaux de mesures fixes par rapport aux modèles statistiques

Pour tenter de valider les modèles statistiques de Paris et Marseille (ceux de Toulouse ne sont pas considérés car peu efficaces), il peut être envisagé de confronter les mesures du réseau fixe avec les indicateurs urbains associés à des zones tampons centrées sur les capteurs. Néanmoins, cela pose la question de la confrontation entre mesures mobiles et fixes. Les données de températures utilisées pour mettre en place le modèle statistique sont des mesures prises avec une fréquence d'une seconde sur une zone pouvant couvrir plusieurs centaines de mètres. Elles sont donc représentatives des phénomènes agglomérés à l'échelle d'une rue. De plus, ces mesures sont prises par un piéton, donc au niveau de la rue. Une mesure fixe quant à elle, est une mesure très locale. Le capteur doit être placé dans une zone représentative de son environnement pour pouvoir tirer des conclusions de ses mesures. Lors des campagnes de mesures du projet EUREQUA, beaucoup de ces stations ont été placées sur des balcons (encastrés ou non) ou sur des toits (voir chapitre 3.4.1), mais quelques-unes ont été placées dans des jardins ou des parcs, éloignées des bâtiments.

Pour chaque station des réseaux fixes de Marseille et Paris, j'applique les mêmes méthodes de correction que pour les données issues du parcours mobile : une correction est effectuée à partir du signal de la station de référence, la valeur moyenne de la température de la station sur le temps du parcours concerné est gardé, la température médiane du parcours est retirée et cette dernière est divisée par son amplitude Amp_{90} pour obtenir la variabilité de température normalisée associée à la station. À chaque station sont associés les indicateurs urbains utiles à la modélisation statistique, moyennés dans une zone tampon de rayon trouvé dans le paragraphe précédent.

Dans la figure 4.23, les positions des stations fixes sont rappelées et dans les tableaux 4.6 et 4.7 sont recensées les valeurs des indicateurs urbains utiles à la modélisation pour le réseau fixe mais aussi pour le parcours mobile pour comparaison.

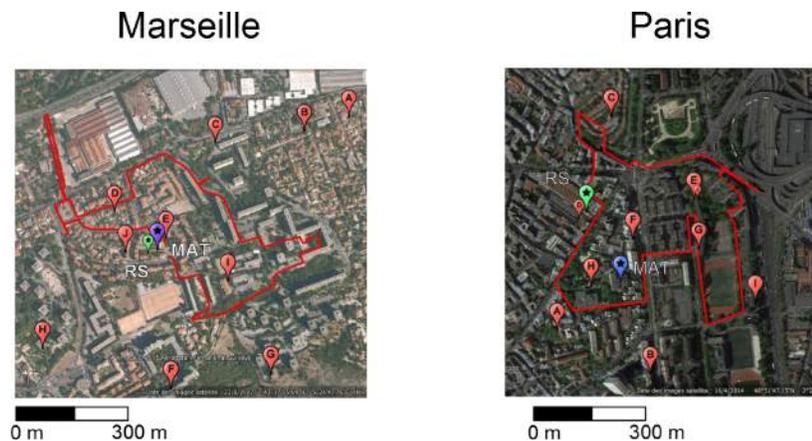


FIGURE 4.23 – Positions des stations de mesures fixes à Marseille et Paris.

POINTS	AR_JAR_40	ROUTE_40	BATI_70	DB_10	DB_50	DSM_10
MAT	-8.54	12.71	-3.00	1.80	-0.27	0.68
A	-2.29	3.59	-4.28	-0.93	-0.08	-0.67
B	-13.56	-9.73	26.18	-0.53	0.83	-0.25
C	8.62	-1.10	-8.95	9.61	0.02	2.60
D	-8.62	13.76	-4.19	2.44	-0.29	1.32
E	5.18	-26.17	-10.93	8.02	-0.30	2.60
F	-13.56	3.28	12.26	2.12	0.27	1.69
G	-5.96	-11.22	-2.47	2.62	-0.12	1.47
H	-4.84	-12.65	-2.89	5.68	0.12	1.59
I	0.43	4.17	-0.05	4.94	0.46	1.66
J	5.85	-9.55	20.07	3.30	0.41	1.95
JARD	-6.10	6.71	-2.60	-0.02	-0.02	-0.07
VIEN	-9.36	9.33	7.44	-0.21	-0.32	-0.11
PONT	-2.57	6.14	3.10	-0.07	-0.51	0.05
MIRA	-6.23	-2.84	9.29	-0.10	0.26	0.21
VALB	-0.21	-2.12	5.20	1.10	-0.48	0.88
STJA	11.92	0.42	-4.88	0.47	0.75	0.36
ILOT	3.70	-9.53	-0.27	0.80	1.17	0.33
CANA	7.08	-13.17	-10.17	-0.91	-0.81	-0.66
STAD	-12.82	4.46	-5.68	-0.38	-0.05	-0.35

TABLE 4.6 – Anomalie des indicateurs urbains par rapport à leur moyenne sur la zone pour les stations du réseau fixe de Marseille et pour les zones du parcours de mesures physiques.

POINTS	ARBUS_40	HERB_40	SOLNU_40	VEGE_50	AR_ALI_70	DB_40	ROUTE_50	ROUTE_60	BATI_40
MAT	-0.65	-0.51	-0.5	15.31	-1.29	2.3	-17.47	-13.81	15.67
A	-1.01	-0.93	-2.43	-2.66	2.15	-1.09	-21.45	-19.04	6.06
B	-1.01	10.86	-2.43	21.38	2.7	4.26	-16.34	-11.06	32.41
C	-1.01	5.68	-2.43	-7.33	4.26	-0.44	-7.28	-2.49	5.08
D	-1.01	-2.43	-2.43	-10.04	1.45	2.15	-5.67	-3.94	-1.6
E	-1.01	-2.43	0.88	-1.14	-2.91	3.18	-14.77	-10.52	8.11
F	16.36	-2.43	-2.43	6.24	-1.38	-0.51	-17.24	-16.16	-5.98
G	-1.01	1.83	-2.43	9.68	3.08	0.16	-22.26	-22.78	39.21
H	-1.01	9.75	-2.43	18.78	3.3	3.24	-7.87	-6.78	0.55
I	-0.6	4.18	4.47	27.3	-4.75	-0.19	-16.26	-18.38	16.33
J	-1.01	5.42	-2.43	8.15	-0.61	-0.33	7.22	13.59	-1.99
PYTH	-0.61	0.57	5.08	5.54	-4.75	-1.06	1.93	5.09	-6.46
STAD	-1.01	-0.6	6.14	2.8	-0.42	-3.24	-1.64	-10.29	-16.47
VEBE	-1.01	-1.62	-2.43	-7.96	-1.14	1.28	9.59	9.02	2.42
GRBD	2.47	-1.77	-2.43	-7.01	5.39	0.99	-3.04	-1.78	2.43
EHPA	-1.01	7.22	0.35	12.57	-0.8	0.49	-20.1	-18.06	7.34
RUPY	0.87	-0.46	-2.43	-1.03	0.86	3.72	-12.22	-10.51	18.61
CAMP	8.03	-2.43	-2.43	10.04	-3.71	-0.41	-9.27	-7.56	8.04
BAGN	-1.01	-2.1	-0.94	-4.79	6.26	-1.46	9.22	8.13	-9.29
PERI	-0.34	-1.67	-2.43	-9.45	-4.75	-1.64	27.22	27.71	-7.74

TABLE 4.7 – Anomalie des indicateurs urbains par rapport à leur moyenne sur la zone pour les stations du réseau fixe de Paris et pour les zones du parcours de mesures physiques.

Les résultats par campagne et pour les modèles de jour et de nuit sont présentés dans la figure 4.24.

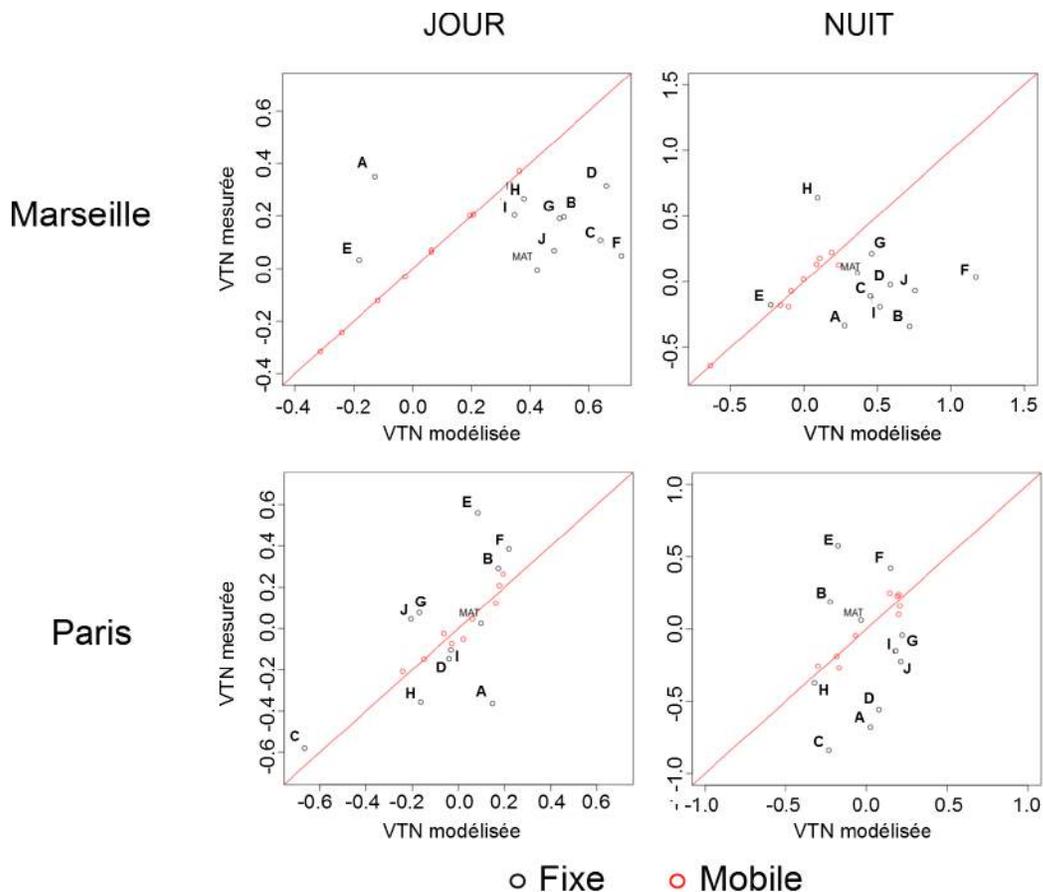


FIGURE 4.24 – Variabilité de température normalisée (VTN) mesurée par le réseau fixe en noir et la station mobile en rouge en fonction de la VTN modélisée statistiquement de jour et de nuit à Marseille et Paris.

À Marseille, les stations fixes sont toutes globalement plus froides de jour et de nuit que la modélisation à l'exception de la station E qui semble la plus proche de la modélisation statistique. La majorité des stations du réseau marseillais est située sur des balcons ou des terrasses à proximité des bâtiments. Cela se traduit par des valeurs plus fortes de la densité de surface de mur et de la densité de bâti dans les zones tampons autour de la station. Or ces deux paramètres sont présents dans les relations statistiques trouvées pour Marseille. La station E quant à elle se trouve au milieu de jardins partagés. Elle est donc éloignée des bâtiments et les indicateurs urbains lui correspondant ont des valeurs plus proches de celles des zones déterminées sur le parcours de mesure. Néanmoins, comme cette mesure est locale, il est normal qu'elle soit quelque peu différente de la modélisation.

Le réseau parisien comporte plus de stations dans des grands jardins ou parcs qu'à Marseille.

Les stations A, C, D et H sont respectivement placées dans un jardin peu entretenu, un jardin entretenu et arrosé, une grande cour fermée peu végétalisée et un parc. Les stations C, D et H ont un comportement assez proche de la modélisation statistique le jour, notamment la station D qui a une variabilité de température très inférieure à celles qui ont servi à la régression. La station A subit statistiquement l'influence du sol nu du parc à côté qui ajoute de la variabilité positive à cette station pourtant située dans un lieu frais. Le rayon assimilé au sol nu est donc trop important pour cette station. La nuit, seule la station H située dans un parc semble suivre le modèle statistique. Par exemple, la station C, située dans un jardin très vert mesure des variabilités très négatives la nuit, conséquence principale de l'arrosage intensif de la propriétaire du jardin. La nuit du 7 octobre à 21 heures, la température était de plus de $3^{\circ}C$ plus fraîche que la température médiane du parcours. Cela met en évidence l'importance du comportement des habitants sur la variabilité de température.

4.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, j'ai essayé d'expliquer la variabilité de température par une variabilité d'indicateurs urbains de morphologie et d'occupation du sol dans des quartiers des villes de Paris, Toulouse et Marseille. Le but était d'étudier s'il était possible de mettre en place une relation statistique commune aux trois villes et valable en toute saison. Pour cela, j'ai fait le choix de considérer que l'amplitude de la variabilité de température est due aux conditions météorologiques synoptiques et que la variabilité spatiale était due aux paramètres morphologiques et d'occupation du sol. Le facteur d'amplitude est effectivement fortement corrélé aux conditions météorologiques que sont le rayonnement solaire, la température, la vitesse du vent et la couverture nuageuse. Une relation statistique commune aux trois villes a été mise en place pour déterminer cette amplitude.

Pour expliquer la variabilité spatiale du signal, il a fallu dans un premier temps déterminer quel était le rayon d'influence maximale de chaque indicateur urbain. Pour cela, à cause de la trop grande variabilité du signal, des zones correspondant à un paysage urbain donné ont été dessinées. Les points de parcours correspondant à une zone ont été moyennés. L'étude sur ces zones a permis de mettre en avant plusieurs phénomènes importants. D'abord, il n'existe pas, quel que ce soit l'indicateur choisi, de rayon d'influence commun à chaque ville ou à Toulouse à chaque saison. Ensuite, le pourcentage de surface imperméable et le pourcentage de végétation sont les paramètres les plus influents globalement sur toutes les campagnes de mesures. Les paramètres morphologiques (la densité de surface de mur et la densité de bâti) ont une influence plus forte la nuit que le jour, quelle que soit la saison ou la ville, ce qui met en avant le rôle de ces indicateurs pour le relâchement de chaleur stockée dans les bâtiments le jour. Enfin, les différentes strates de végétation sont distinguées car leur influence est différente sur les zones étudiées. Les strates herbacées et arbustives peuvent être de petite taille et isolées dans le tissu urbain alors que les arbres de jardin sont indicateurs de grandes zones végétalisées comme des jardins ou des parcs. De plus, les arbres sont responsables d'effets d'ombrage, ce qui n'est pas le cas de l'herbacé et de l'arbustif.

Ensuite, j'ai mis en place des relations statistiques pour chaque campagne de mesure et testé la formulation multipliant l'amplitude due aux paramètres météorologiques à la variabilité liée aux indicateurs urbains. Pour Marseille et Paris, cette méthode donne des résultats plutôt satisfaisants, justifiant le rôle de la morphologie et de l'occupation du sol dans la variabilité de température à fine échelle. Pour le quartier toulousain, cette approche n'a pas donné de résultats, car la densité de bâti y est relativement homogène et la végétation haute et les parcs peu présents. Cela met en exergue le rôle que peuvent avoir les matériaux composant le tissu urbain et les écoulements à fine échelle qui peuvent être prépondérants à l'échelle du quartier. Néanmoins, l'étude saisonnière menée sur Toulouse a permis de mettre en avant la variabilité de certains indicateurs urbains en fonction des saisons. Par exemple, les arbres d'alignement ont un effet rafraîchissant par leur ombrage du printemps à l'automne mais en hiver, leur influence est quasi-nulle. Cela a pu être mis en avant sur deux zones du quartier toulousain.

L'étude des mesures données par le réseau fixe a permis de mettre en valeur plusieurs phénomènes. Les relations statistiques trouvées sont valables pour des mesures en continu dans une rue. Seules les stations correspondant dans leur positionnement aux conditions de mesures à pied donnent des variabilités de température comparables aux modèles statistiques. Les autres stations étant principalement situées sur des balcons de particuliers, leurs indicateurs morphologiques diffèrent fortement des indicateurs des zones définies sur les parcours. De plus, la station située dans

un jardin très arrosé par son propriétaire montre des températures beaucoup plus fraîches que la température moyenne du quartier. Cela met en avant une faiblesse de la modélisation qui ne prend pas en compte le comportement particulier des habitants.

Pour améliorer la modélisation statistique à l'échelle du quartier, il pourrait être intéressant de reproduire ce type de mesures à fine échelle sur des périodes de temps plus longues. Nous avons pu ici ne travailler que sur trois jours consécutifs par quartier, avec souvent une variabilité sensible des conditions météorologiques. Comme ces mesures ont été faites dans le cadre du projet EUREQUA, elles sont couplées à des enquêtes auprès d'habitants et d'usagers des quartiers mais aussi à des campagnes de mesure acoustique et de qualité de l'air. Il n'était donc pas possible de mobiliser autant de personnes sur des périodes plus longues. Mais avec une meilleure représentativité des différents types de temps sur un quartier, il serait possible d'affiner les relations statistiques. Un autre moyen de valider l'approche ou d'affiner les relations statistiques serait d'utiliser un modèle CFD sur les quartiers étudiés. Cela permettrait de mieux étudier l'importance des écoulements à fine échelle notamment sur le quartier de Toulouse.

Même s'il n'a pas été possible de mettre au point une relation commune à chaque ville, le croisement entre indicateurs morphologiques et d'occupation du sol avec la variabilité de température et les conditions météorologiques synoptiques a permis d'établir une relation statistique pour les quartiers de Paris et Marseille, ce qui constitue la dernière partie de la chaîne de modélisation que je souhaite mettre en place.

Chapitre 5

Mise en place d'une chaîne de modélisation complète sur le cas de Paris

5.1 Introduction

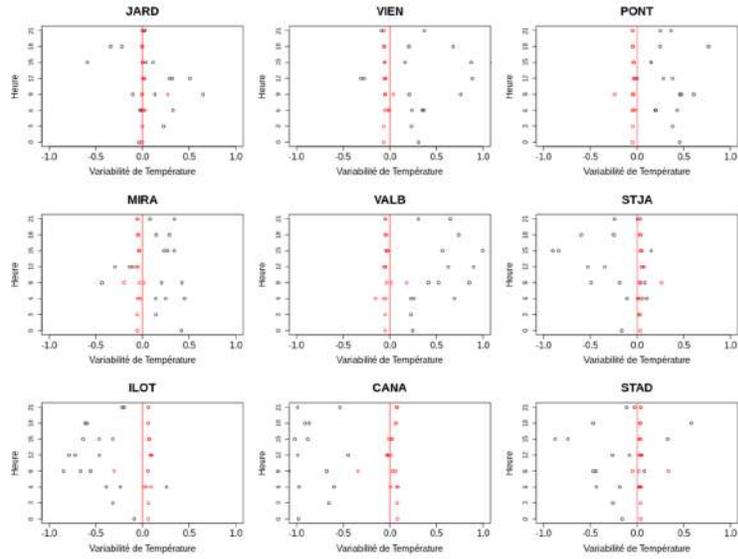
Dans le chapitre précédent, des relations statistiques permettant de déterminer la variabilité de température au sein d'un quartier ont été déterminées. Ces relations peuvent constituer la dernière étape de la chaîne de modélisation que je souhaite mettre en place dans le cadre de cette thèse. Cette approche a été choisie aux vues des limites a priori de l'utilisation du modèle TEB à haute résolution. Dans ce chapitre, la possibilité de reproduire avec TEB la variabilité de température à l'échelle de la rue sera étudiée. TEB sera forcé avec les données des stations de référence de chaque campagne et avec comme description du tissu urbain les valeurs trouvées pour chaque zone définie dans le chapitre précédent. Les limites de la modélisation avec un schéma de canopée urbaine seront donc étudiées. J'expliquerai ensuite comment TEB peut être utilisé pour affiner la modélisation statistique en reproduisant par exemple des effets d'ombrage. Enfin, une chaîne de modélisation complète couplant le générateur de climat urbain et la modélisation statistique à l'échelle de la rue sera mise en place sur le cas de Paris.

