



HAL
open science

Co-construction d'un réseau d'observation du climat urbain et de services climatiques associés : cas d'application sur la métropole toulousaine

Guillaume Dumas

► **To cite this version:**

Guillaume Dumas. Co-construction d'un réseau d'observation du climat urbain et de services climatiques associés : cas d'application sur la métropole toulousaine. Météorologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2021. Français. NNT : 2021TOU30256 . tel-03700032

HAL Id: tel-03700032

<https://theses.hal.science/tel-03700032>

Submitted on 20 Jun 2022

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

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



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Guillaume Dumas

Le :

23/03/2021

Titre :

Co-construction d'un réseau d'observation du climat urbain et de services climatiques associés : cas d'application sur la métropole Toulousaine

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED SDU2E : Océan, Atmosphère, Climat

Unité de recherche :

Centre National de Recherches Météorologiques

Directeur/trice(s) de Thèse :

M. Valéry Masson & Mme Julia Hidalgo

Jury :

M. Gerald Mills (rapporteur)

M. Sylvain Bigot (rapporteur)

M. Vincent Dubreuil (rapporteur)

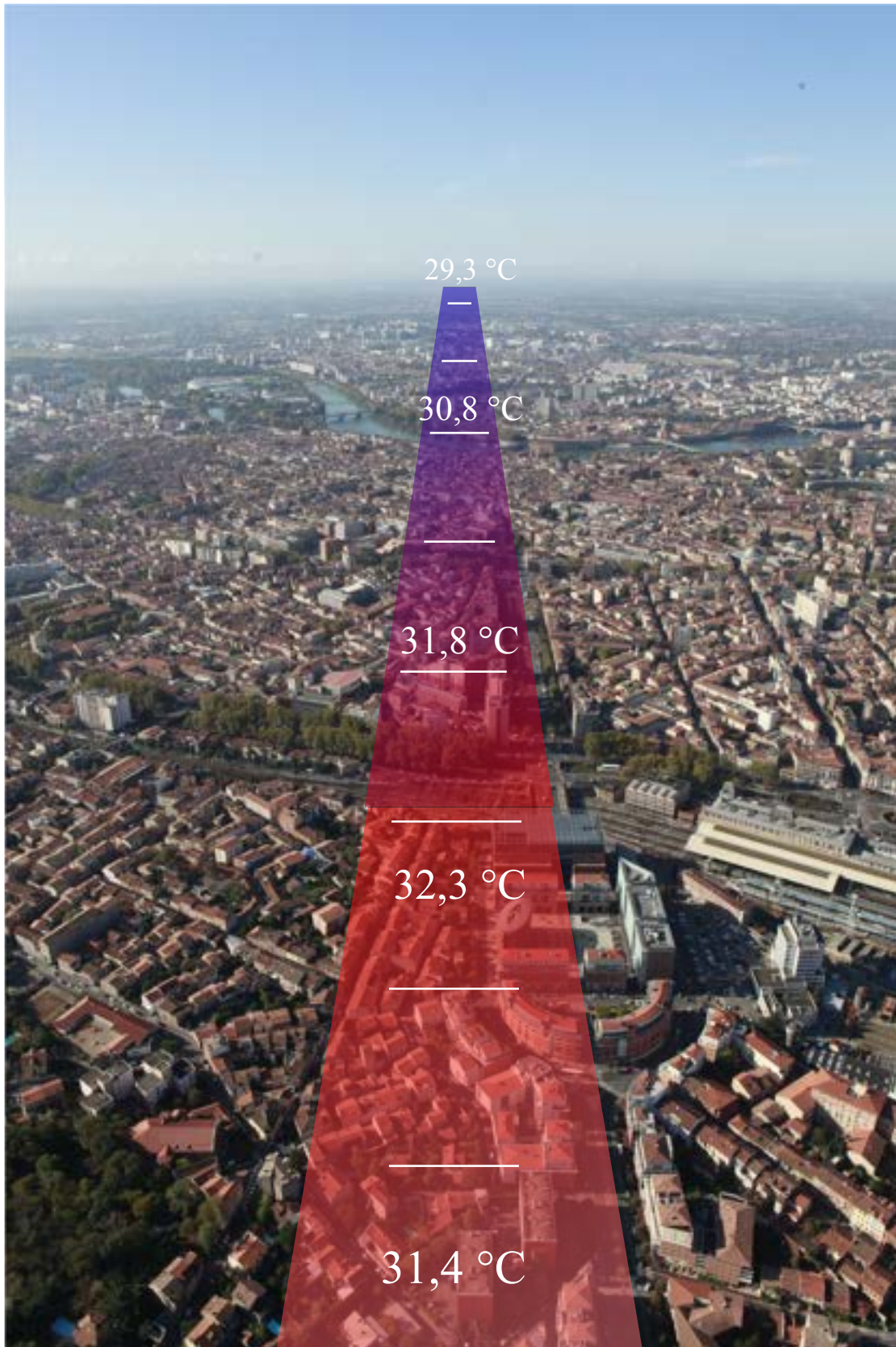
Mme Malika Madelin (examinatrice)

M. Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry (examineur et président du jury)

Mme. Sarah Duché (examinatrice)

Mme Valérie Edouart (co-encadrante)

Co-construction d'un réseau d'observation du climat urbain et de services climatiques associés : cas d'application sur la métropole Toulousaine



toulouse
métropole



METEO
FRANCE



Financements

- Cette thèse s'est déroulée dans le cadre du projet URCLIM (www.urclim.eu), soutenu par la JPI Climate et co-financé par l'union européenne (ERANET ERA4CS, numéro de contrat 690462).
- Cette thèse a fait l'objet d'un partenariat et a été financée en propre à hauteur de 50 % par le Centre National de Recherches Météorologique et 50 % par Toulouse Métropole.

A qui s'adresse cette thèse ?

-Aux climatologues qui ont pour terrain l'urbain, cette thèse propose d'aborder la question du choix des sites de mesures pour piloter des analyses thématiques de l'îlot de chaleur urbain au regard des morphologies urbaines ou des conditions météorologiques.

- Aux urbanistes et géographes ou aux membres des collectivités désireux de compléter ou réviser leurs connaissances sur l'îlot de chaleur ou les services climatiques. Cette thèse propose de déconstruire le concept de services climatiques à base de réseaux de mesures. Ses composantes, ses limites, ses objectifs, ses enjeux, tous les différents points sont abordés pour permettre une appropriation des savoirs par des sciences extérieures à la climatologie.

- Aux amoureux et curieux des sciences du climat souhaitant découvrir le travail réalisé sur le réseau de stations météo de Toulouse. La solution technique est présentée, ainsi que les méthodes pour le choix des sites de mesures.

- A ceux qui s'intéressent à la nature des rapports entre science et société. Quelles formes d'organisation du travail sont attendues entre ces deux mondes ? Comment sont construites les relations et que pouvons-nous attendre des échanges ?

Remerciements

Avant d'aborder le fond du manuscrit, je tenais à exprimer mes sincères remerciements à l'égard des personnes qui ont sû m'accompagner pendant le parcours de la thèse. En effet, j'ai eu la chance de profiter d'un cadre de travail agréable et stimulant, au long de cette expérience.

Tout d'abord, je remercie vivement Madame Julia Hidalgo, la co-directrice de ma thèse, qui m'encadre depuis mon premier stage effectué lors de la troisième année de licence et qui m'a apporté confiance et soutien, ainsi qu'une ouverture d'esprit sur le travail accompli. En parallèle, je tiens à remercier Monsieur Valéry Masson, le co-directeur de ma thèse, qui a su structurer mes propos et me guider sans me contraindre, tout en me faisant part de son expertise pointue.

Je n'oublierai pas l'équipe VILLE du CNRM qui m'a donné l'occasion d'échanger avec un certain nombre de collègues sur des sujets divers et variés lors de repas animés. Ces instants ont été source d'évasion et de convivialité, dans le monde de l'avant COVID-19.

Je pense à mes compagnons de route du bureau 104, Benjamin et Emilie qui ont permis de transformer notre bureau en un espace agréable et jovial.

A Valérie qui a pu me guider dans les arcanes métropolitaines de la collectivité. Elle a sû préserver ma santé mentale et me soutenir pendant plus de trois années. A mes collègues de la Métropole et du Plan Climat, Aurélie et Jérémie qui m'accueillaient avec plaisir le peu de fois où je m'aventurais dans l'ovale.

Mes pensées les plus chères vont à ma femme, Sophie, qui était présente bien avant la thèse, et qui aigaye ma vie un peu plus chaque jour. La thèse à ses cotés prenait l'allure d'une balade paisible en forêt.

A ma famille, ma mère, mon père, ma sœur, qui, loin des aspects techniques, me témoignaient leur soutien et leur affection.

A ma belle famille, qui m'a encouragé ; mes beaux-parents, pour leurs relectures avisées et leur soutien indéfectible.

A mes amis, Marilys, Romain, Jean-Marie, pour les rigolades, les sorties et la bonne humeur !

Enfin, à ma fille Diane, aussi vieille que ma thèse, qui me lira peut-être un jour !

Résumé

Cette thèse fournit une description du développement des services climatiques au sein de Toulouse Métropole, en France. Ces services sont articulés autour d'un réseau de stations météorologiques pour les études de micro-climatologie, en particulier l'analyse de la température de l'air et de l'îlot de chaleur urbain. L'introduction revient sur le concept de services climatiques et leurs évolutions au cours des dernières décennies. Un bref rappel des différentes typologies d'îlots de chaleur est effectué avant d'évoquer l'enracinement de cette thèse dans un historique de partenariat de recherches sur le climat à Toulouse, entre acteurs institutionnels et scientifiques. Le travail s'assemble ensuite autour de trois axes.

Le premier s'emploie à décomposer les services climatiques à base de réseaux d'observations en objets distincts rattachés à des champs disciplinaires séparés mais en interaction. La démarche s'appuie sur une classification de la bibliographie et des travaux de l'Organisation Mondiale de Météorologie sur les services climatiques. Dans cette partie est également expliqué le parti pris et la mise en place d'une dynamique de travail qui fait appel aux méthodes relatives à la participation, et en particulier à la co-construction. Enfin, cette partie présente la gouvernance opérationnelle des services climatiques déployés pendant la période de thèse (2017-2020).

Si l'axe premier présente un cadre théorique, méthodologique et organisationnel du travail de recherche-action, le second axe se veut être la mise en pratique. A savoir la transformation des différentes composantes d'un service climatique à base de réseau de mesures en une solution technique déployée et opérationnelle selon des normes et standards internationaux. Un focus est apporté sur le choix des sites de mesures à l'aide de cartographies thématiques et d'une campagne de mesures véhiculée. Enfin, l'acheminement de la donnée et le matériel utilisé sont expliqués sous l'angle des objets connectés. Cette partie sert également à montrer l'ancrage des différentes composantes du réseau (observation, acheminement et stockage des données, livraison) dans les multiples directions métiers de la Métropole Toulousaine, illustrant ainsi les résultats des méthodes de co-construction.

Le troisième axe, enfin, propose une analyse de l'îlot de chaleur du territoire Toulousain à partir des données mesurées par le réseau mis en place. Dans un premier temps l'îlot de chaleur est abordé sous l'angle classique de la dichotomie urbain/rural et selon des conditions météo optimales à sa formation. Dans un second temps est mobilisée l'approche des types de temps pour approfondir les analyses selon divers types de conditions météorologiques. Enfin une analyse spatiale plus fine est réalisée en mobilisant les Local Climate Zones (LCZ). Pour conclure les analyses, un regard

particulier est porté sur le comportement thermique des zones d'activités (LCZ 8) sur l'été 2020. Elle est, avec la LCZ bâti résidentiel type pavillonnaire, une LCZ particulièrement présente sur le territoire de la Métropole et un tissu urbain sur lequel est porté de nombreuses considérations urbanistiques.

Cette thèse propose ainsi une approche transversale et inter-disciplinaire de mise en œuvre d'un service climatique urbain, complétée d'une analyse territorialisée du climat urbain. Elle vise à mobiliser les méthodes et techniques mises en place par la recherche en climatologie urbaine au service de l'urbanisme opérationnel tout en ayant comme objectif de participer au débat scientifique autour du développement des services climatiques urbains.

Abstract

This thesis provides a description of the development of climate services within Toulouse Métropole, France. These services are articulated around an automated weather station network for micro-climatology studies, in particular the analysis of air temperature of the urban canopy heat island.

The introduction reviews the concept of climate services and their evolution over the last decades. A brief reminder of the different typologies of heat islands is given before evoking the rooting of this thesis in a history of partnership in climate research in Toulouse between institutional and scientific actors. The work is then built around three axes.

The first one decomposes the climate services based on observation networks into distinct objects attached to separate and interacting disciplinary fields. The approach is based on a classification of the bibliography and the work of the World Meteorological Organization on climate services. This part also explains the volunteer to mobilize methods relating to participation and in particular co-construction with the purpose to bring work flow and dynamic. Finally, this part presents the governance of climate services deployed during the thesis period (2017-2020).

While the first axis presents a theoretical, methodological and organizational framework for action-research work, the second axis is intended to be its practical application. In other words the transformation of the different components of a climate service based on a measurement network into a technical solution deployed and operational according to international norms and standards. A focus is brought on the choice of measurement sites with the help of thematic maps and a mobile measurement campaign. Finally, the routing of the data and the equipment used are explained from the perspective of the connected objects. This part also serves to show the anchoring of the different components of the network (observation, data routing and storage, delivery and sharing) in the multiple departments of Toulouse's local authority, which illustrates the results of co-construction methods.

The third axis, finally, proposes an analysis of the heat island of the Toulouse territory from the data measured by the network. First, the heat island is approached from the classic angle of the urban/rural dichotomy and according to optimal weather conditions at its formation. In a second step, the approach of weather types is mobilized to deepen the analyses according to various types of weather conditions. Finally, a finer spatial analysis is carried out using Local Climate Zones (LCZ). To conclude the analyses, a particular look is taken at the thermal behaviour of the activity zones (LCZ 8) over the summer of 2020. Like the LCZ built residential pavilion-type buildings, it is

an LCZ particularly well represented on the territory of the Metropole and a being under many urban planning considerations.

This thesis proposes a transversal and inter-disciplinary approach to the implementation of an urban climate service, complemented by a territorialized analysis of the urban climate. It aims to mobilize the methods provided by urban climatology research in the service of operational urban planning, while at the same time participating in the scientific debate on the development of urban climate services.

Introduction Générale

- **Contexte national**

Dans sa capacité à concentrer des populations, des réseaux et des activités, l'urbain alimente ses vulnérabilités face aux événements climatiques, qu'ils soient ordinaires ou non. Les villes ont alors développé et organisé leurs interventions autour de stratégies dites d'adaptation et d'atténuation. Il s'agit ici de limiter les risques d'un côté et de diminuer les rejets de gaz à effets de serre de l'autre. Pour mieux calibrer ces réponses, les besoins de maîtriser, d'évaluer et de calculer ces risques et vulnérabilités climatiques ont crû. Les collectivités territoriales, les administrations et les acteurs de la fabrique de l'urbain tentent alors ici de répondre aux cadres législatifs, aux exigences citoyennes ainsi qu'aux volontés politiques locales, nationales et internationales.

En France, nous pouvons citer par exemple l'obligation¹ de se doter d'un bilan carbone dans le volet atténuation d'un Plan Climat Air Energie Territorial en application des lois relatives au Grenelle de l'environnement (loi du 3 août 2009 Grenelle 1 et loi du 12 juillet 2000 Grenelle II). Nous pouvons aussi évoquer le passage, avec la loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (27 janvier 2014), d'une compétence facultative et partagée à une compétence obligatoire de la gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations par les collectivités (GEMAPI). Le cadre législatif et politique ne sont pas les seuls vecteurs de ces besoins accrus sur les compétences climatologiques. En effet le citoyen est également de plus en plus en demande d'actions et d'informations relatives au climat, d'autant plus que son niveau d'implication grandit. Nous citons alors des initiatives, comme la convention citoyenne pour le climat initiée par le gouvernement en démarche descendante, et le projet porté² par l'association Negawatt en démarche ascendante.

Pour répondre à ces besoins grandissant et variés, les services climatiques ont été conçus par les agences nationales de météorologie, les laboratoires de recherche ou encore les bureaux d'études privés. Ils ont pour objectif central de produire de l'information climatique à des fins d'aide à la décision et de support technique face aux enjeux contemporains d'adaptation ou d'atténuation de nos territoires urbanisés. Cependant, ces fournisseurs d'informations climatiques ont parfois éprouvé des difficultés à faire lien entre le monde scientifique et celui de l'opérationnel. Ils ont ainsi évolué pour adapter la forme et le rendu de leurs productions scientifico-techniques à des besoins définis par les utilisateurs. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) produit par exemple des rapports experts et vulgarisés pour les décideurs.

1 Obligatoire pour les Etablissement publics de coopération intercommunale (EPCI) de plus de 50 000 habitants.

2 Projet CACTUS pour Consolidating Ambitious ClimateTargets through-end-Use Sufficiency).

- **Contexte local**

En 2016, Toulouse Métropole, sous l'impulsion de l'élue Elisabeth Toutut Picard, alors en charge de la direction Environnement, initie et porte la mise en place d'un Observatoire Environnemental Urbain (OEU). Cette observatoire doit alors regrouper en son sein le suivi d'indicateurs relevant de la qualité environnementale. Il s'organise autour du recueil et du suivi d'informations sur, entre autres: la qualité de l'eau, de l'air, des ambiances sonores et du climat.

La Métropole relève des prérogatives de la loi de Modernisation de l'Action Publique Territoriale et d'Affirmation des Métropoles (MAPTAM) de 2014 citée auparavant. Elle dispose donc des compétences sur la qualité de l'eau au travers, par exemple, de la gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations sus-cité. Les ambiances sonores, y compris la gestion du bruit, font l'objet de documents réglementés (directive européenne 2002/49/CE) tels que les Cartes de Bruit Stratégique (CBS) ou encore le Plan de Prévention du Bruit dans l'Environnement (PPBE). La qualité de l'air relève des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) (article 3 de l'arrêté du 19 avril 2017 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant). L'Observatoire Environnemental Urbain se construit donc dans la volonté de regrouper ces compétences et d'en fluidifier leurs rapports et interactions. Cependant, pour compléter cet observatoire, la composante du suivi du climat est à construire. Cette composante doit donc, comme pour les autres composantes de l'OEU mentionnées, s'insérer et se greffer autour de documents et compétences existants.

Cependant, la loi ne propose aucune obligation pour une collectivité de se doter d'un quelconque suivi du climat. Seule l'obligation de se doter d'un Plan Climat Air Energie Territorial existe. Ce dernier est divisé en deux volets s'axant auour de l'atténuation et de l'adaptation. Le premier concerne l'atténuation du changement climatique. C'est à dire la maîtrise des émissions de Gaz à Effets de Serres (GES) dans l'atmosphère. Ce premier volet dispose d'outils particulièrement réglementés comme le bilan GES (obligatoire pour les collectivités de plus de 20000 habitants), bien que plusieurs méthodes de calculs existent. Le second volet, aux contours encore mal définis et ne disposant pas d'outils obligatoires comme le bilan GES, s'attarde sur la notion d'adaptation au changement climatique. Au sein de la Métropole de Toulouse, le plan climat et ses deux volets est porté par un service dédié intégré à la direction environnement. C'est donc naturellement au sein de ce service que la composante d'observatoire du climat de l'OEU trouve écho.

Pour la métropole, les besoins exprimés portent notamment sur :

- Caractériser les espaces de fraîcheur et de surchauffe urbaine.
- Disposer d'indicateurs pour suivre les impacts de l'urbanisation sur le climat local.
- Approfondir thématiquement et localement le profil climatique de Météo-France.
- Doter le volet adaptation du PCAET d'outils forts, au même titre que le bilan GES.

Ces outils doivent être adaptables et manipulables conjointement à d'autres documents et données. En tête de liste de ces documents sont évoqués le le Plan Local d'Urbanisme intercommunal et d'Habitat (PLUiH) ou les production de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE).

Il apparaît alors un caractère particulier dans les besoins exprimés : l'intégration non obligatoire d'une nouvelle compétence -celle du suivi du climat- au sein d'une direction de la Métropole. En effet usuellement pour des besoins de ce type, les collectivités réalisent des marchés avec des bureaux d'études externes qui vont produire des livrables. Or, dans le cas présent, c'est en interne que ces livrables seront élaborés via une nouvelle compétence métier. Ces livrables formant ainsi ce que nous nommons des « services climatiques ».

Deuxième fait notable, la Métropole souhaite s'orienter fortement sur l'impact de l'urbanisation et la gestion de la chaleur. Avec 1,4 % de croissance annuelle pour la seule ville de Toulouse contre 0,5 % de moyenne nationale dans les villes du même rang et plus de 200 000 habitants accueillis en moins de dix ans, le territoire subit une pression foncière marquée. Cela l'oblige à créer et organiser de nouveaux lieux de vies, notamment par le biais des Zones d'Aménagement Concertées (ZAC). L'artificialisation des sols est donc un sujet majeur pour l'un des territoires champion de l'étalement urbain.

En parallèle de ce point, le territoire dans son ensemble, situé au sud de la France, voit dans ses projections climatiques l'augmentation de l'intensité et de la fréquences des jours de fortes chaleurs. C'est au regard de ces deux facteurs que le principal enjeu climatique gravite autour de l'étude de ce que l'on appelle l'Îlot de Chaleur Urbain (ICU).

Profitant de la proximité territoriale des chercheurs travaillant sur le climat urbain et d'un historique de partenariat fructueux autour de cette thématique, des discussions s'engagent entre la Métropole et ces chercheurs sur la création de cette composante d'observation du climat urbain. Ainsi, après un atelier réalisé entre le service Plan Climat de la Direction Environnement et l'Ecole Nationale de Météorologie en 2016, une thèse co-financée entre la métropole et le Centre National de Recherche Scientifique est montée. Elle est portée scientifiquement par le Centre

National de Recherches Météorologiques de Météo-France et le Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés et Territoires. Le document présent revient sur le travail élaboré au cours de cette thèse avec la Métropole Toulousaine autour de la co-construction d'un réseau d'observation du climat urbain et de services climatiques associés.

Cette thèse revient sur le concept de services climatiques et de leurs évolutions au cours des dernières décennies dans le premier chapitre. Ils sont abordés au travers de leurs enjeux, des facteurs de leur essor et des acteurs qui participent à leur développement. Un positionnement du travail de cette thèse est alors exprimé au regard des différentes visions de services climatiques existantes.

Un bref rappel des différentes typologies d'îlots de chaleur urbains est également effectué. La formation, la spatialisation et la temporalité de l'îlot de chaleur urbain de canopée urbaine sont évoquées pour appréhender le phénomène dans sa globalité et le travail réalisé afin de l'observer.

Enfin, l'enracinement de cette thèse dans un historique de partenariat de recherches sur le climat à Toulouse entre acteurs institutionnels et scientifiques est présenté. Cette section propose ainsi un bref retour sur les projets et acteurs qui ont participé à la création d'un cluster de connaissances autour du climat urbain dans lequel cette thèse s'ancre.

Les services climatiques peuvent être compliqués à cerner dans leur globalité. Si le principe de production de documents scientifiques vers le monde de l'opérationnel est aisé à comprendre, sa mise en œuvre opérationnelle effective peut ne pas l'être. C'est pourquoi le second chapitre s'emploie à décomposer sans pour autant déconstruire les services climatiques à base de réseaux d'observations en objets d'étude distincts rattachés à des champs disciplinaires séparés mais en interaction. La démarche, descriptive sur la forme mais novatrice et didactique dans son approche, s'appuie sur une classification bibliographique à partir de la conceptualisation des services climatiques de l'Organisation Mondiale de Météorologie. Dans cette section est également expliqué le parti pris de recherche-action au travers de la mise en place d'une dynamique de travail qui fait appel aux méthodes relatives à la participation et en particulier à la co-construction. Enfin, cette partie présente la gouvernance (opérationnelle) des services climatiques déployés pendant la période de thèse (2017-2020).

Après avoir présenté dans le deuxième chapitre les cadres théorique, méthodologique et organisationnel de ce travail de recherche-action, le troisième chapitre propose sa mise en pratique : à savoir la transformation des différentes composantes d'un service climatique

à base d'un réseau de mesures en une solution technique, déployée et opérationnelle selon des normes et standards internationaux. Un focus est apporté sur le choix et méthodes de sélection des sites de mesures à l'aide de cartographies thématiques et d'une campagne de mesures véhiculée.

Enfin, l'acheminement de la donnée depuis la station météo jusqu'aux utilisateurs et le matériel utilisé sont expliqués sous l'angle des objets connectés. Cette partie sert également à montrer l'ancrage des différentes composantes du réseau (observation, acheminement et stockage des données, livraison), dans les multiples directions métiers de la Métropole Toulousaine, illustrant ainsi les résultats des méthodes de co-construction.

Dans le chapitre quatre, une analyse de l'îlot de chaleur du territoire Toulousain à partir des données mesurées par le réseau mis en place est proposée. Dans un premier temps l'îlot de chaleur est abordé sous l'angle classique de la dichotomie urbain/rural et selon des conditions météorologiques optimales à sa formation. Dans un second temps est mobilisée l'approche des types de temps pour approfondir les analyses selon divers types de conditions météorologique. Enfin une analyse spatiale plus fine est réalisée en mobilisant les Local Climate Zones (LCZ). L'îlot de chaleur est alors comparé au regard des morphologies urbaines et de leurs spatialités sur l'ensemble de la Métropole. Pour conclure les analyses, un regard particulier est jeté sur le comportement thermique des zones d'activités (LCZ 8) sur l'été 2020 dans le chapitre cinq. Elle est, avec la LCZ bâti résidentiel type pavillonnaire, une LCZ particulièrement présente sur le territoire de la Métropole. C'est également, de manière générale, un tissu urbain sur lequel sont portées de nombreuses considérations urbanistiques.

Cette thèse propose ainsi une approche transversale et inter-disciplinaire de mise en œuvre d'un service climatique urbain, complétée d'une analyse territorialisée du climat urbain. Elle vise à mobiliser les savoirs, méthodes et techniques mis en place par la recherche en climatologie urbaine au service de l'urbanisme opérationnel tout en ayant comme objectif de participer au débat scientifique autour du développement des services climatiques urbains.