5.2 Limites de TEB pour reproduire la variabilité de la température à fine échelle

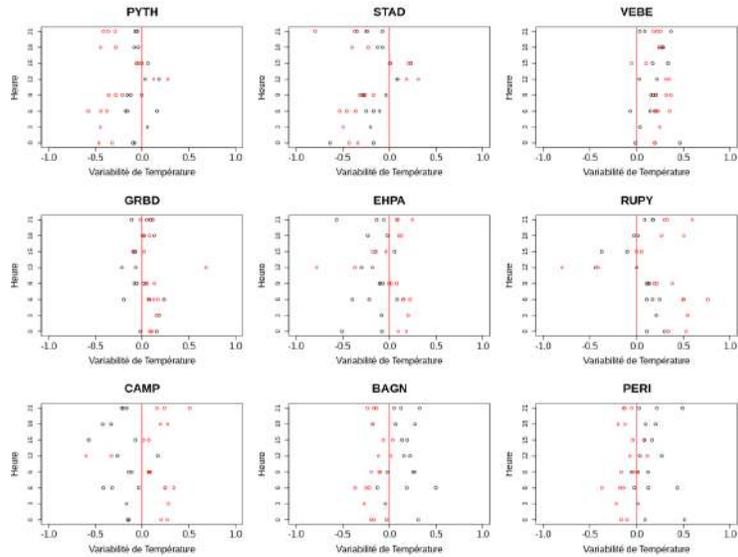
L'utilisation de TEB plutôt que d'une relation statistique pour reproduire la variabilité à fine échelle de la température dans un quartier aurait plusieurs avantages. En effet, TEB est un modèle physique. Cela permettrait de modéliser la température à fine échelle quelle que soit la saison et sur plusieurs quartiers, seulement à partir des données de description du tissu urbain. Cependant, TEB repose sur l'hypothèse de rue canyon et à l'échelle de quelques dizaines de mètres, cette hypothèse peut ne plus être valide. Pour tester les limites de TEB, des simulations à une dimension sur chaque zone des parcours de Paris et Marseille ont été faites. En entrée du modèle, les valeurs des indicateurs urbains trouvées dans le chapitre précédent (fraction de bâti, fraction de végétation (haute et basse), fraction de sol nu, hauteur moyenne des bâtiments et densité de surface de mur) seront utilisés. Les données issues de la station de référence seront utilisées comme forçage atmosphérique. Les résultats des simulations sur Marseille et Paris sont présentées dans la figure 5.1. Les résultats sur Toulouse apportant des conclusions identiques à celles de Marseille, ils ne seront pas présentés.

À Marseille, TEB ne renvoie quasiment aucune variabilité de température quelle que soit la zone étudiée au contraire de Paris où les résultats sont plus nuancés. Ce résultat est a priori étonnant mais s'explique au regard de la variabilité des indicateurs urbains à Paris et Marseille et à la capacité de TEB à reproduire des variations de température en rapport avec cette variabilité. À Marseille, la fraction de végétation entre les différentes zones varie entre 10 et 50% et à Paris entre 5 et 30%. TEB semble donc avoir des difficultés à reproduire les effets importants à fine échelle de la végétation. De plus, à Marseille, la densité de surface de mur varie entre 0,4 et 1,1 alors qu'à Paris sa variabilité est beaucoup plus forte (entre 0,15 et 2,4). Or la densité de surface de mur est un paramètre déterminant dans TEB puisque ce paramètre détermine le piégeage radiatif. À Marseille, celui-ci reste relativement constant à des valeurs relativement faibles quelle que soit la zone. À Paris, une régression linéaire entre la densité de surface de mur de chaque zone et la variabilité de température calculée par TEB donne un coefficient de corrélation R^2 de 0,61. Ceci est significatif et très élevé comparé aux résultats donnés par le croisement des données

Marseille



Paris



○ Mesure ○ Modélisation

FIGURE 5.1 – Variabilité de température mesurée par la station mobile en noir et modélisée par TEB en rouge en fonction de l'heure et de la température de chaque parcours à Marseille et Paris.

mesurées avec les indicateurs urbains du chapitre précédent. Celui-ci était en effet inférieur à 0,1 à Paris.

À fine échelle, TEB semble donc plus sensible aux variations de densité de surface de mur qu'à la variation de fraction de végétation. Pour vérifier cela, j'ai effectué quatre simulations à tous paramètres et forçages égaux par ailleurs, les deux premières en passant la densité de surface de mur 0,5 à 1,5 et les deux suivantes en passant la fraction de végétation de 10 à 50 %. Alors que la variation de la fraction de végétation a donné une variabilité de température inférieure à $0,2^{\circ}C$, celle de densité de surface de mur a donné une augmentation moyenne de $0,5^{\circ}C$. À Paris, la densité de surface de mur monte jusqu'à 2,4 ce qui explique la forte variabilité des températures simulées.

Les défauts liés à la fraction de végétation peuvent venir du fait que le mélange vertical dans TEB, même avec son modèle multi-couche CANOPY (HAMDI et al. 2008) n'est pas suffisant pour représenter à deux mètres l'influence de la végétation. D'une part, les effets d'ombrage des arbres ne sont pas ici pris en compte et sont développés dans la thèse d'Émilie Redon. D'autre part, actuellement, une unique température est calculée dans le canyon. Celle-ci est influencée par les flux d'énergie venant des jardins mais aussi de la route et des murs. Séparer l'air du canyon en deux entre température de l'air au-dessus des jardins et température de l'air au-dessus de la route permettrait de mieux reproduire la variabilité. Sans CANOPY, une seule température de jardin dans le canyon serait calculée. Celle-ci serait en interaction avec une température de route (voir Figure 5.2.a). Avec CANOPY, une température de jardin et de route seraient calculées sur chaque couche du canyon avec une interaction entre la température de l'air au-dessus des jardins et celle au-dessus de la route grandissante en fonction de la hauteur dans le canyon (voir Figure 5.2.b)

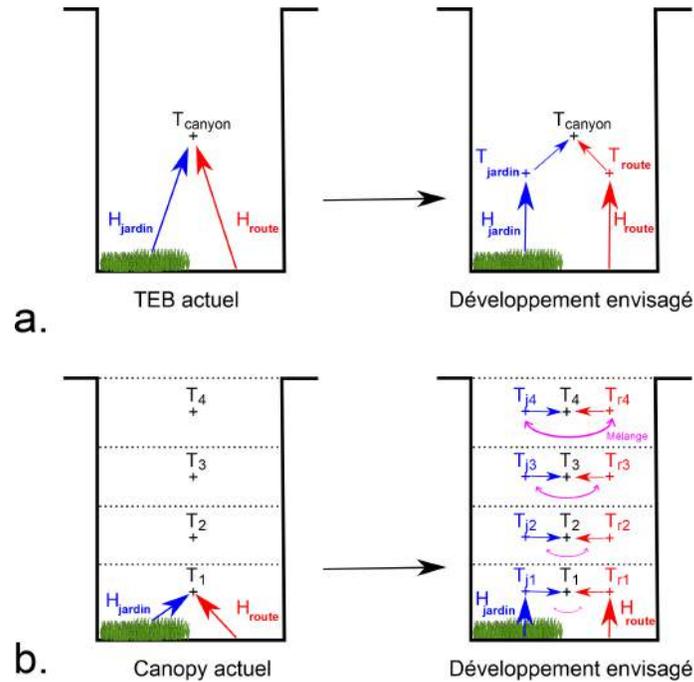


FIGURE 5.2 – Développement envisagé pour un diagnostic de la température dans une zone végétalisée dans le model TEB sans CANOPY (a) et dans le model TEB avec CANOPY (b).

À Paris, les simulations avec TEB donnent des bonnes tendances pour la variabilité de température pour les zones STAD, qui contourne des terrains de sport, RUPY, VEBE et GRBD qui sont situés sur des grands axes ou des rues assez denses. Les zones végétalisées comme EHPA qui longe un parc ou CAMP située dans la "Campagne à Paris", îlot de maisons d'ouvriers situé au cœur d'un quartier dense, renvoient des variabilités positives alors que ce sont les zones les plus fraîches du quartier. Ces zones sont en effet plus végétalisées que le reste du quartier, comme à Marseille. Mais elles sont aussi plus ouvertes dans un rayon proche du parcours. CAMP regroupe les points du parcours passant au milieu de maisons et EHPA passe à côté d'un parc. Le rayon d'influence choisi pour la densité de surface de mur pourrait être trop grand pour ces zones. Les zones PYTH, située dans la cité Python, BAGN, qui longe le rond point de la porte de Bagnollet et PERI qui passe au-dessus du périphérique sont des zones où la température modélisée avec TEB est trop faible par rapport aux mesures. Ces zones sont assez peu végétalisées ce qui fait qu'elles ont une variabilité positive que le modèle n'arrive pas à reproduire. Cela s'explique par le fait qu'elles ne correspondent pas à l'hypothèse de rue canyon. Ce sont des zones urbanisées mais très peu denses et les bâtiments y sont placés perpendiculairement ou de manière non régulière. En revanche, les zones RUPY, VEBE et GRBD sont des rues dans un quartier dense parisien haussmannien qui correspond bien à l'hypothèse de rue canyon. C'est pourquoi TEB arrive à reproduire correctement leur variabilité, tout comme la zone STAD qui est une zone très ouverte. À Marseille, il n'y a que très peu de zones qui correspondent à l'hypothèse de rue canyon. Mais comme leur densité de surface de mur est du même ordre de grandeur que celle des autres zones, il n'y a pas de variabilité qui s'en dégage.

Le modèle TEB permet donc de reproduire la variabilité de température due aux paramètres

morphologiques du tissu urbain mais malgré l’inclusion des jardins à la base du canyon, il ne prend pas assez en compte la végétation qui joue un rôle tout aussi prépondérant que la morphologie. De plus, il est limité par son hypothèse de rue canyon. Cette hypothèse, qui est valide à l’échelle du quartier l’est beaucoup moins à l’échelle de quelques centaines de mètres pour des tissus urbains variés. Les relations statistiques trouvées au chapitre précédent resteront donc celles utilisées pour la modélisation de la variabilité de température à fine échelle dans la chaîne de mesure.

5.3 Modélisation simple d’effets d’ombrage avec TEB

Le modèle TEB peut être utile pour modéliser des effets d’ombrages à fine échelle. Dans le chapitre précédent, les points de mesure correspondant à des zones ombragées le matin ou l’après-midi avait été exclus de la modélisation statistique. L’idée ici est de pouvoir reproduire l’effet de l’ombrage simplement avec TEB. Pour cela, j’ai relancé une simulation sur la zone RUPY à Paris, composée de petites rues dans un quartier dense et ombragé l’après-midi, en diminuant de 80% le rayonnement solaire direct l’après-midi. Les résultats sont illustrés dans la figure 5.3.

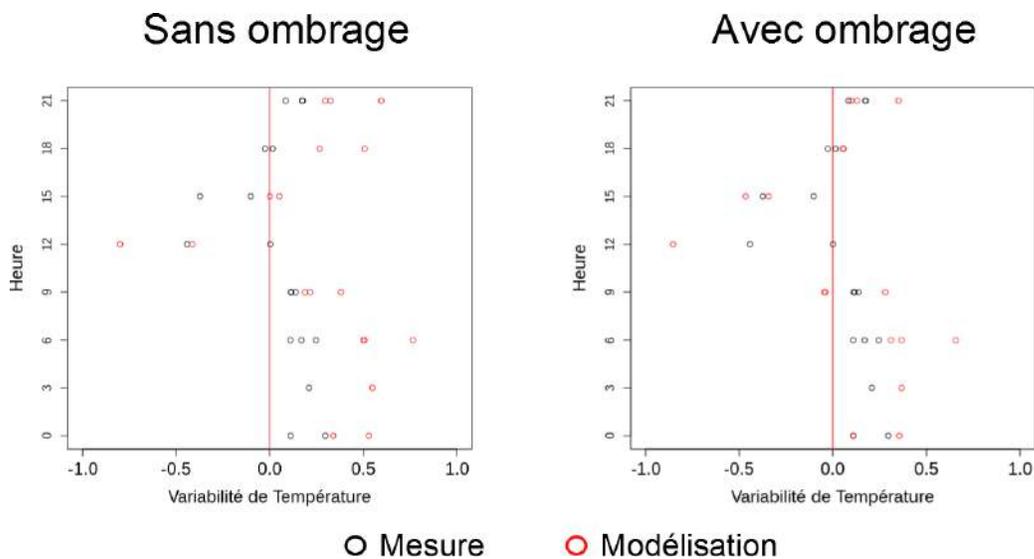


FIGURE 5.3 – Variabilité de température mesurée par la station mobile en noir et modélisée par TEB en rouge en fonction de l’heure des parcours avec à gauche la simulation sans ombrage et droite la simulation avec ombrage.

La simulation sans ombrage fait apparaître des variabilités de températures négatives l’après-midi, qui ne sont pas reproduites par le modèle. Mais lorsque le rayonnement solaire est atténué, c’est toute la variabilité sur la journée qui est mieux reproduite. L’après-midi les effets d’ombrages apparaissent nettement mais ils induisent une baisse de la variabilité la nuit car moins de chaleur est stockée dans les bâtiments ainsi qu’en début de journée par continuité des températures nocturnes. Cette approche très simple permet de reproduire des résultats probants sur une zone qui correspond à l’hypothèse de rue canyon.

Il pourrait donc être intéressant dans de futurs développements de séparer dans TEB l'évolution de la température de la route à l'ombre et au soleil et leur température à deux mètres associée. En effet, si les ombrages sont bien pris en compte dans TEB, une seule température de canyon y est calculée. Pour pouvoir diagnostiquer une température à l'ombre dans la rue, un futur développement de TEB pourrait être de séparer le canyon en deux parties (appelées droite et gauche dans la figure 5.4).

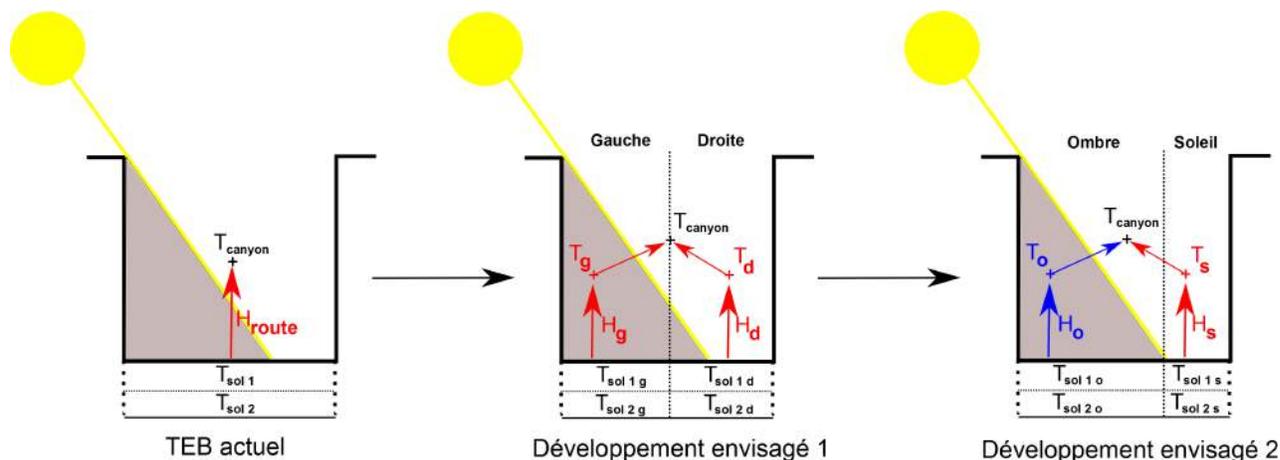


FIGURE 5.4 – Développement envisagé pour un diagnostic de la température à l'ombre dans TEB.

Un bilan énergétique serait fait de chaque côté du canyon, intégrant le rayonnement incident dans chaque colonne d'air. Il en résulterait des températures de droite et de gauche distinctes si l'ombre est conséquente dans le canyon. Cette formulation est une première possibilité. Un développement après cette étape serait de considérer deux volumes variant au cours de la journée en fonction de l'ensoleillement dans le canyon. La surface du premier volume correspondrait à la surface ombragée dans la rue, et la surface du second serait la surface ensoleillée. Deux températures 'ombre' et 'soleil' seraient alors diagnostiquées dans le canyon. Les volumes de chaque partie devant varier dans le temps, cette approche ne serait développée que si celle vue précédemment ne donne pas de résultats satisfaisants. Une approche similaire pourrait être mise en place avec CANOPY. L'illustration précédente ne prend pas en compte les jardins. On supposera dans un premier temps qu'il n'est pas nécessaire de mettre en place les effets d'ombrages sur les zones végétalisées elles-mêmes car celles-ci sont surtout présentes dans des zones ouvertes où les effets d'ombrages ne sont pas prépondérants. On pourrait donc se limiter à deux zones de route et une de jardin.

Développer une paramétrisation sous-maille dans TEB pourrait être une piste pour coupler les relations statistiques, utiles quand l'hypothèse de rue canyon n'est plus valable et les effets d'ombrage. Mais dans un premier temps le rôle de la végétation dans TEB doit être amélioré et c'est l'objet de la thèse en cours d'Émilie Redon dans notre équipe. Je garderai pour l'établissement complet de la chaîne de modélisation les relations statistiques pour modéliser la température à fine échelle.

5.4 Exemple de la mise en place de la chaîne de modélisation complète

Pour conclure ce travail de thèse, j'ai mis en place la chaîne complète de modélisation sur Paris. Paris est la seule ville sur laquelle le générateur de climat urbain spatialisé a été validé pour le moment. C'est donc sur cette ville que la chaîne va être testée.

Le principe de la chaîne de modélisation est de partir d'une température provenant d'une station ou de plusieurs stations opérationnelle(s) rurale(s) et de la description d'une ville pour simuler la température à l'échelle de la rue dans un quartier. Pour cela le générateur de climat urbain spatialisé va être utilisé pour calculer l'îlot de chaleur urbain sur une maille de 2km de côté sur toute l'agglomération. Les données météorologiques issues de la simulation sur la maille contenant la station de référence de la campagne de mesure parisienne sont extraites. Ces données vont servir de données d'entrée au modèle statistique pour calculer l'amplitude de la variabilité de température. Les relations statistiques trouvées pour Paris permettront ensuite de simuler la température à l'échelle du quartier.

La première étape de la chaîne de modélisation est donc d'effectuer une simulation avec le générateur de climat urbain spatialisé sur Paris sur une période couvrant la période de la campagne de mesure. J'ai pour cela pris les données issues des stations opérationnelles de Roissy, Orly, Pontoise et Toussus-le-Noble en région parisienne pour garder la même méthodologie que dans le chapitre 2. J'ai monté à 30 mètres les données des stations et j'ai ensuite moyenné les quatre stations pour obtenir un fichier de forçage unique. La simulation a ensuite été lancée à partir du 1er octobre 2013 (la campagne de mesure a eu lieu du 7 au 10 octobre). Une illustration de l'îlot de chaleur urbain à deux mètres le 8 octobre 2013 à minuit (UTC) est donnée figure 5.5.