Table des matières

Chapitre I. Introduction aux services climatiques intégrés et au climat urbain et contexte de l'étude

I.1. Les services climatiques.....	2
I.1.A. Une définition qui évolue.....	2
I.1.B. Une forte croissance.....	3
I.1.C. Une inégale répartition et des objectifs distincts.....	4
I.1.D. Des problématiques et enjeux récurrents.....	5
I.2. Services climatiques urbains intégrés.....	6
I.2.A. Les services climatiques adaptés aux échelles et aux enjeux des villes.....	6
I.2.B. Les agences nationales de météorologie pour fournir des services urbains intégrés.....	7
I.2.C. Les services climatiques urbains intégrés de Toulouse Métropole.....	8
I.3. Le phénomène de micro climatologie appelé îlot de chaleur urbain.....	9
I.3.A. Monitorer le phénomène de micro-climatologie appelé îlot de chaleur urbain.....	9
I.3.B. Les différents types d'îlots de chaleur urbains.....	9
I.3.C. Caractéristiques de l'ICU de canopée urbaine.....	15
I.4. Genèse d'un projet.....	20
I.4.A. Une historique de projets de recherches.....	20
I.4.B. Construire les services urbains intégrés et le monitoring de l'ICU sur Toulouse Métropole.....	25

Chapitre II. Construire des services climatiques urbains intégrés en mobilisant des processus de co-construction

II.1. Structure générale des services intégrés urbains.....	28
II.1.A. Les composantes qui composent des services climatiques.....	28
II.1.B. L'organisation de la participation.....	32
II.2. Structure des services climatiques sur la base de réseaux d'observation.....	36
II.2.A. Champs disciplinaires impliqués.....	36
II.2.B. Choix des sites de mesure.....	38
II.2.C. Choisir les capteurs.....	42
II.2.D. Choisir les technologies de télécommunications.....	45
II.2.E. Organiser les bases de données.....	47
II.2.F. Livrer la donnée.....	48
II.2.G. Transversalité des services climatiques.....	50
II.3. Co-construction de services climatiques sur la base de réseaux d'observation, appliquée aux services urbains de Toulouse.....	53
II.3.A. Les acteurs.....	53
II.3.B. La participation des départements urbains.....	55
II.3.C. Gouvernance du réseau.....	62

Chapitre III. Implantation d'un réseau de stations météorologiques pour l'observation et la caractérisation de l'îlot de Chaleur Urbain sur le territoire de Toulouse Métropole

III.1. Déploiement de la composante observation des services climatiques de Toulouse par le monde de la recherche.....	67
III.1.A. Caractériser le territoire à l'aide d'outils cartographiques et des mesures de terrain	68
III.1.B. Choix des sites : la traduction de besoins opérationnels en sites de mesures.....	96
III.1.C. Présentation de la solution technique.....	106
III.1.D. Déploiement des stations météo.....	110
III.2. Composantes monitoring, base de données et partage: de services climatiques à un objet IoT.....	116
III.2.A. Transmission de la donnée : la passerelle.....	117
III.2.B. Stockage de la donnée : le noyau central.....	118
III.2.C. Livraison de la donnée et applications.....	119
III.3. Conclusion.....	121

Chapitre IV. Caractérisation de l'îlot de Chaleur Urbain sur la métropole de Toulouse

IV.1. Récupération, organisation et évaluation des données disponibles.....	127
IV.1.A. Quantité de données.....	127
IV.1.B. Qualité des données.....	128
IV.1.C. Informer sur l'état du réseau et fiabiliser les calculs.....	129
IV.2. L'îlot de chaleur classique.....	131
IV.2.A. Evaluer une étude d'ICU.....	131
IV.2.B. Analyses de l'ICU sur la base de réseaux de mesures de température de l'air proposées par la littérature.....	133
IV.2.C. Choix des stations, des temporalités et résultats.....	133
IV.3. Approche par type de temps et saisonnière.....	140
IV.3.A. Le concept de type de temps	140
IV.3.B. Les types de temps de Toulouse.....	141
IV.3.C. L'attribution des types de temps au jeu de données des capteurs.....	144
IV.3.D. La représentativité des types de temps.....	146
IV.3.E. L'ICU selon les saisons et les types de temps.....	148
IV.4. Analyse spatiale infra-urbaine (Local Climate Zones).....	156
IV.4.A. L'approche par Local Climate Zones et effectif sur Toulouse.....	156
IV.4.B. Analyse infra-urbaine pour conditions optimales annuelles et saisonnière et par situation météorologique.....	159
IV.4.C. Conclusion sur l'analyse spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain sur Toulouse.	169

Chapitre V. Inter-comparaison du micro-climat des zones d'activités en été

V.1. Une morphologie urbaine caractéristique et une rareté d'observations.....	172
V.2. Présentation des sites d'observations, situations géographiques et période d'étude.....	173
V.3. Résultats.....	176
V.3.A. Des évolutions temporelles de l'ICU entre LCZ d'activités et rural similaires à la différence urbain/rural.....	179
V.3.B. Les effets de l'ensoleillement prolongé.....	179
V.3.C. Les espaces à proximité: un gisement de fraîcheur potentiel ?.....	180
V.3.D. L'effet des vents est légèrement perceptible.....	181
V.4. Des espaces à surveiller.....	184

VI. Conclusion générale et perspectives

VI.A. Un mot pour conclure.....	188
VI.B. Perspectives: Les études sur le climat au service de l'urbanisme contemporain....	191

Bibliographie

Bibliographie scientifique.....	196
Lois, chartes, documents de l'OMM et divers.....	205

Figures et Tableaux

Figures.....	208
Tableaux.....	211

Annexes

I. Bras de déport.....	214
II. Métadonnées.....	216

Chapitre I. Introduction aux services climatiques intégrés, au climat urbain et au contexte de l'étude.

I.1. Les services climatiques.....	2
I.1.A. Une définition qui évolue.....	2
I.1.B. Une forte croissance.....	3
I.1.C. Une inégale répartition et des objectifs distincts.....	4
I.1.D. Des problématiques et enjeux récurrents.....	5
I.2. Services climatiques urbains intégrés.....	6
I.2.A. Les services climatiques adaptés aux échelles et aux enjeux des villes.....	6
I.2.B. Les agences nationales de météorologie pour fournir des services urbains intégrés.....	7
I.2.C. Les services climatiques urbains intégrés de Toulouse Métropole.....	8
I.3. Le phénomène de micro climatologie appelé îlot de chaleur urbain.....	9
I.3.A. Monitorer le phénomène de micro-climatologie appelé îlot de chaleur urbain.....	9
I.3.B. Les différents types d'îlots de chaleur urbains.....	9
I.3.C. Caractéristiques de l'ICU de canopée urbaine.....	15
I.4. Genèse d'un projet.....	20
I.4.A. Une historique de projets de recherches.....	20
I.4.B. Construire les services urbains intégrés et le monitoring de l'ICU sur Toulouse Métropole.....	25

I.1. Les services climatiques

I.1.A. Une définition qui évolue

Des décennies de travaux et d'études scientifiques existent sur le sujet des « services climatiques » (Vaughan & Dessai, 2014). Il est aisément possible de remonter autour de quarante ans pour les premières d'entre elles (Changnon et al., 1980), bien que la démocratisation du terme a lieu à partir de 2002. Les principes de ces services, cependant, remontent à plus d'un siècle. Ces études abordent et présentent le sujet en tant que notion, concept ou encore comme champ interdisciplinaire. Ce dernier aspect ressort fortement dans certaines études récentes (Harjanne, 2017; Bigot et al., 2017). Elles observent et analysent de façon quasi-systémique la création et les interactions d'acteurs, de langages, de structures, etc. autour de ce terme.

Son sens a alors évolué et a été modifié au cours du temps et de ces travaux avec une accélération sur les dernières années (Lugen, 2020). Au départ, c'est la nécessité, le besoin de fournir et d'améliorer l'accès aux sciences du climat et de leurs données à des utilisateurs. En ce sens les agences nationales de météorologie -comme Météo France- sont souvent présentées comme des services climatiques.

Ces dernières années, depuis 2014, le terme présente un objet caractérisant des « services intégrés », c'est-à-dire dirigés par des utilisateurs et conduits pour des applications scientifiques (Vaughan, 2014; Lourenco et al., 2016; Bessembinder et al., 2019, Lugen, 2020).

Quelles que soient leurs dénominations, « services climatiques » ou encore « services climatologiques », la définition contemporaine consensuellement avancée évoque :

Des services impliquant la livraison, l'accès, de connaissances scientifiques climatiques produites pour des utilisateurs spécifiques. Ils peuvent être citoyens, acteurs de la fabrique de la ville, professionnels de l'agriculture, etc. La forme de cette livraison et de ces connaissances varie et peut inclure l'utilisation de logiciels avec des interfaces spécifiques, des bulletins, des services internet, des sites internet, etc. (Vaughan, 2014).

En ce sens, les services climatiques ont pour vocation intrinsèque d'établir une connexion entre deux univers distincts : sciences et société (McNie, 2012).

I.1.B. Une forte croissance

La multiplicité actuelle des initiatives se définissant comme des « services climatiques » est corrélée à quatre principaux facteurs :

- Premièrement les technologies ont évolué et les solutions proposées pour étudier le climat sont bien plus efficaces en termes de coûts/résultats qu'elles ne l'étaient il y a dix ou vingt années en arrière. La démocratisation des données satellites ou encore des réseaux de stations météorologiques amateurs comme Netatmo (Chapman et al., 2017) en sont de pertinents exemples. Sur un panel exhaustif de 161 études¹ scientifiques anglo saxonnes publiées depuis 1980 (Lugen), la majorité (38,5%) correspondent à ce cadre dans lequel les services climatiques sont présentés comme une innovation technologique en amélioration continue.
- Ensuite, le besoin de maîtriser, d'évaluer, de calculer les risques et vulnérabilités climatiques a crû (Quenault, 2014, Strret & al., 2019). Il concerne désormais bien plus que la seule discipline de la climatologie. L'économie, la sociologie, l'écologie, etc. peuvent être citées (Fauchoux, 2005). Ce besoin grandissant peut s'expliquer lorsque les nombreux rapports du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat) décrivent comment ces risques et vulnérabilités impactent un large nombre de métiers dans différents secteurs comme la santé, l'agriculture, la planification urbaine, etc. Dans le panel d'études sus-cité, une minorité d'études dispose de ce cadre (5.6%), il est souvent mis en corrélation avec le caractère éthique (6.2%)
- Enfin la demande de ces services climatiques coïncide avec leur disponibilité (Millner, 2012) couplée au soutien qui leur est apporté. Ce dernier se matérialise via les propos d'acteurs d'importance (GIEC, OMM, Météo-France, etc.) et de documents d'appui nationaux ou internationaux (Street, 2016). Peuvent être cités l'accord de Paris, les rapports de l'Organisation Mondiale de la Santé ou encore de l'agenda des Nations Unies. Le cadre abordé ici est celui du marché disponible (13 % des études) et des structures mises en places pour soutenir les initiatives.
- Le dernier facteur, que nous aborderons plus loin et qui s'observe dans 36,6 % des études, dont la quasi-intégralité date d'après 2014, coïncide avec le besoin de disposer d'une interface entre sciences et sociétés, avec des applications focalisées sur les utilisateurs.

1 La liste est disponible dans la Table 1 à l'adresse suivante: <http://www.mdpi.com/2073-4433/11/10/1047/s1>. Elle est tiré de Lugén, 2020

I.1.C. Une inégale répartition et des objectifs distincts

L'effectif des services climatiques est inégalement réparti autour du monde, avec une forte présence en Europe. Leur essor a abouti à la mise en place de programmes et projets visant à les organiser. C'est le cas notable du *Global Framework for Climate Services* (GFCS), porté par l'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM). Le principal objectif de ce projet est de supporter l'implantation de services climatiques à différentes échelles, mondiales et nationales, tout en les liant à différentes problématiques, comme la sécurité alimentaire, la santé, la réduction des risques en cas de désastres. Pour ce faire, ce type d'initiative produit de nombreux guides (Hewitt et al., 2012).

De nombreux auteurs appuient le manque de développement de services climatiques dans les pays de l'hémisphère sud (OMM, Lugen 2020) tout en pointant en parallèle les problèmes liés au financement et leurs modèles économiques pour des pays en « développement économique » (Webber, 2016). Ce sont alors les agences nationales de météorologie qui deviennent les principaux acteurs de leur mise en place, sous couvert de financements, principalement des pays du nord². Dans ces pays, les projets se multiplient aux échelles nationale, internationale et infra-nationale, mais les répartitions inégales demeurent. En Europe, les services climatiques font déjà l'objet d'études systémiques (Cortekar et al., 2020) et de projets structurants. Le compte des services climatiques change selon les variations des définitions choisies. Ces études permettent cependant d'obtenir une vision globale entre autres sur la forme des données produites, de leurs fournisseurs, de leurs utilisateurs et des zones géographiques couvertes.

En France, plus de 40 fournisseurs sont répertoriés (Cortekar et al., 2020). Le consortium "Convention relative à l'attribution d'un appui financier au bénéfice des services climatiques" peut être cité comme la volonté affichée d'organiser et structurer l'offre des services climatiques (Planton et al., 2018). Les acteurs de sa coordination sont le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES), le Centre National de Recherches Scientifiques (CNRS), le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (IPSL/LSCE), le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) et le Climat, Environnement, Couplage et Incertitudes (CECI).

2 - https://gfcs.wmo.int/sites/default/files/COMPENDIUM-ON-GFCS-PROJECTS-24.3.14-2_1.pdf
- https://gfcs.wmo.int/node/39#node_partnership_full_group_sponsors_partners

I.1.D. Des problématiques et enjeux récurrents

Malgré leur avancement à l'international (Vaughan, 2014; Lourenco et al., 2016), cette « nouvelle » vision des services climatiques (National Research Council et al., 2001) peine encore à connecter de manière efficace les producteurs de services et les utilisateurs (Lucio & Grasso, 2016; Buontempo et al., 2014).

Même avec le support de l'OMM et la mise en place d'initiatives telles que les GFCS, les services climatiques demeurent un objet encore largement informel (Brasseur et al., 2016; Grimmond et al., 2019) à l'international.

Avec l'émergence grandissante du terme « climate services », les variantes de définitions se sont multipliées et peuvent mener à une forme de confusion. En conséquence, plusieurs auteurs évoquent le besoin de standardiser les services climatiques (Vaughan, 2014; Lourenco et al., 2016; Brasseur et al., 2016; Harjanne, 2017).

De surcroît, il reste un manque de méthodes d'évaluations des services climatiques, en particulier en ce qui concerne le rapport entre les créateurs de l'offre de services climatiques et la demande réelle des utilisateurs potentiels.

Enfin, la plupart des théories se basent sur une conceptualisation des « bonnes pratiques » plutôt que par une évaluation complète au travers d'un cadre d'évaluation commun (Vaughan, 2014 ; Grimmond et al., 2019).

I.2. Services climatiques urbains intégrés

I.2.A. Les services climatiques adaptés aux échelles et aux enjeux des villes

Parmi les déclinaisons des services climatiques existent les « Services climatique urbains intégrés »³. Ces derniers reprennent les objectifs des services climatiques tout en les connectant aux enjeux urbains. L'OMM a déjà accordé un guide sur l'élaboration de ces services particuliers. La déclinaison des services climatiques à l'échelle de l'urbain est récente. Les acteurs urbains sont sensibles aux vulnérabilités et aux expositions aux risques naturels et anthropiques (Eliasson et al., 2000). De plus, des réglementations et des compétences imposées à certaines villes les poussent à se doter de données que les services climatiques peuvent produire.

Cet intérêt grandissant des villes pour les services climatiques se voit dans la croissance de grands réseaux institutionnels⁴ et projets⁵, publics ou privés, organisés autour de ces thèmes dans le monde. De tels réseaux s'adressent aux acteurs via leurs prismes professionnels et leurs besoins opérationnels très spécifiques (Uittenbroek et al., 2013) : gestion des mobilités, de l'énergie, planification et aménagement, pollution, gestions des eaux, etc. Les réponses vont des techniques d'adaptation et d'atténuation du dérèglement climatique à la gestion des espaces verts en tenant compte des diagnostics de vulnérabilité de la population, des considérations sanitaires et des évaluations des risques.

L'éventail des actions est donc large, tout comme les besoins. Les services climatiques des zones urbaines tentent de répondre à ces préoccupations diverses. Ils étaient initialement appelés services météorologiques, climatiques et environnementaux urbains intégrés (Grimmond et al., 2019). Les services climatiques urbains intégrés incluent donc toutes les spécificités liées à ces zones (Grimmond et al., 2019), y compris les émissions de gaz à effet de serre, les intensités des îlots de chaleur urbains, la durabilité énergétique et hydrique et les inondations urbaines, etc.

Quel que soit le sujet étudié, l'objectif demeure identique à celui des services climatologiques généraux : proposer une structure permettant à des acteurs d'observer, de s'informer et de réagir en conséquence en utilisant différents niveaux d'analyses, d'acteurs et d'actions à l'échelle de la ville (Baklanov et al., 2018).

3 Ci-après dénommés services climatiques urbains ou services climatiques.

4 L'initiative climate-fit.city <https://climate-fit.city/about-climate-fit/> qui est une part du Pan-European Urban Climate services. ; C40 cities : <https://www.c40.org/>

5 Pan-European Urban Climate Services (<https://cordis.europa.eu/project/id/730004/fr>), URCLIM (<https://www.urclim.eu/>)

I.2.B. Les agences nationales de météorologie pour fournir des services urbains intégrés

Les similitudes entre les objectifs des services climatologiques et la mission des Services météorologiques et hydrologiques nationaux (SMHN) placent le SMHN dans une position idéale pour offrir un soutien et une assistance dans le développement des services climatologiques (Grimmond et al., 2019). Mais ils ne sont pas les seuls acteurs potentiels, des bureaux d'études ou des entreprises de systèmes d'informations peuvent prétendre au développement de tels services, que ce soit à l'échelle nationale (Egis) ou locale (HDrain). La principale distinction entre les deux est que les SMHN ont été pensés et créés pour ces missions-là, en tant que services, là où des entreprises répondraient plus à une demande via une volonté économique et mercantile (Webber, 2016).

Cependant, si les SMHN correspondent à des services climatiques aux échelles nationales et régionales de par leurs structures, ils ne peuvent pas fournir d'observations in situ cohérentes à haute densité et spécifiques à un lieu avec leurs structures et fonctionnements actuels. Les moyens financiers et humains nécessaires sont trop conséquents.

A contrario, ils peuvent fournir l'expertise, les compétences et les connaissances utiles pour développer et intégrer des systèmes d'observation fins, en tant que composante des services climatologiques dans les départements urbains (Baklanov et al., 2018). Cet aspect rentre ainsi en corrélation avec la définition des missions de SMHN.

Le principal enjeu des SMHN réside alors dans leur capacité à combler les lacunes en termes de production, de transfert et de traduction de données vers les nouveaux utilisateurs pour combler la «vallée de la mort» (Mahon et al., 2019; Grimmond et al., 2019). Cette expression désigne le fossé qui sépare parfois le rendu des productions scientifiques et les besoins opérationnels d'acteurs. Cela peut-être en termes de temporalités, en terme de langage (par exemple si ce n'est pas compréhensible et manipulable pour l'utilisateur), en termes d'utilisations, etc. C'est en surmontant ce point que l'intégration des services climatologiques est réussie. Cela signifie que les services fournis sont utilisés efficacement par les organisations qui manifestent un intérêt à disposer de ces mêmes services climatologiques (Allis et al., 2019). Pour remplir ces objectifs et atteindre leur potentiel, les services climatologiques sont aujourd'hui souvent construits à l'aide de processus de co-construction. Ces processus supposent une garantie que les services livrés correspondent bien aux besoins évoqués par les utilisateurs. La mobilisation de ces processus est fortement liée aux caractéristiques et spécificités locales, y compris aux points de vue géographiques, politiques, économiques ou sociaux. Le Conseil économique, social et

environnemental publie en 2017 un document intitulé Sciences et société : « Répondre ensemble aux enjeux climatiques ». Il y recommande « *que le développement des services climatiques accessibles, appelés à jouer un rôle important dans les stratégies d'adaptation et de prévention des risques liés aux phénomènes extrêmes fasse l'objet d'un dialogue permanent entre la communauté scientifique et les acteur.rice.s de l'entreprise* ».

I.2.C Les services climatiques urbains intégrés de Toulouse Métropole

C'est dans ces logiques d'objectifs d'intégration effective de contenus scientifiques spécifiques à des utilisateurs que la collectivité territoriale de la métropole toulousaine et le laboratoire de recherche de l'agence nationale de la météorologie, ont conçu et déployé le programme de services climatiques intégrés urbains de Toulouse. La première phase du programme consiste en une surveillance de l'Îlot de Chaleur Urbain (ICU) de la couche limite atmosphérique via un réseau de stations météorologiques connectées en temps réel. La section suivante propose de revenir sur ce concept d'îlot de chaleur, ses différentes formes et processus.

I.3. Le phénomène de micro climatologie appelé îlot de chaleur urbain

I.3.A. Monitorer le phénomène de micro-climatologie appelé îlot de chaleur urbain

Tout comme les services climatiques qui, malgré leur évolution encore marquée, disposent de guides et de normes pour être mis en place ; l'observation de l'ICU peut être réalisée via différentes méthodes : les thermographies satellites, les réseaux de mesures mobiles, les mesures fixes. Chacune de ces méthodes de mesures physiques est couverte par de nombreux travaux de l'OMM et d'autres acteurs, scientifiques ou professionnels. Ces travaux les comparent et analysent lorsqu'elles rentrent en concurrence (Mirzaei & al., 2010). Par exemple l'approche par réseau de mesure coûte plus chère et prends plus de temps que l'approche par modélisation. En contre partie cette dernière exige des compétences et des connaissances pointues sur les modèles disponibles et leurs mises en œuvre. Quoi qu'il en soit ces méthodes de mesures disposent de normes, de standards, de méthodologies propres qui nécessitent des installations attentionnées pour être scientifiquement valides (Baranka & al., 2016). Les méthodes et leurs caractéristiques dépendent directement des études à réaliser et des variables à observer. Pour comprendre le choix d'un réseau de stations fixes, il faut comprendre les différentes déclinaisons de l'ICU et les différents moyens d'observations qui y sont associés.

I.3.B. Les différents types d'îlots de chaleur urbains

Les environnements urbains, dans le sens des espaces physiques et sociaux (Sénécal, 2015) disposent de températures plus élevées que leurs alentours aux dominantes plus végétalisées. Cela est dû en majeure partie aux matériaux qui parsèment ces espaces : bitumes, béton, acier, briques, etc : tout autant de capteurs de chaleur qui agissent comme des radiateurs pour le climat urbain. Ce phénomène de différence de température se nomme l'îlot de chaleur urbain.

Le concept d'îlot de chaleur urbain (ICU) désigne, tel qu'il a été exposé pour la première fois par le considéré père fondateur de la climatologie urbaine Luke Howard; l'effet de réchauffement de l'air de l'urbain par rapport au rural (Howard, 1818). Le terme « îlot de chaleur » a une origine plus incertaine, mais nous pouvons remonter son utilisation jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle (Balchin & Pye, 1947). Les études ont, entre 1818 et 1980, suivi le cycle de vie complet des découvertes scientifiques tel que défini par Thomas Kuhn (Kuhn, 1962 au travers de trois périodes

distinctes (Stewart, 2019). Du début du XIX^{ème} siècle jusqu'au début du XX^{ème} ; c'est la période, ou « épisode » -selon Kuhn- des pionniers, les études se multiplient autour de « *l'anomalie* » des différences de températures entre urbain et rural. Ces études ont principalement lieu en Europe. L'entre deux guerres est la période d'innovation des méthodologies. Enfin les années 1950 et 1980 marquent le début et la fin de la période de l'expérimentalisme, les travaux s'appuyant ainsi sur plus de cent-cinquante années de recherches établies.

Depuis, l'ICU a fait l'objet de nombreuses études (Akbabi). Au fil de ces travaux, différentes techniques ont donc été mises au point pour mesurer, quantifier et analyser les causes et effets de l'ICU. Le terme désigne aujourd'hui quatre grands types distincts (Stewart, 2011) avec chacun ses propres caractéristiques (figure 1.A.).

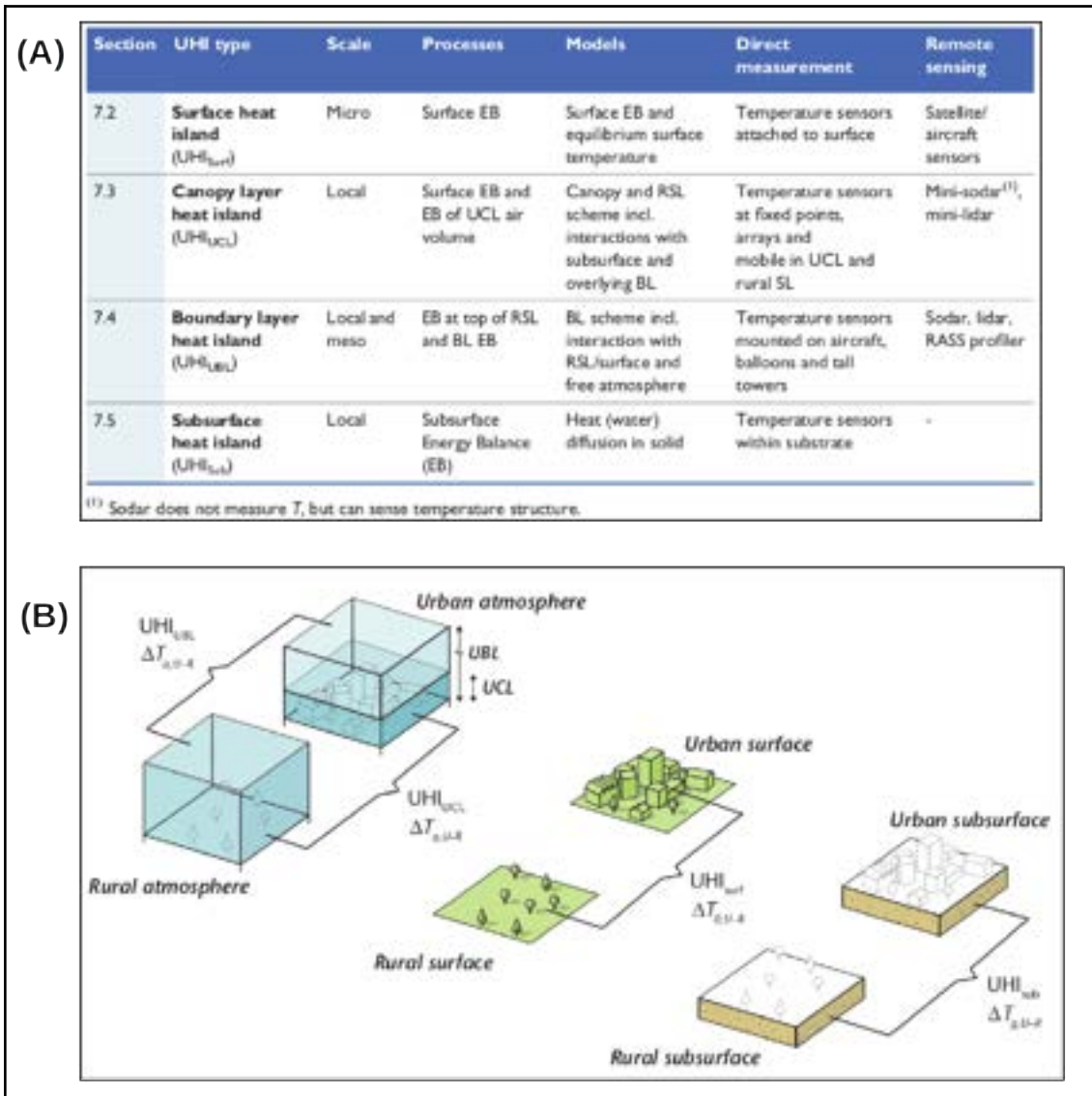


Figure 1, Résumé des différents types d'ICU (source Oke & al., 2017). Les différentes caractéristiques des ICU sont synthétisées (A). Les différences de températures conceptualisées pour les quatre types d'ICU (B).

- L'ICU Atmosphérique

Il est divisé en deux types. L'ICU de la couche limite urbaine (CLU) ou encore appelé ICU à l'échelle meso-escalatoire. Il se mesure en degré Celsius avec un delta de température entre « l'urbain » au-dessus du niveau des toits et le « rural » à une élévation similaire dans la couche limite atmosphérique (figure 1.B.). La couche limite se traduit par la couche atmosphérique directement altérée par les éléments disposés à la surfaces terrestre. Bien que toutes les couches de l'atmosphère soient impactées par la surface, la couche limite a la particularité de l'être rapidement. Il se représente donc plutôt à l'échelle d'une unité urbaine pour mieux matérialiser le gradient entre ces deux espaces .

Ensuite, en complément de l'ICU meso vient le micro îlot de chaleur urbain. Il concerne la canopée urbaine (CU) et se mesure donc en dessous du sommet des arbres et bâtiments. Il possède donc les caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain meso mais modifiées/perturbées par la proximité de la surface. Il peut aussi être représenté sous formes de cartes couvrant des unités urbaines mais à une résolution plus fine, c'est-à-dire de l'ordre de la centaine de mètres.

Les deux ICU sont modélisables, soit à l'aide de données de températures mesurées, soit à l'aide de modèles numériques. Il en résulte des modélisations avec des mailles allant de quelques mètres sur des zones restreintes à une ou plusieurs centaines de mètres, sur des zones plus étendues (Atkinson, 2003, Balázs, 2009, Karlicky & al., 2018, Touati & al., 2020).

- **Formule ICU_{CLU} et ICU_{CU} :**

$$\Delta T_a = T_{U_a} - T_{R_a}$$

ΔT_a : différence de température en degrés Celsius.

T_{U_a} : température de l'air à environ deux mètres au-dessus du sol pour l' ICU_{cu} et au-dessus de la canopée pour l' ICU_{clu} en milieu urbain.

T_{R_a} : température de l'air à environ deux mètres au-dessus du sol pour l' ICU_{cu} et au-dessus de la canopée pour l' ICU_{clu} à élévation similaire de T_{U_a} en milieu rural.

- L'ICU de surface

L'îlot de chaleur urbain de surface (ICU_{surf}) fait référence aux températures des surfaces des matériaux. Il s'exprime lui aussi en degrés Celsius selon une différence de température entre deux surfaces. Il se mesure à l'aide de thermographies. Elles peuvent être aériennes, satellites ou au sol. L'accès gratuit à de nombreux stocks d'images satellites en fait un ICU particulièrement documenté et étudié (Zhou & al., 2019). Sa modélisation se fait selon des carroyages dont la maille dépend de la qualité des données d'entrée. La résolution est autour de la centaine de mètres par pixel par exemple pour les satellites (Le Roy & al., 2019; Tomlinson & al., 2011) mais peut descendre à quelques mètres de résolution pour des images aériennes. Des méthodes de descente d'échelle peuvent être ensuite appliquées pour affiner les résolutions (Bechtel & al., 2012). Il existe aussi des modélisations entièrement numériques prodiguées par des modèles selon des résolutions plus ou moins fines (Hénon & al., 2012 ; Hénon & al., 2012) qui peuvent mobiliser des données observées (Morrison & al., 2018). Les résolutions peuvent être de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, mais la zone d'étude considérée est alors limitée. Ce sont plus des études de surfaces localisées à l'échelle d'un quartier, d'une rue, d'une place, que des comparaisons entre les surfaces de l'urbain et du rural.

- **Formule ICU_{surf} :**

$$\Delta t_0 = TU_0 - TR_0$$

ΔT_0 : différence de température en degrés Celsius.

TU_0 : température de surface urbaine moyenne en degrés Celsius au contact de l'air, découlant de flux radiatifs, conductifs et turbulents. Elle inclut toutes les surfaces des éléments urbains de surface.

TR_0 : température de surface rurale moyenne en degrés Celsius au contact de l'air, découlant de flux radiatifs, conductifs et turbulents. Elle inclut toutes les surfaces des éléments urbains de surface.

- L'ICU sous terrain

L'îlot de chaleur urbain souterrain ICU_{ss} (pour « sou-sol ») correspond à la température des sous-sols ou des eaux qui s'y trouvent. Il s'exprime lui aussi en degré Celsius. Il se modélise selon les mêmes échelles que l'ICU de surface. De par sa nature d'accès difficile, il est moins étudié que les autres types. Pourtant ses effets peuvent être conséquents en termes de risques. La prise en compte des épisodes de gonflements et retraits des argiles, la gestion des gels et dégels ou encore la qualité de l'eau potable (Müller & al., 2014, Luo & al., 2015). Les mesures de température en milieu urbain sont récentes mais les méthodes sont éprouvées par les études de climatologie, en particulier les études de permafrost (Ferguson & al., 2007). Comme les autres ICU il peut être aussi modélisé à partir d'images satellite de surface (Zhan & al., 2014).

- **Formule ICU_{sub} :**

$$\Delta T_g = TU_g - TR_g$$

ΔT_g : différence de température en degrés Celsius.

TU_g : température de sous-sol urbain à une profondeur présentant des changements de températures actifs sur une période de temps donné.

TR_g : température de sous-sol rural à une profondeur présentant des changements de températures actifs sur une période de temps donné.

Quel que soit son type, l'ICU correspond toujours à une équation faisant intervenir des différences de températures selon des temps donnés. Dans cette thèse, l'ICU qui est étudié est l'ICU de canopée urbaine (ici et après que nous nommerons simplement ICU). Nous cherchons donc à observer les différences de températures de l'air à deux mètres au-dessus du sol entre l'urbain et le rural. La section suivante revient sur les caractéristiques et la formation de l'ICU, en explicitant les processus physiques en jeu, en particulier les échanges d'énergie opérés.

I.3.C. Caractéristiques de l'ICU de canopée urbaine

L'ICU est tout sauf figé, il se déplace, se meut, se renforce et se dissipe. Retour sur le phénomène, ses temporalités et ses particularités.

- Formation :

Dans la journée, les matières des éléments disposés à la surface terrestre emmagasinent l'énergie qu'ils reçoivent du soleil : la brique en terre cuite, le bois des chênes d'un parc, le zinc d'une gouttière, le corps humain, etc. Cependant, toute matière présente des capacités différentes en termes de stockage mais aussi de relâchement et de dégagement de l'énergie perçue durant la journée en provenance du soleil. Nous évoquons alors la conductivité, la diffusivité ou encore l'effusivité des matériaux. De plus ces matériaux, selon leur état, leurs couleurs, leurs revêtements ou leurs traitements peuvent drastiquement varier leurs caractéristiques (Yang & al., 2015; Masson & al, 2014).

Par rapport à leur importance dans la formation de l'ICU, nous pouvons diviser les matières selon trois familles : celles qui réalisent la photosynthèse, les espaces aquatiques et les autres.

La photosynthèse diminue puis s'arrête selon les cycles diurnes, au regard des disponibilités en eau et de l'exposition solaire. En effet les végétaux, de leur côté, lorsqu'ils sont exposés à l'énergie solaire réalisent la photosynthèse. Ils mobilisent la lumière du soleil comme énergie pour puiser l'eau dans le sol, afin d'extraire le carbone (C) du dioxyde de carbone (CO_2) capturé dans l'atmosphère et d'y rejeter l'oxygène (O_2). Lors de cet exercice, les plantes transpirent de l'eau (H_2O) et celle contenue dans les sols s'évapore ; la somme de ces deux phénomènes forme alors l'évapotranspiration, qui a pour conséquence de refroidir l'environnement immédiat des végétaux (figure 2).

Les autres matières : céramiques, métalliques, organiques sans photosynthèse et composites vont au contraire continuer à émettre de l'énergie, même lorsqu'elles n'y seront plus exposées (Alchapar & al., 2014). Certaines d'entre elles n'ont pas terminé durant la nuit de libérer l'énergie accumulée (figure 2). C'est pour cela que les écarts ou intensités maximums de l'ICU surviennent durant la nuit. Or, ces matières sont les principales composantes des matériaux que l'on retrouve dans les espaces fortement urbanisés, car ils constituent nos logements, nos infrastructures routières, nos espaces publics, etc.

Enfin les espaces aquatiques participent eux aussi à ces rafraîchissements par le changement d'état de l'eau passant de liquide à celui de gaz par évaporation (Gober & al., 2009).

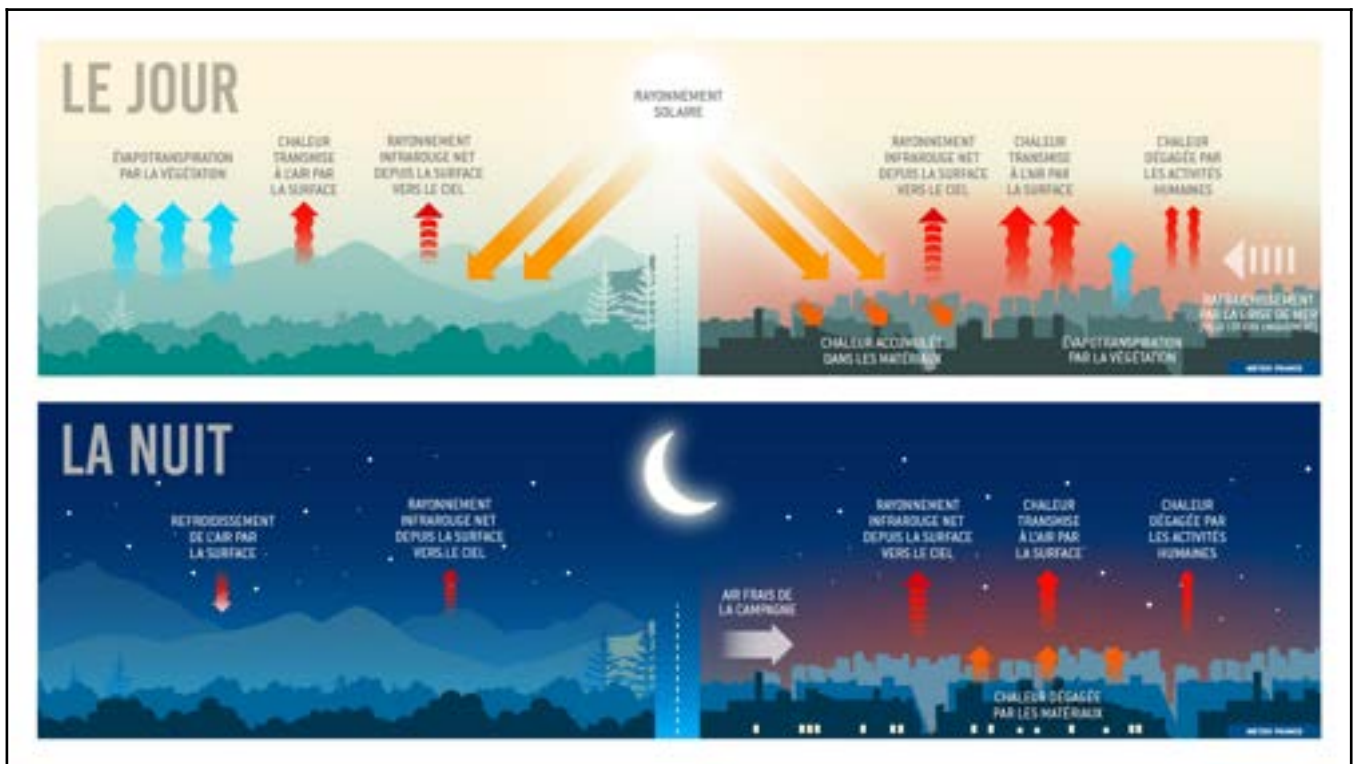


Figure 2, Formation de l'ICU selon le cycle diurne et la dichotomie schématique urbain/rural (crédits : CNRS).

Les matériaux ne sont pas la seule cause de la formation de l'ICU, les activités humaines (figure 2) participent aussi au réchauffement de l'air. Nous pouvons évoquer les rejets de chaleur des climatisations, de l'industrie, des moteurs, ou des corps.

Les écarts de températures entre urbain et rural peuvent aussi être influencés selon les topographies ou les éléments de surfaces (figure 3). Les brises thermiques, littorales ou orographiques, par exemple, impactent l'ICU et sa variabilité. Une ville en fond de vallée peut donc disposer de températures plus faibles que ses alentours végétalisés situés à des élévations supérieures. Une ville côtière, selon la densité et les hauteurs du bâti en front de mer, altère les effets des échanges d'airs et donc la formation ou dissipation de son ICU. Il est difficile de mesurer alors l'ICU, au sens de l'impact de la ville sur les températures, dans ces conditions spécifiques. En effet il est compliqué de discerner quelle part résulte de la ville dans les écarts de température. Les températures reflètent alors la somme des effets cumulés plus qu'uniquement les rejets de chaleur stockées et anthropiques.

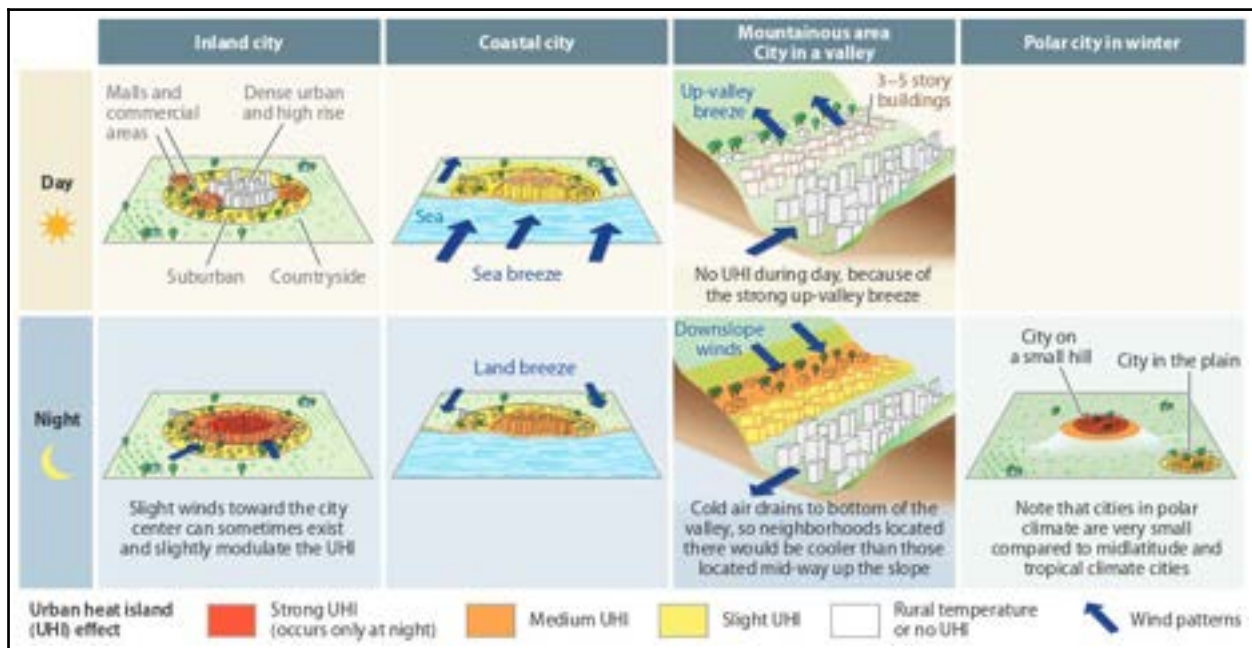


Figure 3, La spatialité de l'îlot de chaleur selon de multiples situations géographiques de jour et de nuit (image tirée de Masson & al., 2020).

Enfin, la formation de l'ICU ne s'observe pas uniquement en fonction du cycle diurne, les conditions météorologiques altèrent son comportement (Klysik & al., 1999). La température, le vent, l'humidité, les précipitations ou encore la présence ou pas de couvertures nuageuses vont moduler son intensité et étendue spatiale. De fait, des classifications en types de temps sensibles sont utilisées pour caractériser les jours, selon ces conditions particulières (Hidalgo & al., 2018).

- Intensité :

De fait, l'ICU se matérialisera donc sous forme d'une différence de température entre l'urbain et le rural (ΔT_a U-R). Pour une application en urbanisme, l'enjeu est de déterminer quel est l'impact de la ville sur ce delta de température de l'air.

. Cela diffère donc d'une observation des différences de températures entre l'urbain et le rural. Car ces différences peuvent se produire pour d'autres causes que l'ICU. Les effets de relief ou de sites sont donc à éviter sous peine de biaiser la mesure de l'amplitude (Stewart, 2011).

L'écart de température est souvent à son maximum durant la nuit, en particulier lorsque les espaces végétalisés se sont rafraîchis alors que les matériaux des milieux urbains rejettent encore la chaleur accumulée. Le jour, l'intensité sous conditions nuageuses dégagées a tendance à diminuer, car, une fois les besoins énergétiques pour la photosynthèse comblés, les espaces végétalisés chauffent également. La quantité d'eau disponible dans le sol va être un facteur déterminant dans

les réactions de la végétation. La photosynthèse étant directement corrélée à l'eau contenue dans le substrat.

Caractériser l'intensité signifie donc être capable de discerner ces variations de températures entre l'urbain et le rural tout en évitant les effets biaisant l'amplitude. Ainsi apparaît l'importance de la localisation des sites d'observations.

- Spatialisation :

Les températures sont continues. C'est pour cela que les appellations « urbain » et « rural » traduisent bien mal en réalité la diversité de l'ICU et demeurent une caractérisation simpliste de nos territoires. Il existe une multitude de territoires bien loin de cette dichotomie que l'urbanisme n'a pas su nommer de façon appropriée pour les besoins de la climatologie : un grand parc en milieu urbain, un grand bâtiment industriel entouré de champs cultivés, un lotissement de pavillon individuels avec de grands jardins. Ces espaces sont tout autant de territoires ne possédant pas les mêmes comportements thermiques. L'ICU s'observe alors pour des espaces différents aux caractéristiques précises, nous parlons alors plus de formes, de morphologies, de tissus urbains. Étudier la spatialité de l'ICU implique donc la caractérisation du territoire étudié en ces différentes typologies d'« urbain » et de « rural ».

C'est dans cette optique que le concept des Local Climate Zones (LCZ) ont été créées (Oke & Stewart, 2012). Les espaces « urbains » et « ruraux » y sont organisés en dix-sept classes. Dix pour l'urbain et sept pour le reste. Chaque LCZ dispose d'une description composée d'informations diverses (photos, texte descriptif) et d'une série d'indicateurs accompagnés de leurs plages théoriques. Les indicateurs peuvent être classés en plusieurs catégories :

- Les caractéristiques des matériaux et des surfaces (albédo, coefficient de convection, surface imperméable/pérméable).
- Les caractéristiques de morphologie urbaine générale (rugosité, effet canyon et facteur de vue du ciel).
- Les caractéristiques concernant les bâtiments (hauteur moyenne et densité de bâti).
- Une caractéristique pour décrire l'impact des activités humaines : les flux de chaleur anthropiques. Ainsi, grâce à une description plus fine d'un territoire offerte par l'utilisation des LCZ, le choix des sites d'observations peut être réalisé pour rendre compte de la spatialité de l'ICU avec plus de fidélité.

Un réseau de mesures qui a pour mission de monitorer l'ICU doit donc être capable d'en caractériser les amplitudes, les spatialités (figure 4.A.) et les temporalités (figure 4.B.). Cette

caractérisation doit donc placer l'analyse au-delà d'un simple cycle jour/nuit et d'une dichotomie « urbain »/ « rural ». Le territoire doit donc être finement analysé, tant sur son climat, sa géographie ou son occupation du sol. Cette étape peut s'appuyer sur l'existence d'outils tels que la classification LCZ ou les guides de l'OMM (cf chapitre II).

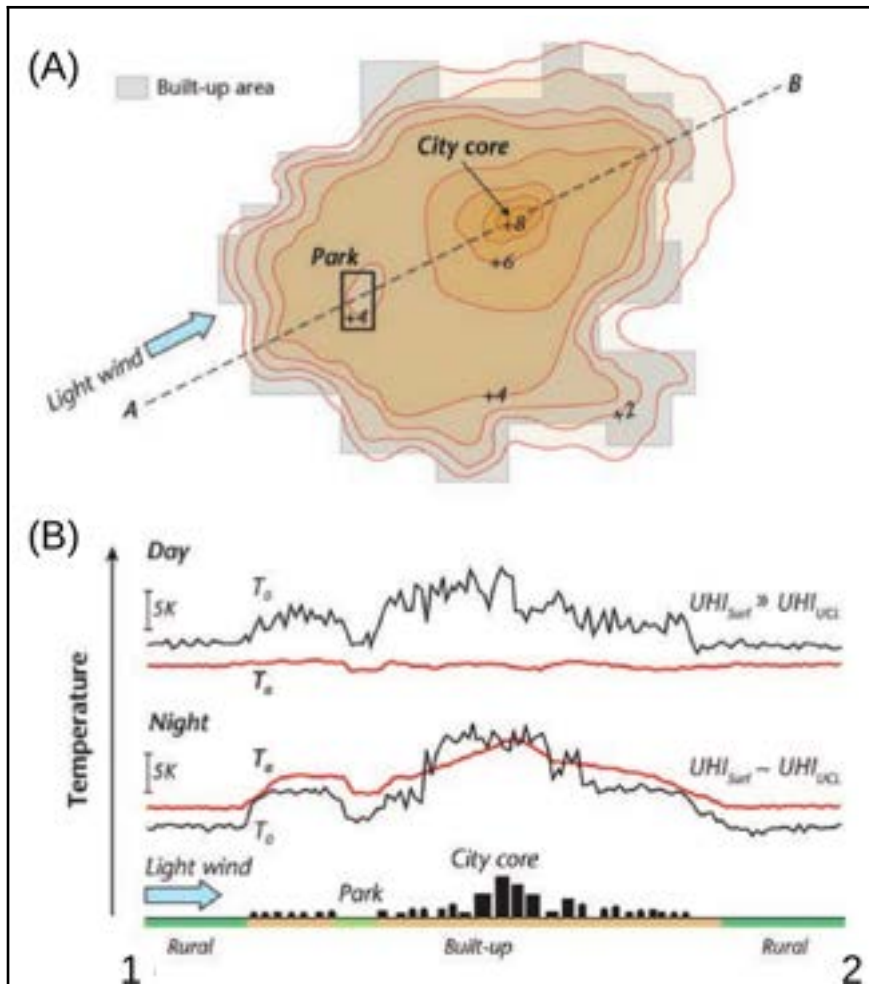


Figure 4.A et 4.B. , Spatialité et amplitude schématiques de l'ICU en conditions météorologiques favorables calmes : ciel dégagé et vents faibles (images tirées de Oke & al., 2017). La carte isotherme (A) montre le gradient de température selon le degré d'urbanisation. La coupe (B) montre la température de surface et de l'air d'une ligne qui va du point 1 au point 2.

I.4. Genèse d'un projet

Pour étudier l'îlot de chaleur de canopée urbaine sur son territoire, la Métropole de Toulouse a voulu se doter de services climatiques en partenariat avec le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM). Cette volonté est la résultante de la présence d'acteurs particuliers et d'un historique de collaborations entre diverses institutions. Cette section propose de revenir sur la somme des travaux qui ont mené à cette thèse, à commencer par les projets de recherche ayant pour thème le climat urbain et menés sur le territoire Toulousain.

I.4.A. Un historique de projets de recherches

Sur les vingt dernières années, six programmes de recherche, intégrant des composantes sur le climat urbain ont eu lieu, impliquant des chercheurs de différents organismes de recherches sur des thématiques de plus en plus étendues.

De 2004 à 2005 a eu lieu le projet CAPITOUL. C'est un projet porté principalement par le Centre National de Recherches Météorologiques qui consiste en une campagne d'observations de un an. Les principaux objectifs expérimentaux sont :

- Échanges d'énergie entre surface urbaine et atmosphère selon des conditions météorologiques variées.
- Impact de la ville sur l'écoulement d'air au dessus d'elle (à 1km d'altitude).
- Caractériser la formation et la transformation de l'aérosol urbain (particules en suspension dans l'atmosphère).
- Étudier la dispersion à courte distance d'une simulation de rejet industriel par lâcher de gaz inertes.

C'est une campagne interne au laboratoire et à son équipe d'instrumentation. L'époque est encore dans la compréhension et l'observation de phénomènes de micro-climatologie urbaine, d'autant plus qu'elle prend place un an après la canicule de 2003. Nous trouvons alors dans la liste des partenaires du projet, des structures issues des sciences de l'atmosphère, de l'environnement et du spatial, par exemple le Laboratoire d'Aerologie (LA), le Centre d'Etudes Spatiales et de la Biosphère (CESBIO), etc. Les observations de la campagne CAPITOUL ont nourri de nombreuses études et ont servi de données à des projets ultérieurs menés sur le territoire.

Cinq années plus tard, les projets vont se succéder. D'abord en 2009-2010 a eu lieu le Programme national Interdisciplinaire de Recherche Ville et Environnement (PIRVE) relevant d'un

partenariat entre le Centre National de Recherches Scientifiques et le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable des Transports et du Logement (MEDDTL) . L'université Toulouse II Jean Jaurès (alors appelé Université du Mirail) répond à ce projet au travers de son laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST). Il a pour objectif d'identifier, de comprendre et d'explicitier – notamment en les modélisant- les interactions entre climat périurbain, formes urbaines et modes d'habiter. C'est une approche de géographie sensible et paysagère du territoire. Quelques observations instrumentées in-situ ont lieu, comme une campagne de mesures à vélo dans la ville péri-urbaine de Blagnac, en collaboration avec d'autres laboratoires, comme le CNRM.

A partir de 2010, sur une durée de trois ans, est mené le projet Adaptation au Changement Climatique de l'Agglomération Toulousaine (ACCLIMAT). Le projet étudie les interactions entre processus de développement urbain, de micro-climat urbain et le changement climatique. Il s'appuie sur une plate-forme interdisciplinaire de modélisation numérique. C'est au travers de ce projet que se dessinent concrètement l'interdisciplinarité qui portera les projets ultérieurs sur Toulouse et les passerelles entre acteurs opérationnels et scientifiques. En effet, nous trouvons parmi les acteurs l'Agence d'Urbanisme et d'Aménagement de Toulouse (AUAT), le CNRM, l'université Jean Jaurès et Paul Sabatier (Institut de Mathématiques de Toulouse), le laboratoire en architecture de Bordeaux, l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA) et des agents de l'agglomération Toulousaine.

Alors qu'ACCLIMAT est encore en cours, est lancé le projet Evaluation mUltidisciplinaire et Requalification Environnementale des QUArtiers (EUREQUA), de 2012 à 2016. Ce projet, également vecteur d'une forte interdisciplinarité, est mené conjointement par des membres du LISST, du CNRM mais fait également intervenir d'autres acteurs comme l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Île de France (IAU). Le projet questionne les enjeux de la requalification environnementale du cadre de vie urbain à l'échelle des quartiers en s'appuyant sur une équipe pluri disciplinaire. La transversalité du projet est marquée par des disciplines telles que la géographie, l'urbanisme et la climatologie. Pour illustrer ce point, nous pouvons citer les parcours de mesures instrumentées menés avec des habitants du quartiers conjointement questionnés sur leurs ressentis et sensations.

Ensuite, de 2014 à 2018 vient le projet Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme-Climat urbain et Energie (MApUCE). Le projet vise à intégrer dans les politiques urbaines et les documents juridiques les plus pertinentes des données quantitatives de microclimat urbain, climat et énergie dans une démarche applicable à toutes les villes de France. La passerelle entre monde scientifique et opérationnel est mise en évidence jusque dans l'intitulé du projet. Ce dernier est

porté entre autres par le CNRM, le LISST, le Laboratoire de Recherches en architecture de Toulouse (LRA) et l'AUAT. Durant quatre ans, de multiples ateliers de travaux sont réalisés entre scientifiques et acteurs opérationnels de la fabrique de la ville. Nous pouvons évoquer notamment la direction de l'aménagement, en charge de la rédaction du Plan Local d'Urbanisme intercommunal et de l'Habitat (PLUi-H).