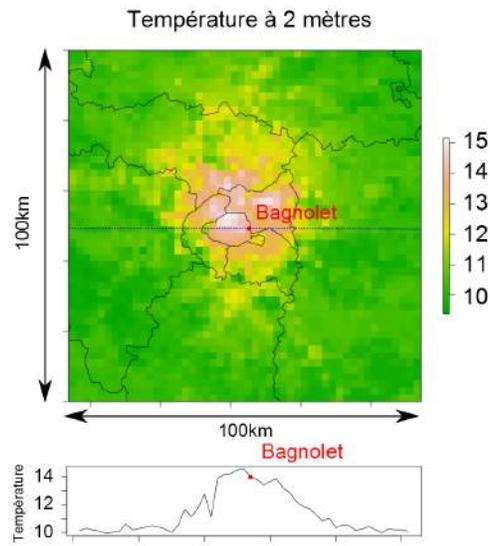


FIGURE 5.5 – Température à 2 mètres simulée par le générateur de climat urbain spatialisé le 8 octobre à 0h UTC. Le point rouge représente l'emplacement du mât de mesure porte de Bagnole. La figure du bas représente la température modélisée sur le transect représenté en pointillés bleus sur la figure supérieure.

Le point rouge représente la position de la station de référence. La porte de Bagnolet se trouve donc en plein cœur de l'îlot de chaleur urbain comme l'illustre le tracé ouest-est de la température en-dessous de la représentation spatiale.

Sur les trois jours de campagne de mesure (voir Figure 5.6), le générateur de climat urbain permet d'obtenir une température proche des mesures de la température au sein du quartier. Il semble néanmoins que les valeurs d'ICU renvoyée sur les deux premières nuits sont un peu faibles. Le jour, les mesures correspondent à la simulation.

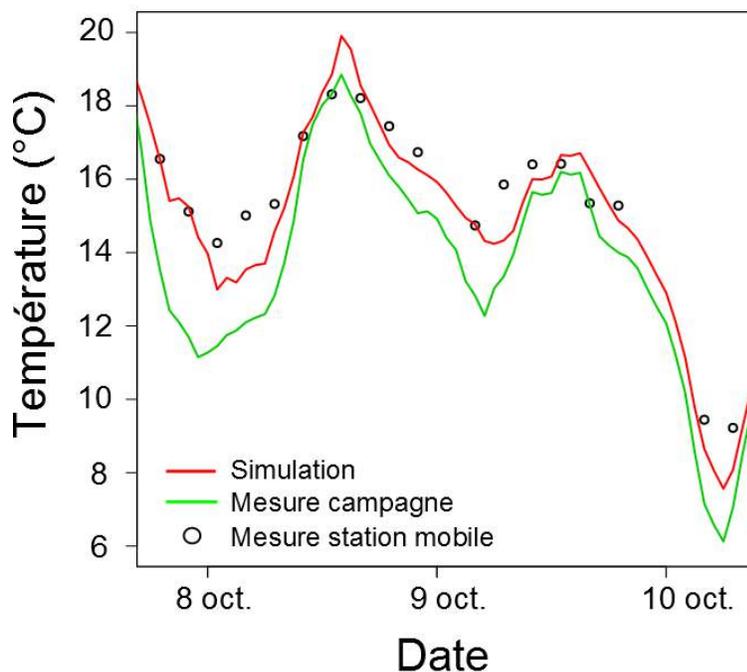


FIGURE 5.6 – Température mesurée lors des parcours (cercle noir), température de la station moyenne de campagne (en vert) et température simulée par le générateur de climat urbain spatialisé (en rouge) lors des trois jours de campagne de mesures à Paris en octobre 2013.

Le biais moyen et l'erreur quadratique moyenne entre la température mesurée et la température simulée sont respectivement de $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ et de $0,77\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec un coefficient R^2 de 0,95, ce qui correspond à de bonnes performances pour un modèle simple. Si ce travail n'était fait qu'avec la température de campagne, le biais moyen serait de $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'erreur quadratique moyenne de $1,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ et le coefficient R^2 de 0,89. L'utilisation du générateur de climat urbain est donc un gain sensible dans la représentation de la température en ville par rapport à ne travailler qu'avec la donnée brute de campagne.

Pour déterminer la variabilité de la température à l'échelle de la rue dans le quartier, la relation

$$\Delta T_t(x) = \text{Amp}(t) \times \text{Var}(x) \quad (5.1)$$

est employée. Les données issues de la simulation sont utilisées pour déterminer l'amplitude Amp de la variabilité du signal. Dans le chapitre 4, j'ai déterminé statistiquement que l'amplitude de la variabilité du signal était reliée aux paramètres météorologiques par la relation

$$Amp = 0,58 + 0,0015Ray + 0,053T_{med} - 0,16V_s - 0,041Couv \quad (5.2)$$

Le rayonnement solaire Ray et la couverture nuageuse $Couv$ sont issus des forçages de la station à la campagne. Le vent V_s est celui de la station rurale multiplié par 0,6 pour prendre en compte la rugosité des bâtiments en ville. La température moyenne T_{med} est la température modélisée à deux mètres par le générateur de climat urbain. L'amplitude déterminée par les données issues de la simulation ont un biais moyen de $0,2^\circ C$ et une erreur quadratique moyenne de $0,3^\circ C$ par rapport à l'amplitude déterminée par les mesures de la station de référence. Ce sont aussi des scores acceptables étant donnée la modélisation mise en place.

La variabilité de température est finalement calculée en multipliant les relations statistiques de l'équation 4.5 donnant le paramètre Var par l'amplitude simulée Amp . Les résultats sont illustrés dans la figure 5.7.

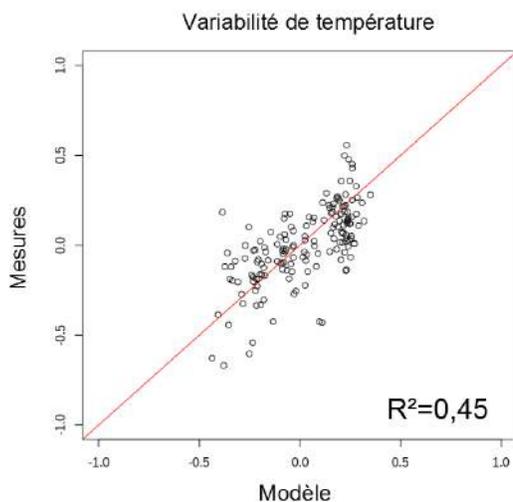


FIGURE 5.7 – Variabilité de température mesurée en fonction de la variabilité modélisée par la chaîne de modélisation à Paris.

Les résultats issus de la chaîne de simulation sont semblables à ceux obtenus avec les données mesurées (R^2 de 0,45 dans les deux cas, biais moyen de $0,16^\circ C$ avec la chaîne contre $0,01^\circ C$ et erreur quadratique moyenne de $0,17^\circ C$ avec la chaîne contre $0,16^\circ C$). Les données météorologiques étant proches de celles mesurées, les amplitudes Amp calculées par les données de la station de référence ou par les données issues de la simulation avec le générateur de climat urbain spatialisé sont proches. La variabilité spatiale Var ne dépendant pas des paramètres météorologiques, elle est identique dans les deux cas de figure. Il est donc logique que les résultats sur la variabilité de température simulée soient semblables à celle simulée avec les données mesurées.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une chaîne complète de modélisation de température urbaine à haute résolution a été mise en place sur le cas de Paris. Cette chaîne couple les travaux sur le générateur de climat urbain spatialisé pour la modélisation à l'échelle de la ville et le travail sur le croisement entre la variabilité de température à l'échelle de la rue en fonction d'indicateurs urbains. Pour la modélisation à haute résolution, il est nécessaire de travailler avec des relations statistiques plutôt qu'avec le modèle TEB car ce dernier affiche certaines limites. Il ne reproduit que les variabilités de température causées par la morphologie du tissu urbain et sous-estime celles causées par la végétation. De plus, TEB est limité par son hypothèse de rue canyon. Sur des zones urbanisées mais n'ayant pas une géométrie conforme à l'hypothèse de rue canyon, il renvoie en effet des variabilités de température à l'échelle de la rue trop froide. Cependant TEB peut être un outil intéressant pour prendre en compte des effets comme les effets d'ombrage et un couplage entre les relations statistiques et le modèle pourrait permettre d'améliorer la modélisation à haute résolution de la ville. Cependant, dans un premier temps, les effets de la végétation dans le modèle doivent être améliorés, notamment en mettant en place une influence de la végétation plus réaliste sur toute la verticale du modèle multi-couches de canopée CANOPY et en séparant la température du canyon en température de l'air au-dessus du jardin et température de l'air au-dessus de la route au lieu d'une unique température.

La chaîne de modélisation sur le cas de Paris donne des résultats satisfaisants étant donné la rapidité en temps de calcul qu'il a fallu pour obtenir les résultats. La simulation avec le générateur de climat urbain sur 10 jours (qui nécessite environ 10 minutes de temps de calcul sur un ordinateur personnel) fournit des résultats pour la température à deux mètres très proches de celles mesurées avec la station mobile sur les parcours. La variabilité de température à l'échelle de la rue donne quant à elle des résultats proches de ceux obtenus avec les données de la station de référence située au sein du quartier.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

L'objectif de cette thèse était de mettre en place une chaîne de modélisation rapide permettant de simuler la température urbaine à l'échelle de la rue à partir des données de température situées en dehors de la ville et de la description du tissu urbain. Pour cela deux approches de modélisation à différentes échelles ont été couplées.

La première approche consiste à calculer l'îlot de chaleur urbain à l'échelle de l'agglomération avec une résolution de l'ordre d' 1km^2 . Pour cela, j'ai développé le générateur de climat urbain spatialisé. Ce modèle permet de reproduire la température en ville sans utiliser un modèle atmosphérique méso-échelle. Il ne nécessite d'avoir en entrée que la description du tissu urbain et les données d'une station de mesures opérationnelle se situant en périphérie de la ville, par exemple dans un aéroport. Le générateur de climat urbain spatialisé, que j'ai développé dans la première partie de ma thèse, comporte un modèle statistique de couche limite, dont la hauteur dépend des conditions météorologiques synoptiques et de la description de la ville en surface. Il comprend aussi un modèle lagrangien d'advection par le vent. Le générateur de climat urbain spatialisé a été validé sur Paris sur une année complète en comparaison avec une simulation d'un an faite avec le modèle MesoNH. Le biais moyen et l'erreur quadratique moyenne entre la simulation avec le générateur et celle avec MesoNH sont respectivement de $-0,04\text{ }^\circ\text{C}$ et de $0,83\text{ }^\circ\text{C}$. Ces résultats sont satisfaisants étant donné la rapidité et la simplicité du générateur. Le générateur de climat urbain reproduit la variabilité saisonnière du climat urbain, ce qui le rend utilisable pour des études sur une ou plusieurs années. Il a déjà été utilisé pour des études sur le changement climatique en ville dans les projets MUSCADE et ACCLIMAT (MASSON et al. 2014a) ou l'étude de l'impact des panneaux solaires en ville (MASSON et al. 2014b). Le générateur de climat urbain spatialisé doit être validé sur d'autres villes que Paris. Avec les données du projet CAPITOUL, il pourrait être testé sur Toulouse. Beaucoup d'agglomérations étant situées en bord de mer, il faudrait aussi paramétrer l'influence de la brise de mer dans le modèle, phénomène qui n'est pas encore pris en compte à l'heure actuelle. De même, on pourrait réfléchir à comment prendre en compte les effets de l'orographie pour modéliser le climat urbain de villes entourées de montagnes.

La deuxième approche consiste à obtenir de manière statistique la variabilité de température à l'échelle de la rue à partir d'une description du tissu urbain à haute résolution et des données météorologiques issues de la simulation à l'échelle de la ville avec le générateur de climat urbain spatialisé. L'utilisation du modèle TEB à haute résolution n'est pas suffisante à l'heure actuelle. Ce modèle ne prend en effet pas suffisamment en compte les effets de la végétation à l'échelle de la rue et est limité par son hypothèse de rue canyon à une résolution de quelques centaines de mètres.

C'est pourquoi une approche statistique a été choisie pour modéliser la variabilité de température à haute résolution. Une telle étude nécessite habituellement un modèle de type CFD. Mais le temps de calcul d'un modèle de CFD est très long et ne permet pas de faire une modélisation rapide et accessible en dehors des laboratoires de recherche en sciences atmosphériques.

Pour comprendre comment se comporte la variabilité de température à haute résolution, des campagnes de mesures ont été réalisées dans les quartiers de trois villes à Paris, Marseille et Toulouse dans le cadre du projet EUREQUA. J'ai participé à chacune de ces campagnes et j'ai plus particulièrement organisé celle de Paris, notamment pour le choix du parcours de mesures et pour déterminer et mettre en place le réseau de mesures fixes. En tout, cinq campagnes de mesures ont eu lieu, une de deux semaines à Marseille en juin 2013, une de deux semaines à Paris en octobre 2013 et trois à Toulouse en janvier, avril et juin 2014. Pour chaque campagne de mesures, une période d'observations intensives de trois jours a été mise en place avec des parcours de mesures instrumentés effectués toutes les trois heures. Ces parcours ont été faits avec une station mobile piétonne unique en son genre développée par le CNRM/GAME spécifiquement pour le projet. J'ai donc pu travailler avec des données de température de l'air à très haute résolution spatiale et temporelle sur trois villes différentes pour mener cette étude.

J'ai fait le choix de considérer que la variabilité de température était due aux conditions météorologiques sur le quartier étudié, à la morphologie et à l'occupation du sol du quartier. Cette hypothèse est une hypothèse forte car elle ne prend pas en compte les matériaux qui constituent le tissu urbain ni les rôles des écoulements à fine échelle ou des flux turbulents qui peuvent être prépondérants à l'échelle de la rue. L'objectif initial était de mettre en place une relation statistique qui soit valable sur les trois villes quelle que soit la saison. J'ai considéré que l'amplitude de la variabilité de la température était due aux conditions météorologiques et que sa variabilité spatiale était due à la morphologie et à l'occupation du sol au sein du quartier. Pour l'amplitude de la variabilité, j'ai mis au point une relation statistique valable sur les trois villes avec un coefficient de corrélation global R^2 d'environ 0,8 ce qui est satisfaisant. Pour déterminer l'influence de la morphologie et de l'occupation du sol, des indicateurs urbains ont été choisis sur les trois villes à partir d'un traitement sous système d'information géographique. J'ai ensuite déterminé quel était le rayon d'influence de chacun de ces indicateurs pour chaque ville puis mis en place une relation statistique entre les indicateurs pertinents pour reproduire la variabilité de température dans le quartier.

Cette étude a permis d'aboutir à plusieurs conclusions importantes. Premièrement, il n'existe pas de rayon d'influence commun à des indicateurs quelles que soient la ville et la saison. L'idée d'une relation statistique unique entre les villes a donc dû être abandonnée. Deuxièmement, les indicateurs urbains les plus influents sont la fraction de végétation et la fraction de surface imperméable. Les indicateurs de morphologie sont plus influents la nuit que le jour, ce qui met en évidence leur rôle dans le stockage le jour de la chaleur et son relâchement la nuit. Troisièmement, il est important de dissocier différentes couches de végétation (herbacées, arbustives et arborées) car chacune d'elle peut avoir une influence différente. Les arbres produisent de l'ombre et sont représentatifs de grandes zones végétalisées comme des jardins ou parcs. Les strates herbacées et arbustives peuvent être isolées dans le tissu urbain et n'ont une influence qu'en surface.

Si l'approche a donné des résultats corrects sur Marseille et Paris avec des coefficients de corrélation respectivement de 0,68 et 0,44, l'étude du quartier toulousain n'a pas mené à une relation statistique fiable, quelle que soit la saison. Dans ce quartier, l'hypothèse de travail de départ n'est pas suffisante. Le quartier n'a pas une densité de bâti ou de végétation assez contras-

tée. Les effets de l'écoulement de l'air à fine échelle et les matériaux qui constituent le tissu urbain doivent être prépondérants. Néanmoins l'étude du quartier toulousain a permis de mettre en évidence la variabilité saisonnière des indicateurs urbains au sein du quartier. En effet, comme la végétation évolue en fonction des saisons, le signal associé à un indicateur de végétation ne sera pas le même en hiver qu'en été. Par ailleurs, il peut être important de prendre en compte aussi le comportement des habitants d'une ville, car un jardin qui sera par exemple bien arrosé et entretenu n'aura pas la même température qu'un jardin sec.

Pour mieux comprendre les phénomènes en jeu au sein de chacun des quartiers, il serait intéressant de travailler avec une modélisation CFD sur chacun des quartiers étudiés. De telles simulations vont être réalisées dans le cadre du projet EUREQUA mais elles n'étaient pas disponibles avant la fin de cette thèse. Leur étude permettra par exemple de mieux comprendre les phénomènes en jeu dans le quartier toulousain. Par ailleurs, pour aller plus loin dans l'approche statistique à haute résolution de la variabilité de la température urbaine, il serait intéressant d'effectuer des campagnes de mesures plus longues et sur d'autres quartiers avec la station de mesure piétonne. En effet, je n'ai pu travailler qu'avec trois jours complets de mesures pour établir ces relations statistiques, ce qui constitue une limite dans l'approche. Pour une meilleure représentativité des mesures, il faudrait avoir plusieurs jours de mesures pour différents types de temps (couverts, ciel clair, venteux ou non, pluvieux ou non). Cela nécessite néanmoins des moyens humains considérables.

Enfin, les relations statistiques n'étant valables que sur un quartier à une période donnée, il pourrait être utile de développer une paramétrisation sous-maille dans TEB couplant des effets physiques pris en compte par le modèle et les relations statistiques qui permettraient de s'affranchir de l'hypothèse de rue canyon quand celle-ci n'est plus valable en sein d'un quartier. Cela permettrait de prendre en compte des effets saisonniers et des effets d'ombrages sur la variabilité de la température de l'air au sein même du canyon urbain. Mais dans un premier temps, l'influence de la végétation dans la canopée urbaine dans le modèle doit être développée car les mesures des campagnes EUREQUA ont mis en évidence la sous-estimation de l'influence de la végétation pour une étude à haute résolution. Cela peut être envisagé en calculant dans TEB et CANOPY une température de l'air au-dessus des jardins et au-dessus de la route au lieu de considérer une température unique de canyon. L'effet des arbres dans la canopée, aussi bien de par leurs effets d'ombrage ou par la modification de l'écoulement d'air qu'ils entraînent, doit aussi être développé.

Finalement, une chaîne de modélisation complète couplant le générateur de climat urbain spatialisé et les relations statistiques croisant variabilité de température et indicateurs urbains de morphologie et d'occupation du sol a été mise en place sur le cas de Paris. Cette chaîne donne des résultats satisfaisants étant donnée la simplicité des techniques de modélisation mise en place, remplissant l'objectif de simuler la température urbaine à haute résolution avec des moyens et données accessibles en dehors des laboratoires de sciences atmosphériques.

Annexe A

Questionnaire EUREQUA

Dans cette annexe est présentée une version générique du questionnaire effectivement proposé aux enquêtés lors des parcours des campagnes de mesure du projet EUREQUA. La version présentée ici ne comporte qu'un volet sur un point d'arrêt. Lors d'un parcours complet, ce questionnaire est répété autant de fois qu'il y a de points d'arrêt sur le parcours. Les questions à un point d'arrêt portent aussi bien sur les paramètres physiques évalués sur un parcours (bruit, confort thermique, pollution) que sur des ressentis plus larges comme l'appréciation globale du lieu, sa beauté, son entretien le sentiment de sécurité qu'il s'en dégage etc... La dernière partie n'est remplie par l'enquêté qu'à la fin du parcours et permet de faire un bilan du parcours effectué.

Arrêt N°1 :

Pouvez-vous nous donner 3 à 5 mots qui décrivent au mieux selon vous cet endroit ? (1^{ère} colonne).

Colonne 2 : Classez ces mots de 1 (le plus important pour vous) à 5 (le moins important pour vous)

Colonne 3 : Indiquez pour chacun des mots s'il est plutôt positif (+) ou négatif (-)

Mots	Importance (de 1 à 5)	Evaluation (+ ou -)

⌚ **C'est un endroit que vous fréquentez :**

- Jamais Rarement Occasionnellement Régulièrement

CONFORT CLIMATIQUE

⌚ **Comment évaluez-vous votre confort climatique à cet endroit?**

- Pas confortable Peu confortable Assez confortable Très confortable

Quels sont les éléments qui influencent votre confort ou inconfort climatique à cet endroit ?