Deux projets prennent ancrage sur le territoire portés par le Laboratoire de recherche en architecture (LRA), déjà impliqué dans des projets précédents et ayant activement participé à d'autres études. Le premier se positionne chronologiquement juste avant MApUCE, en 2014/2015. Il s'intitule Îlots de Fraîcheurs Urbains. Il est dirigé par le LRA, le Laboratoire matériaux et durabilité des constructions (LMDC), l'ONERA et la Communauté urbaine Toulouse Métropole et plus particulièrement OPPIDEA, l'aménageur de la collectivité. Il propose alors de travailler sur l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain à l'aide de modélisations numériques (Envimet). Le projet IFU compare des stratégies bioclimatiques passives comme la couverture végétale, la présence d'eau, les masques du bâti. La zone d'étude est réduite puisqu'elle consiste en l'aménagement d'un nouveau quartier, la Zone d'Aménagement Concerté de Montaudran. Les travaux, menés en collaboration avec l'aménageur, ont permis de directement mettre en place les résultats en application. Des plantations d'arbres à la gestion de certains espaces aquatiques, la fabrication des espaces publics s'est nourrie des analyses proposées. Le second projet fait suite à IFU de 2015 à 2018, il s'intitule alors MultipliCités. Il vise à étudier les réponses énergétiques urbaines en termes de performances, de qualité des ambiances architecturales et urbaines et d'impacts socio-économiques. Nous pouvons aisément apercevoir les similitudes des projets, entre ACCLIMAT et IFU ou entre MultipliCités et MApUCE.

Nous observons à plusieurs reprises, coté institutions scientifiques, la présence du CNRM, du LISST ou du LRA. Coté acteurs opérationnels de la fabrique urbaine, nous notons la collectivité de Toulouse (aujourd'hui Métropole mais anciennement agglomération ou district) et l'AUAT. Au delà de ces institutions se cachent des individus qui se sont croisés, cotoyés et ont su revendiquer leurs spécialités et leurs possibles apports dans l'élaboration d'un groupe de travail et de recherches sur le climat urbain et ses sujets connexes. Ces acteurs, couplés aux organismes de recherche sur le spatial comme le CESBIO, l'ONERA, ou le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), forment un cluster de connaissances et de savoirs thématiques.

Le paysage scientifique toulousain est donc particulièrement actif sur l'étude des questions climatiques en milieu urbain depuis les années 2000. Ceci s'explique à la fois par le fort potentiel du site en recherche et enseignement supérieur sur les deux volets (la ville et le climat) et par

l'évolution du contexte institutionnel – surtout depuis le Grenelle de l'Environnement - qui favorise la visibilité de ces recherches et la mise à disposition de ressources.

L'équipe de recherche en climatologie urbaine du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) est sans doute à l'origine de cette dynamique à l'échelle locale. L'objectif initial, très opérationnel, était d'améliorer la représentation de la surface urbaine dans les modèles de prévision du temps de Météo-France. Depuis, diverses collaborations se sont développées sur la scène toulousaine associant des chercheurs spécialisés en aménagement du territoire (LISST), en architecture (LRA), en géographie de l'environnement (Géographie de l'Environnement, GEODE) et dans la caractérisation des matériaux et du transfert radiatif (CESBIO ; l'ONERA ; LMDC ; l'École de Design et d'Arts Appliqués). Parallèlement, les recherches se rapprochent du terrain en impliquant des acteurs institutionnels, tels l'agence d'urbanisme de l'aire métropolitaine de Toulouse (l'Aua/T) ou l'intercommunalité de Toulouse Métropole.

Le CNRM comme illustration de l'économie de la connaissance

La présence du CNRM sur le territoire toulousain représente en effet un vecteur fort dans les interactions et liens construits entre Toulouse et la recherche sur le climat. Le CNRM est une unité mixte de recherche qui assure en grande partie les activités scientifiques de Météo-France. Il est constitué de six unités de recherches. L'une d'entre elles, le « Groupe de Météorologie à Moyenne Echelle » comprend l'équipe VILLE. Celle-ci étudie expérimentalement et par simulation des phénomènes atmosphériques à différentes échelles : des aires urbaines aux rues, des quartiers, etc. L'objectif est d'améliorer leur compréhension et leur paramétrisation dans les modèles numériques de prévision du temps et d'étude du climat. L'activité de services de Météo-France ainsi que la présence de ses locaux sur Toulouse, couplé aux besoins de transparence et aux compétences florissantes des villes vis-à-vis du climat, ont conduit depuis des années, à l'émergence de nombreux projets, études et échanges sur le territoire toulousain. Cela s'observe en particulier dans le cadre de l'élaboration de documents d'adaptation ou d'atténuation du changement climatique. Ce constat révèle un effet de proximité marqué et place la Métropole dans une position facilitante pour accéder à un haut niveau de services (Zuliani, 1998).

Cette thèse fait suite à cette dynamique et jouit d'un lien très particulier avec les projets CAPITOU et MApUCE. Le premier était une campagne d'observation conjointe portée par le CNRM d'un an visant à étudier les dynamiques de la couche limite au-dessus de la ville, ses interactions avec les aérosols et les échanges d'énergie entre la surface et l'atmosphère. Nous y percevons donc le point commun du déploiement d'un réseau de mesures météorologiques sur la ville pour des études de caractérisation de faits climatiques précis.

Le projet MApUCE est quant à lui, un projet interdisciplinaire qui vise à intégrer dans les politiques urbaines et les documents juridiques les plus pertinents des données quantitatives de microclimat urbain et d'énergie. Il est porté par plusieurs laboratoires dont le LISST. La démarche se veut applicable à toutes les villes de France. Les nombreuses données récoltées disponibles dans la campagne CAPITOU ont servi dans le cadre de MApUCE. En particulier les données de températures qui ont notamment servi à la modélisation de l'ICU sous forme de cartes interpolées de températures. Les documents ainsi créés durant le projet ont permis d'apporter matière à discussion lors des échanges avec les services de la réglementation de Toulouse Métropole. Ces échanges prennent place dans le cadre de la rédaction des doctrines d'aménagement du PLUi-H. La matérialisation la plus marquante est la rédaction d'une doctrine pour la construction de bâtiments bioclimatiques. Cette dernière permet, pour la construction d'un bâtiment qui répondrait à des critères de formes, de matériaux et d'emplacement, de déroger à des règles du PLUi-H comme l'alignement des bâtiments par rapport au bâti existant ou les bandes de constructibilité.

La thèse emprunte donc au projet MApUCE l'aspect intégré des résultats à la démarche de conception de la ville. En effet l'un des objectifs est que l'association avec le CNRM apporte des compétences et productions scientifiques absorbables par les compétences métropolitaines en termes d'aménagement et de planification urbains vis-à-vis des questions climatiques. L'enjeu est de co-construire le premier service climatique intégré en tant que compétence métropolitaine de France, à base d'outils issus, notamment, du monde de l'Internet des Objets (IOT).

I.4.B. Construire les services urbains intégrés et le monitoring de l'ICU sur Toulouse Métropole

Ce chapitre est revenu sur les services climatiques, leurs origines, leurs évolutions et leurs enjeux, en particulier en terme de diffusion de savoirs. Après avoir évoqué leur définition actuelle autour d'une production scientifique orientée utilisateurs, leurs déclinaisons en services intégrés urbains, objet de la thèse ici présente, est évoquée.

Dans un second temps, l'objet central de ces services climatique est exposé : l'îlot de chaleur urbain. Cette description permet de mieux appréhender les temporalités et la spatialisation de ce phénomène de micro-climatologie.

Enfin nous avons rappelé comment un projet comme cette thèse peut découler d'un contexte local de partenariats et de collaborations au travers d'un historique non exhaustif de projets ayant pour thème le climat sur le territoire Toulousain.

Les chapitres suivants proposent de suivre la construction de ces services intégrés urbain pour du monitoring de l'îlot de chaleur au sein de la Métropole de Toulouse. Cette construction s'organise en trois axes :

- Le premier inclut les travaux existants sur les composantes organisationnelles d'un service climatique urbain intégré et les applique aux spécificités organisationnelles et territoriales du territoire d'étude à l'aide de méthodes de travail participatives.
- Le second axe propose d'explicitier la création d'un réseau de stations de mesures opérationnelles de variables météorologiques pour monitoring des études de l'ICU et de micro-climatologie. Les méthodes de définitions du choix des emplacements sont détaillées. La solution technique est ensuite présentée.
- Enfin, le troisième axe propose d'analyser l'ICU Toulousain à partir des données du réseau de capteurs mis en place. L'approche se veut incrémentale avec l'ajout de nouveaux prismes de lecture de l'ICU tels que les types de temps ou les morphologies urbaines.

Chapitre II. Construire des services climatiques urbains intégrés en mobilisant des processus de co-construction

II.1. Structure générale des services intégrés urbains.....	28
II.1.A. Les composantes qui composent des services climatiques.....	28
II.1.B. L'organisation de la participation.....	32
II.2. Structure des services climatiques sur la base de réseaux d'observation.....	36
II.2.A. Champs disciplinaires impliqués.....	36
II.2.B. Choix des sites de mesure.....	38
II.2.C. Choisir les capteurs.....	42
II.2.D. Choisir les technologies de télécommunications.....	45
II.2.E. Organiser les bases de données.....	47
II.2.F. Livrer la donnée.....	48
II.2.G. Transversalité des services climatiques.....	50
II.3. Co-construction de services climatiques sur la base de réseaux d'observation, appliquée aux services urbains de Toulouse.....	53
II.3.A. Les acteurs.....	53
II.3.B. La participation des départements urbains.....	55
II.3.C. Gouvernance du réseau.....	62

La Métropole, en souhaitant se doter d'un réseau de stations météorologiques pour l'observation de l'ICU, interroge indirectement ses capacités à se doter d'une nouvelle compétence. En effet, une partie du travail de la thèse est consacrée au travail mené avec les départements techniques de la métropole. L'objectif est d'internaliser le plus possible les différentes composantes du monitoring de l'ICU, formant alors des services climatiques intégrés à la métropole. Ce chapitre propose de cheminer depuis des services climatiques généraux et leurs composantes jusqu'à leurs intégrations opérationnelles dans les différents départements :

Dans une première section, le travail du présent chapitre se fonde sur les récents travaux portant sur les services climatiques urbains, élaborés par l'Organisation Mondiale de Météorologie (Grimmond et al., 2019). Chaque composante des services climatiques est présentée. Un regard attentif est porté, notamment, sur les questions traitant de l'organisation du travail entre acteurs, à savoir, la mise en place de processus de participation et, plus précisément, de co-construction.

Dans une seconde section, les services climatiques généraux sont transposés au cas d'étude des services climatiques fondés sur des réseaux d'observation. Chaque composante est connectée et associée à une discipline (l'électronique, les technologies de télécommunications, la climatologie, l'urbanisme, etc.) ainsi qu'à une bibliographie idoine. L'objectif est de dresser, pour chaque composante, les principaux enjeux auxquels ils doivent faire face, mais aussi, un état de l'art actuel non exhaustif.

La démarche proposée dans ces deux premières sections, principalement descriptive dans sa forme, propose, sur le fond, de simplifier l'approche usuelle des services climatiques. En effet ces derniers, souvent traités comme une boîte noire, sont décomposés de manière didactique.

Dans une troisième section, le cadre et les méthodes de travail mis en place pour développer l'intégration des composantes énumérées des services climatiques, au sein de la métropole de Toulouse, sont également décrits. En suivant, une organisation des acteurs est proposée. Enfin, la gouvernance opérationnelle des services est explicitée au regard des différents départements de la Métropole, de leurs rôles et de leurs besoins.

II.1. Structure générale des services intégrés urbains

II.1.A. Les composantes des services climatiques

L'organisation mondiale de la météorologie organise les composantes des services climatiques urbains, appelés services intégrés urbains (SIU, que nous nommerons simplement « services climatiques » par la suite), autour d'un process rétroactif (figure 5). Celui-ci décrit les interactions et relations entre les fournisseurs desdits services ainsi que de leurs utilisateurs, ce qui incluent leurs besoins.

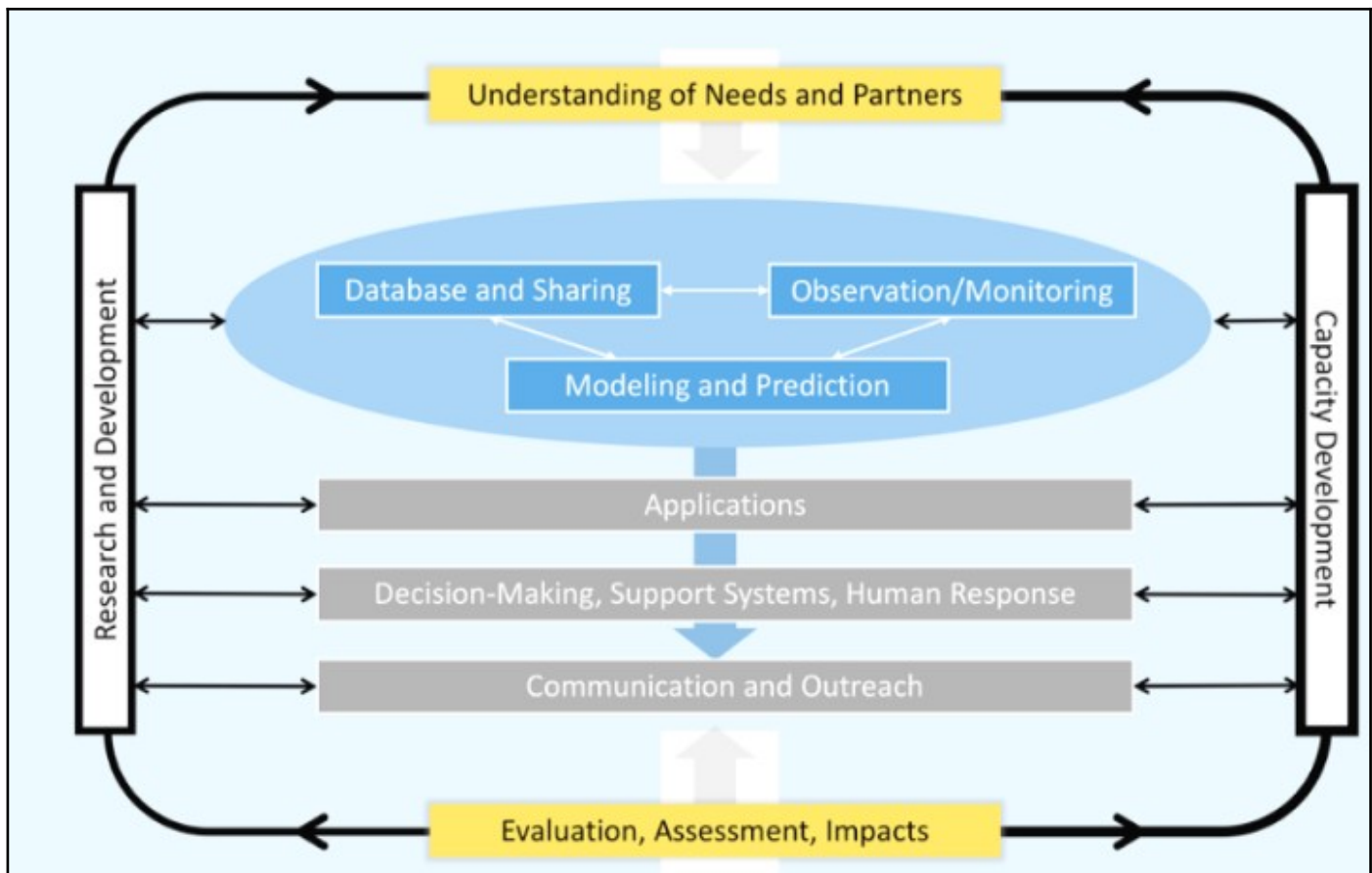


Figure 5, schématisation des composantes des services climatiques urbains type (Grimmond & al., 2019).

Dix points clés structurent les services climatiques. Ils peuvent être divisés en quatre composantes indépendantes mais non hiérarchisées :

- **La première composante** consiste à la production de données. Nous notons trois sous-composantes agissant en interaction les unes par rapport aux autres:

- les bases de données et leur diffusion/partage : c'est dans cette composante que la donnée mesurée est stockée et transmise aux utilisateurs. Pendant ce processus elle peut migrer d'une forme brute à une forme compréhensible, par des utilisateurs définis, dans sa première transformation potentielle. Est alors évoqué ici la représentation graphique simple de la donnée. Par exemple, des données de température stockées sous forme de listes successives de mesures sont transformées en un graphique ou ces températures sont affichées selon l'heure de la journée en hiver.

- l'observation et/ou le monitoring : composante centrale (s'il en existe), elle est en charge de mesurer la donnée que l'on souhaite observer en vue de sa transformation ultérieure. Cela peut être, par exemple, un réseau de stations météo, ou encore, des données satellites. Cette composante renvoie de manière directe aux questions portant sur le choix des sites de mesure, terrains d'observation, mais également sur l'acheminement de la donnée depuis la mesure jusqu'à son stockage.

- la modélisation et la prédiction : cette composante fait le lien entre les observations (le cas échéant) ou les données brutes (en général) et la livraison aux utilisateurs. Les données vont être modifiées à partir de leurs formes brutes à celles livrées aux utilisateurs, cette composante décrit alors la deuxième transformation possible de la donnée. A titre d'illustration, pour un réseau de mesures, il peut s'agir de la cartographie de l'îlot de chaleur, à partir des températures interpolées des différents points de mesures croisées aux reliefs, aux densités de bâti et de végétation. Ainsi, contrairement à la première transformation, la donnée stockée seule ne suffit plus, elle est alors mobilisée avec d'autres facteurs ou indicateurs.

- **La deuxième composante** concerne les différentes utilisations effectives des données par les utilisateurs. En effet, une fois la donnée mise en forme et partagée, son utilisation n'est pas effective. Cette composante va donc évaluer la donnée livrée au regard de ses capacités

d'intégration par les utilisateurs dans le contexte de leurs activités professionnelles. Nous relevons d'abord comme sous-composante les applications. C'est d'un certain point de vue la troisième transformation de la donnée. Si la deuxième transformation consiste en la mise en pratique de connaissances scientifiques, celle-ci correspond à la transformation opérationnelle par des utilisateurs en vue de leurs besoins professionnels. Les applications peuvent avoir pour objectif d'être, par la suite, un support de décision et/ou un système de réponse humaine¹. La gestion des fortes pluies, en l'occurrence va exiger des modélisations et spatialisations précises afin que les professionnels puissent gérer au mieux les écoulements, les infiltrations ou les pollutions des eaux. Les applications se destinent à devenir un outil de dialogue, de communication ou encore de sensibilisation². Par exemple dans le cadre de formations internes ou de liens avec les citoyens à l'occasion des échanges d'enquêtes publiques.

- **La troisième composante** renvoie à deux sous-composantes particulièrement transversales à tous les autres :
 - Recherche et développement.
 - Capacité de développement.

Ces deux points soulèvent en réalité des questions techniques, économiques, de temporalité ou encore relatif à l'état des connaissances. Prenons le cas d'un département des espaces verts d'une ville qui souhaite disposer d'un suivi continu de l'état de sa végétation, à partir de l'imagerie spatiale à l'échelle de l'arbre, c'est à dire, de quelques mètres de résolution. Ce département a besoin de recevoir des données corrigées provenant de satellites capables de visualiser, à cette précision, et selon la fréquence voulue. La technologie et l'état des sciences doivent être en capacité de répondre à ces besoins. Ensuite, si la compétence de récupération et d'interprétation des données satellitaires n'est pas internalisée, celle-ci doit budgétiser la production de rapports récurrents par un bureau d'études ou construire un partenariat avec un organisme public.

- Enfin, la **quatrième** composante se divise en deux sous-composantes. La première concerne les "évaluations, bilans et impacts" et se complète de la seconde, "compréhension des

1 Deuxième sous-composante.

2 Troisième sous-composante.

besoins et des partenaires”. Cette composante matérialise l’aspect cyclique du travail des services climatiques. Les utilisateurs et les fournisseurs demeurent en relation continue.

II.1.B. L’organisation de la participation

II.1.B.a. Le besoin de la participation dans les services climatiques

Une composante supplémentaire peut être envisagée pour compléter le schéma exposé. Plus discrète, elle caractérise la nature-même des échanges entre fournisseurs et utilisateurs. En effet, comme le montre la figure 5, le développement de services climatiques nécessite des interactions incessantes entre les utilisateurs et les fournisseurs. Ce constat est clairement révélé par les flèches bidirectionnelles au sein de la structure. Elles matérialisent les recommandations visant à renforcer le lien existant entre les « scientifiques » et les « non-scientifiques » (Hewitt et al., 2012; Baklanov et al., 2018). Cette idée est particulièrement importante car de nombreuses études classent l’aspect relationnel comme étant le critère principal pour réussir à créer et à pérenniser des services climatiques (McNie, 2012; Christel et al., 2018; Grimmond et al., 2019). L’objectif principal est d’éviter le processus habituel de livraison de la production des sciences vers la société, parfois décrit comme un « quai de chargement » ou un « modèle linéaire » (Cash et al., 2006; McNie, 2011).

Au-delà de la volonté d’améliorer l’utilisation et l’intégration des services climatiques, la nécessité de créer des interactions fortes entre les acteurs est inhérente à la nature-même des services climatiques. Effectivement, leur bicéphalie marquée entre les sciences et les services exige l’union de deux univers. Ainsi, chaque acteur -fournisseur ou utilisateur- prend en charge une facette mais a besoin de l’expérience de l’autre pour la développer.

Ces interactions peuvent revêtir différentes formes d’organisation du travail. Elles s’inscrivent ici dans le champ particulièrement riche de la participation, dans le cadre d’une recherche-action associée (Liu, 1995). Les formes de la participation, comme ses dispositifs, varient selon les domaines auxquels ils s’appliquent. Un éclairage sur la polymorphie de la participation est alors nécessaire.

II.1.B.b. Les formes de la participation : consultation, concertation et co-construction

Au sein de cette sous-section, nous proposons de reproduire, dans les services climatiques urbains, les formes de participation auxquelles les acteurs de la fabrique de l’urbain sont déjà familiers, comme nous le verrons plus loin. Sous cet angle, la concertation, la consultation ou la co-construction deviennent des piliers de la conception de services climatiques pour définir et mettre en place ces interactions désirées entre les acteurs. En l’occurrence, la participation revêt les mêmes

formes que la participation citoyenne mobilisée à travers les démarches urbanistiques de projet (Özdirlik & Terrin, 2015 ; Bacqué et Gauthier, 2011). Le citoyen-usager est alors remplacé par le technicien-usager de la Métropole. Il s'agit d'une approche centrée sur le point de vue du fournisseur de données qui est aussi le gestionnaire de l'organisation du travail. C'est également une approche heuristique puisqu'il n'y a, à ce jour, aucun protocole d'intégration de services climatiques au sein des collectivités. Au regard du caractère polysémique des trois termes étudiés ici, le développement suivant tente de structurer les trois formes de participation mobilisées dans la thèse, à partir de travaux de l'ADEME³ et de travaux divers :

- La **consultation** : Elle se déroule plutôt en amont d'un projet et des décisions. Elle sert principalement à informer et à recueillir les besoins. L'utilisateur est donc uniquement consulté. Cela peut aider à la réalisation d'un cahier des charges de meilleure qualité. Il n'y a pas forcément d'itération du processus une fois le produit livré. C'est aussi une étape où l'on trouve l'acculturation réalisée entre utilisateurs et fournisseurs.
- La **concertation** (Beuret, 2013) intervient, quant à elle, avant ou après la réalisation d'un projet. Celle-ci peut servir à expliquer ou justifier les choix réalisés pendant l'élaboration du projet en lui-même ou pour débattre de ses modalités d'application. La démarche itérative est ici attendue, autrement dit, les utilisateurs et fournisseurs interagissent à de multiples reprises pour améliorer le projet.
- La **co-construction**, ou la **co-production** (Akrich, 2013), est une participation dans laquelle les utilisateurs sont acteurs de l'élaboration du projet. Ils ont pour objectif, avec les fournisseurs, de créer un « monde commun » (Foudriat, 2014) qui sert de fondement à leur coopération. Les démarches itératives sont fortement mobilisées. Ainsi les utilisateurs sont consultés, concertés et co-construisent le projet. Il s'agit d'une relation d'interdépendance (Bourque & Panet-Raymond, 1991) reliée à des processus sociaux de construction et de partage d'objectifs relationnels à long terme (Levesque, 2001). La co-construction trouve son équilibre au travers de multiples points, dont la légitimité, les intérêts (économique, de visibilité, etc.) des acteurs et la mutualisation des moyens (Audoux & Gillet, 2011).

3 La participation citoyenne : réussir la planification et l'aménagement durable, 2016

II.1.B.c. Le choix de la co-construction et l'approche interdisciplinaire

Au final, il n'est donc pas surprenant de retrouver l'idée de la participation qui est sous-jacente à de nombreuses composantes des services climatiques comme « Compréhension des besoins et des partenaires », « évaluation, bilan et impacts » ou encore la composante « partage » de la donnée. De facto, la co-construction est souvent énoncée comme le mode de participation optimum à adopter pour la conception de services climatiques. De surcroît, les acteurs urbains sont sensibles et rodés à ces questions de la participation, que ce soit par injonction légale ou volonté politique. Ceux-ci disposent d'outils pour mener des consultations (comme les procédures d'enquêtes publiques) ou pour des concertations (comme les procédures de concertation préalable). La co-construction demeure cependant davantage une participation volontariste, qui ne dispose pas encore d'un cadre légal défini et qui est représentée comme une variante de la concertation.

Malgré l'absence d'un cadre législatif propre, il existe de nombreux travaux qui tentent de conceptualiser les méthodes de co-construction (Akrich, 2013), sans compter que le vocable jouit d'une popularité grandissante. La co-construction relève des disciplines de la sociologie, des sciences politiques, du marketing et du management. Il est possible de recenser certains travaux directement conçus pour des services climatiques (Vincent & al., 2018). Cependant, tout comme les services climatiques, le terme "co-construction" demeure une notion polysémique selon les usages. Pour clarifier, le terme « co-construction » mobilisé dans la thèse exprime le niveau d'implication prononcé (telle que défini dans le II.1.B.b.) d'une pluralité d'acteurs dans l'élaboration et la mise en œuvre d'une ou plusieurs composantes de services climatiques.

Dans la co-construction l'organisation du travail peut revêtir plusieurs aspects, la **collaboration**, la **coopération** et la **coordination** (Michaux & al., 2011). La collaboration signifie que les tâches sont réalisées conjointement par les acteurs. La coopération sous-entend une certaine répartition des tâches sans réellement, mutualiser les travaux. La coordination s'articule autour d'une organisation des tâches et de niveaux d'intégration entre les actions de différents acteurs. Dans une démarche de simplification, ce niveau de précision pour décrire l'organisation du travail entre les acteurs n'est pas explicité dans cette thèse.

L'élaboration de services climatiques, de par les compétences exigées par leurs composantes, inclut une pluralité des partenaires. Leur niveau d'intégration dans un processus de co-construction implique un travail interdisciplinaire et transdisciplinaire et une certaine gestion de projet (Webber et al., 2019). L'interdisciplinarité fait référence ici à l'intégration des disciplines, par exemple en termes de méthodes, de modèles et de données. Différemment, la transdisciplinarité fait référence à la coopération entre les communautés d'acteurs scientifiques et non scientifiques.