(Dans la colonne 1, entourer les paramètres qui vous paraissent importants, puis cochez dans la colonne 2 la case qui correspond à votre choix)

⌚ CHALEUR	<input type="checkbox"/> Froid	<input type="checkbox"/> plutôt froid	<input type="checkbox"/> plutôt chaud	<input type="checkbox"/> Chaud
⌚ HUMIDITE	<input type="checkbox"/> Humide	<input type="checkbox"/> plutôt humide	<input type="checkbox"/> plutôt sec	<input type="checkbox"/> Sec
⌚ VENT	<input type="checkbox"/> Venteux	<input type="checkbox"/> plutôt venteux	<input type="checkbox"/> plutôt calme	<input type="checkbox"/> Calme
⌚ ENSOLEILLEMENT	<input type="checkbox"/> Ombragé	<input type="checkbox"/> plutôt ombragé	<input type="checkbox"/> plutôt ensoleillé	<input type="checkbox"/> Ensoleillé
⌚ AUTRES, précisez				

⌚ **A votre avis, quelle température fait-il actuellement dans ce lieu précis ?**

.....C°

QUALITE DE L'AIR

⌚ **Que pensez-vous de la qualité de l'air à cet endroit ?**

- Très mauvaise Plutôt mauvaise Plutôt bonne Très bonne

⌚ **Sur quoi repose votre évaluation?**

- Odeur Trafic Paysage Difficulté respiratoire Autres.....

Précisez vos réponses :

.....

CONFORT SONORE

⌚ **Trouvez-vous cet endroit :**

- Très bruyant Plutôt bruyant Plutôt calme Très calme

⌚ **Que pensez-vous de l'ambiance sonore à cet endroit?**

- Très désagréable Plutôt désagréable Plutôt Agréable Très agréable

Quels sont les éléments de l'environnement qui vous ont permis de donner cette réponse ?

.....

⌚ **Quels sont les différents sons que vous entendez à cet endroit? (Colonne 1)**

⌚ **Pour chaque son, pouvez-vous évaluer :**

- Son intensité ou force sonore : de « très faible » à « très fort » (colonne 2)
- Votre appréciation : de « très désagréable » à « très agréable » (colonne 3)

TYPE DE SONS	INTENSITE / FORCE SONORE				APPRECIATIONS			
1.....	Très Faible	Faible	Fort	Très fort	Très désagréable	Plutôt désagréable	Plutôt Agréable	Très agréable
2.....	Très Faible	Faible	Fort	Très fort	Très désagréable	Plutôt désagréable	Plutôt Agréable	Très agréable
3.....	Très Faible	Faible	Fort	Très fort	Très désagréable	Plutôt désagréable	Plutôt Agréable	Très agréable
4.....	Très Faible	Faible	Fort	Très fort	Très désagréable	Plutôt désagréable	Plutôt Agréable	Très agréable

APPRECIATION DU LIEU

🕒 **Appréciez-vous cet endroit?**

- Pas du tout
 Plutôt non
 Plutôt oui
 Tout à fait

Pourquoi ?

.....

.....

Pouvez-vous évaluer le lieu selon les critères ci-dessous ? (Plusieurs réponses possibles, merci de cocher les cases correspondantes à vos choix)

critères	Intensité				Appréciation			
	--	--	+	++	Très désagréable	Plutôt désagréable	Plutôt agréable	Très agréable
Entretien du lieu	Pas entretenu	Peu entretenu	Assez entretenu	Très bien entretenu				
Beauté du lieu	Laid	plutôt laid	plutôt beau	Très beau				
Sécurité du lieu	Dangereux	plutôt dangereux	plutôt sécurée	Très sécurée				
Luminosité du lieu	Sombre	plutôt sombre	plutôt lumineux	Très lumineux				
Animation du lieu	Pas animé	Peu animé	Assez animé	Très animé				
Fréquentation du lieu	Mauvaise	plutôt mauvaise	plutôt bonne	Très bonne				

Autres :

.....

.....

A la fin du parcours commenté :

Maintenant que tous les points d'arrêt sont renseignés, pouvez-vous nous dire :

Quel est l'endroit du parcours que vous avez préféré ? Pourquoi ?

.....
.....
.....

Quel est celui que vous avez le moins aimé ? Pourquoi ?

.....
.....
.....

Pouvez-vous classer les points d'arrêts selon chacun des 3 critères suivants ? (1 correspondant au lieu le mieux évalué et 7 au lieu le moins bien évalué)

N° et nom du lieu <i>(Colonne pré-remplie)</i>	Confort climatique	Qualité de l'air	Confort acoustique	Commentaire, Pourquoi ?
Nom du lieu 1				
Lieu 2				
Lieu 3				
Lieu 4				
Lieu 5				
Lieu 6				
Lieu 7				

Questions pour les habitants du quartier

Age : Sexe : F M

Emploi :

Situation matrimoniale/Nombre d'enfants :

Adresse :

Depuis quand habitez-vous dans ce quartier ?

Quel quartier habitiez-vous avant ?

Depuis quand habitez-vous à Paris/Marseille/Toulouse?

Où viviez-vous avant de vous installer à Paris/Toulouse/Marseille?

Comment et pourquoi avez-vous choisi d'habiter ce quartier ?

.....
.....
.....
.....
.....

Etes-vous satisfait de votre logement Oui Non

Etes-vous satisfait de votre immeuble/résidence Oui Non

Etes-vous satisfait votre quartier ? Oui Non

Etes-vous satisfait de vivre à Paris/Marseille/Toulouse ? Oui Non

Aimez-vous vivre dans une ville en général ? Oui Non

Aimeriez-vous vivre à la campagne ? Oui Non

Coordonnées pour vous contacter lors de la prochaine étape d'étude sur le quartier :

Nom, prénom :

Mail :

Téléphone :

N.B : Ces informations nous permettrons seulement de vous recontacter. Le questionnaire que vous venez de remplir est quant à lui totalement anonyme.

Questions pour les « non-résidents » dans le quartier

Age :	Sexe : <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/>
M	
Emploi :	
Situation matrimoniale/Nombre d'enfants :	
Adresse :	
Depuis quand habitez-vous votre quartier ?	
Depuis quand habitez-vous à Paris/Marseille/Toulouse?	
Fréquentez-vous ce quartier dans lequel nous sommes ?	
<input type="checkbox"/> Jamais	<input type="checkbox"/> Rarement
<input type="checkbox"/> Occasionnellement	<input type="checkbox"/> Régulièrement
Précisez votre réponse :	
.....	
.....	
.....	
.....	
Appréciez-vous ce quartier ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
Pourquoi :	
.....	
.....	
.....	
.....	
Coordonnées pour vous contacter lors de la prochaine étape d'étude sur le quartier :	
Nom, prénom :	
Mail :	Téléphone :
<i>N.B : Ces informations nous permettrons seulement de vous recontacter. Le questionnaire que vous venez de remplir est quant à lui totalement anonyme.</i>	

Annexe B

Présentation des zones déterminées de manière experte à Marseille, Paris et Toulouse

Les zones choisies de manière experte sur les parcours de Marseille, Paris et Toulouse sont présentées dans cette annexe avec une image aérienne, une image vue de la rue, un bref descriptif et le détail des valeurs des indicateurs urbains et leur anomalie par rapport à la moyenne du parcours de la ville concernée.

Marseille - Zone JARD

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone traversant les jardins partagés.

Indicateurs urbains (anomalie)



VEGE = 20.8 (-6.4)
HERB = 8.6 (+5.8)
ARBUS = 5.6 (-4.8)
AR_JAR = 6.6 (-7.4)
AR_ALI = 0.4 (+0.1)
SOLNU = 0 (-0.4)



ROUTE = 63.1(+10.1)
BATI = 15.7 (-3.0)
DB = 2.0 (-0.0)
DSM = 0.7 (+0.0)
HM = 11.1 (+0.7)

Marseille - Zone VIEN ○

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone composée de maisons individuelles (rue de Vienne)

Indicateurs urbains (anomalie)

	{	VEGE = 9.0 (-18.2)		{	ROUTE = 62.2 (+9.2)
		HERB = 1.2 (-1.6)			BATI = 28.5 (+9.8)
		ARBUS = 2.3 (-8.1)			DB = 1.7 (-0.3)
		AR_JAR = 5.4 (-8.6)			DSM = 0.8 (+0.1)
		AR_ALI = 0.0 (-0.3)			HM = 5.8 (-6.0)
		SOLNU = 0 (-0.4)			

Marseille - Zone PONT ●

Vue aérienne

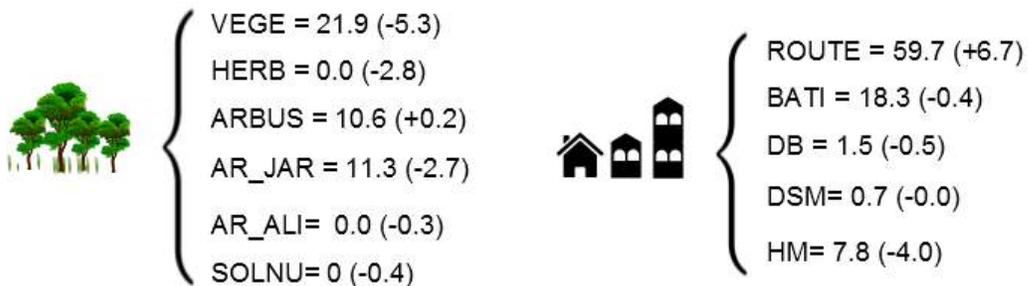


Vue de la rue



Description : route longeant une zone industrielle menant sous une autoroute.

Indicateurs urbains (anomalie)



Marseille - Zone MIRA ●

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone composée de maisons individuelles avec jardins.
(rue de Miramar).

Indicateurs urbains (anomalie)



VEGE = 19.2 (-8.0)
HERB = 0.6 (-2.2)
ARBUS = 9.5 (-0.9)
AR_JAR = 9.1 (-4.9)
AR_ALI = 0.0 (-0.3)
SOLNU = 0 (-0.4)



ROUTE = 49.1 (-3.9)
BATI = 31.5 (+12.8)
DB = 2.3 (+0.3)
DSM = 1.1 (+0.4)
HM = 7.0 (-4.8)

Marseille - Zone VALB ●

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : boulevard de la valbarelle, axe routier principal du quartier.

Indicateurs urbains (anomalie)



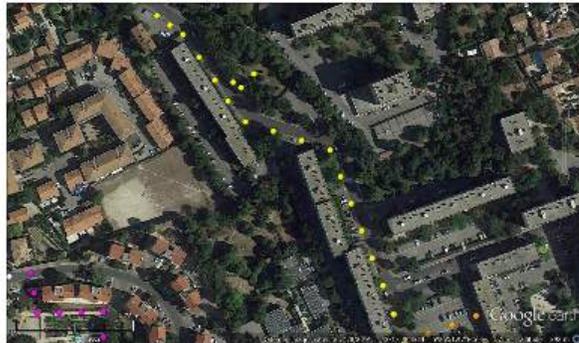
VEGE = 31.9 (+4.7)
HERB = 3.1 (+0.3)
ARBUS = 15.3 (+4.9)
AR_JAR = 13.4 (-0.6)
AR_ALI = 0.0 (-0.3)
SOLNU = 0 (-0.4)



ROUTE = 48.4 (-4.6)
BATI = 19 (+0.3)
DB = 1.5 (-0.5)
DSM = 0.7 (+0.0)
HM = 7.6 (-4.2)

Marseille - Zone STJA

Vue aérienne



Vue de la rue



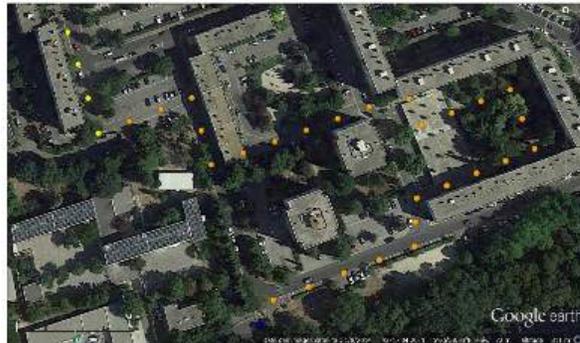
Description : entrée de la résidence de Château Saint Jacques, composée de hautes barres d'immeubles et végétalisées.

Indicateurs urbains (anomalie)

	{	VEGE = 32.2 (+5.0)		{	ROUTE = 53.2 (+0.2)
		HERB = 3.3 (+0.5)			BATI = 14.2 (-4.5)
		ARBUS = 2.8 (-7.6)			DB = 2.8 (+0.8)
		AR_JAR = 26.1 (+12.1)			DSM = 0.7 (+0.0)
		AR_ALI = 0.4 (+0.1)			HM = 18.8 (+7.0)
		SOLNU = 0 (-0.4)			

Marseille - Zone ILOT

Vue aérienne



Vue de la rue



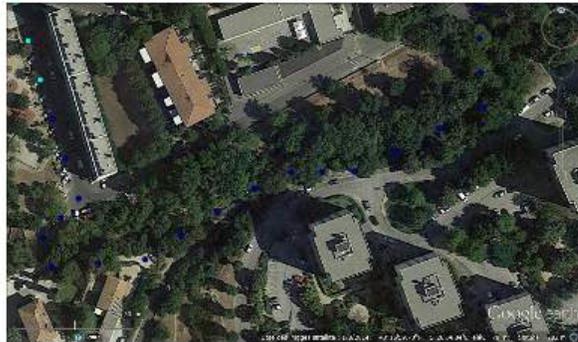
Description : coeur de la résidence de Château Saint Jacques, composée de hautes barres d'immeubles et végétalisées.

Indicateurs urbains (anomalie)

	{	VEGE = 28.7 (+1.5)		{	ROUTE = 39.6 (-13.4)
		HERB = 2.2 (-0.6)			BATI = 21.8 (+3.1)
		ARBUS = 8.4 (-2.0)			DB = 3.2 (+1.2)
		AR_JAR = 18.2 (+4.2)			DSM = 0.8 (+0.1)
		AR_ALI = 1.5 (+1.2)			HM = 15.1 (+3.3)
		SOLNU = 3 (+2.6)			

Marseille - Zone CANA ●

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone située le long d'un canal sous des arbres.

Indicateurs urbains (anomalie)

	{	VEGE = 51.3 (+24.1)		{	ROUTE = 39.6 (-13.4)
		HERB = 6.8 (+4.0)			BATI = 7.2 (-11.5)
		ARBUS = 23.8 (+13.4)			DB = 1.2 (-0.8)
		AR_JAR = 20.6 (+6.6)			DSM = 0.4 (-0.3)
		AR_ALI = 0.0 (-0.3)			HM = 17.0 (+5.2)
		SOLNU = 0 (-0.4)			

Marseille - Zone STAD

Vue aérienne



Vue de la rue



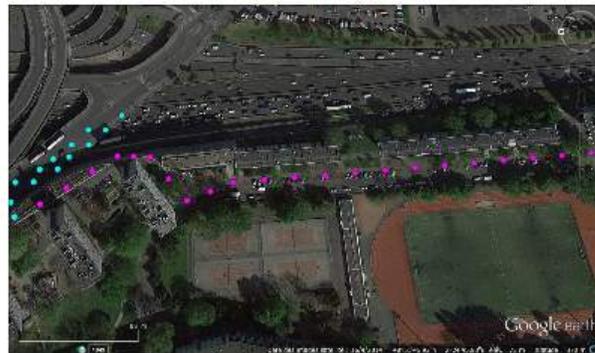
Description : zone à proximité d'un stade et sur une place entre deux barres d'immeuble.

Indicateurs urbains (anomalie)

	{	VEGE = 30.7 (+3.5)		{	ROUTE = 56.4 (+3.4)
		HERB = 5.2 (+2.4)			BATI = 12.9 (-5.8)
		ARBUS = 24.7 (+14.3)			DB = 1.9 (-0.1)
		AR_JAR = 0.8 (-13.2)			DSM = 0.6 (-0.1)
		AR_ALI = 0.0 (-0.3)			HM = 14.7 (+2.9)
		SOLNU = 0 (-0.4)			

Paris - Zone PYTH

Vue aérienne



Streetview



Description : zone traversant la cité Python, longeant des terrains de sport et des barres d'immeuble

Indicateurs urbains (anomalie)

	$\left\{ \begin{array}{l} \text{VEGE} = 22.0(+5.5) \\ \text{HERB} = 3.4 (+0.6) \\ \text{ARBUS} = 0.5 (-0.6) \\ \text{AR_JAR} = 18.1 (+5.5) \\ \text{AR_ALI} = 0 (-5.3) \\ \text{SOLNU} = 11.2 (+7.1) \end{array} \right.$		$\left\{ \begin{array}{l} \text{ROUTE} = 55.8 (+1.9) \\ \text{BATI} = 10.9 (-9.2) \\ \text{DB} = 2.15 (-1.62) \\ \text{DSM} = 0.46 (-0.72) \\ \text{HM} = 14.8 (-3.2) \end{array} \right.$
---	---	---	--

Paris - Zone STAD ○

Vue aérienne

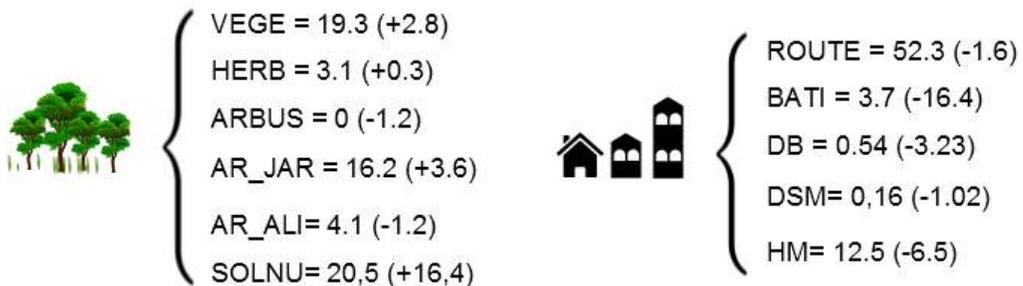


Vue de la rue



Description : zone ouverte longeant un stade.

Indicateurs urbains (anomalie)



Paris - Zone VEBE ●

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone dense et urbanisée.

Indicateurs urbains (anomalie)

	{	VEGE = 8.5 (-8.0)		{	ROUTE = 63.5 (9.6)
		HERB = 1.1 (-1.7)			BATI = 24.2 (+4.1)
		ARBUS = 0 (-1.2)			DB = 5.37 (+1.60)
		AR_JAR = 7.5 (-5.1)			DSM = 1,48 (+0.3)
		AR_ALI = 3.7 (-1.6)			HM = 22.2 (+4.2)
		SOLNU = 0 (-4.1)			

Paris - Zone GRBD

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone dense le long de grands boulevards.

Indicateurs urbains (anomalie)



VEGE = 9.5 (-7.0)
HERB = 1.2 (-1.6)
ARBUS = 2.6 (+1.5)
AR_JAR = 5.7 (-6.9)
AR_ALI = 13.7 (+8.4)
SOLNU = 0 (-4.1)



ROUTE = 50.9 (-3.0)
BATI = 25.9 (+5.8)
DB = 5.2 (+1.40)
DSM = 1,7 (+0.5)
HM = 20.0 (+2.0)

Paris - Zone EHPA ●

Vue aérienne

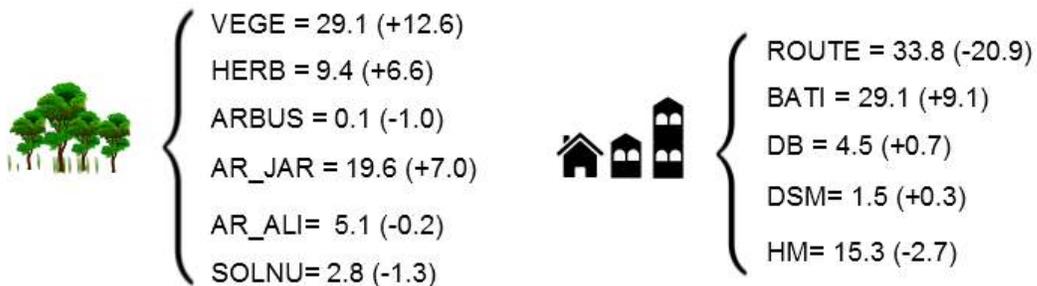


Vue de la rue



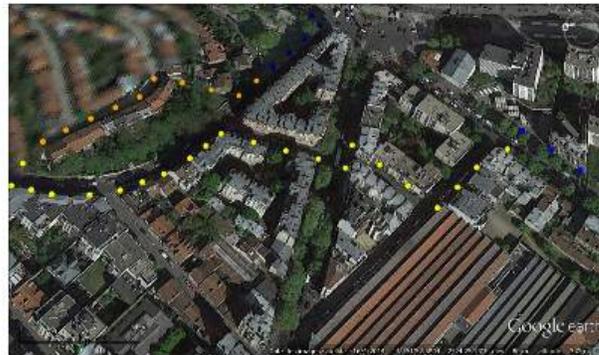
Description : zone longeant le parc de la maison de retraite EHPAD

Indicateurs urbains (anomalie)



Paris - Zone RUPY

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone très dense et urbanisée, passant par la rue de la PY.

Indicateurs urbains (anomalie)

	$\left\{ \begin{array}{l} \text{VEGE} = 15.5 \text{ (-1.0)} \\ \text{HERB} = 2.2 \text{ (-0.6)} \\ \text{ARBUS} = 1.5 \text{ (+0.4)} \\ \text{AR_JAR} = 11.8 \text{ (-0.8)} \\ \text{AR_ALI} = 4.5 \text{ (-0.8)} \\ \text{SOLNU} = 0 \text{ (-4.1)} \end{array} \right.$		$\left\{ \begin{array}{l} \text{ROUTE} = 41.7 \text{ (-12.2)} \\ \text{BATI} = 38.2 \text{ (+18.2)} \\ \text{DB} = 7.2 \text{ (+3.4)} \\ \text{DSM} = 2.4 \text{ (+1.2)} \\ \text{HM} = 18.5 \text{ (+0.5)} \end{array} \right.$
---	---	---	--

Paris - Zone CAMP

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone traversant un quartier de maisons individuelles ('La campagne à Paris')

Indicateurs urbains (anomalie)



VEGE = 26.5 (+10.0)
HERB = 0 (-2.8)
ARBUS = 9,4 (+8.3)
AR_JAR = 17.1 (+4.5)
AR_ALI = 0.2 (-5.1)
SOLNU = 0 (-4.1)



ROUTE = 44.6 (-9.3)
BATI = 28.5 (+8.4)
DB = 3.6 (-0.1)
DSM = 1.9 (+0.7)
HM = 12.5 (-5.5)

Paris - Zone BAGN ●

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone longeant le rond point de la porte de Bagnolet

Indicateurs urbains (anomalie)



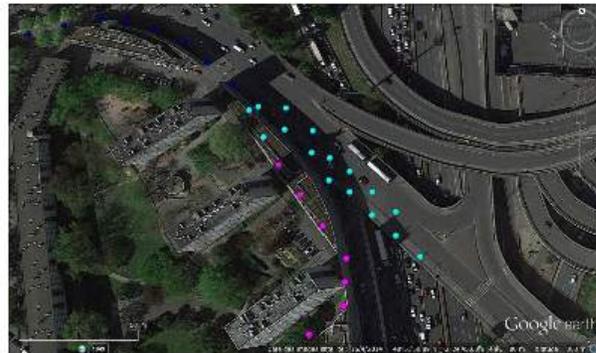
VEGE = 11.7 (-4.8)
HERB = 1.0 (-1.8)
ARBUS = 0.0 (-1.1)
AR_JAR = 10.7 (-1.9)
AR_ALI = 13.0 (+7.7)
SOLNU = 2.1 (-2.0)



ROUTE = 63.1 (+9.2)
BATI = 10.1 (-10.2)
DB = 2.2 (-1.6)
DSM = 0.7 (-0.5)
HM = 21.2 (+3.2)

Paris - Zone PERI ●

Vue aérienne

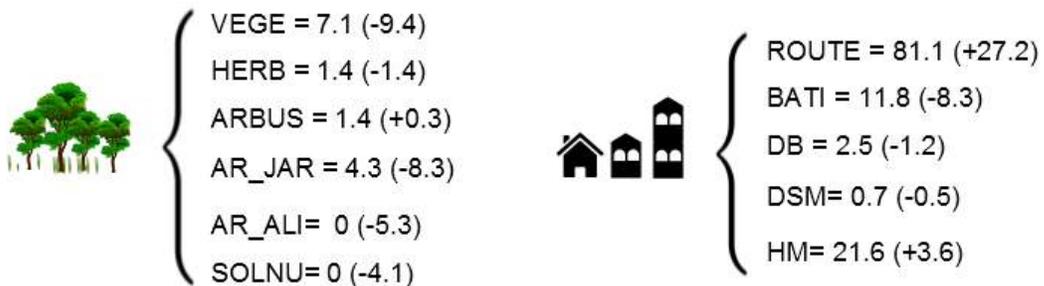


Vue de la rue



Description : zone sur un pont au-dessus du périphérique.

Indicateurs urbains (anomalie)



Toulouse - Zone CITE

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone située au coeur de la cité TABAR.

Indicateurs urbains (anomalie)

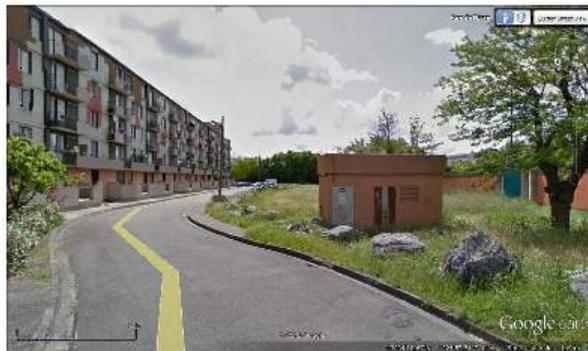
	{	VEGE = 10.1 (-11.2)		{	ROUTE = 30.1 (-0.7)
		HERB = 5.8 (-8.0)			BATI = 13 (+5.6)
		ARBUS = 3.6 (-0.9)			DB = 3.1 (1.1)
		AR_JAR = 0.7(-2.2)			DSM= 0.9 (+0.3)
		AR_ALI= 21.3 (+6.9)			HM= 13.7 (+1.6)
		SOLNU= 13.8 (+5.7)			

Toulouse - Zone MURAO

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone longeant une barre d'immeuble, un mur anti-bruit et une zone herbacée.

Indicateurs urbains (anomalie)

	{	VEGE = 13.6 (-7.7)		{	ROUTE = 50.2 (+11.4)
		HERB = 11.3 (-2.5)			BATI = 11.8 (-5.6)
		ARBUS = 1.1 (-3.4)			DB = 1.9 (-0.1)
		AR_JAR = 1.2 (-1.7)			DSM = 0.5 (-0.1)
		AR_ALI = 13.2 (-1.2)			HM = 15.9 (+3.8)
		SOLNU = 1.3 (-6.8)			

Toulouse - Zone BRUX ●

Vue aérienne

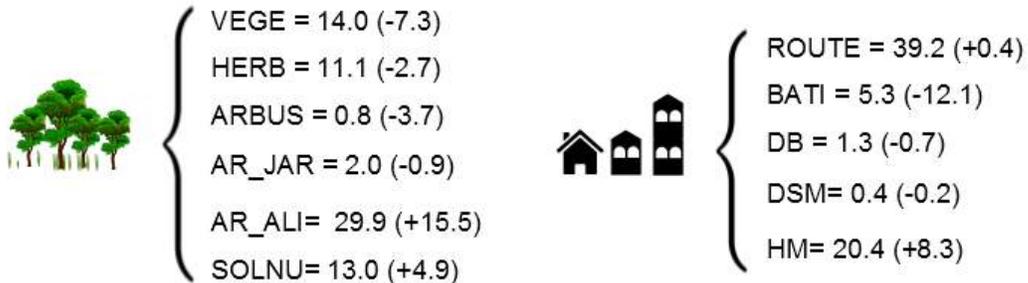


Vue de la rue



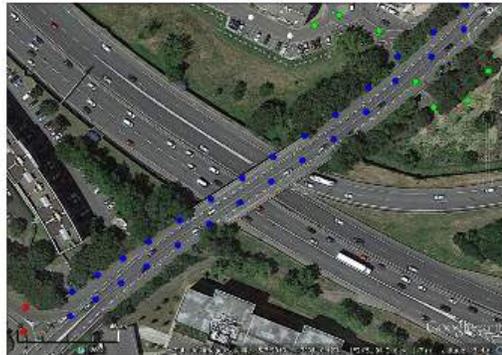
Description : zone passant sous le pont de la rocade et sous des arbres d'alignement.

Indicateurs urbains (anomalie)



Toulouse - Zone PONT ●

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : pont au-dessus de la rocade.

Indicateurs urbains (anomalie)



VEGE = 19.7 (-2.6)
HERB = 17.1 (+3.3)
ARBUS = 0.4 (-4.1)
AR_JAR = 1.1 (-2.8)
AR_ALI = 23.6 (+9.2)
SOLNU = 5.1 (-3.0)



ROUTE = 40.9 (+10.1)
BATI = 4.2 (-13.2)
DB = 0.5 (-1.5)
DSM = 0.2 (-0.4)
HM = 10.3 (-1.8)

Toulouse - Zone BRUX ●

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone de l'autre côté de la rocade par rapport au reste du parcours, longeant une barre d'immeuble et des jardins.

Indicateurs urbains (anomalie)



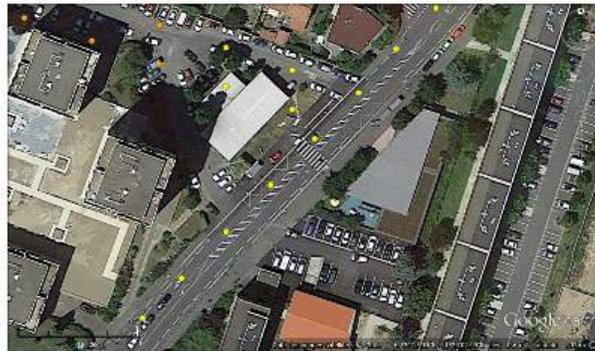
VEGE = 18.3 (-3.0)
HERB = 7.0 (-6.3)
ARBUS = 8.3 (+3.8)
AR_JAR = 2.9 (+0.0)
AR_ALI = 14.5 (+0.1)
SOLNU = 11.1 (+3.0)



ROUTE = 39.3 (+0.5)
BATI = 21.5 (+4.1)
DB = 3.0 (+1.0)
DSM = 0.7 (+0.1)
HM = 14.0 (+1.9)

Toulouse - Zone SEYS ●

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone parcourant la route de Seysse, l'axe routier principal du quartier.

Indicateurs urbains (anomalie)



VEGE = 17.9 (-3.4)
HERB = 14.3 (+0.5)
ARBUS = 2.6 (-1.9)
AR_JAR = 1.0 (-1.9)
AR_ALI = 8.0 (-6.4)
SOLNU = 5.2 (-2.0)



ROUTE = 39.4 (+0.6)
BATI = 23.1 (+5.8)
DB = 2.7 (+0.7)
DSM = 0.7 (+0.1)
HM = 12.4 (+0.3)

Toulouse - Zone TOUR

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone végétalisée située dans la résidence des tours de Seysse.

Indicateurs urbains (anomalie)



VEGE = 41.8 (+20.5)
HERB = 25.1 (+11.3)
ARBUS = 6.1 (+1.6)
AR_JAR = 10.5 (+7.6)
AR_ALI = 0.0 (-14.4)
SOLNU = 4.7 (-3.4)



ROUTE = 30.9 (-7.9)
BATI = 21.1 (+3.7)
DB = 2.8 (+0.8)
DSM = 0.8 (+0.2)
HM = 13.6 (+1.5)

Toulouse - Zone VEND ●

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone dans un quartier résidentiel avec jardins contenant notamment la rue de la Vendée.

Indicateurs urbains (anomalie)

	{	VEGE = 28.8 (+7.5)		{	ROUTE = 34.3 (-4.5)
		HERB = 14.3 (+0.5)			BATI = 27.8 (+10.1)
		ARBUS = 8.2 (+3.7)			DB = 1.6 (-0.4)
		AR_JAR = 8.2 (+3.7)			DSM = 0.6 (-0.0)
		AR_ALI = 0.2 (-14.2)			HM = 5.7 (-6.4)
		SOLNU = 11.4 (+3.3)			

Toulouse - Zone VIEN ●

Vue aérienne



Vue de la rue



Description : zone dans un quartier résidentiel avec jardins contenant notamment la rue de la Vienne.

Indicateurs urbains (anomalie)



VEGE = 37.3 (+16.4)
HERB = 22.2 (+8.4)
ARBUS = 11.5 (+7.0)
AR_JAR = 3.9 (+1.0)
AR_ALI = 4.5 (-9.9)
SOLNU = 10.8 (+2.8)



ROUTE = 30.9 (-7.9)
BATI = 25.5 (+8.1)
DB = 1.8 (-0.2)
DSM = 0.7 (+0.1)
HM = 7.1 (-5.0)

Annexe C

Données de températures zonées par ville

Marseille

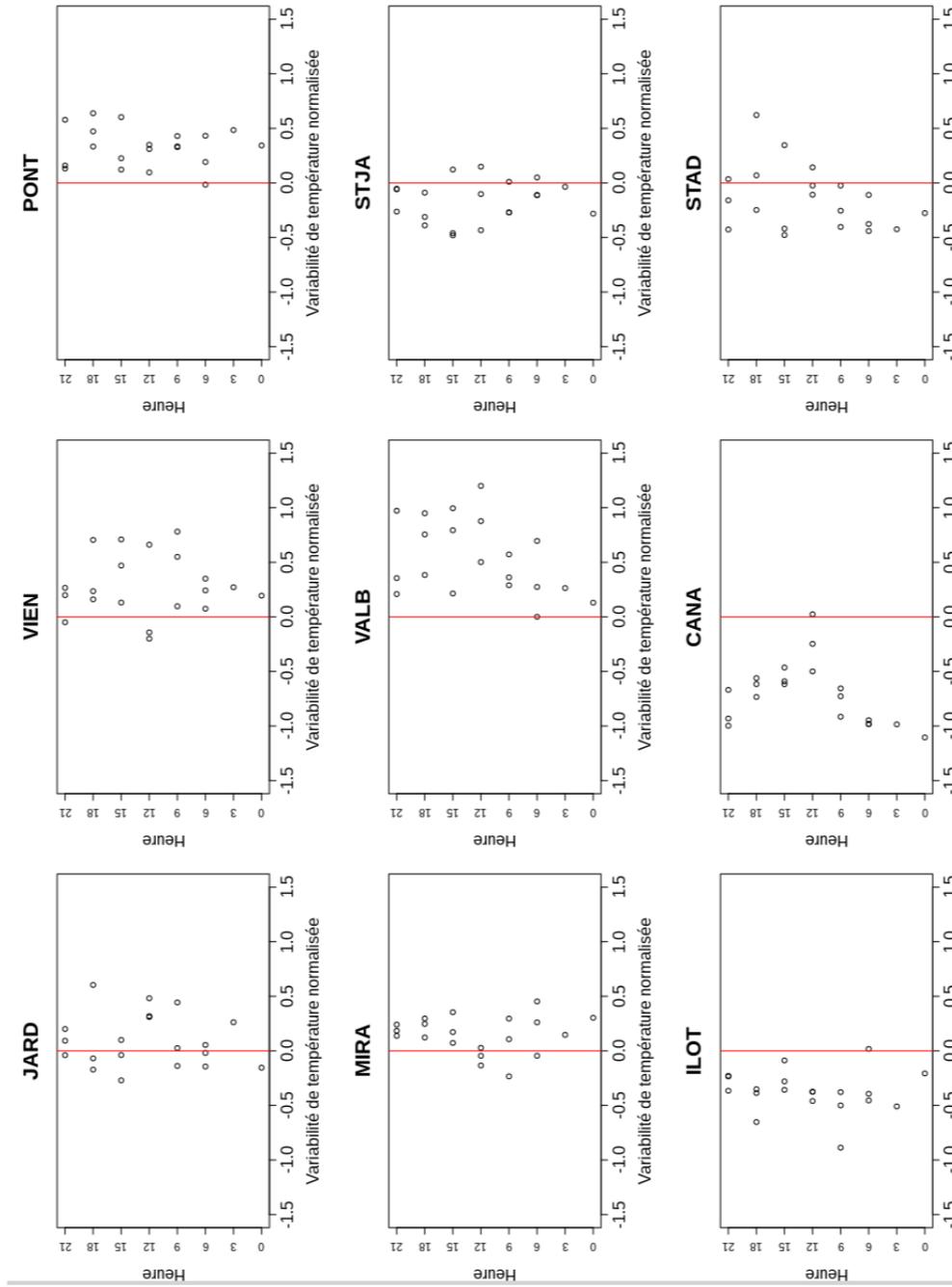


FIGURE C.1 – Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Marseille.

Paris

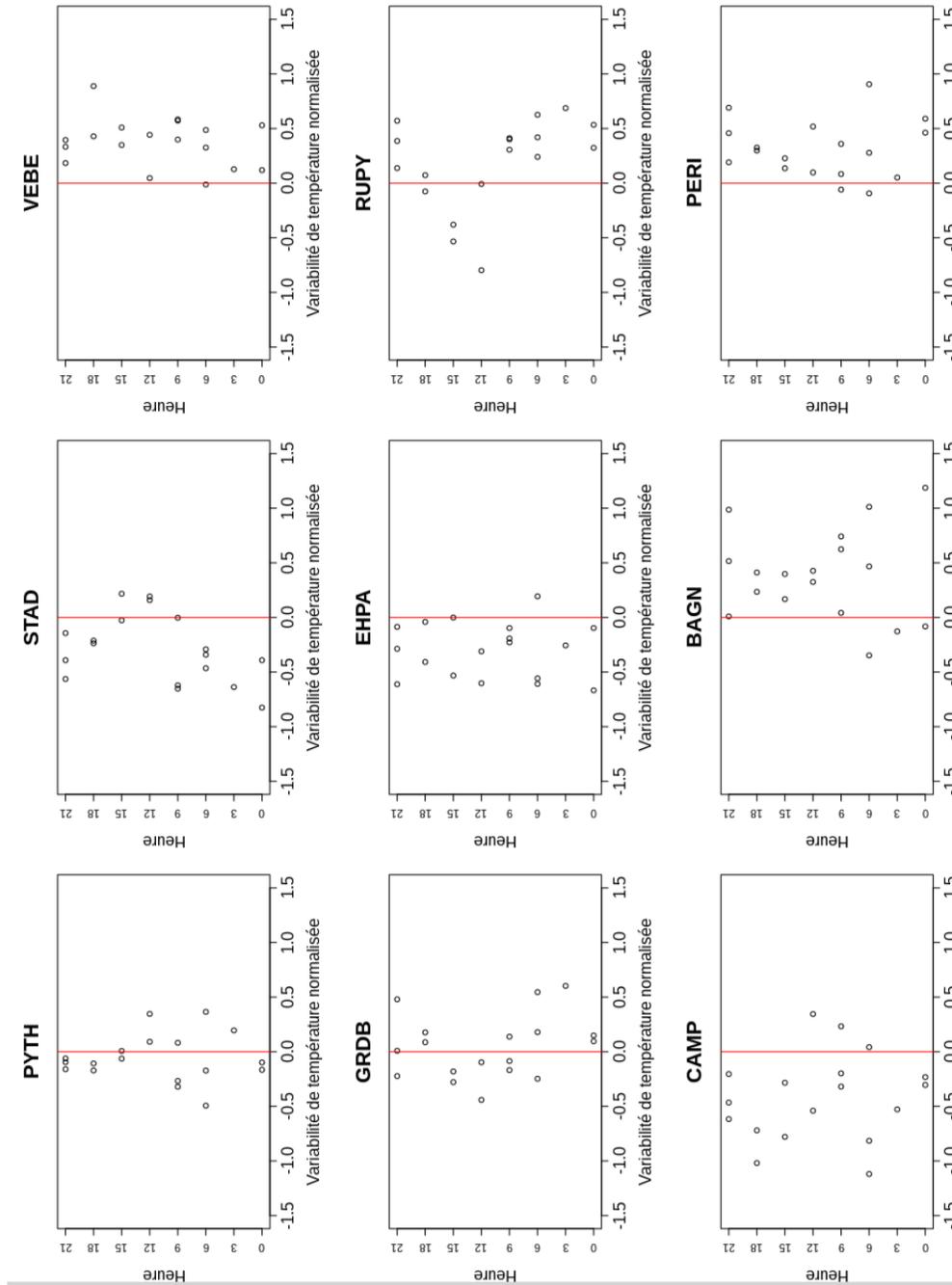


FIGURE C.2 – Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Paris.