Les enjeux auxquels la co-construction doit répondre sont alors multiples :

- identifier les acteurs et construire les relations et liens d'interactions
- comprendre les applications et les besoins
- comprendre les compétences et connaissances nécessaires dans leur mise en pratique
- caractériser les capacités humaines, techniques et matérielles pour leurs mises en œuvre
- évaluer les résultats.

Les réponses à ces enjeux ne sont ni successives ni simultanées. En effet, la démarche de co-construction ne se situe pas dans une optique figée. Les échanges entre acteurs sont itératifs, multiples et continus (Vincent & al., 2018). La section suivante propose de s'attarder sur l'identification des besoins, des acteurs et des connaissances nécessaires à chaque composante de services climatiques sur la base de réseaux d'observation. La démarche propose une approche des composantes par disciplines associées.

II.2. Structure des services climatiques sur la base de réseaux d'observation

Le schéma proposé par l'OMM, étudié dans la section précédente, se destine à une approche généraliste des services climatiques. Il peut s'appliquer à des services climatiques construits sur l'utilisation de données satellitaires comme à des services climatiques fondés sur des réseaux d'observations. Il peut être mobilisé pour développer des services climatiques de support de décision comme des observatoires territoriaux. Afin d'appliquer une démarche de co-construction à l'élaboration de services climatiques, ayant pour objet un réseau d'observation sous l'angle de la climatologie, nous avons jugé intéressant de focaliser notre travail autour des deux composantes constitutives d'un réseau de mesure. En effet, les réseaux d'observation sont majoritairement définis par deux composantes dans le schéma général des services climatiques (figure 5) :

- La composante « observation / surveillance », qui peut être divisée en trois sous-composantes : choix des sites de mesure, des types de capteurs et des types de télécommunication ;
- La composante « base de données et partage », qui est déjà divisée et qui indique la façon dont les données sont organisées et mises à disposition.

II.2.A. Champs disciplinaires impliqués

Il est possible, à partir des composantes énoncées ci-dessus, de dresser le schéma général de services climatiques à base de réseau d'observation dérivé de celui des services climatiques général (figure 5) et d'y rattacher les champs disciplinaires (figure 6).

L'intérêt de cette méthode est multiple. En premier lieu, il s'agit de définir les compétences attendues à l'occasion de chaque étape de la construction des services. Cette opération facilite les mises en relation et les choix d'interlocuteurs parmi les acteurs. En second lieu, cette approche formule de manière implicite des propositions de réponses aux enjeux de légitimité, de mutualisation ou d'intérêts, sous-jacents à toute co-construction, en d'autres termes, la gouvernance opérationnelle.

Par exemple, les deux composantes « Observation / Surveillance » et « Base de données et partage » sont composées de six domaines disciplinaires distincts tels que l'informatique,

l'électronique, la climatologie, etc. Toutes ces disciplines vont être regroupées au sein de l'intitulé « recherche et développement » et « capacité développement ».

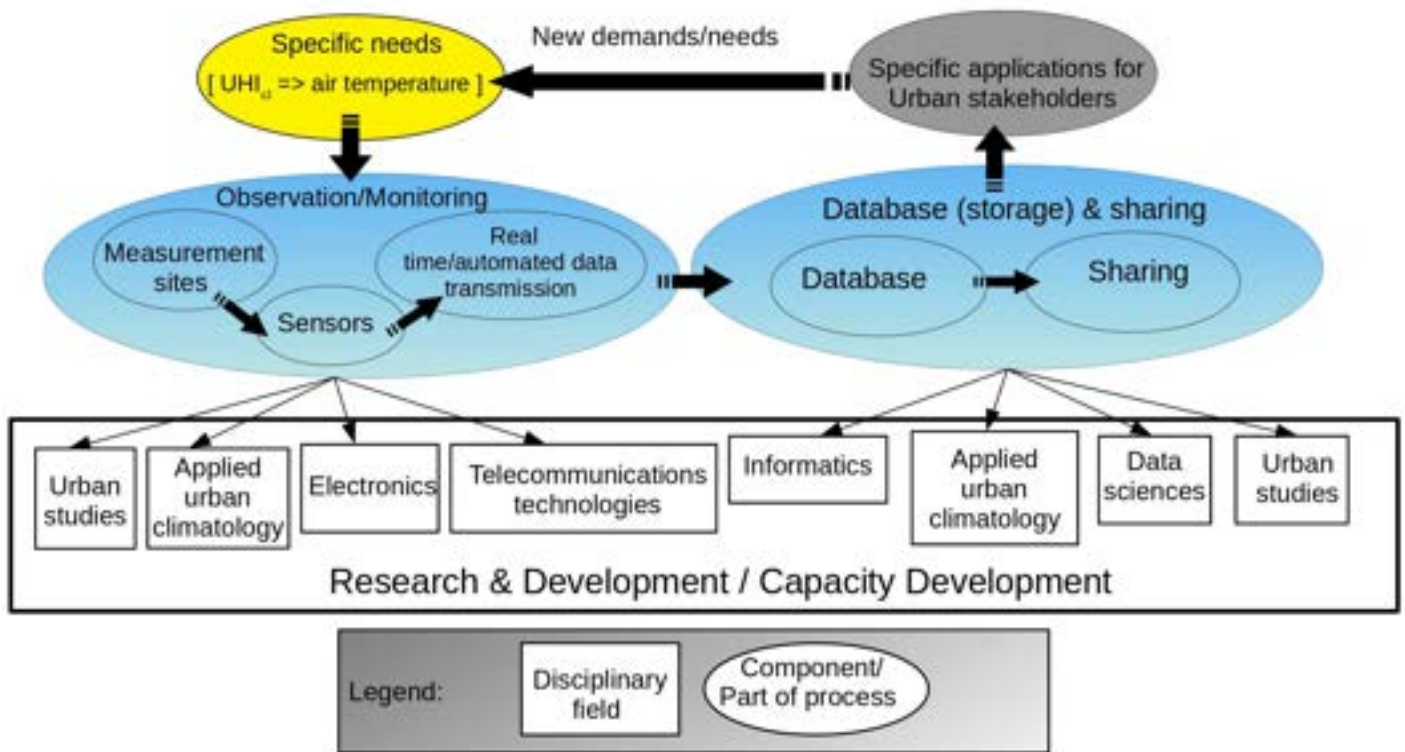


Figure 6, Processus de co-construction et disciplines associées aux deux composantes observation/monitoring, database and sharing⁴.

La figure 6 est donc conçue comme le schéma de l'OMM autour d'un processus rétroactif, dont le point de départ choisi réside dans la mise en forme des besoins, c'est à dire ici, le monitoring de l'ICU. Celle-ci se décompose de la façon suivante:

- La composante « observation/ surveillance », dans laquelle on trouve les sous-composantes du choix des sites de mesure, du type de capteurs et des technologies d'émission et de transmission des données. Ces trois sous-composantes sont liées par les questions sous-jacentes de capacité ou de développement. Par exemple, pour un budget donné, il faut déterminer si l'accent sera mis sur le nombre de capteurs ou sur leur qualité.
- Dans la composante « base de données » et partage, les questions portent sur la manière de stocker les données et de les rendre disponibles et compréhensibles du point de vue des utilisateurs spécifiques.

⁴ Cette figure est tirée d'un article en anglais soumis à la revue *Climate Services*. Il s'intitule : *A real-time atmospheric measurement network: The first phase of urban climate services in Toulouse*.

- Les « applications » sont fondées sur la forme de livraison de données. Cette composante est fortement dépendante des deux précédentes. Par exemple, la fréquence d'échantillonnage des capteurs est déterminée au sein de la sous-composante « transmission automatisée de données en temps réel », puis sera limitée par la capacité de stockage et son organisation, limitant de fait le nombre de cartes productibles.
- Les applications suscitent, ensuite, de nouvelles demandes ou besoins lorsque les utilisateurs les manipulent et peuvent solliciter des améliorations ou de nouvelles fonctions. Les fournisseurs peuvent également proposer des technologies ou de nouveaux systèmes d'observation améliorés.

Chaque discipline possède son état de l'art, ses normes, ses standards, ses habitudes, etc. Les services climatiques doivent s'adapter aux besoins de chacune de ces disciplines pour que les compétences de chacun puissent s'exprimer. Pour faciliter et conceptualiser ce processus de co-construction interdisciplinaire, les tableaux 1 à 6 présentent plusieurs références bibliographiques relatives aux disciplines concernées dans la figure 6.

Ces références arborent plusieurs formes : des lignes directrices, des retours d'expériences, des évaluations ou encore des normes. Les sources de ces références sont tout aussi diverses que leurs formes. Certaines références proviennent du monde de la recherche, via des revues scientifiques, de documents émanant d'organisations telles que l'OMM pour la climatologie ou d'autres d'organismes publics, nationaux ou Européens, mais également du secteur privé, etc.

La somme de ces références forme un socle de connaissances (non exhaustives) à mobiliser pour bâtir des services climatiques à base de réseaux d'observation tout en respectant les diverses compétences mises en oeuvre et exigées par chaque composante.

II.2.B. Choix des sites de mesure

Pour réaliser des études sur l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU), le choix de l'emplacement des stations météorologiques est une étape importante.

Pour observer cet effet microclimatologique, nous utilisons des thermomètres fixes ou mobiles, préférentiellement dans des abris anti-rayonnement. Dans une approche fixe, chaque sonde est généralement placée sur des sites représentatifs des zones climatiques locales urbaines et rurales (Stewart & Oke, 2009, 2012), un concept approfondi dans le chapitre III. Un capteur peut

également être monté sur un véhicule, ce qui constitue une approche mobile pour étudier les variations de la température à fine échelle spatiale.

Dans l'approche fixe, le réseau de stations météorologiques peut être déployé sous diverses formes ou spatialisations (Robinson, 2010; Muller et al., 2013), comme décrit par la figure 7.

- Un réseau de type systématique a un point pour chaque carré d'une grille. Un tel réseau peut être intéressant pour une ville ayant de grandes zones urbaines identiques mais n'est pas pertinent s'il existe une forte variabilité des formes urbaines. Le découpage en districts ou blocs de certaines villes d'Amérique du Nord ou d'Asie de l'Est peut se plier à l'exercice.
- Un réseau de type radial correspond à une forme d'étoile avec des échantillons le long des transects de chaque branche de l'étoile. Un tel réseau est utile pour déterminer le gradient de température d'une ville à partir du centre-ville et s'étendant jusqu'aux zones périphériques. Cependant le caractère arbitraire de la démarche laisse des « cavités », des « trous » dans les espaces observés.
- Un réseau de type aléatoire, ou un réseau semi-aléatoire avec des échantillons aléatoires, peut exister lorsque des stations météorologiques amateurs sont utilisées car il n'y a pas une unique autorité en charge du placement global du réseau. Cette appellation de réseau peut également être donnée lorsque les sites sont imposés comme par exemple uniquement les écoles. Certaines considérations sont moins contraignantes, comme l'utilisation uniquement de poteaux de feux de signalisation. Tout dépend donc de la densité des sites potentiels autorisés et du nombre de sites pouvant être équipés. Par exemple, s'il y a un effectif de 10 stations à déployer et qu'elles ne peuvent être disposées que sur les 10 écoles du territoire, le réseau est entièrement aléatoire (d'un point de vue météorologique), tandis que s'il y a 5 stations pour 15 écoles, alors le réseau est semi-aléatoire. La frontière entre les réseaux de type semi-aléatoire et de type gradient / transect peut être très floue.
- Dans les réseaux politiques, les frontières politiques ont un impact sur les positions de l'échantillon. Par exemple, une station est positionnée sur chaque commune d'une collectivité, ou encore une station sur chaque quartier.
- Les réseaux de type gradient / transect ont des échantillons à différentes densités ou le long de lignes. De tels réseaux peuvent sembler aléatoires dans les apparences ; cependant, chaque emplacement correspond à un choix spécifique, souvent thématique. La méthode du transect peut représenter l'amplitude thermique entre un centre-ville et son environnement selon différents axes et thématiques (Fast et al., 2005). Un tel réseau peut

suivre une rivière ou suivre une succession de zones industrielles ou résidentielles de plus en plus denses. Le principe porté par cette approche est de ne pas délaissier de territoires et de rendre compte de toutes les spécificités notables. Cette approche sous-entend une connaissance poussée du territoire étudié, comme le montre le chapitre III.

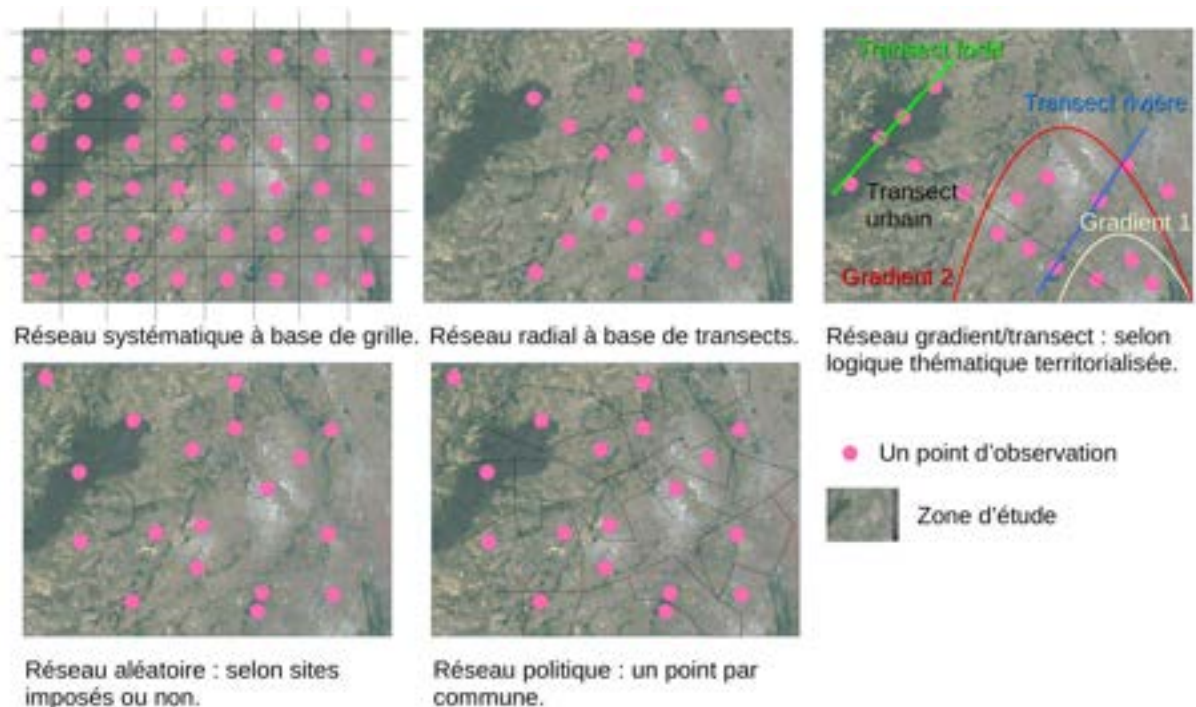


Figure 7 , les 5 différentes formes et spatialisations de réseaux d'observations, inspirées par Robinson, 2010.

Les méthodes du choix des sites de mesures déterminent la qualité de l'échantillon du réseau en termes de représentativité de leur environnement immédiat. La qualité des mesures de l'amplitude de l'ICU en est directement impactée. Le tableau 1 ci-dessous présente différents types de références bibliographiques concernant ce sujet capital. Le tableau permet d'aborder le choix des sites aux types de réseaux, mais aussi, la description des différentes classes de tissus urbains et tous les outils nécessaires indispensables à l'élaboration de ces tâches. Ces références relèvent donc en majorité de la climatologie appliquée.

Typologies	Objectifs	Exemples
Lignes directrices	Fournir des méthodes standardisées pour déployer un réseau	<ul style="list-style-type: none"> World Meteorological Organization, Guide to Instruments and Methods of Observation Volume III – Observing Systems, 2018, p. 371-398. OKE, Peter R., OKE, T. R., OKE, T. R., et al. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. 2006. OKE, Timothy R., MILLS, Gerald, CHRISTEN, Andreas, et al. Urban climates. Cambridge University Press, 2017. BARANKA, Györgyi, BOZÓ, L., KOMAC, Blaž, et al. Urban Heat Island Gold Standard and Urban Heat Island Atlas. In: Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario. Springer, Cham, 2016. p. 41-70. CHAPMAN, Lee, BELL, Cassandra, & BELL, Simon. Can the crowdsourcing data paradigm take atmospheric science to a new level? A case study of the urban heat island of London quantified using Netatmo weather stations. International Journal of Climatology, 2017, vol. 37, no 9, p. 3597-3605.
Retour d'expérience	Presenter des réseaux	<ul style="list-style-type: none"> WARREN, Elliott L., YOUNG, Duick T., CHAPMAN, Lee, et al. The Birmingham Urban Climate Laboratory—A high density, urban meteorological dataset, from 2012–2014. Scientific data, 2016, vol. 3, no 1, p. 1-8. MULLER, Catherine L., CHAPMAN, Lee, GRIMMOND, C. S. B., et al. Sensors and the city: a review of urban meteorological networks. International Journal of Climatology, 2013, vol. 33, no 7, p. 1585-1600.
Revue de réseaux	Comparer des réseaux	<ul style="list-style-type: none"> STEWART, Iain D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. International Journal of Climatology, 2011, vol. 31, no 2, p. 200-217.

Tableau 1, proposition bibliographique comme aide au choix des sites de mesure d'un réseau d'observation sur la base de stations météorologiques et monitoring de l'îlot de chaleur. Les sources sont classées selon leurs typologies et leurs objectifs.

Les normes sont fournies par les documents de type « lignes directrices ». Ceux-ci expliquent comment interpréter les zones urbaines d'un point de vue climatologique en utilisant une approche systémique. L'OMM est le principal fournisseur de ce type de document (Oke, 2006 ; Oke & al., 2017). Les références de type « retours d'expériences » permettent d'évaluer un réseau, de comparer ses caractéristiques aux standards via un point de vue ancré dans son environnement (ex: géographie ou politique) avec les spécificités pertinentes (ex: économie ou densité) (Chapman & al., 2017 ; Warren & al., 2016). Le troisième type de référence consiste en des « revues » de multiples réseaux, qui permettent de les comparer les uns aux autres. Rapidement, un utilisateur peut voir les variétés et les complexités des réseaux et en rechercher un correspondant aux enjeux qui lui semblent pertinents (Muller & al., 2013).

Les études urbaines sont un type de références bibliographiques qui ne sont pas présentées ici directement. Elles englobent toutes références qui permettrait d'apporter d'autres connaissances

sur la lecture du territoire, au-delà de son découpage en morphologies urbaines (Allain, 2004). Elles apportent ainsi d'autres niveaux de lecture pour un territoire donné, nous pouvons évoquer ce qui relève de la géographie sensible ou du paysage (Panerai, 1999 ; Bochet, 2002 ; Besse, 2009; Olmedo, 2015). Le type de population, les futures opérations immobilières et la rénovation urbaine sont quelques exemples de points à considérer pour les acteurs lors du choix de sites de mesure adaptés à l'évolution de la zone urbaine étudiée. L'objectif est de croiser la lecture de la ville du point de vue climatologique à une lecture connexe, possiblement héritée d'autres disciplines comme les études paysagères (géographie physique) ou les études d'appropriation des espaces par les individus (géographie humaine, sociologie).

Ainsi la lecture du territoire peut adopter de multiples points de vue selon diverses disciplines. La climatologique intervient pour qualifier la représentativité des sites, la géographie, l'urbanisme et les autres disciplines pour la lecture territoriale thématifiée.

II.2.C. Choisir les capteurs

Chaque site de mesure déterminé dispose de capteurs pour réaliser les mesures souhaitées. Le choix du capteur dépend donc des variables physiques observées ; l'électronique est ici la discipline majoritairement mobilisée.

Enjeu	Types de capteurs	Sources d'évaluation/comparaison	Exemples
Fournir les évaluations de capteurs pour aider aux choix des différentes technologies disponibles	<ul style="list-style-type: none"> • Capteurs professionnels • Capteurs semi-professionnels • Capteurs amateurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Revues indépendantes • OMM ou services météorologiques nationaux • Revue d'entreprises spécialisées en électronique (grey literature) 	<ul style="list-style-type: none"> • NO, EXPERT GUIDE. The Davis Instruments Vantage Pro2 wireless AWS—an independent evaluation against UK-standard meteorological instruments. 2009. • World Meteorological Organization. Guide to Instruments and Methods of Observation Volume III – Observing Systems, 2018, p. 81-112. • LACOMBE, M., BOUSRI, D., LEROY, M., et al. WMO field intercomparison of thermometer screens/shields and humidity measuring instruments. World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods, Report, 2011, no 106. National Instruments “Engineer’s Guide to Accurate Sensor Measurements.”

Tableau 2 , proposition bibliographique comme aide au choix des capteurs d'un réseau d'observation sur la base de stations météorologiques. Les sources sont classées selon les types de capteurs et l'origine de leurs évaluations/comparaisons.

La plupart des réseaux de stations météorologiques utilisés pour les études d'ICU ne mesurent que la température ou les données de température et d'humidité. En France, la ville de Dijon a installé plus de 50 sondes de température et d'humidité depuis 2014, dans le cadre du projet de recherche MUSTARDijon (Richard et al., 2018, 2019; De Lapparent, 2015). Peu de ces réseaux incluent une gamme complète de capteurs relevant la pluie, la température, l'humidité, la pression, la vitesse et la direction du vent et le rayonnement solaire. En France, avec le réseau présenté dans cette thèse, seule l'Université de Rennes possède un réseau homogène⁵ complet d'environ 30 stations météorologiques à l'échelle infra-urbaine (Foissard, 2015).

Ici encore, les besoins sont à prendre en compte, car pour un réseau de mesure de l'ICU, les températures suffisent. De plus, la présence de stations Météo-France à proximité et en suffisamment grand nombre peuvent apporter les informations manquantes. Cependant, la mesure de variables supplémentaires permet à un réseau d'être utilisé pour des analyses plus approfondies et de travailler sur des relations entre l'ICU et d'autres effets météorologiques. Cette démarche permet donc des applications supplémentaires aux études d'ICU (Chapman et al., 2015). La qualité des capteurs eux-mêmes varie de l'amateur au professionnel. Par exemple, les sciences participatives et les données de crowdsourcing sont fondées sur l'utilisation de stations météorologiques amateurs telles que Netatmo (Napoly et al., 2018). La qualité de ces données peut fluctuer mais la quantité de données est souvent suffisante (Chapman et al., 2017).

Chaque capteur a ses propres caractéristiques techniques. Il existe de nombreux critères à prendre en compte, notamment la précision et la durée de vie d'un capteur. De plus, il faut déterminer si la solution technique est réalisée à l'aide d'un sous-traitant ou d'un produit pré-existant prêt à l'emploi. Les coûts et les temporalités peuvent varier considérablement et les partenaires doivent communiquer pour adapter les produits à leurs besoins spécifiques. Les références citées dans le tableau, telles que Lacombe & al., 2011, peuvent être utilisées pour comparer et analyser différentes solutions techniques en ce qui concerne leurs qualités et leurs limites.

Cette étape du choix des capteurs est cependant facilitée par des documents de l'OMM. Cette organisation réalise des comparaisons et permet aux utilisateurs de directement sélectionner des technologies existantes commercialisées. L'accès à cette information se réalise sans posséder forcément de connaissances en électronique. Certaines de ces recommandations sont spécialement

5 Le terme homogène fait référence ici à la gestion homogène des technologies de capteurs sur l'ensemble du réseau mais également à une méthode homogène du choix des sites de mesures pour un réseau donné pour des études de climatologie. Par exemple, des réseaux des Association agréée de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) ne rentre pas dans cette catégorie)

conçues et pensées pour réaliser des études sur le fondement de relevés de températures en milieu urbain ou agricole. Celles-ci proposent alors des capteurs ayant déjà fait l'objet d'évaluations.

Le réseau de Dijon s'appuie, par exemple, sur des sondes Hobo® ; le réseau de Rennes ou celui analysé via cette thèse, sur les stations DAVIS®. Des organisations comme Météo-France disposent aussi d'études d'évaluation sur la qualité de ces capteurs, analysant les niveaux de précision mesurés à ceux affichés par le constructeur pour toutes les variables observées. Ils fournissent alors des référentiels de confiance envers les capteurs.

Dans le cas où les capteurs seraient fabriqués spécifiquement, les autres types de références sont mobilisés. L'utilisation principale de ce tableau réside dans l'appropriation d'outils en vue de la réalisation de cahiers des charges exhaustifs et spécifiques à des demandes particulières, à l'instar des mesures de températures en milieu urbain. La ville de Chicago a par exemple un réseau de stations météo dont le design a été travaillé pour qu'elles se fondent dans le paysage urbain (Jacob & al., 2017).

II.2.D. Choisir les technologies de télécommunications

Pour tout capteur se pose la question de la transmission des données mesurées. Cette sous-composante relève de la discipline des technologies de et de la communication. Elle s'aborde sous deux angles distincts :

Sujets	Objectifs	Exemples
L'internet des objets (IoT) ou cyberstructures (incluant les <i>smart cities</i>)	Analyser et comparer les caractéristiques de réseaux IoT	<ul style="list-style-type: none"> • MINERVA, Roberto, BIRU, Abyi, & ROTONDI, Domenico. Towards a definition of the Internet of Things (IoT). IEEE Internet Initiative, 2015, vol. 1, no 1, p. 1-86. • European Telecommunications Standards Institute works (BESEN, Stanley M. The European telecommunications standards institute: A preliminary analysis. Telecommunications policy, 1990, vol. 14, no 6, p. 521-530.). • MORIN, Elodie. Interopérabilité de protocole de communication adaptatifs basse-consommation pour des réseaux de capteurs. 2018. Thèse de doctorat. // Morin Elodie, Interoperability of communication protocols for low consumption sensors networks. IoT Standards landscape and future evolutions (European Telecommunications Standards Institute 2016, technical report).
Normes et systèmes de communications	Comparer les technologies et normes	<ul style="list-style-type: none"> • LIU, Jun, ZHANG, Binbin, & LV, Baolei. An intelligent framework of Automatic Weather Station. • MURTY, Rohan Narayana, MAINLAND, Geoffrey, ROSE, Ian, et al. Citysense: An urban-scale wireless sensor network and testbed. In: 2008 IEEE conference on technologies for homeland security. IEEE, 2008. p. 583-588.

Tableau 3, proposition bibliographique comme aide au choix des technologies de communication d'un réseau d'observation sur la base de stations météorologiques. Les sources sont classées selon leurs sujets et leurs objectifs.

- Le premier aspect concerne les caractéristiques du réseau d'observation en tant qu'objet structuré de l'Internet des objets (IoT). En effet un réseau de mesures, c'est un réseau d'équipements électroniques parmi tant d'autres pour une ville. Il faut alors le définir par rapport à ces autres réseaux et l'inscrire en tant que tel. Les technologies de la télécommunication mobilisent de nouveaux concepts qui aident à catégoriser les différentes composantes d'un réseau. Nous ne parlons plus de stations météo mais de terminaux, de branches, de dialogue. Ces aspects sont à aborder par les acteurs qui héritent des tâches de l'entretien et de la gestion du réseau et qui sont les garants de son fonctionnement. Ils interrogent les caractéristiques du réseau : les terminaux du réseau sont-ils capables de recevoir des informations ? Les passerelles sont-elles capables de communiquer entre elles ?