Toulouse Janvier

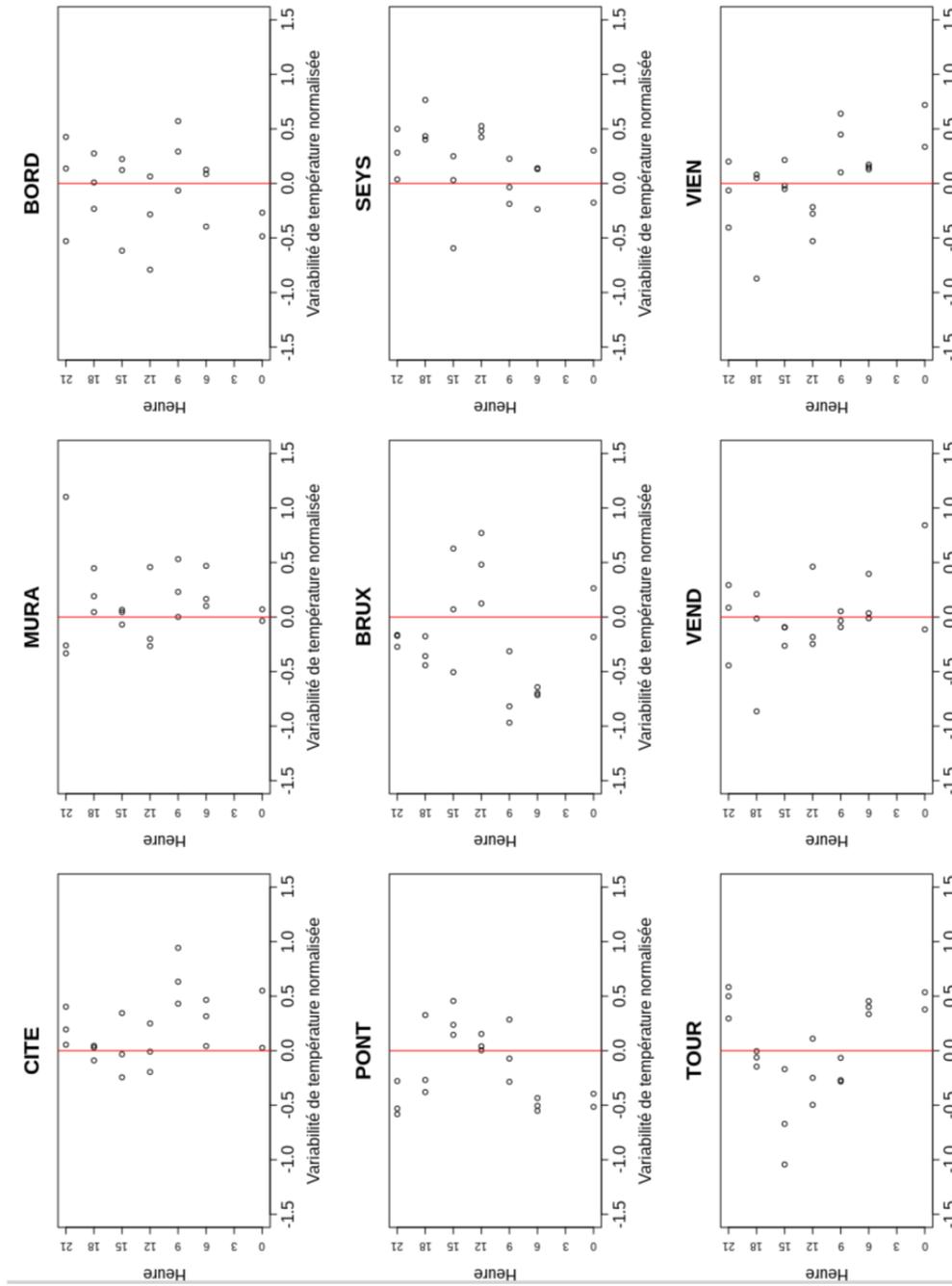


FIGURE C.3 – Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Toulouse en janvier.

Toulouse Avril

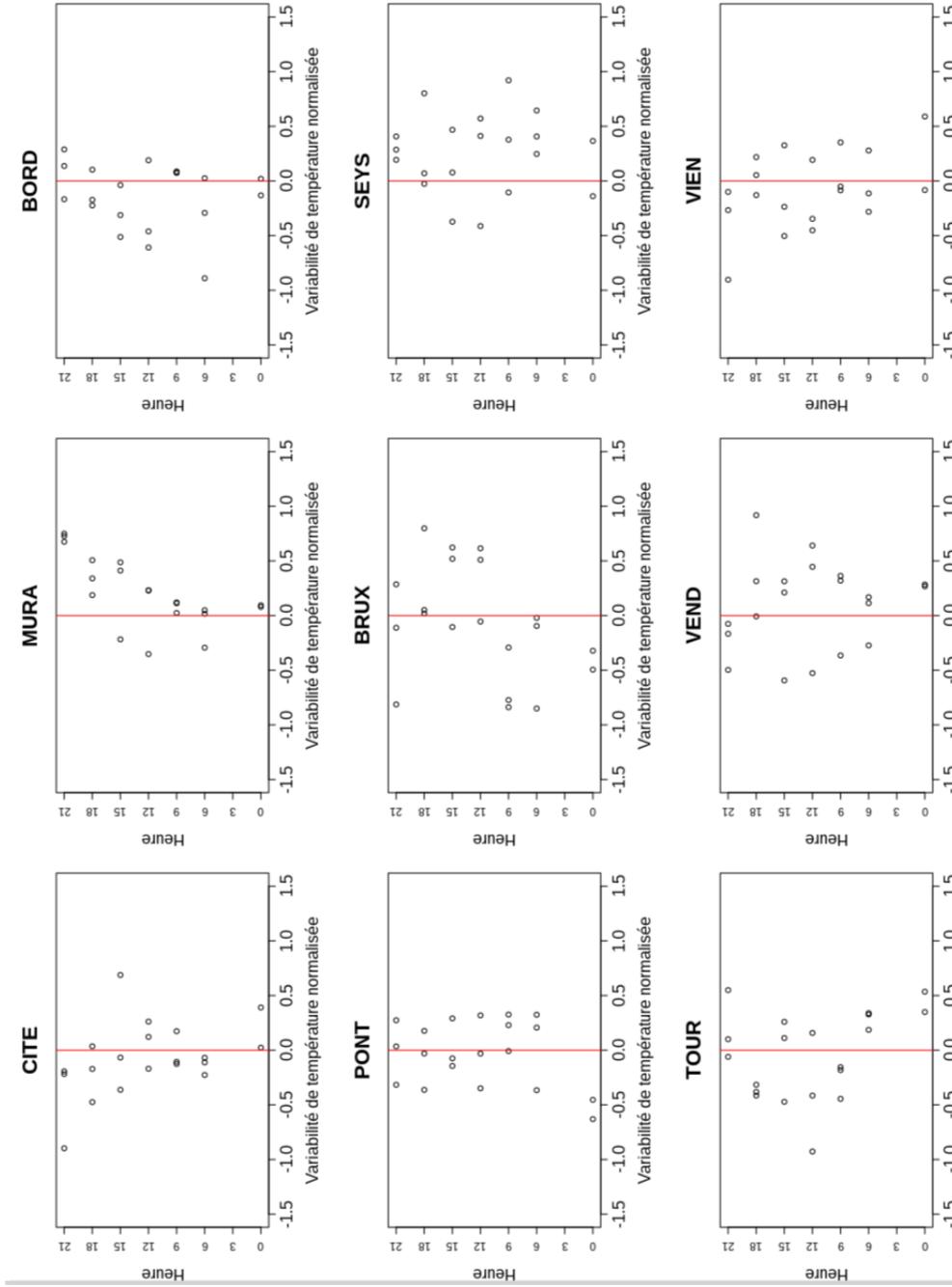


FIGURE C.4 – Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Toulouse en avril.

Toulouse Juin

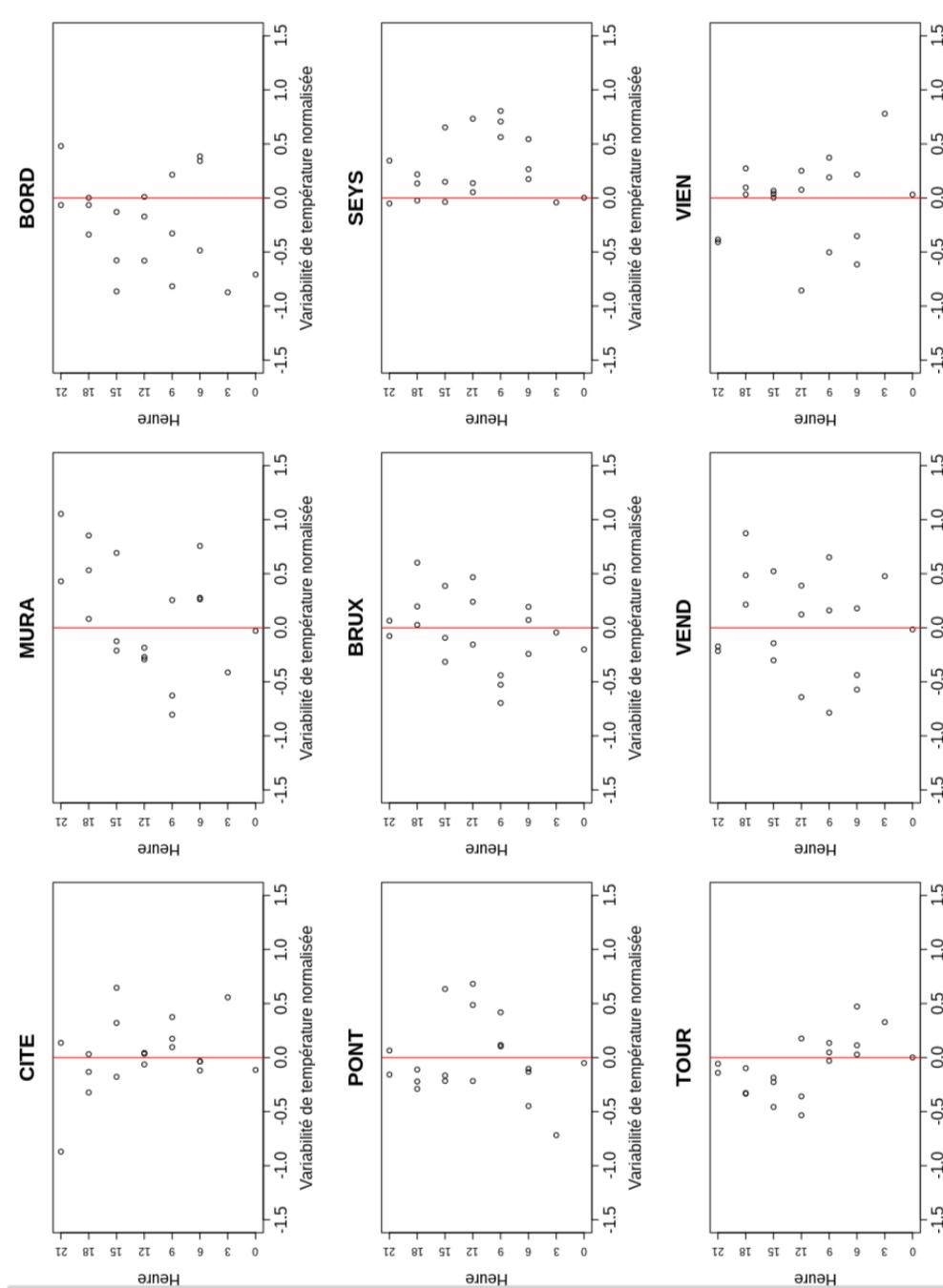


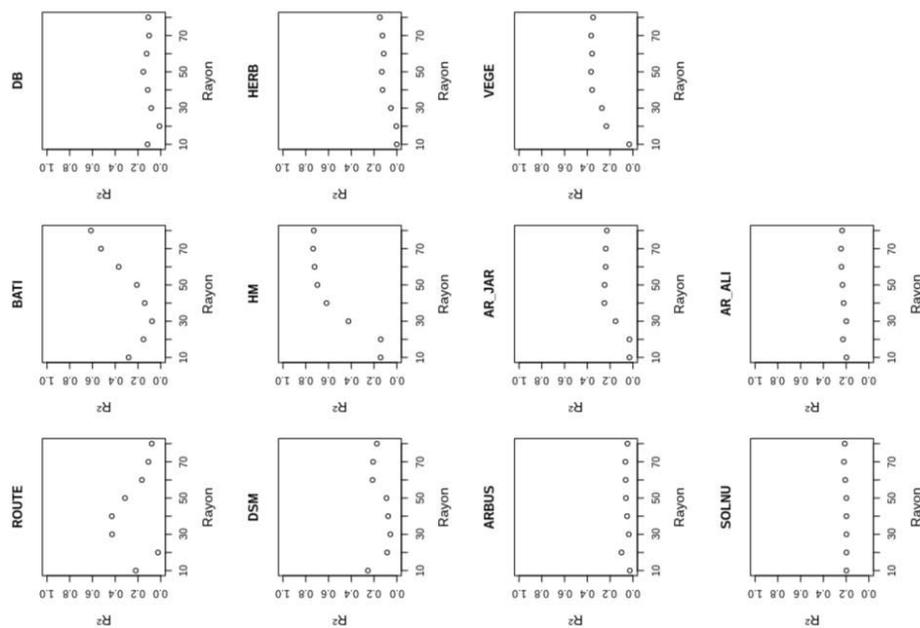
FIGURE C.5 – Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Toulouse en juin.

Annexe D

Détermination du rayon d'influence des indicateurs urbains

Marseille

Jour



Nuit

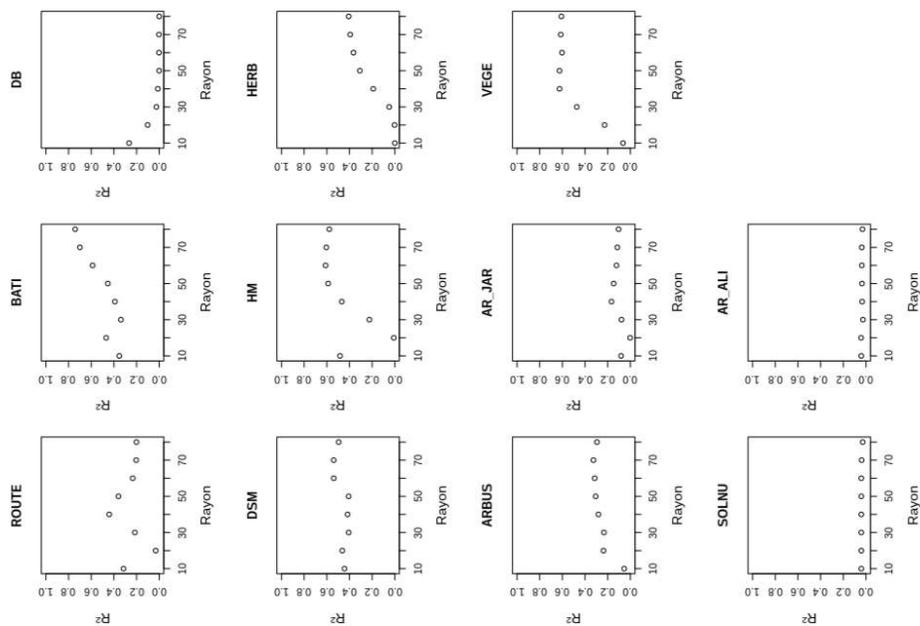
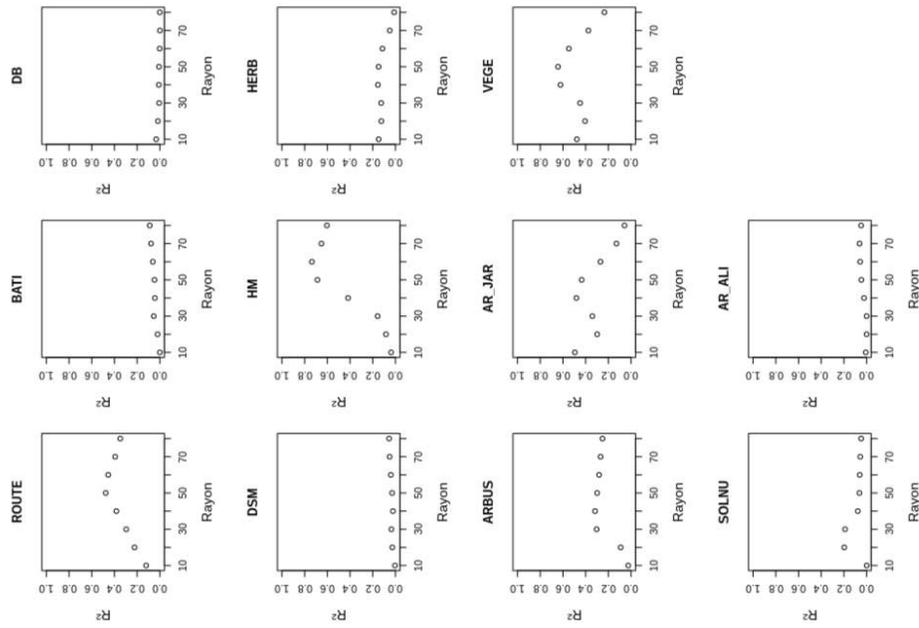


FIGURE D.1 – Coefficient de corrélation au carré en fonction du rayon des indicateurs urbains à Marseille le jour et la nuit.

Paris

Jour



Nuit

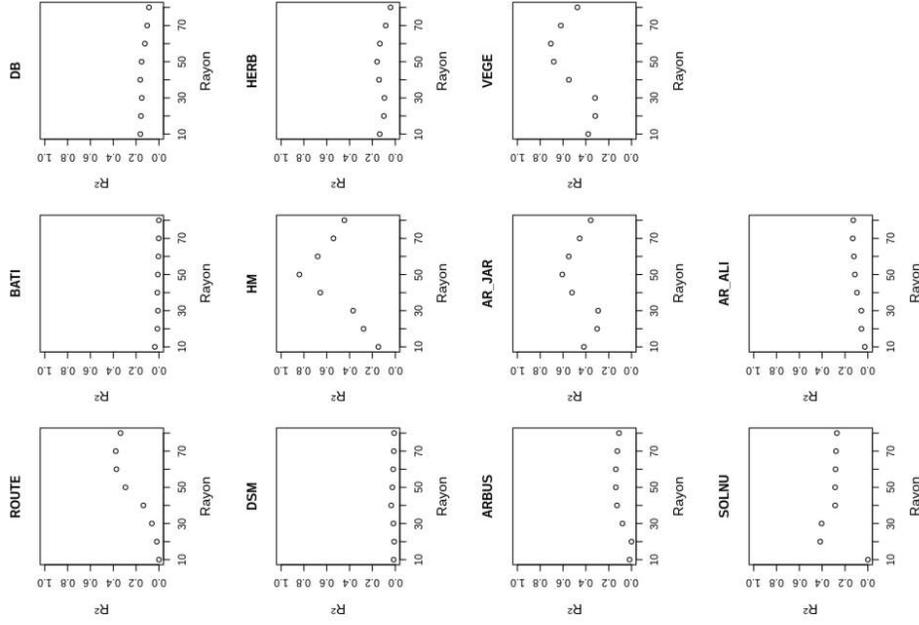


FIGURE D.2 – Coefficient de corrélation au carré en fonction du rayon des indicateurs urbains à Paris le jour et la nuit.

Toulouse Janvier

Jour

Nuit

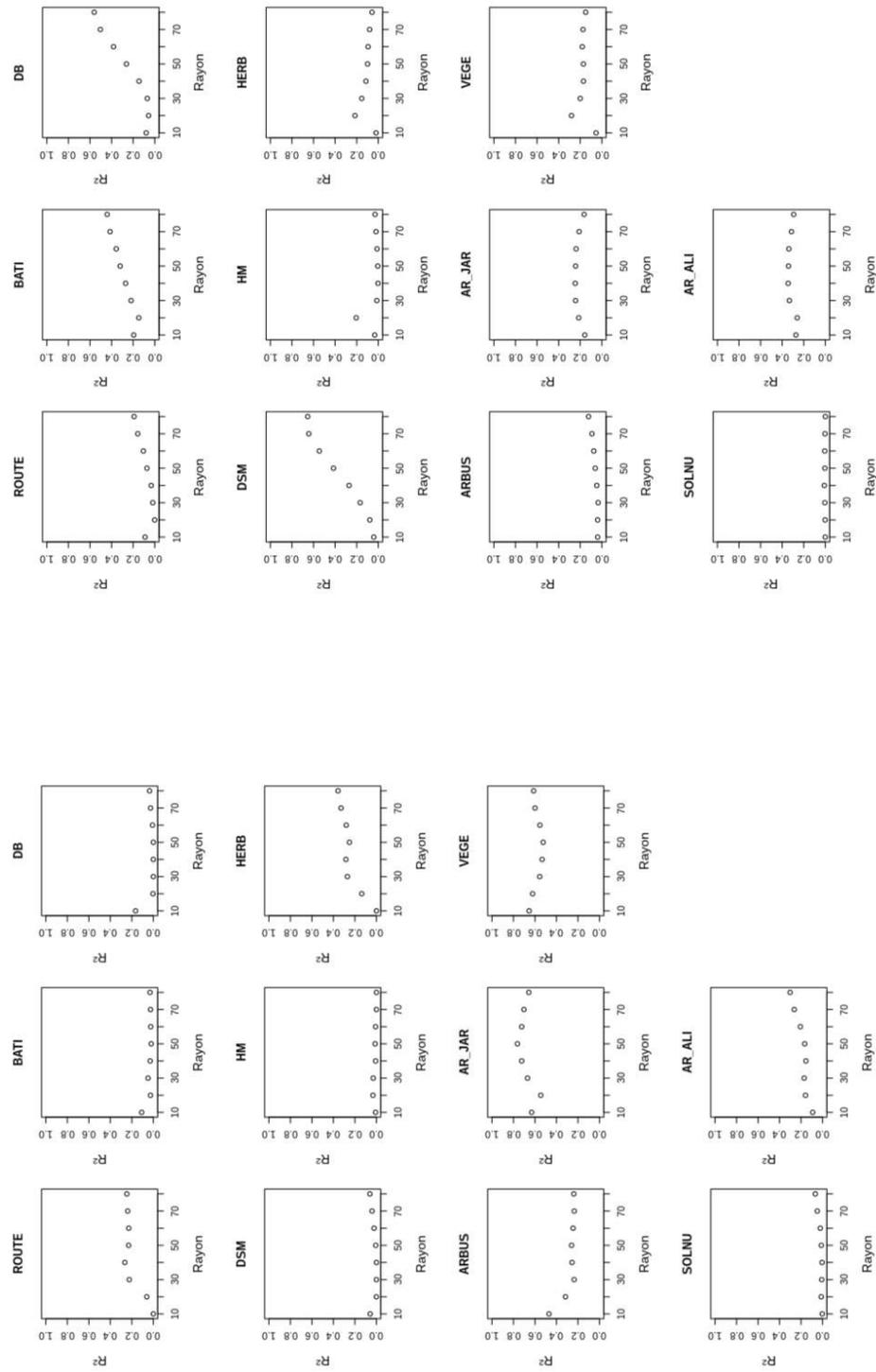
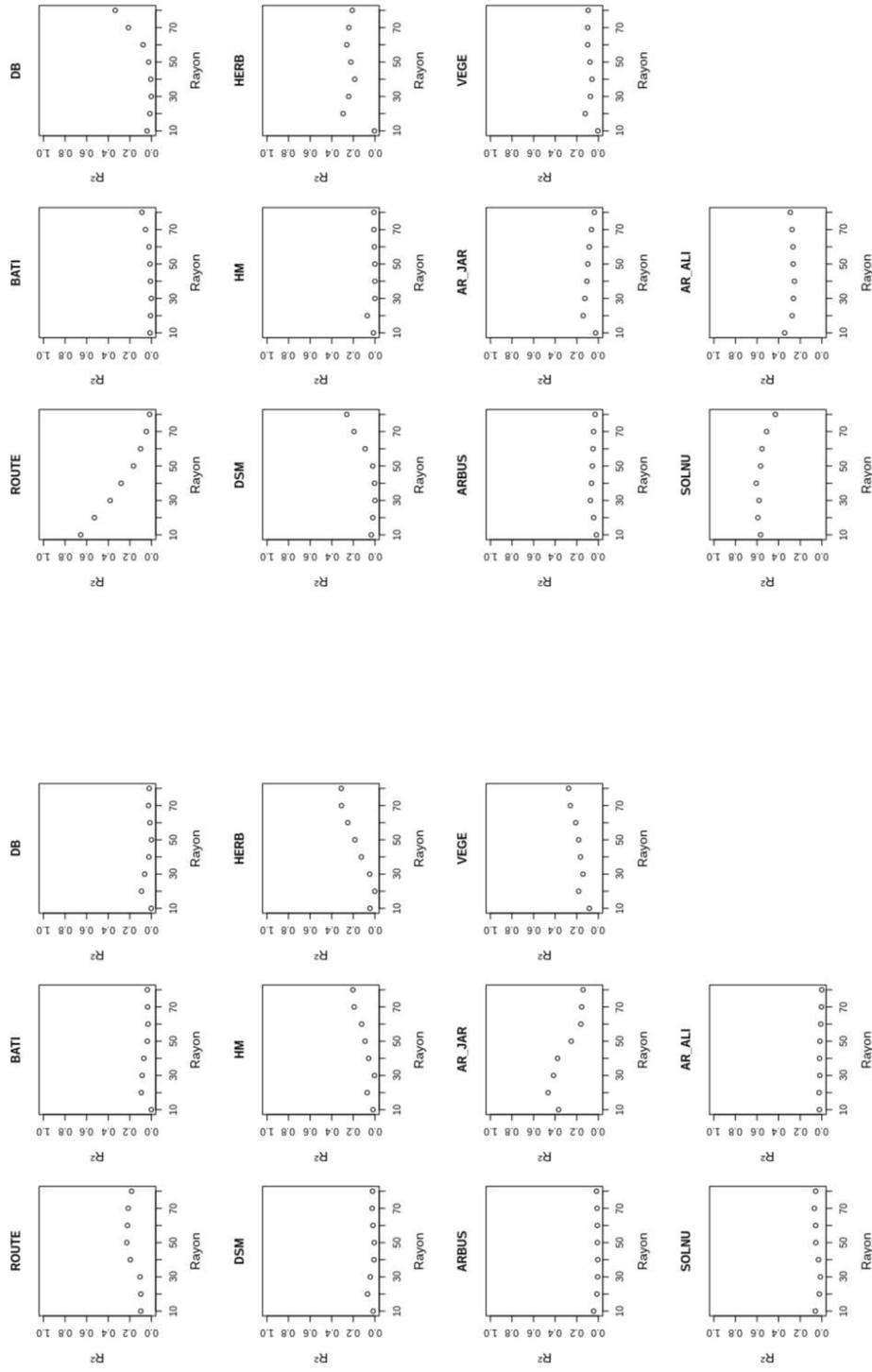


FIGURE D.3 – Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Toulouse en janvier le jour et la nuit.

Toulouse Avril

Jour



Nuit

FIGURE D.4 – Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Toulouse en avril le jour et la nuit.

Toulouse Juin

Jour

Nuit

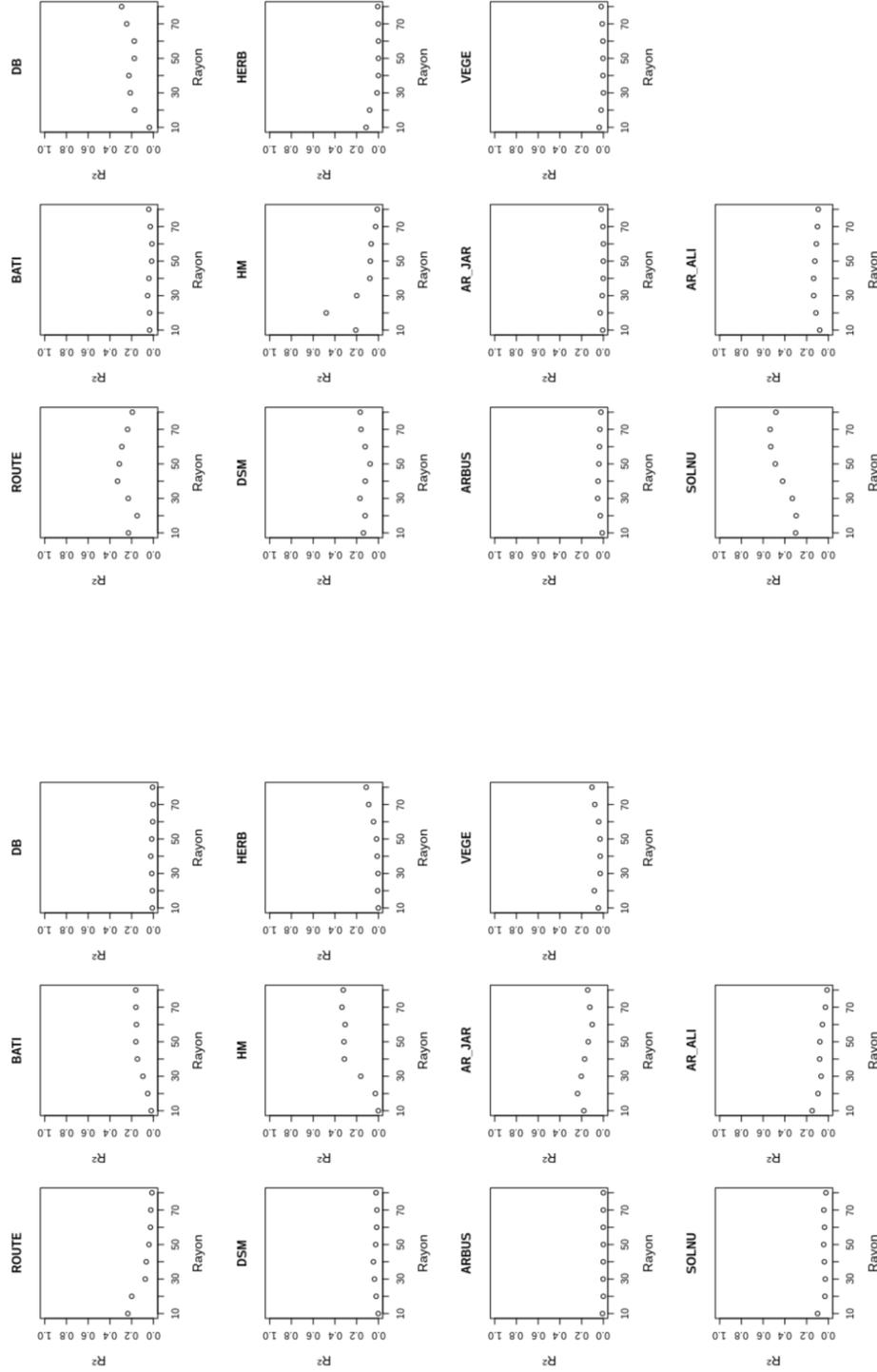
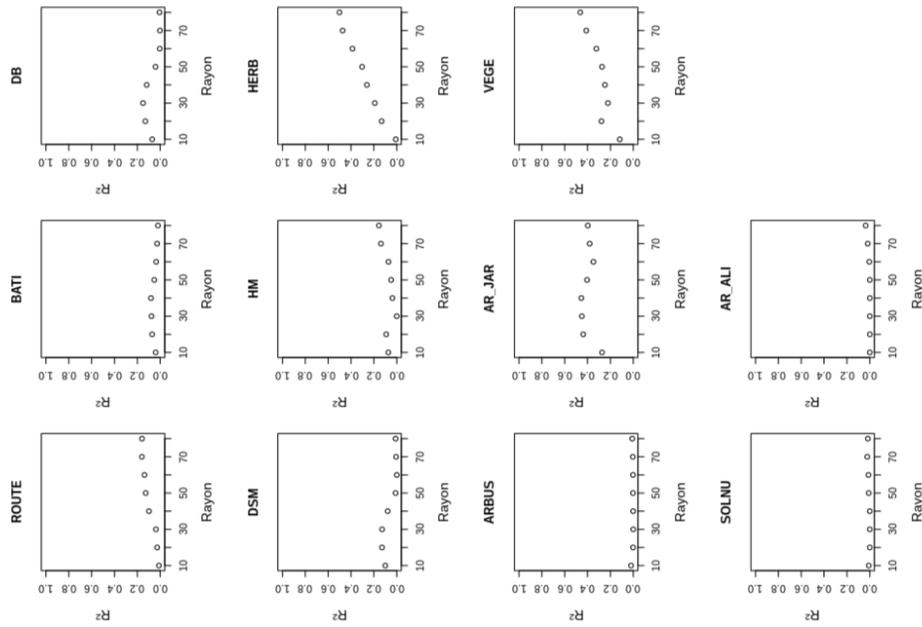


FIGURE D.5 – Variabilité de température normalisée par parcours lors de la campagne de Toulouse en juin le jour et la nuit.

Toulouse

Jour



Nuit

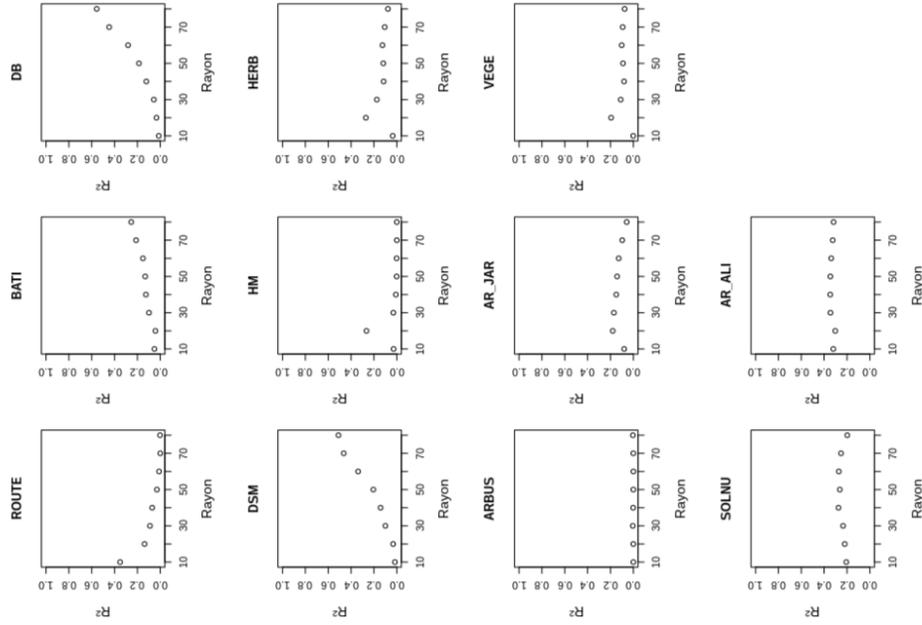
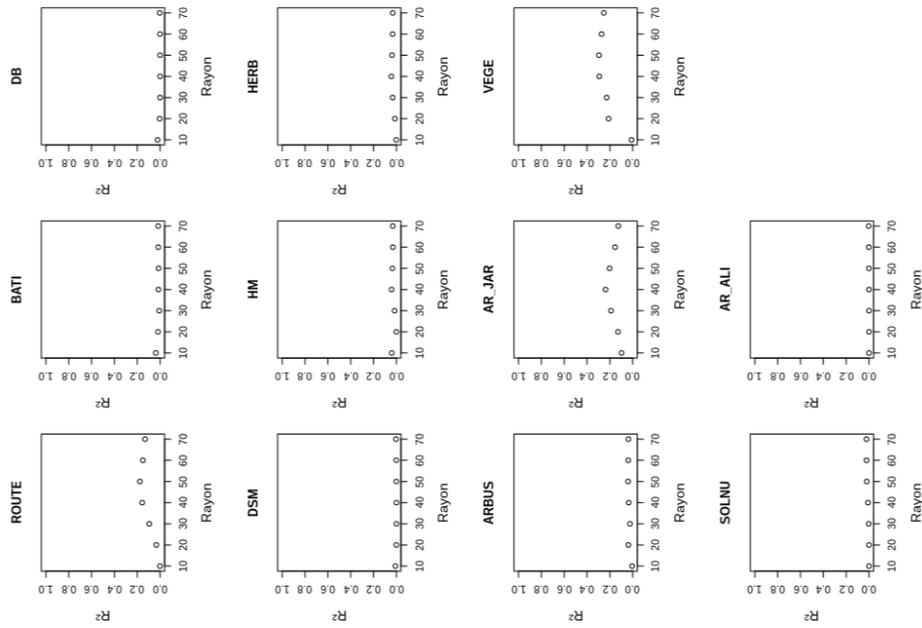


FIGURE D.6 – Variabilité de température normalisée par parcours à Toulouse (moyenne sur les parcours de toutes les saisons) le jour et la nuit.

Global

Jour



Nuit

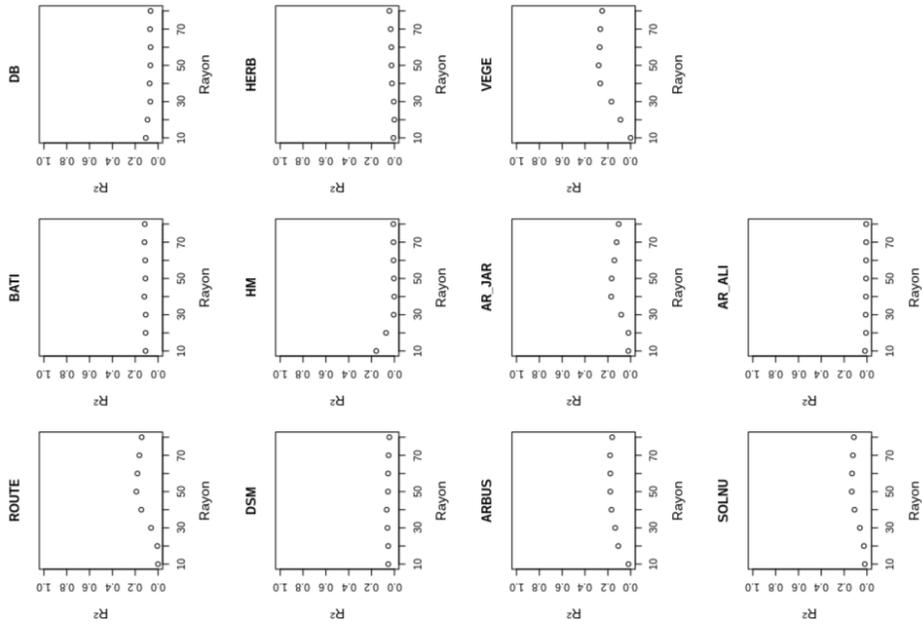


FIGURE D.7 – Variabilité de température normalisée par parcours de toutes les villes le jour et la nuit.