- Le deuxième aspect est plus opérationnel et concerne le système de télécommunication utilisé pour la transmission des données. Il est fortement lié à l'électronique et à l'informatique. La transmission de données peut être effectuée soit à l'aide d'une routine manuelle ou alors via des communications automatiques. Selon la définition du réseau utilisé, un type de transmission manuelle est généralement appelé « ensemble de capteurs ». Cette expression signifie que les données sont stockées à l'aide d'un enregistreur jusqu'à ce qu'une personne vienne les récolter, que la mémoire arrive à saturation, ou qu'il y est réécriture par dessus les premières données enregistrées. Il s'agit de la méthode utilisée initialement dans le projet MUSTARDijon jusqu'à son automatisation récente ou encore le réseau HiSAN à Taiwan (Chen et al., 2018). Certains réseaux, à l'inverse, peuvent fournir des données en temps réel avec des stations météorologiques automatiques, comme le réseau de Szeged, en Hongrie (Skarbit, 2017) ou le réseau de Météo-France.

Dans le cas d'un réseau automatique, des questions supplémentaires se posent, telles que le type de liaison. Une liaison filaire implique plus de travail lors de l'installation mais moins de manutention. Un réseau par ondes permet plus de souplesse dans le choix des sites mais intéresse la question du choix des technologies (4G, SigFox, Lora, Wi-fi) et de l'alimentation électrique. Chacune de ces technologies disposent d'avantages et d'inconvénients : couverture réseau, portées d'émissions, coûts des abonnements, demandes en énergies pour envoyer les messages, etc.

Que le travail porte sur l'aspect conceptuel ou opérationnel du réseau, il existe des normes qui doivent être respectées. Ces normes peuvent changer d'un pays à l'autre. Par exemple, l'Europe est réglementée par l'Institut européen des normes de télécommunications. Ce sont des normes strictes auxquelles nous ne pouvons nous soustraire. Lors de l'achat de produits manufacturés estampillés (par exemple « fabriqué au sein de l'Union Européenne »), les normes sont théoriquement respectées, comme celles qui réglementent les fréquences du Wi-fi.

Ce type d'information sur les technologies du réseau peut paraître techniciste. Cependant les réseaux de mesures urbains sont régulièrement disposés sur des mâts d'éclairage ou encore des poteaux électriques. Les gestionnaires de ces réseaux exigent alors, avant toute pose, de fournir les caractéristiques techniques des dispositifs mis en place, en vue de garantir l'intégrité matérielle de leurs équipements. Il est donc pertinent de les convier assez tôt dans les discussions. A titre d'illustration, en France, de nombreuses villes sont équipées de lignes de tramway avec alimentations aériennes. La présence de ces câbles, bien que non dangereux en soit, peut être vecteur de refus à la pose de certains sites de mesures de par les autorités gestionnaires du tramway.

II.2.E. Organiser les bases de données

Une fois les données mesurées par les capteurs, puis transmises via des modules de communication, elles sont réceptionnées, stockées et organisées sur des bases de données idoines. Le travail nécessite ici de se concentrer à la fois sur les méthodes et les outils. Il est donc fortement lié à l'informatique.

Types	Objectifs	Exemples
Normes et standards de base de données (methodes)	Aider à homogénéiser et organiser les données et métadonnées associées	<ul style="list-style-type: none"> • The SMM-CD Working Group, 2019: The guidance booklet on the WMO-Wide Stewardship Maturity Matrix for Climate Data. Document ID:WMO-SMM-CD-0002.Version: v03r00 20190131. • Guidance for creating WMO Core Profile Metadata in version 1.3, 2015. • SECRETARIAT, W. M. O. I-Purpose and Scope of WIGOS Metadata. • Guide to the WMO Information System, 2017. • MULLER, Catherine L., CHAPMAN, Lee, GRIMMOND, C. S. B., et al. Toward a standardized metadata protocol for urban meteorological networks. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, vol. 94, no 8, p. 1161-1185. • LI, Yishan & MANOHARAN, Sathiamoorthy. A performance comparison of SQL and NoSQL databases. In: 2013 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM). IEEE, 2013. p. 15-19. • JATANA, Nishtha, PURI, Sahil, AHUJA, Mehak, et al. A survey and comparison of relational and non-relational database. International Journal of Engineering Research & Technology, 2012, vol. 1, no 6, p. 1-5.
Comparaison de logiciels de bases de données (outils)	Aider à choisir les meilleures suites logicielles pour gérer les données et métadonnées	

Tableau 4, proposition bibliographique comme aide à l'organisation des données produites à partir d'un réseau d'observation sur la base de stations météorologiques. Les sources sont classées selon leurs types et objectifs.

- Les méthodes concernent l'organisation du contenu des données par rapport à leurs types. La donnée est ici traitée sous forme brute, directement émise depuis les capteurs. Les données satellitaires et les données d'observation nécessitent par exemple des métadonnées spécifiques et, de plus, peuvent nécessiter une certaine gestion du stockage. Les lignes directrices et les normes fournies par l'OMM permettent d'homogénéiser et de partager les données dans un format commun utilisé dans les sciences du climat. A titre d'exemple, les heures sont transmises au format UTC. La méthode tend à garantir l'utilisation, en toute confiance, et dans des limites définies des données produites. Ces questions n'impactent pas

la qualité des données mais, davantage leur capacité à s'ouvrir au monde scientifique ou à l'international.

- Les outils, de leur côté, dépendent de l'architecture logicielle de la plate-forme de données souhaitée. Les études citées dans le tableau (Li, 2013 ; Jatana, 2012) offrent des comparaisons entre diverses technologies. Les critères à examiner comprennent l'efficacité du stockage de l'espace virtuel, l'utilisation d'un portail Internet ou la vitesse de transmission des informations et l'accès. Ces enjeux peuvent paraître inadaptés pour une gestion de données de réseaux de mesures au regard des quantités de données manipulées. Cependant ils prennent davantage de sens en cas de croisement des données mesurées avec des données cartographiques, des images aériennes ou des algorithmes de modélisation, plus lourds à manipuler.

II.2.F. Livrer la donnée

Une fois les données organisées, elles peuvent être retravaillées pour que leurs formes soient celles attendues par des utilisateurs spécifiques. La livraison des données se compose à la fois d'esthétique et de substance. En ce qui concerne les données climatiques, certains aspects des résultats doivent être affinés, retravaillés ou traités à nouveau. L'incertitude, la précision, la sensibilité politique et les limites des données représentent des critères qui doivent être pris en considération. Le retour d'expérience est un moyen de répondre à ces problèmes. Cependant, comme nous l'avons démontré précédemment, il y a aujourd'hui une absence d'examen comparatifs concernant la fourniture de données climatiques dans le cadre des services climatologiques.

Types	Objectifs	Exemples
Retours d'expériences	Ressentis et retours d'expériences sur le développement de services climatiques et outils d'évaluation	<ul style="list-style-type: none"> • BIGOT, Sylvain, DUCHÉ, Sarah, MADELIN, Malika, <i>et al.</i> Étude du climat urbain: pour une mise à disposition de nouveaux services climatiques. 2017. • CHRISTEL, Isadora, HEMMENT, Drew, BOJOVIC, Dragana, et al. Introducing design in the development of effective climate services. <i>Climate Services</i>, 2018, vol. 9, p. 111-121. • REN, Chao, NG, Edward Yan-yung, & KATZSCHNER, Lutz. Urban climatic map studies: a review. <i>International Journal of Climatology</i>, 2011, vol. 31, no 15, p. 2213-2233. • SOREIDE, Nancy N., SUN, Charles L., KILONSKY, Bernard J., et al. A climate data portal. In: <i>MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 01CH37295)</i>. IEEE, 2001. p. 2315-2317. • TAYLOR, Andrea L., DESSAI, Suraje, & DE BRUIN, Wändi Bruine. Communicating uncertainty in seasonal and interannual climate forecasts in Europe. <i>Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences</i>, 2015, vol. 373, no 2055, p. 20140454. • DEANDREIS, C., LEMOND, J., DANDIN, P., et al. Recent progress towards climate services in France. <i>Pollution Atmosphérique</i>, 2013, p. 120-128. • DANDIN, Philippe, CORRE, Lola, & L'HÔTE, David. Drias, une stratégie de service pour l'adaptation. <i>Villes et climat</i>, p. 15. • JOURDAIN, Sylvie, ROUCAUTE, Émeline, DANDIN, Philippe, et al. Le sauvetage de données climatologiques anciennes à Météo-France: De la conservation des documents à la mise à disposition des données. <i>La Météorologie</i>, 2015.

Tableau 5, proposition bibliographique comme aide à la livraison et la mise en forme de la donnée produite par un réseau d'observation sur la base de stations météorologiques.

Le point à relever est l'apparition du champ disciplinaire « design ». En effet, la fourniture de services climatologiques aux utilisateurs est souvent associée à une interface de visualisation, et des études sont disponibles concernant cet aspect spécifique (Christel & al, 2018). Il peut également servir de point d'échange et de co-construction et peut renvoyer à des méthodologies d'études de conception (Sedlmair et al., 2012 ; Goosen & al. 2014). La visualisation des données dans les services climatologiques demeure un domaine de recherche actif (Nocke, 2008). Cela s'explique en raison de la relative nouveauté de l'exercice. La plage de variation de la visualisation des données et les caractéristiques de livraison des données correspond à la plage de variation des utilisateurs. En d'autres termes, plus les besoins et les applications des utilisateurs varient, plus les données se présenteront sous des formes différentes. Les mêmes variables à l'origine peuvent servir des formes et rendus différents. Dans le cadre du projet MApUCE, de nombreux livrables ont été le sujet de réflexions sur les choix graphiques pour représenter l'ICU (figure 8). Nous pouvons également citer les efforts apportés à la récente refonte graphique du portail DRIAS⁶.

⁶ <http://www.drias-climat.fr/>

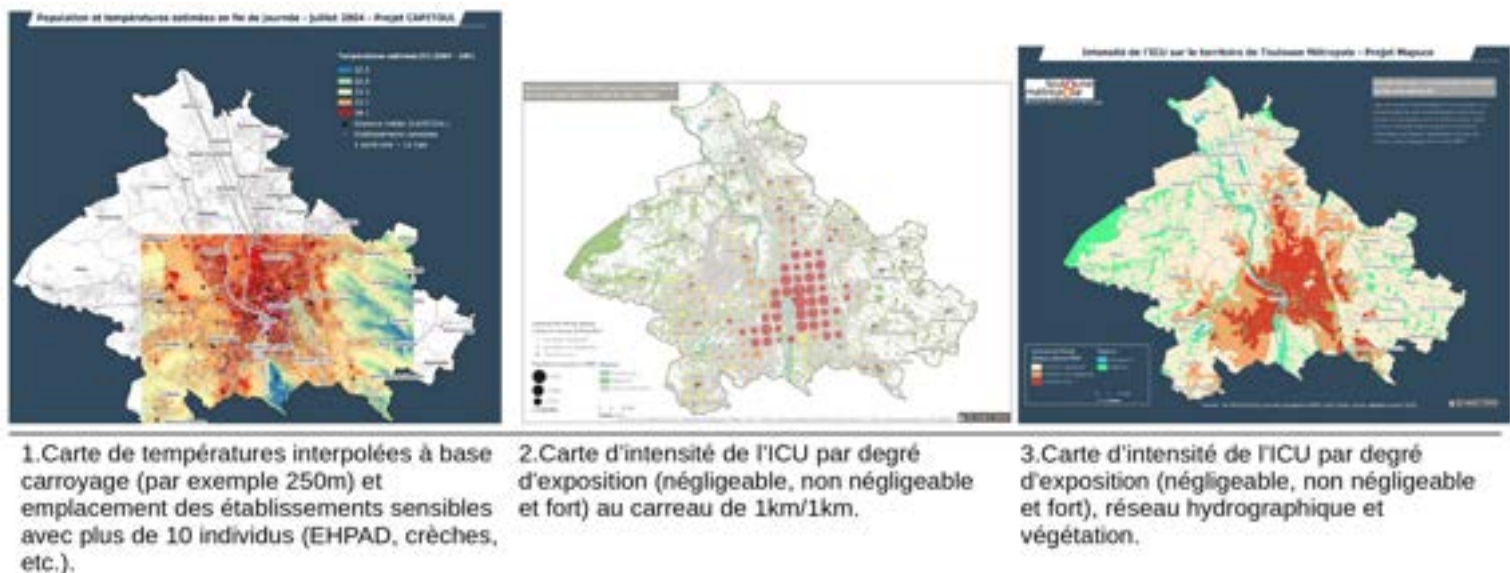


Figure 8, propositions et variations graphiques autour des cartographies de l'ICU. Ces cartes sont disponibles sur un site internet dédié⁷.

C'est lors de cette étape que l'aspect légal est défini : à qui appartient la donnée ? Dans le cadre d'une livraison des données au citoyen via des plateformes open-data, cette question doit être abordée. De plus le sujet est en vogue (Favro, 2016), réglementé⁸ et soutenu politiquement en France⁹. Cette étape de l'ouverture des données questionne également la volonté de partager les données produites avec des scientifiques internationaux. Par exemple, les données du vent peuvent être livrées après transformation, exprimées en km/h ou selon l'échelle de Beaufort pour des stations côtières, plutôt qu'à l'aide de ses composantes U et V¹⁰. Ces transformations basiques permettent d'éviter des traitements ultérieurs lors de la transformation de la donnée avant le partage.

II.2.G. Transversalité des services climatiques

Enfin, comme cela a été démontré auparavant, les services climatologiques sont des projets transversaux, incluant de multiples acteurs impliqués dans la production et la livraison de la science du climat. Cependant, comme il s'agit d'un domaine émergent, de nombreuses références sont disponibles pour conceptualiser et évaluer les objectifs et enjeux des projets, mais il y a moins de retour d'expériences concernant leurs applications.

⁷ <http://lib.aua-toulouse.org/CarteDuMois/170419/>.

⁸ Cf le projet de loi « Pour une République numérique »

⁹ <https://www.etalab.gouv.fr/la-france-de-nouveau-sur-le-podium-de-lopen-data-en-2019>

¹⁰ Que le glossaire de Météo-France qualifie de niveau de compréhension « initié » sur son échelle curieux/initié/expert : http://files.meteofrance.com/files/glossaire/FR/glossaire/designation/811_initie_view.html

Types	Objectifs	Exemples
Lignes directrices	Fournir des lignes directrices pour le développement (co-construction et composants)	<ul style="list-style-type: none"> Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services, 2018 WMO Guideline serie. DANIELS, Elizabeth, BHARWANI, Sukaina, & BUTTERFIELD, Ruth. The Tandem framework: a holistic approach to co-designing climate services. SEI Discussion Brief. Stockholm Environment Institute, 2019.
Services climatiques en tant que services de science	Fournir la conceptualisation, les objectifs et les enjeux des services climatologiques	<ul style="list-style-type: none"> MCNIE, Elizabeth C. Delivering climate services: organizational strategies and approaches for producing useful climate-science information. <i>Weather, Climate, and Society</i>, 2012, vol. 5, no 1, p. 14-26. BRASSEUR, Guy P. & GALLARDO, Laura. Climate services: Lessons learned and future prospects. <i>Earth's Future</i>, 2016, vol. 4, no 3, p. 79-89. BESSEMBINDER, Janette, TERRADO, Marta, HEWITT, Chris, et al. Need for a common typology of climate services. <i>Climate Services</i>, 2019, vol. 16, p. 100135. CHAPMAN, Lee, MULLER, Catherine L., YOUNG, Duick T., et al. The Birmingham urban climate laboratory: an open meteorological test bed and challenges of the smart city. <i>Bulletin of the American Meteorological Society</i>, 2015, vol. 96, no 9, p. 1545-1560. CHRISTEL, Isadora, HEMMENT, Drew, BOJOVIC, Dragana, et al. Introducing design in the development of effective climate services. <i>Climate Services</i>, 2018, vol. 9, p. 111-121.
Retours d'expériences	Présenter les services climatiques urbains selon différents aspects	<ul style="list-style-type: none"> KOTOVA Lola, TERRADO Marta, KRZIC Aleksandra, DJURDJEVIC Vladimir, GARRETT Nathalie, STRATCHAN Jane, & BESSEMBINDER Janette. Lessons and practice of co-developing Climate services with users, European Climate Observations, Monitoring and Services Initiative, 2017. MCNIE, Elizabeth C. Delivering climate services: organizational strategies and approaches for producing useful climate-science information. <i>Weather, Climate, and Society</i>, 2012, vol. 5, no 1, p. 14-26.

Tableau 6, proposition bibliographique portant un regard sur la transversalité des services climatiques. Les sources sont classées selon leurs types et leurs objectifs.

Des lignes directrices existent pour développer ces services, y compris les méthodes de co-construction (Daniels & al., 2019). Les retours d'expériences (Chapman & al., 2015, Bigot & al, 2017 ; Kotova & al., 2015) fournissent des exemples de services climatiques appliqués à des territoires spécifiques via de multiples composantes (par exemple, observations, livraison et transmission de données). Le document le plus évocateur de cette démarche est le guide élaboré par l'OMM pour la construction des services climatiques. Ce guide tente, sur 35 pages rédigées en langue anglaise, par l'approche des bonnes pratiques basées sur l'expérience de ses auteurs principaux, d'apporter une vision théorique aux services climatiques dans les sociétés actuelles. Il demeure un document accessible, vulgarisé, tout public et didactique. Il aborde les services climatiques sous l'angle des utilisateurs et fournisseurs, évoque les freins, les limites et les fossés à franchir pour la mise en place des services climatiques. Paru en 2018 en mai pour sa première

édition, il est encore difficile d'observer ses effets dans la mise en place de services climatiques. La thèse ici présente tente par exemple de mobiliser le schéma des composantes de services climatiques de ce guide et d'élaborer dessus un cadre de travail approfondi, organisationnel et opérationnel via un retour d'expérience territorialisé. L'approche ici interdisciplinaire tente cependant de sortir de la vision des services climatiques urbains portée par les climatologues pour les rattacher à d'autres objets ou disciplines, telles que l'urbanisme ou encore l'internet des objets.

C'est alors ici que prends sens le travail des chercheurs, qui, en parallèle des climatologues, ont su questionner et étudier le développement des services climatiques en tant que services scientifiques généraux, questionnant leurs formes, enjeux, utilités et applications (McNie 2012).

La bibliographie du tableau 6 traite des services climatiques en tant qu'objet selon une approche transversale et interroge également leurs utilités de manière indirecte. Les futurs utilisateurs des services climatiques sont en mesure de se poser les questions suivantes : avons-nous besoin de ces services ? Sommes-nous en mesure d'embrasser les capacités de production de données et de documents de ces services ? Ces services correspondent-ils, par ailleurs, à nos besoins ? Pour ce faire, cette bibliographie insiste sur la mise en marche de pratiques de travail participatives entre utilisateurs et fournisseurs, permettant in fine de répondre à ces interrogations (McNie, 2012 ; Brasseur & al., 2016).

II.3. Co-construction de services climatiques sur la base de réseaux d'observation, appliquée aux services urbains de Toulouse

Cette section fait état du travail de participation mis en place au sein de Toulouse Métropole. Elle est abordée sous l'angle de la gouvernance opérationnelle et des acteurs du réseau au regard de la liste des objectifs et des normes (tableaux 1 à 6) attendus et exigés pour chaque composante de services climatiques à base de réseaux de mesures (figure 6). Cette section consiste à déterminer les rôles et les besoins des acteurs impliqués. L'objectif est de répertorier, d'organiser et hiérarchiser les compétences. De même, les services climatiques ne faisant pas intervenir uniquement la Métropole, les interactions avec les différents acteurs externes sont décrites (tableau 7 et figure 12).

II.3.A. Les acteurs

Construire des services climatiques implique divers partenaires, publics et privés. Chaque acteur peut être classé selon son secteur (privé, public), son degré de participation (consultation, concertation, co-construction) et les composantes au sein desquelles il intervient (Tableau 7). Du côté des entités publiques, nous observons par exemple des départements urbains de la Métropole ou des communes, Météo-France, des universités¹¹ ou encore la Caisse des Dépôts et des Consignations (CDC). Du côté du secteur privé se situent des entreprises, start-ups ou encore des bureaux d'études. Les organisations publiques ont fourni un soutien économique et technique et sont intégrés activement dans la conception des services. Les acteurs privés sont mobilisés en vue de l'exercice de missions spécifiques, mais ne participent pas ou peu à la co-construction.

Notons que dans le cas des services climatiques de Toulouse, certains départements urbains sont polyvalents. En effet en étant propriétaires du réseau et en internalisant certaines composantes, ils remplissent à la fois les rôles de fournisseurs et d'utilisateurs. Seul le caractère scientifique est partagé via les interactions avec le monde de la recherche.

De ce fait, la gouvernance opérationnelle sera principalement construite autour des départements urbains et la gouvernance scientifique par le CNRM et le LISST. Les démarches participatives sont appliquées sur les départements urbains car ils recouvrent presque la totalité des composantes du réseau. Il est opportun de s'attarder sur l'organisation de la Métropole.

11 Toulouse University II: Jean Jaurès (Social and Human Sciences) and Toulouse University III: Paul Sabatier (Medical, Engineering, and Technological Sciences)

Acteur	Secteur	Participation	composante
TM ¹² : Environnement et energie	Public	Co-construction	toutes sauf le système de transmission
TM: Espaces verts		Consultation	-choix des sites -applications
TM : Pôles territoriaux		Consultation	-choix des sites -applications
TM : Réglementation		Co-construction	-choix des sites -partage -applications
TM: Eclairage Public		Co-construction	-choix des sites -technologies de communication -choix de capteur
TM:Construction bâtiments publics		Concertation	-choix des sites -applications
TM : Mobilité Gestion Réseau		Consultation	-choix des sites -applications
TM : Numérique et Innovation		Co-construction	-technologies de communication -stockage -partage -applications
CNRM		Co-construction	-choix des sites -applications -livraison
Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités Sociétés Territoires		Co-construction	-choix des sites -applications -livraison
Institut de Recherche en Informatique de Toulouse		Consultation	-technologies de communication
Caisse dépôts Consignations		Co-construction	-livraison -applications -stockage
Centre National d'Etudes Spatiales		Consultation	-applications -partage
Société Nationale des Objets Connectés	Privé	Consultation	-technologies de télécommunication
HD-rain		Consultation	-choix du capteur
Urban Canopée		Consultation	-choix des sites
Volx		Co-construction	-choix du capteur
WaltR		Consultation	-choix du capteur

Tableau 7, acteurs et secteurs d'activité des services climatiques de Toulouse. Ils sont organisés selon le niveau de participation et les composantes dans lesquelles ils interviennent.

12 Toulouse-Metropole

II.3.B. La participation des départements urbains

La collectivité toulousaine est divisée en départements, eux-mêmes subdivisés en départements plus petits aux compétences plus spécifiques. La Métropole est ainsi scindée en douze départements¹³. Par exemple, il y a le Département de l'Environnement et de l'Énergie (EED). Ce dernier est aussi organisé en sous-départements qui sont en charge de sujets divers. Il existe un sous-département en charge du Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET), un autre consacré à la qualité de l'air et des nuisances sonores, mais aussi d'autres sous-départements ayant pour responsabilité la gestion des fleuves et de certaines structures hydrologiques.

En France, il n'y a pas de législation pour organiser concrètement un territoire métropolitain, cependant la loi établit une liste de compétences à se doter¹⁴ (Le Bras et al., 2016; Chabrot, 2013). Chaque département peut être organisé par le maire de la ville et son conseil d'administration, à leur guise. L'enjeu est alors d'identifier où se trouvent les compétences dans chaque département concernant les composantes des services climatiques et de les hiérarchiser.

Comme l'indique le tableau 7, la participation des départements urbains n'est pas homogène, certains sont uniquement consultés, d'autres concertés et d'autres encore participent à la co-construction. Dans la consultation, nous retrouvons les départements interrogés pour les choix des sites de mesures. Ils ont un besoin spécifique qui correspond à une application et à des localisations particulières. Les espaces verts, par exemple, souhaitent se munir de données provenant des parcs et en particulier pendant l'été. Ils peuvent ainsi comparer les températures de différents parcs entre eux. Les pôles territoriaux préfèrent placer des capteurs au regard des projets urbains, de rénovations ou de nouveaux quartiers, à des fins de suivi des évolutions de température. Leurs besoins sont pris en compte mais en l'absence de retour de leur part pour validation des emplacements, leurs rôles sont cantonnés à la consultation.

Au deuxième échelon, nous observons les départements concertés, là aussi principalement pour le choix des capteurs reliés à des applications définies. Les emplacements sollicités peuvent être pris en compte et faire l'objet de retour au cas par cas, aux fins de validation par les services. Il est permis de citer, en exemple, les techniciens du département de la construction et des bâtiments neufs, qui sont en demande de capteurs situés sur des écoles. Ils ont pour but de comparer les données extérieures de températures à leurs données intérieures de leur réseau de capteurs.

13 Organigramme disponible sur le portail des agents de la Métropole. Dernière mise à jour Novembre 2019.

14 LOI n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles

Au dernier échelon, se trouve la co-construction. Celle-ci concerne plusieurs composantes. Les suggestions des départements urbains impliqués, impactent la structure des services climatiques et peuvent modifier la taille du réseau, ses objectifs ou toute autre spécification. Par exemple, le service de l'éclairage public est habilité à invalider l'ensemble du réseau, si les besoins du service ne sont pas satisfaits. Ces besoins concernent, entre autres, la transmission des données, qui doit être conforme aux directives européennes en matière d'émissions sans fil, mais aussi le poids des stations et de leurs supports de fixation qui ne doivent pas remettre en cause la stabilité ou l'intégrité physique des mâts d'éclairage.

Dans le cas de la co-construction, les échanges avec les départements ne peuvent pas être réalisés en une seule réunion regroupant tous les départements et équipes urbains au sein du même lieu. En effet, ces départements n'éprouvent pas les mêmes besoins. En conséquences, il convient de prévoir un certain nombre de réunions, réparties sur plusieurs mois et organisées avec les personnes habilitées de chaque département. Lors de ces réunions, chaque département urbain peut mobiliser un champ disciplinaire particulier. Dès lors, le langage doit être adapté à chaque discussion. Les tableaux 1 à 6 permettent de s'approprier le langage de chaque discipline. Le projet peut être constamment renégocié tout du long de ces échanges. Son contenu et ses contours sont co-construits dans un processus dynamique. Nous pouvons observer deux exemples de co-construction particulièrement avancés.

- **La plateforme IA DATA**

L'un des points clés actuel du réseau est la création d'une plate-forme conçue pour réaliser l'intégration des données et la mise à disposition des applications par le département du Numérique de la métropole toulousaine. C'est via cette plate-forme que seront transmis les applications aux utilisateurs. Ces applications peuvent être livrées sous formes de cartes, de tableaux ou de graphiques, et accompagnées de toutes notes explicatives et de métadonnées. Quelques images de la version alpha de la plate-forme sont disponibles en figure 9.



1. L'utilisateur arrive sur l'interface générale sur laquelle il peut choisir d'accéder aux cartographies de l'îlot de chaleur, aux données des capteurs séparés ou en carte.



2. La carte en temps réel permet d'interagir avec chaque station pour voir les valeurs actuellement relevées.



3. Chaque station dispose d'une page propre où les données peuvent être mises en tableaux ou graphiques. Il existe un onglet comparaison pour afficher une autre station simultanément.

Figure 9, impressions d'écrans de la plate-forme IA data dans sa version actuelle, encore en construction. Elle doit être agrémentée d'études produites à l'issue de cette thèse.