Bibliographie

- ADO, H. Y. « Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze ». In : *Journal of Applied Meteorology* 31.10 (1992), p. 1146–1164.
- ALONSO, M., M. FIDALGO et J. LABAJO. « The urban heat island in Salamanca (Spain) and its relationship to meteorological parameters ». In : *Climate Research* 34.1 (2007), p. 39.
- ANR. *Projet EUREQUA, Programme batiments et villes durables, Publication scientifique*. 2011.
- ARNFIELD, A. J. « Canyon geometry, the urban fabric and nocturnal cooling: a simulation approach ». In : *Physical Geography* 11.3 (1990), p. 220–239.
- BEAULANT, A. et al. « Future heat waves over paris metropolitan area ». In : *National Security and Human Health Implications of Climate Change*. Springer, 2012, p. 135–145.
- BELCHER, S., J. HACKER et D. POWELL. « Constructing design weather data for future climates ». In : *Building Services Engineering Research and Technology* 26.1 (2005), p. 49–61.
- BELDING, H. et T. HATCH. « Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strain ». In : *Heating, piping and air conditioning* 27.8 (1955), p. 129.
- BONAN, G. B. *Ecological climatology: concepts and applications*. Cambridge University Press, 2002.
- BOTTYÁN, Z. et J. UNGER. « A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island ». In : *Theoretical and Applied climatology* 75.3-4 (2003), p. 233–243.
- BOUYER, J. « Modélisation et simulation des microclimats urbains-Étude de l’impact de l’aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments ». Thèse de doct. Université de Nantes, 2009.
- BOWLER, D. E. et al. « Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence ». In : *Landscape and urban planning* 97.3 (2010), p. 147–155.
- BRANDSMA, T. et D. WOLTERS. « Measurement and statistical modeling of the urban heat island of the city of Utrecht (the Netherlands) ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51.6 (2012), p. 1046–1060.
- BRÖDE, P. et al. « Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI) ». In : *International journal of biometeorology* 56.3 (2012), p. 481–494.

- BRUSE, M. « ITCM—A simple dynamic 2-node model of the human thermoregulatory system and its application in a multi-agent system ». In : *Ann. Meteorol* 41 (2005), p. 398–401.
- BUENO, B. et al. « Calculation of air temperatures above the urban canopy layer from measurements at a rural operational weather station ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52.2 (2013), p. 472–483.
- BUENO, B. et al. « Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme ». In : *Geoscientific Model Development Discussions* 4.4 (2011), p. 2973–3011.
- CHANDLER, T. J. *The climate of London*. Hutchinson, 1965.
- CHANG, C. H. et K. C. GOH. « The relationship between height to width ratios and the heat island intensity at 22: 00 h for Singapore ». In : *International Journal of Climatology* 19.9 (1999), p. 1011–1023.
- CHEN, F. et al. « Utilizing the coupled WRF/LSM/Urban modeling system with detailed urban classification to simulate the urban heat island phenomena over the Greater Houston area ». In : *Fifth Symposium on the Urban Environment*. T. 2004. 2004, p. 9–11.
- CHEN, L. et al. « Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach ». In : *International Journal of Climatology* 32.1 (2012), p. 121–136.
- CHOW, W. T. et M. ROTH. « Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore ». In : *International Journal of Climatology* 26.15 (2006), p. 2243–2260.
- CHUN, B. et J.-M. GULDMANN. « Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities ». In : *Landscape and urban planning* 125 (2014), p. 76–88.
- CLEUGH, H. et T. OKE. « Suburban-rural energy balance comparisons in summer for Vancouver, BC ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 36.4 (1986), p. 351–369.
- CRAWLEY, D. B. et al. « EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program ». In : *Energy and buildings* 33.4 (2001), p. 319–331.
- DE MUNCK, C. et al. « The GREENROOF module (v7. 3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB ». In : *Geoscientific Model Development Discussions* 6.1 (2013), p. 1127–1172.
- DESA. *United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division: World Urbanization Prospects, the 2009 Revision: Highlights*. 2010.
- DESCARTES, G. *Consultation internationale de recherche et de développement sur le Grand Pari de l'agglomération parisienne. Rapport final*. 2009.
- DUPONT, E. et al. « Comparison between the atmospheric boundary layer in Paris and its rural suburbs during the ECLAP experiment ». In : *Atmospheric Environment* 33.6 (1999), p. 979–994.
- DUPONT, S. et P. G. MESTAYER. « Parameterization of the urban energy budget with the submesoscale soil model ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45.12 (2006), p. 1744–1765.

- ELIASSON, I. « Infrared thermography and urban temperature patterns ». In : *International journal of remote sensing* 13.5 (1992), p. 869–879.
- ERELL, E., D. PEARLMUTTER et T. WILLIAMSON. *Urban microclimate: designing the spaces between buildings*. Routledge, 2012.
- ERELL, E. et T. WILLIAMSON. « Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station ». In : *International Journal of Climatology* 26.12 (2006), p. 1671–1694.
- FANGER, P. O. et al. « Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. » In : *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. (1970).
- FIALA, D. et al. « UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation ». In : *International journal of biometeorology* 56.3 (2012), p. 429–441.
- FORTUNIAK, K. « An application of the urban energy balance scheme for a statistical modeling of the UHI intensity ». In : *Proceedings of the 5th International Conference on Urban Climate*. T. 1. 2003, p. 59–62.
- FOUILLET, A. et al. « Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France ». In : *International archives of occupational and environmental health* 80.1 (2006), p. 16–24.
- FUNG, W. et al. « Derivation of nighttime urban air temperatures using a satellite thermal image ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48.4 (2009), p. 863–872.
- GARTLAND, L. *Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas*. Routledge, 2010.
- GOLDEN, J. S. et K. E. KALOUSH. « Mesoscale and microscale evaluation of surface pavement impacts on the urban heat island effects ». In : *The international journal of pavement engineering* 7.1 (2006), p. 37–52.
- GRIMMOND, C. et T. R. OKE. « Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form ». In : *Journal of Applied Meteorology* 38.9 (1999), p. 1262–1292.
- « Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS) ». In : *Journal of Applied Meteorology* 41.7 (2002), p. 792–810.
- GRIMMOND, C. et al. « Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison ». In : *International journal of climatology* 31.2 (2011), p. 244–272.
- GRIMMOND, C. et al. « The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1 ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49.6 (2010), p. 1268–1292.
- GROMKE, C. et al. « Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations—evaluation of CFD data with experimental data ». In : *Atmospheric Environment* 42.37 (2008), p. 8640–8650.
- GUGLER, J. « The urban transformation of the developing world. » In : (1996).

- HAMDI, R. et V. MASSON. « Inclusion of a drag approach in the Town Energy Balance (TEB) scheme: Offline 1D evaluation in a street canyon ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47.10 (2008), p. 2627–2644.
- HART, M. A. et D. J. SAILOR. « Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island ». In : *Theoretical and Applied Climatology* 95.3-4 (2009), p. 397–406.
- HARTZ, D. et al. « Linking satellite images and hand-held infrared thermography to observed neighborhood climate conditions ». In : *Remote Sensing of Environment* 104.2 (2006), p. 190–200.
- HEUSINKVELD, B. G. et al. « Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use ». In : *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119.2 (2014), p. 677–692.
- HIDALGO RODRIGUEZ, J. « Une approche observationnelle, numérique et théorique de la circulation de brise urbaine diurne pour les villes continentales ». Thèse de doct. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- HIDALGO, J., V. MASSON et L. GIMENO. « Scaling the daytime urban heat island and urban-breeze circulation ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49.5 (2010), p. 889–901.
- HÖPPE, P. « The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment ». In : *International Journal of Biometeorology* 43.2 (1999), p. 71–75.
- HOVE, L. van et al. « Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration ». In : *Building and Environment* 83 (2015), p. 91–103.
- KANDA, M. et al. « A simple energy balance model for regular building arrays ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 116.3 (2005), p. 423–443.
- KIM, Y.-H. et J.-J. BAIK. « Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul ». In : *Journal of Applied Meteorology* 44.5 (2005), p. 591–605.
- KLYSIK, K. et K. FORTUNIAK. « Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland ». In : *Atmospheric Environment* 33 (1999), p. 3885–3895.
- KONDO, H. et al. « Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city: Structure of the urban canopy model and its basic performance ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 116.3 (2005), p. 395–421.
- KRAYENHOFF, E. S. et J. A. VOOGT. « A microscale three-dimensional urban energy balance model for studying surface temperatures ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 123.3 (2007), p. 433–461.
- KRÜGER, E., F. MINELLA et F. RASIA. « Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil ». In : *Building and Environment* 46.3 (2011), p. 621–634.
- LAIDI, M. et al. « The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave ». In : *Environmental health perspectives* 120.2 (2012), p. 254.
- LAC, C. et al. « CO₂ dispersion modelling over Paris region within the CO₂-MEGAPARIS project. » In : *Atmospheric Chemistry and Physics* 13.9 (2013), p. 4941–4961.

- LAI, L.-W. et W.-L. CHENG. « Air quality influenced by urban heat island coupled with synoptic weather patterns ». In : *Science of the total environment* 407.8 (2009), p. 2724–2733.
- LANDSBERG, H. E. *The urban climate*. T. 28. Academic press, 1981.
- LECONTE, F. et al. « Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements ». In : *Building and Environment* 83 (2015), p. 39–49.
- LEE, S.-H. et J.-J. BAIK. « Statistical and dynamical characteristics of the urban heat island intensity in Seoul ». In : *Theoretical and Applied Climatology* 100.1-2 (2010), p. 227–237.
- LEMONSU, A., C. GRIMMOND et V. MASSON. « Modeling the surface energy balance of the core of an old Mediterranean city: Marseille ». In : *Journal of Applied Meteorology* 43.2 (2004), p. 312–327.
- LEMONSU, A., V. MASSON et E. BERTHIER. « Improvement of the hydrological component of an urban soil–vegetation–atmosphere–transfer model ». In : *Hydrological processes* 21.16 (2007), p. 2100–2111.
- LEMONSU, A., S. BELAIR et J. MAILHOT. « The new Canadian urban modelling system: evaluation for two cases from the Joint Urban 2003 Oklahoma City experiment ». In : *Boundary-layer meteorology* 133.1 (2009), p. 47–70.
- LEMONSU, A. et al. « Evaluation of the town energy balance model in cold and snowy conditions during the Montreal urban snow experiment 2005 ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49.3 (2010), p. 346–362.
- LEMONSU, A. et al. « Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas ». In : *Geoscientific Model Development* 5.6 (2012), p. 1377–1393.
- LO, F.-c. et Y.-M. YEUNG. « Globalization and the world of large cities. » In : (1998).
- LOUW, W. et J. MEYER. « Near-surface nocturnal winter temperatures in Pretoria ». In : *Notos* 14 (1965), p. 49–56.
- LOWRY, W. P. « Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis ». In : *Journal of Applied Meteorology* 16.2 (1977), p. 129–135.
- LU, J. et al. « A laboratory study of the urban heat island in a calm and stably stratified environment. Part I: Temperature field ». In : *Journal of Applied Meteorology* 36.10 (1997), p. 1377–1391.
- MARTILLI, A., A. CLAPPIER et M. W. ROTACH. « An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 104.2 (2002), p. 261–304.
- MASSON, V., C. GRIMMOND et T. R. OKE. « Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities ». In : *Journal of applied meteorology* 41.10 (2002), p. 1011–1026.
- MASSON, V. et Y. SEITY. « Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48.7 (2009), p. 1377–1397.

- MASSON, V. « A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models ». In : *Boundary-layer meteorology* 94.3 (2000), p. 357–397.
- MASSON, V. et al. « Adapting cities to climate change: a systemic modelling approach ». In : *Urban Climate* 10 (2014), p. 407–429.
- MASSON, V. et al. « Solar panels reduce both global warming and urban heat island ». In : *Atmospheric Science* 2 (2014), p. 14.
- MASSON, V. et al. « The canopy and aerosol particles interactions in Toulouse urban layer (CAPITOU) experiment ». In : *Meteorology and Atmospheric Physics* 102.3-4 (2008), p. 135–157.
- MASSON, V. et al. « The SURFEXv7. 2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes ». In : (2013).
- MASTERTON, J., C. S. de l'environnement ATMOSPHERIQUE et F. RICHARDSON. *Humidex: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity*. Downsview, Ont.: Atmospheric Environment, 1979.
- MEMON, R. A. et D. Y. LEUNG. « Impacts of environmental factors on urban heating ». In : *Journal of Environmental Sciences* 22.12 (2010), p. 1903–1909.
- MEMON, R. A., D. Y. LEUNG et C.-H. LIU. « An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating ». In : *Atmospheric Research* 94.3 (2009), p. 491–500.
- MOONEN, P. et al. « Urban Physics: effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand ». In : *Frontiers of Architectural Research* 1.3 (2012), p. 197–228.
- MORRIS, C., I. SIMMONDS et N. PLUMMER. « Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city ». In : *Journal of Applied Meteorology* 40.2 (2001), p. 169–182.
- NIKOLOPOULOU, M. et S. LYKODIS. « Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries ». In : *Building and Environment* 41.11 (2006), p. 1455–1470.
- NOILHAN, J. et S. PLANTON. « A simple parameterization of land surface processes for meteorological models ». In : *Monthly Weather Review* 117.3 (1989), p. 536–549.
- OFFERLE, B., C. GRIMMOND et K. FORTUNIAK. « Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre ». In : *International Journal of Climatology* 25.10 (2005), p. 1405–1419.
- OFFERLE, B. et al. « Urban modification of the surface energy balance in the West African Sahel: Ouagadougou, Burkina Faso ». In : *Journal of Climate* 18.19 (2005), p. 3983–3995.
- OKE, T. R. *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and Observing Methods*. 2006.
- OKE, T. R. « Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations ». In : *Journal of climatology* 1.3 (1981), p. 237–254.
- « City size and the urban heat island ». In : *Atmospheric Environment (1967)* 7.8 (1973), p. 769–779.
- OKE, T. R. « The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands ». In : *Atmosphere* 14.4 (1976), p. 268–277.

- OLESON, K. W. et al. « An urban parameterization for a global climate model. Part I: Formulation and evaluation for two cities ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47.4 (2008), p. 1038–1060.
- PANTAVOU, K. et al. « Outdoor thermal sensation of pedestrians in a Mediterranean climate and a comparison with UTCI ». In : *Building and Environment* 66 (2013), p. 82–95.
- PARK, H.-S. « Features of the heat island in seoul and its surrounding cities ». In : *Atmospheric Environment (1967)* 20.10 (1986), p. 1859–1866. DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/0004-6981\(86\)90326-4](http://dx.doi.org/10.1016/0004-6981(86)90326-4).
- PETRALI, M. et al. « Urban planning indicators: useful tools to measure the effect of urbanization and vegetation on summer air temperatures ». In : *International Journal of Climatology* 34.4 (2014), p. 1236–1244.
- PIGEON, G. *Computation of a thermal comfort index in the teb urban canopy model*. 2011.
- PIGEON, G. et al. « De l’observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville ». In : (2008).
- PIGEON, G. et al. « Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the TEB scheme ». In : *Meteorology and Atmospheric Physics* 102.3-4 (2008), p. 159–171.
- PIGEON, G. et al. « Evaluation of building energy simulations with the TEB model against EnergyPlus for a set of representative buildings in Paris ». In : *Build. Environ* 76 (2014), p. 1–14.
- PORSON, A. et al. « Implementation of a new urban energy budget scheme in the MetUM. Part I: description and idealized simulations ». In : *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 136.651 (2010), p. 1514–1529.
- POTVIN, A. « Assessing the microclimate of urban transitional spaces ». In : *Proceedings of Passive Low Energy Architecture* (2000), p. 581–6.
- REN, C., E. Y.-y. NG et L. KATZSCHNER. « Urban climatic map studies: a review ». In : *International Journal of Climatology* 31.15 (2011), p. 2213–2233.
- REN, Z. et al. « Constructing weather data for building simulation considering urban heat island ». In : *Building Services Engineering Research and Technology* (2012), p. 0143624412467194.
- ROBITU, M. *Etude de l’interaction entre le bâtiment et son environnement urbain: influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. 2005.
- ROTACH, M. et al. « BUBBLE—an urban boundary layer meteorology project ». In : *Theoretical and Applied Climatology* 81.3-4 (2005), p. 231–261.
- SCHWARZ, N. et al. « Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators - an application for the city of Leipzig (Germany) ». In : *Ecological Indicators* 18 (2012), p. 693–704.
- SHARON, D. et R. KOPLOWITZ. « Observations of the heat island of a small town. » In : *Meteor. Rundsch.* 25 (1972), p. 143–146.
- SHASHUA-BAR, L. et M. E. HOFFMAN. « The Green CTTC model for predicting the air temperature in small urban wooded sites ». In : *Building and Environment* 37.12 (2002), p. 1279–1288.

- SHASHUA-BAR, L., D. PEARLMUTTER et E. ERELL. « The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate ». In : *Landscape and Urban Planning* 92.3 (2009), p. 179–186.
- STEWART, I. D., T. OKE et E. S. KRAYENHOFF. « Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations ». In : *International Journal of Climatology* 34.4 (2014), p. 1062–1080.
- STEWART, I. D. « Redefining the urban heat island ». In : (2011).
- STEWART, I. D. et T. R. OKE. « Local climate zones for urban temperature studies ». In : *Bulletin of the American Meteorological Society* 93.12 (2012), p. 1879–1900.
- SZYMANOWSKI, M., M. KRYZA et al. « GIS-based techniques for urban heat island spatialization. » In : *Climate Research* 38.2 (2009), p. 171–187.
- TAHA, H. « Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat ». In : *Energy and buildings* 25.2 (1997), p. 99–103.
- TAKAHASHI, K. et al. « Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation ». In : *Energy and Buildings* 36.8 (2004), p. 771–779.
- TANIGUCHI, M., W. C. BURNETT et G. D. NESS. « Integrated research on subsurface environments in Asian urban areas ». In : *Science of the Total Environment* 404.2 (2008), p. 377–392.
- THORSSON, S. et al. « Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting ». In : *International Journal of Climatology* 27.14 (2007), p. 1983–1993.
- TOPARLAR, Y. et al. « CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam ». In : *Building and Environment* (2014).
- TRAN, H. et al. « Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities ». In : *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 8.1 (2006), p. 34–48.
- UNGER, J., Z. SÜMEGHY et J. ZOBOKI. « Temperature cross-section features in an urban area ». In : *Atmospheric Research* 58.2 (2001), p. 117–127.
- VANT-HULL, B. et al. « FINE STRUCTURE IN MANHATTAN'S DAYTIME URBAN HEAT ISLAND: A NEW DATASET ». In : *Journal of Urban and Environmental Engineering (JUEE)* 8.1 (2014).
- WONG, P.-y. « A GIS approach to analyzing microclimate variations and the urban heat island phenomenon in Hong Kong ». Thèse de doct. The University of Hong Kong (Pokfulam, Hong Kong), 2014.
- YAGLOU, C. et D. MINARD. « Control of heat casualties at military training centers. » In : *AMA Archives of Industrial Health* 16.4 (1957), p. 302.
- YAN, H. et al. « Assessing the effects of landscape design parameters on intra-urban air temperature variability: The case of Beijing, China ». In : *Building and environment* 76 (2014), p. 44–53.