Il s'agit d'un point central des services climatiques qui sert de cas d'usage pour cette plate-forme « Artificial Intelligence Data ». Pour mener à bien l'élaboration de celle-ci, une nouvelle équipe a été recrutée par le département du numérique. La constitution de cette équipe n'est pas liée à la création des services climatiques. Elle découle d'un appel à projet Européen « ville de demain » lancé en 2016 auquel le département a répondu. C'est en 2018 qu'il a été décidé de rattacher les services climatiques comme second cas d'usage pour la plate-forme. Les données provenant du réseau de stations météorologiques fournissent ainsi une « preuve du concept » pour leur plate-forme, qui est actuellement en construction. De plus ils ont désormais internalisé les composantes du stockage et du partage de données dans leur architecture technique.

C'est également ce département, qui, au vu de la part grandissante de la question de l'internet des objets, a commandé un audit sur ce sujet. Celui-ci avait pour but de réaliser un benchmark et un état des lieux des IoT de la Métropole et des différents départements qui en font usage. Ce travail a été confié, via appel d'offres, à la société Egis. Dans le cadre de ce travail, le

département Environnement et Energies a été interrogé en tant que titulaire de certaines composantes des services climatiques et du réseau.

Ainsi, la co-construction peut s'alimenter de réflexions mûries au sein d'autres départements et de nouvelles instances. Pour le stockage, l'organisation et le partage, le Numérique était le département cible en termes de compétences vis-à-vis de la Métropole mais ne disposait pas, en interne, des compétences indispensables à la réalisation de ce travail. Rapidement, au fil des premières discussions, s'est imposée l'idée que les services climatiques soient rattachés à l'équipe IA data, inexistante alors, pour récupérer ces composantes.

La concrétisation de cette plate-forme s'est réalisée, ensuite, au cours d'échanges multiples. Les discussions avec le Département Numérique portent tant sur des sujets tels que les logiciels que sur l'organisation des données. Il est important de pouvoir communiquer à l'aide d'un vocabulaire approprié, lorsque des points spécifiques sont soulevés à l'occasion des échanges menés avec les départements aux compétences qui peuvent être éloignées. Par exemple, leur plate-forme pouvait intégrer tout travail d'analyse de données développé en langage informatique Python. Cependant, certaines analyses sont produites via d'autres langages informatiques, tels que le R. Ils ont donc intégré un module R dans leur architecture. Ce détail n'est pas anodin puisqu'aujourd'hui chaque logiciel nécessite des sécurités et des politiques d'utilisation. Intégrer un nouveau langage ou une brique logicielle impose des réponses à ces questions.

A l'occasion du travail mené avec le Département Numérique, des questions de design et de graphisme sont également évoquées, un aspect déjà étudié dans la littérature scientifique pour les services climatologiques (tableau 5).

En ce qui concerne l'élaboration de la plate-forme, nous retrouvons des compétences variées et corrélées aux métiers de l'informatique, tels que des « data-scientist », « data-analyst », développeur front-office, backend, etc.

- **Portail WEB de cartographie de l'ICU en temps réel**

Le deuxième cas de figure est porté par un autre acteur public : la Caisse des Dépôts et Consignations et de son opérateur Informatique CDC. La CDC, au-delà de sa compétence parfois réductrice de banque des territoires, se positionne en accompagnant les réflexions des collectivités et leurs expérimentations, notamment sur les questions de l'open data. La CDC est rattachée au projet de la création des services climatiques, via un partenariat avec la Métropole, puisque les données mesurées par les capteurs ont pour vocation d'être transmises en libre accès aux citoyens.

L'objectif de ce partenariat est de mettre en place un portail web sur lequel il serait possible d'afficher une cartographie des températures provenant des capteurs installés. Ces cartographies en

temps réel sont calculées selon la méthode développée par le LISST (Touati & al., 2020). Là encore, ce portail web sert de preuve du concept pour la CDC et l'ICDC, la branche Informatique de la CDC. Cette démarche, susceptible de se démocratiser à d'autres métropoles ou collectivités, leur permet d'apprécier s'ils disposent des compétences techniques suffisantes. Le partenariat s'étale sur près de deux ans. Pendant cette période, il a fallu mettre en place les conventions, réaliser des ateliers de co-constructions, cette fois-ci organisés par la CDC, et de nombreuses réunions de travail.

Puisque la création de l'équipe IA DATA se fait en parallèle au sein du département du numérique, ils sont associés pour toutes discussions techniques. En effet à terme, tout travail produit par l'ICDC est récupéré et mis en place sur la plate-forme IA DATA. La cartographie des îlots de chaleur est l'une des applications convoitées par les départements urbains.

Le partenariat est finalisé avec la livraison de ce portail web (figure 10). Les équipes ICDC et IA DATA travaillent aujourd'hui aux transferts et à la traduction de leurs architectures techniques à celles mises en place par la Métropole et le département Numérique.



Accueil du portail, avec vidéo explicative et présentation des acteurs et de la démarche.



Cartographie de l'ICU



Affichage carte simple (à un instant T, selon deux types d'échelle et deux types de classification des températures).



Affichage carte moyennée selon des périodes, par exemple entre 2h et 4h du matin tous les jours pendant deux mois..

Figure 10, portail web co-construit par la branche informatique de la Caisse des Dépôts, la Métropole et le Centre National de Recherches Météorologiques.

Les résultats de la participation révèlent des attentes réelles de nombreux départements contactés en plus de leurs aspirations. Le nombre de partenariats et de projets urbains, liés au réseau d'observation, a augmenté au fur et à mesure de la progression de l'étude. Cela n'a pas vraiment modifié la solution technique elle-même ; cependant, cela a changé l'étendue des applications du réseau en tant qu'outil, pour certains départements. La principale conséquence a été l'augmentation du nombre de stations météorologiques au sein du réseau. Afin d'illustrer les modifications d'effectif, deux projets liés au réseau sont présentés ci-dessous.

- Le premier est un projet d'urbanisme porté par le département de Garonne et des Canaux, sous-département de l'Environnement et Energies. Il est en charge de la Garonne, du Canal du Midi et du Canal de Brienne, tous trois traversant la ville. Ce département souhaite mesurer l'impact des futures rénovations et de révégétalisation, de part et d'autre du Canal du Midi. Il prévoit de supprimer une grande partie de la circulation automobile, de créer de plus grands espaces verts et de planter des milliers d'arbres, s'inscrivant dans le projet politique « 100 000 arbres » de la ville de Toulouse. A ce jour, le projet est en phase de conception, et il y aura une période de construction de cinq ans de 2021 à 2025. Ainsi, 10 stations ont été achetées et spécifiquement conçues pour observer cette opération. Leur placement n'est pas encore effectif.
- Le second dessein est à la fois un projet d'urbanisme et un projet scientifique : la transformation d'une île du centre de Toulouse en parc (figure 11). Actuellement, cette île abrite une aire de stationnement et le centre des expositions. C'est un endroit qui comprend une grande quantité de surfaces imperméables et quelques arbres qui seront transformés en parc urbain. Une dizaine de stations est liée à ce projet appelé «Projet LIFE île Ramier». L'objectif est de réaliser des simulations de microclimat, avec des modèles haute résolution, en combinaison avec des stations météorologiques supplémentaires pour évaluer l'impact des changements futurs sur la région. Les stations sont en place et leur émission effective depuis décembre 2020.



Figure 11, la destruction de l'ancien parc des expositions (à gauche) et les effets de rafraîchissement du futur parc (à droite) sont étudiés dans le cadre du projet LIFE. Ces images sont tirées du site internet de Toulouse Métropole dédié au projet¹⁵.

II.3.C. Gouvernance du réseau

Au total, les services climatiques mobilisent 11 départements (figure 12). La figure présente de manière hiérarchisée pour chaque département, l'expression de leurs besoins et de leurs rôles. Nous relevons ainsi les départements qui sont directement concernés par les choix des sites de mesure et qui attendent des résultats des composantes partage et applications. Les composantes transmission de données, stockage de données et partage sont étroitement liées au département Numérique (en tant que développeurs d'interfaces utilisateurs des services climatiques). Le volet transmission de données est également lié au service de l'éclairage public pour assurer la compatibilité avec leurs réseaux et valider chaque pôle.

En parallèle, nous notons la présence de trois départements en attente de résultats produits par d'autres départements utilisant les données.

- Le département de l'Innovation est en charge de la supervision de tout projet de ville intelligente (elle représente un sous-département « Modernisation » du département Numérique).

¹⁵ <https://www.toulouse-metropole.fr/projets/grand-parc-garonne/ile-du-ramier>

- Le département de la Régulation est en charge de l'ensemble des agglomérations construites par les pouvoirs publics et de la rédaction des documents d'urbanisme.
- Le département Sécurité Civile et Risques Majeurs attend les protocoles du département de l'Environnement et Energies pour gérer efficacement les canicules.

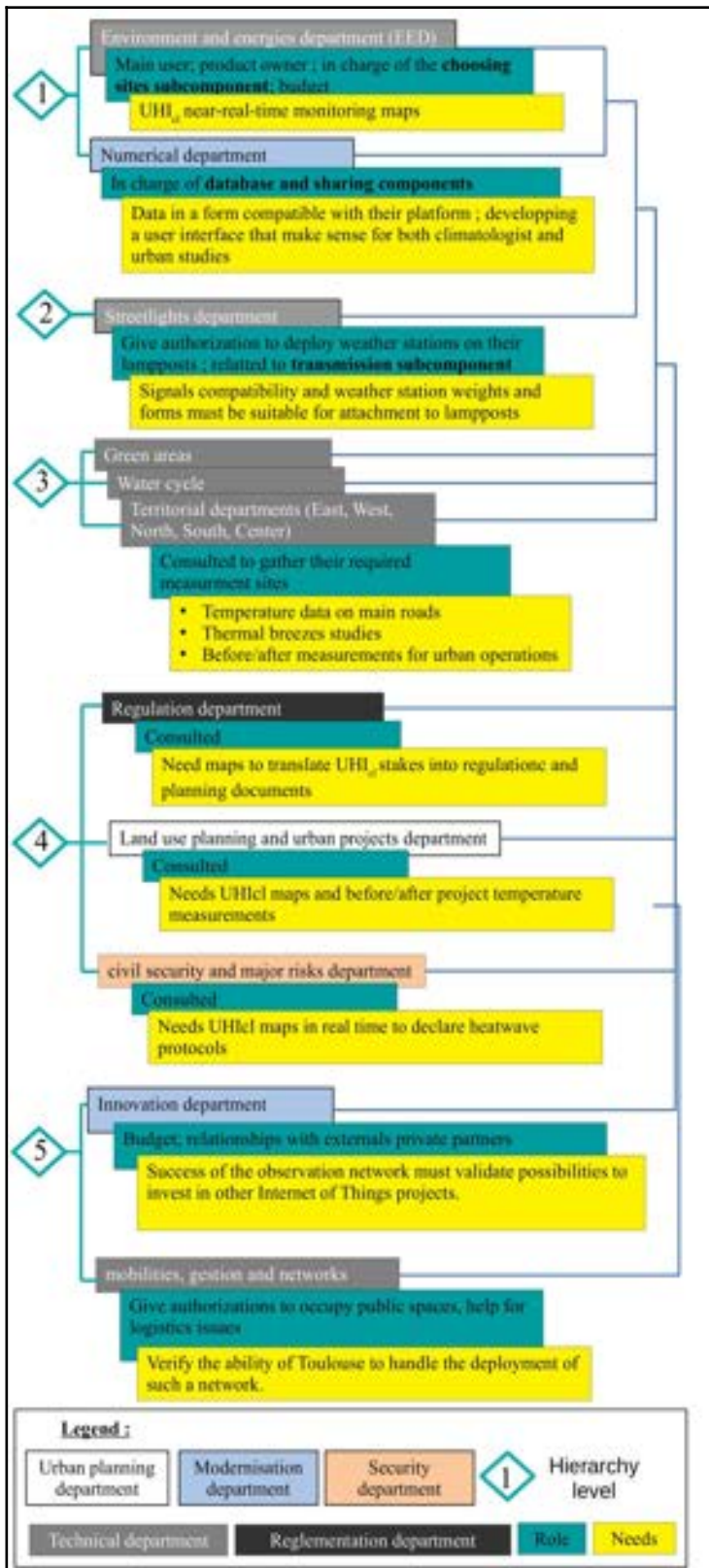


Figure 12, charte d'organisation des services climatiques urbains au sein de la Métropole. Le schéma montre les niveaux hiérarchiques sur la priorisation des besoins (non du décisionnel), les compétences au sein de la métropole, les besoins exprimés et le rôle joué pour les services climatiques.

La mise en place de co-construction sert également de cadre au travail scientifique organisé par le CNRM et le LISST. De ce fait, chaque composante (figure 6) a été investie également par le monde de la recherche. La partie suivante présente donc le choix des sites de mesures, la solution technique retenue pour les capteurs et les technologies de télécommunications ainsi que l'organisation des données. Ces résultats intègrent les décisions prises lors de la co-construction avec les différents acteurs.

Chapitre III. Implantation d'un réseau de stations météorologiques pour l'observation et la caractérisation de l'îlot de Chaleur Urbain sur le territoire de Toulouse Métropole.

III.1. Déploiement de la composante observation des services climatiques de Toulouse par le monde de la recherche.....	67
III.1.A. Caractériser le territoire à l'aide d'outils cartographiques et des mesures de terrain....	68
III.1.B. Choix des sites : la traduction de besoins opérationnels en sites de mesures.....	96
III.1.C. Présentation de la solution technique.....	106
III.1.D. Déploiement des stations météo.....	110
III.2. Composantes monitoring, base de données et partage: de services climatiques à un objet IoT.....	116
III.2.A. Transmission de la donnée : la passerelle.....	117
III.2.B. Stockage de la donnée : le noyau central.....	118
III.2.C. Livraison de la donnée et applications.....	119
III.3. Conclusion.....	121

La co-construction permet de définir (Chapitre II), avec les différents départements urbains, la gouvernance, les besoins et les applications souhaités vis-à-vis des services climatiques. Les départements urbains de la métropole peuvent dessiner les contours de leurs compétences et celles déléguées au monde scientifique. Le département du numérique a, par exemple, hérité de la composante « stockage, partage et mise à disposition » des applications développées. Le département de l'environnement et énergies, de son côté, coordonne, gère et organise les services climatiques entre les divers départements.

Le monde scientifique, via la présence du CNRM et du LISST, intervient au travers de multiples composantes des services climatiques de Toulouse (cf Chapitre II.1.A.) , dont deux font l'objet du chapitre présent :

- Tout d'abord la composante observation, en charge de la réalisation de mesures en vue de leur transformation ultérieure pour des études spécifiques, est présentée. Ainsi, la méthode du choix des sites de mesures, le déploiement du réseau, la technologie et les spécificités des capteurs sont présentées.
- Ensuite, les composantes du monitoring et du partage, en charge de la gestion de la base de données et de sa mise à disposition, est expliquée. Nous retrouvons dans cette section, ce qui fait lien entre les données mesurées des capteurs et la plate-forme du département du numérique. Cela concerne donc l'acheminement de la donnée dans le but de produire les applications souhaitées pendant le processus de co-construction (Chapitre II figure 12). La solution technique globale retenue à cette fin clôt la présentation opérationnelle de ces composantes.

III.1. Déploiement de la composante observation des services climatiques de Toulouse par le monde de la recherche

La composante observation est la composante qui va fortement déterminer la qualité des données produites pour les applications. Un choix incorrect des sites de mesures va créer des biais dans les analyses. Des capteurs inadaptés vont mener à des plages d'incertitudes trop élevées. Un placement défectueux de stations va générer des mesures suspicieuses. Une station doit être représentative de son environnement, sans pour autant être sous l'influence directe d'un élément isolé de celui-ci. Par exemple, une station située au milieu d'un parc suffisamment grand dans un espace ouvert est dite représentative du parc; mais si cette station se situe sous un arbre au-dessus d'un étang au milieu du parc, elle est représentative uniquement de cet espace précis et limité. Il est donc parfois difficile en milieu dense urbain ou végétal de trouver des emplacements corrects. Cette section décrit les démarches effectuées pour trouver des sites représentatifs. Le choix des sites de mesure s'appuie dans cette partie sur le cadre théorique décrit dans le II.2.B., notamment le tableau I qui comprend de nombreuses références bibliographiques dont des documents de l'Organisation Mondiale de Météorologie. Pour réaliser cette étape cruciale du choix des sites, une méthode à base d'approche cartographique et de terrain a été mise en place.

- **Approche cartographique : Les LCZ et les cartes thématiques.**

Un outil-clef d'aide à la lecture du territoire au regard des questions microclimatiques a été mobilisé. C'est la classification en zones climatiques locales (à l'échelle urbaine). D'autres thématiques ont aussi été mobilisées pour compléter cette lecture du territoire d'un point de vue microclimatique : des éléments morphologiques décrivant l'environnement naturel (les reliefs, les densités de végétation) et des éléments décrivant finement la structure urbaine (l'âge du bâti, la densité de bâti, etc.)

- **Approche sur terrain : campagne de mesure véhiculée.**

En complémentarité de l'approche cartographique, une campagne de mesures a été mise en place. Deux tracés ont été réalisés à plusieurs répétitions pour observer les températures en début d'après-midi et en début de nuit de différents tissus urbains. Cela permet de caractériser ainsi un ICU de jour (minima) et juste après le coucher du soleil (maxima).

III.1.A. Caractériser le territoire à l'aide d'outils cartographiques et des mesures de terrain

III.1.A.a. Les Local Climate Zones

-Le choix des LCZ

Brièvement présentées dans les chapitres I et II, les LCZ représentent un concept de climatologie qui aide à classer le territoire en différentes zones selon des caractéristiques définies. L'objectif est double, le premier est d'apporter une diversification à l'approche classique en dichotomie de l' « urbain » et du « rural » usitée pour les études de l'ICU. Les LCZ amènent également des informations sur les volumes, avec des indicateurs tels que la hauteur des bâtiments ou la rugosité. La forme aujourd'hui utilisée des LCZ est celle de I.D. Stewart et T. Oke, mais les premiers travaux, visant à mieux caractériser l'urbain du rural, sont plus anciens. Des études avaient déjà été réalisées de façon localisée. Chandler, en 1965, proposait de diviser Londres en quatre zones. Il prenait en compte le climat, la morphologie urbaine globale et la forme du bâti. Il était probablement le premier à avoir développé une classification basée sur le climat d'une ville. Auer, en 1978, proposait une classification de l'urbain et du rural pour la cité de St. Louis. Elle était basée sur la végétation et le bâti. Enfin, Ellefsen, en 1991, proposait 17 UTZ (Urban Terrain Zones / Zones de terrains urbains) à une échelle adaptable aux quartiers prenant en compte la géométrie du bâti, les matériaux de construction et les configurations des rues. C'est le premier système qui représente les structures de villes et matériaux, au sein de recherches portant sur les pluies acides. C'est en reprenant les caractéristiques des travaux de Auer et Ellefsen que Oke, en 2004 et 2008, dirigea une classification simple des zones urbaines en UCZs (Urban Climate Zones), jusqu'à la version de 2012 mobilisée dans cette thèse.

Le second objectif des LCZ est de standardiser cette approche de l'urbain, que ce soit pour communiquer avec d'autres climatologues travaillant sur l'ICU (Oke, 2006), ou tout simplement avec le grand public. En effet, c'est aussi un outil qui vulgarise les morphologies urbaines au travers de variables simples comme la hauteur des bâtiments ou leurs densités. Ainsi, dans cette optique sont apparues des initiatives comme le projet WUDAPT (The World Urban Database and Access Portal Tools) qui ont prolongé la portée des LCZ et permis une démocratisation du concept. Ce projet a pour vocation de produire une cartographie LCZ globale. La méthode de classification des LCZ se fait via des images satellites avec des supervisions humaines et informatiques (Bechtel & al, 2015). A l'échelle nationale, la cartographie des LCZ a été portée au travers, notamment, du projet

MApUCE (Masson & al, 2015). Un portail web a été mis en place¹ et une comparaison avec la méthode WUDAPT a été réalisée (Hidalgo & al, 2019).

Travailler avec le concept de LCZ apporte donc un double bénéfice pour des études de l'ICU dans le cadre de services climatiques. Il permet de correctement caractériser le territoire d'étude pour mieux choisir les sites d'observations. Ensuite, il fournit un outil de travail mobilisable dans les réunions avec les départements urbains dans le cadre de la co-construction de par sa nature de modèle simplifié et vulgarisé des territoires urbains, au travers d'un vocabulaire familier à l'urbanisme (Dumas, 2016). Comme souligné précédemment, il est important d'adapter le langage lors des exercices, des réunions et des ateliers de co-construction, cela fait partie de la phase d'acculturation des acteurs. Cette étape est donc en demande d'outils telles que les LCZ. Enfin, puisque la cartographie LCZ est disponible pour de très nombreux territoires en France, leur utilisation permet également une certaine reproductibilité du travail réalisé.

1 <https://mapuce.orbisgis.org/>

- Présentation des LCZ :

Il y a au total 17 LCZ (figure 13). Il y a deux catégories et une sous-catégorie :

- Première catégorie : les zones climatiques avec du bâti. Elles sont classées selon la hauteur du bâti moyen et sa densité.
- Deuxième catégorie : les zones « naturelles », délivrant des informations sur la nature du sol et la végétation.
- Enfin la sous catégorie « altération d'états » apporte des informations sur le sol et la végétation : sec, humide, enneigé ou sans feuille.

Les LCZ peuvent se combiner, donnant ainsi des sous-classes. Nous combinons alors des informations sur le bâti avec des informations sur le sol et la végétation. Bien que peu usitée, l'idée reste la même : apporter de nouvelles manières de classer les territoires. Dans certains cas, des LCZ peuvent ainsi être créées pour coller un peu plus à la réalité du terrain. C'est le cas du travail réalisé par l'IAU (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme), renommé depuis Institut Paris Région, et de sa cartographie des LCZ de l'île de France². Dans le cadre de leur travail au sein du SDRIF (schéma Directeur d'Île de France), une classification LCZ a été utilisée dans laquelle une classe « E.b - Cimetière arboré, minéral/végétal » a été rajoutée. C'est une sous-classe de la LCZ « E.Roche nue, pavés, macadam ». En effet, les cimetières, en France et plus spécifiquement à Paris, peuvent être particulièrement arborés tout en ayant un sol imperméable ou couvert de minéraux. Cependant, la classification utilisée pour décrire Toulouse Métropole se réfère aux LCZ classiques, et seulement onze d'entre elles se trouvent sur le territoire (cf.cadres rouges sur la figure 13).

2 https://cartoviz.institutparisregion.fr/?id_appli=imu&x=650605.4973108575&y=6861149.10374988&zoom=6

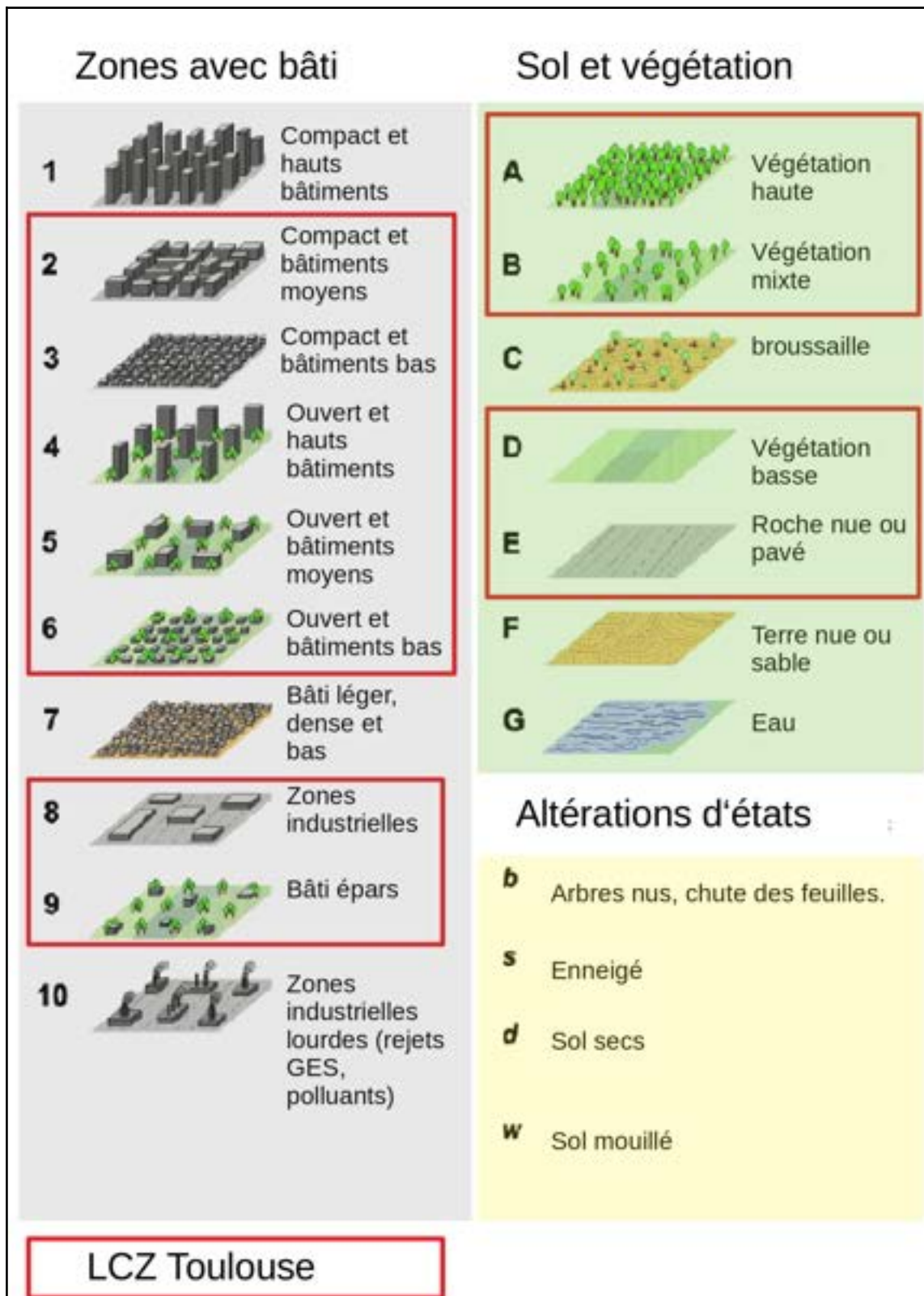


Figure 13, les 17 zones climatiques classiques (Stewart et Oke) et les 11 utilisées à Toulouse.

Chaque LCZ dispose d'une fiche descriptive présentant ses caractéristiques (figure 14). Chaque fiche se compose de divers éléments.

- Une description textuelle de quelques lignes en haut de fiche. Son but est de fournir des informations sur la localisation de ce type de LCZ, ses géométries, etc.
- Une description visuelle. Des séries de photos prises à partir du sol ou d'angles élevés.
- Les plages de variables théoriques, ou plutôt typiques, initialement caractérisées pour l'urbanisme d'Amérique du Nord
- . Il y a 10 variables pour les LCZ : le facteur de vue du ciel, le ratio hauteur des bâtiments/largeur des rues, l'albédo, l'admittance, la hauteur moyenne, la classe de rugosité (pour l'écoulement des vents), les pourcentages de surfaces imperméabilisées, bâties et perméables, les rejets de gaz anthropiques.

Les fiches descriptives des LCZ apportent des éléments qui affinent la classification. Elles sont déclinables pour chaque territoire pour s'adapter aux spécificités locales. L'urbanisme pouvant varier d'un pays à un autre. Par exemple en France l'urbanisme dit Haussmannien représente particulièrement bien la LCZ 2, qui est un bâti dense et moyennement élevé. D'un autre côté la LCZ 8, qui sert à décrire les zones industrielles, n'est pas forcément un outil satisfaisant pour représenter les zones industrielles françaises qui disposent parfois de surfaces végétalisées plus marquées que les valeurs théoriques. Lorsque les données sont disponibles, des études peuvent être réalisées pour comparer les valeurs théoriques à celles de LCZ locales (Zheng & al, 2018), permettant ainsi d'apporter un regard local sur un concept mondial. Dans le cadre du projet MApUCE, les LCZ de Toulouse ont été réalisées et sont disponibles en fiches descriptives.

LCZ KEY	ZONE NAME	#
ZONE DEFINITION		
<p>Form: Description of building geometry, construction materials, land cover, tree density, and human activity. Function: Land uses most likely associated with this zone. Location: Expected location of the zone (core, periphery; city, countryside). Correspondence: Comparable zones in the urban classification systems of Oke (2004) and Ellefsen (1990/91).</p>		
ZONE ILLUSTRATION		
<p>Objects</p> <ul style="list-style-type: none">  Buildings heavy materials  Dwellings lightweight materials  Trees/plants <p>Land cover</p> <ul style="list-style-type: none">  Low plants  Rock or paved  Soil or sand  Water 	<p>High-angle photographs (© I.D. Stewart, Can Stock Photo Inc.)</p>  <p>Low-level photographs (© I.D. Stewart, Can Stock Photo Inc.)</p> 	
ZONE PROPERTIES		
<p>Sky view factor ψ_{sky} 0 – 1</p> <p>Aspect ratio H/W 0 – 3⁺</p> <p>Mean building/tree height z_{31} 0 – 50⁺ m</p> <p>Terrain roughness class 1 – 8</p> <p>Building surface fraction λ_b 0 – 100 %</p> <p>Impervious surface fraction λ_i 0 – 100 %</p> <p>Pervious surface fraction λ_v 0 – 100 %</p> <p>Surface admittance μ 500 – 2,500⁺ J m⁻² s^{-1/2} K⁻¹</p> <p>Albedo α 0.02 – 0.5</p> <p>Anthropogenic heat flux Q_F 0 – 400⁺ W m⁻²</p>	<p>Fraction of sky hemisphere visible from ground level. Varies with height and spacing of buildings and trees. Affects surface radiational heating/cooling.</p> <p>Mean height-to-width ratio of street canyons (LCZs 1–7), building spacing (LCZs 8–10), and tree spacing (LCZs A–G). Affects surface airflow and radiational heating/cooling.</p> <p>Geometric average of building heights (LCZs 1–10) and tree/plant heights (LCZs A–F). Affects surface reflectivity, flow regimes, and heat dispersion above ground.</p> <p>Davenport <i>et al.</i> (2000) classification of effective terrain roughness (z_0) for city and country landscapes. Affects surface reflectivity, flow regimes, and heat dispersion above ground. See Table 5 for class descriptions.</p> <p>Proportion of ground surface with building cover. Affects surface reflectivity, flow regimes, and heat dispersion above ground.</p> <p>Proportion of ground surface with impervious cover (paved or rock). Affects surface reflectivity, moisture availability, and heating/cooling potential.</p> <p>Proportion of ground surface with pervious cover (bare soil, vegetation, water). Affects surface reflectivity, moisture availability, and heating/cooling potential.</p> <p>Ability of surface to accept or release heat at local scale. Affects surface heat storage and heating/cooling rates. Varies with soil wetness and material density. In dense tree canopies (LCZ A), the “surface” is undefined and admittance is unknown.</p> <p>Surface reflectivity at local scale and under a clear midday sky. Affects surface radiational heating potential. Varies with surface color, wetness, and roughness.</p> <p>Mean annual anthropogenic heat flux density at local scale. Heat sources include vehicle engines, industrial/domestic combustion processes, space cooling/heating, and human metabolism. Varies significantly with latitude, season, and population density.</p>	

Figure 14, canevas explicatif d'une fiche LCZ.

-Cartographie des LCZ sur Toulouse Métropole

La méthode classique d'attribution des LCZ utilise un carroyage de plusieurs centaines de mètres. La méthode pour réaliser la cartographie des LCZ sur Toulouse a été réalisée sur une échelle plus fine et sur des données non carroyées. C'est le découpage en unités spatiales de référence du projet MApUCE qui est mobilisé. Ce travail a été mené en amont de la thèse (Hidalgo & al, 2019). La méthode mise en place se base sur une méthode d'attribution supervisée à partir des variables de végétation, de sols imperméables et du bâti. Les données proviennent principalement de la BD TOPO de l'IGN. Lorsque l'on observe la carte des LCZ sur la Métropole Toulousaine (figure 15), nous pouvons noter la forte représentativité de 3 LCZ avec bâti : les LCZ 8 de zones industrielles, les LCZ 6 de type pavillons individuels résidentiels et enfin la LCZ 5, à savoir le bâti de hauteurs et densités moyennes..

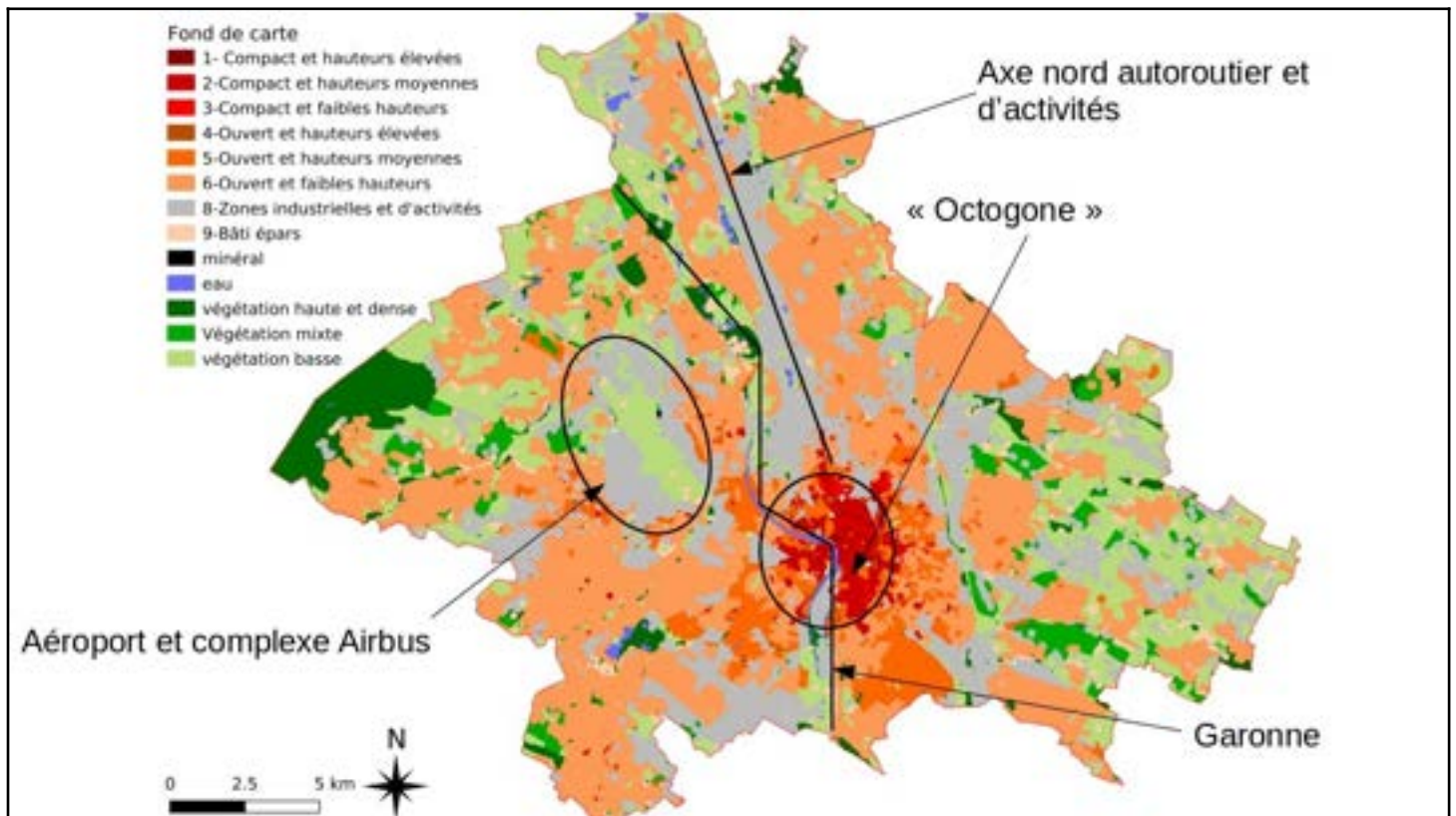


Figure 15, cartographie LCZ de Toulouse Métropole.

Sur la figure 15, nous observons une structure de métropole en étoile, avec un centre marqué par du bâti dense et moyennement élevé (LCZ 2 et LCZ 3). Le centre se délimite avec de grandes avenues pour dessiner un « octogone », frontière récurrente entre les LCZ 2 et 3, ou 3 et 5. Ce sont les territoires en densification urbaine. En s'éloignant du centre, les tissus urbains sont moins denses. Les LCZ 5, 6, 8 et 9 se succèdent alors. Autour de la ville se trouvent des espaces qui alternent les grandes zones pavillonnaires (LCZ 6) et d'activités (LCZ 8).

De grands axes rayonnent au-delà de la ville de Toulouse, comme l'axe nord autoroutier en direction de Paris (LCZ 8), l'axe sud-ouest vers Tarbes, ou l'axe sud-est vers Montpellier. La Garonne et le Canal du Midi dessinent également des axes avec la présence, sur la zone hors digue du fleuve au nord de Toulouse, de poches de végétation (cultures, parcs et ripisylves).

Le territoire administratif de la Métropole, composé de 37 communes, ne s'étend pas au-delà de Toulouse au sud. Le territoire d'étude est donc composé uniquement de la partie nord de l'unité urbaine totale. De fait, le gradient urbain, ou se succèdent les LCZ 5 puis 6 vers 9, n'est pas observable sur toute la partie sud et sud-ouest.

III.1.A.b. Les reliefs, l'âge du bâti, les densités de végétation et de bâti

Lorsque nous observons les variables mobilisées par les LCZ, nous nous apercevons d'un manque d'informations sur certaines thématiques qui jouent un rôle fondamental dans le climat local.

Le relief, par exemple, est un élément essentiel en météorologie urbaine et pourtant absent des LCZ, comme le souligne Stewart en 2018, qui propose d'intégrer dans les LCZ des informations sur ce dernier. Ce sont ses études sur la ville de Manizales dans le centre de la Colombie qui mettent en lumière ces insuffisances de la classification LCZ lorsqu'il y a spatialement une homogénéité des LCZ et des reliefs complexes. Il propose de se baser sur une classification orographique des milieux urbains (Wanner et Filliger, 1989) pour apporter cette complémentarité aux LCZ. Dûe à cette récente proposition non endoctrinée, la classification de Stewart n'est pas utilisée, mais le relief est mobilisé.

Le principe que nous avons appliqué pour le choix des autres données est le même que celui évoqué par Stewart. A savoir que lorsqu'une LCZ occupe un large territoire, il est nécessaire d'aller à l'intérieur de la zone considérée afin de dégager de nouvelles clefs de lecture qui impactent le climat local, comme le relief.

La végétation, par exemple, joue un rôle important dans la gestion de l'ICU. C'est une variable déjà présente dans les LCZ, exprimée par une plage de densité de végétation pour chaque LCZ. Cependant, la densité de végétation ne donne pas d'information spatiale, et les méthodes de représentation graphique des LCZ peuvent ainsi faire disparaître des espaces végétalisés localisés comme les parcs. La structure du découpage du territoire du projet MApUCE, utilisée pour la cartographie LCZ, par exemple, est construite à partir des axes routiers, ferroviaires et maritimes. Cela fractionne certains ouvrages. Ainsi le Canal du Midi ou le Canal de Brienne sont séparés dans la longueur. L'utilisation de la trame verte et bleue, qui regroupe au contraire et fait ressortir ces ouvrages, en juxtaposition des LCZ, permet d'éviter la disparition de ce type d'éléments.

Enfin, la dernière donnée mobilisée afin de compléter les informations amenées par la cartographie LCZ est l'âge du bâti. L'ICU est en partie généré par les rejets de chaleurs anthropiques, comme les chauffages en hiver ou les climatisations en été (Tremeac & al., 2012). Cependant, les logements, bureaux ou bâtiments d'activités ne vont pas réagir de la même manière selon les normes utilisées lors de leurs constructions. Les grands ensembles, construits dans les années soixante, disposent d'isolations de mauvaise qualité et laissent échapper de la chaleur, jusqu'à leurs éventuelles rénovations. De fait, l'année de construction du bâti permet de faire ressortir, au sein d'une même LCZ, différents tissus urbains.

Le choix de ces trois données conjointes aux LCZ est aussi guidé par la volonté d'utiliser des données issues des Systèmes d'Informations Géographiques aisément accessibles, et visuellement évocatrices, comme les LCZ. L'utilisation de la trame verte et bleue permet, par exemple, dans le cadre de la co-construction, d'avoir un outil qui est déjà utilisé et manipulé par les départements urbains, que ce soit ceux de l'urbanisme, de l'environnement ou des transports. Il est alors parfois plus aisé de travailler avec ce type de cartographie « prêtes à l'emploi ».

L'approche se veut, à minima, reproductible sur n'importe quel territoire français : les données de reliefs, d'années de constructions et de TVB étant disponibles pour de nombreux territoires.

- Le relief

Pour prendre en compte le relief dans le choix des sites, des jointures spatiales sont réalisées entre la cartographie LCZ et un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de 1m de précision (montré en figure 16). A chaque LCZ est donc attribuée une altitude moyenne qui servira pour le choix des sites de mesures.

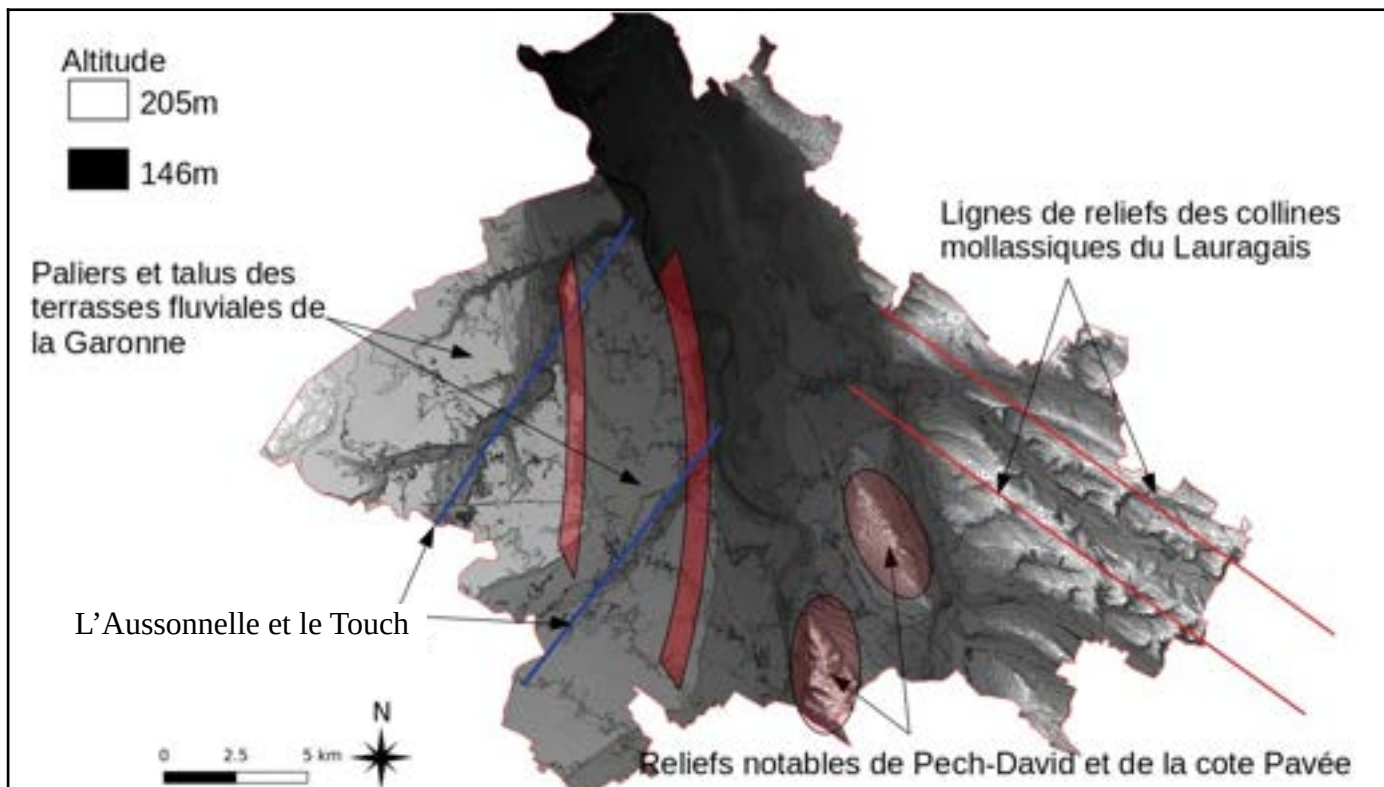
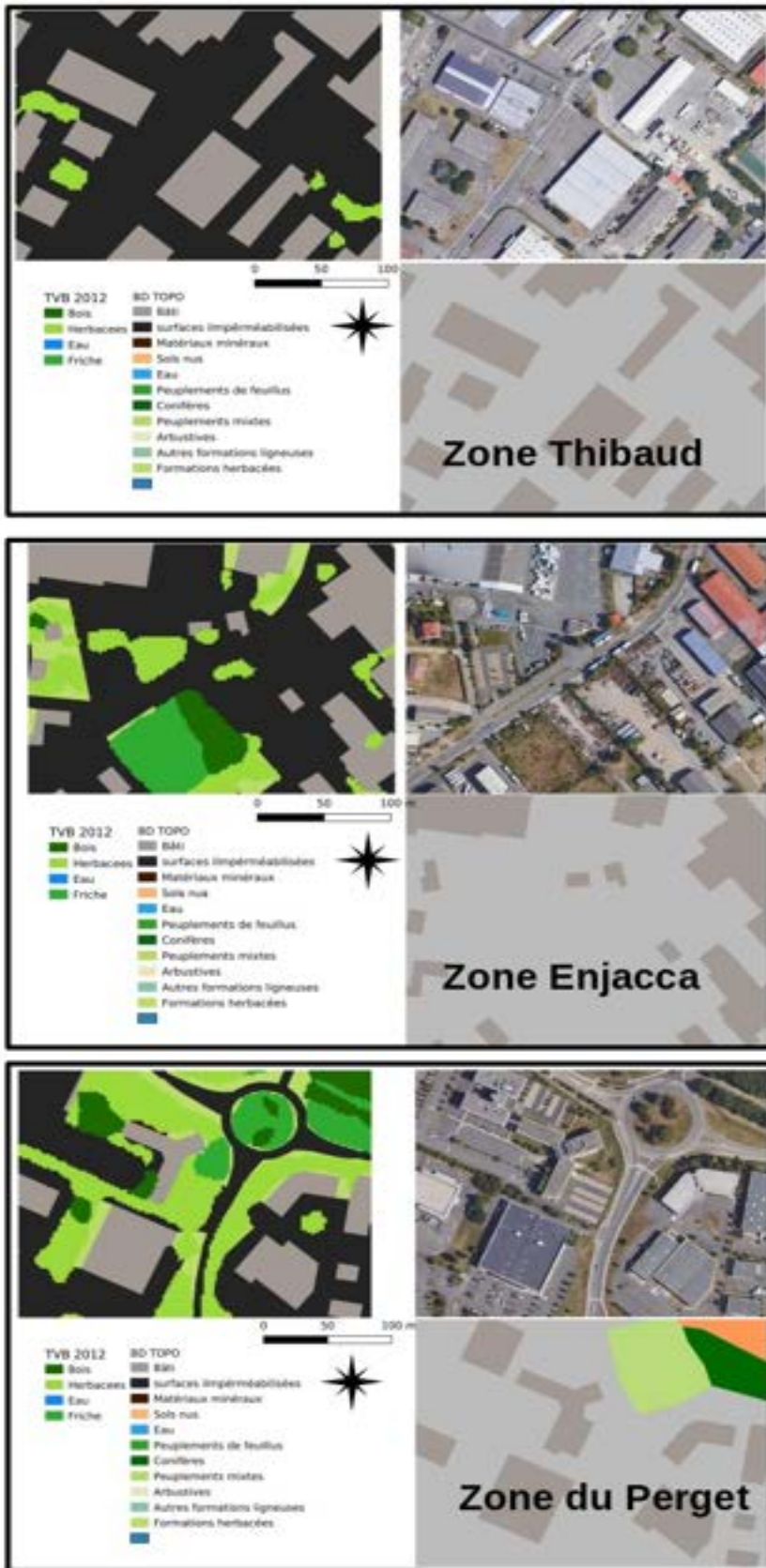


Figure 16, relief de Toulouse Métropole à 1m de précision.

Sur la figure 16, nous pouvons observer des différences entre l'est et l'ouest Toulousain. Du côté ouest, se trouvent les terrasses formées par la Garonne, avec des ruptures nettes d'altitude, allant de quelques mètres à deux dizaines de mètres. Elles sont traversées par les rivières du Touch et de l'Aussonnelle. Du côté est, les reliefs sont marqués par les paysages des coteaux du Lauragais avec de grandes lignes de crêtes espacées de centaines de mètres. Nous remarquons alors, en comparant avec la carte des LCZ, que l'étalement urbain, comprenant les grandes zones pavillonnaires ou d'activités (comme le complexe Airbus), se situent sur les terrasses de la Garonne, davantage propices aux grands aménagements et infrastructures de transports.

- La Trame Verte et Bleue (TVB)

La trame verte et bleue est une donnée « clef en main », livrée par la direction de l'environnement de la Métropole. Son utilisation est, comme indiquée en amont, optimale pour montrer des ouvrages tels que les cours d'eaux ou petits parcs, mais également pour classer les tissus qui peuvent présenter de grandes variations de densité de végétation et de surfaces perméables, comme les LCZ 8 : bâtiments industriels et d'activités. Comme montré sur la figure 15, c'est une LCZ présente à Toulouse sur de larges espaces, plutôt sur des zones aux reliefs peu marqués. La lecture de ces espaces bénéficie fortement de l'apport d'informations apportées par la TVB, comme le montre la figure ci-dessous (figure 17).



Sur la figure ci-contre, nous pouvons observer pour une même typologie LCZ (8, bâtiments d'activités), trois différents gradients de végétation et d'ouvertures des espaces (c'est à dire le ratio hauteur de bâti par rapport aux distances entre bâtiments).

Pour la zone Thibaud, la végétation est réduite à quelques arbres, les surfaces perméables sont minimales et seul l'axe routier central ouvre cet espace. Cependant, les bâtiments sont de faible hauteur (moins de 8m). Les activités sont mixtes : bureaux, commerces spécialisés du bâtiment d'intérieur (visseries, peintures, placardistes).

La zone En Jacca dispose de plus de zones perméables, avec la présence par exemple de friches (au centre de l'image). Les espaces sont plus ouverts et la zone d'activité n'est pas structurée autour d'un seul axe central. Les bâtiments sont cependant plus hauts que la zone Thibaud avec une orientation des activités sur le secteur du BTP et du fret.

La zone du Perget, enfin, combine de plus grands espaces verts entretenus, avec des haies séparatrices. Les bâtiments sont moins nombreux mais plus imposants, avec de grandes surfaces et de grandes hauteurs. Cela est dû à l'activité de commerces (Boulangers, Leroy Merlin, Decathlon) et d'immeubles de bureaux.

Figure 17 (ci-dessus), trois LCZ 8 présentes sur l'agglomération de Toulouse, montrant la variabilité intra-LCZ des surfaces perméables et de la végétation.

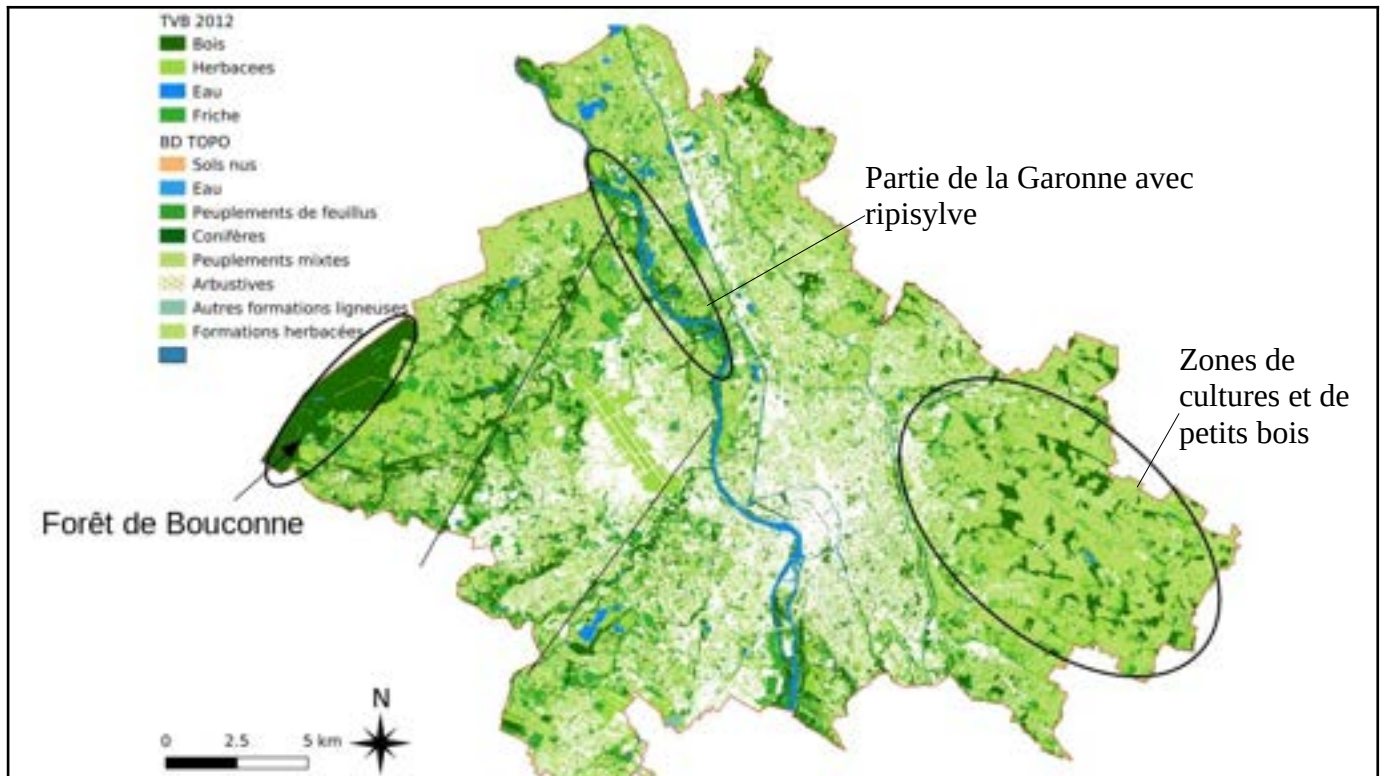
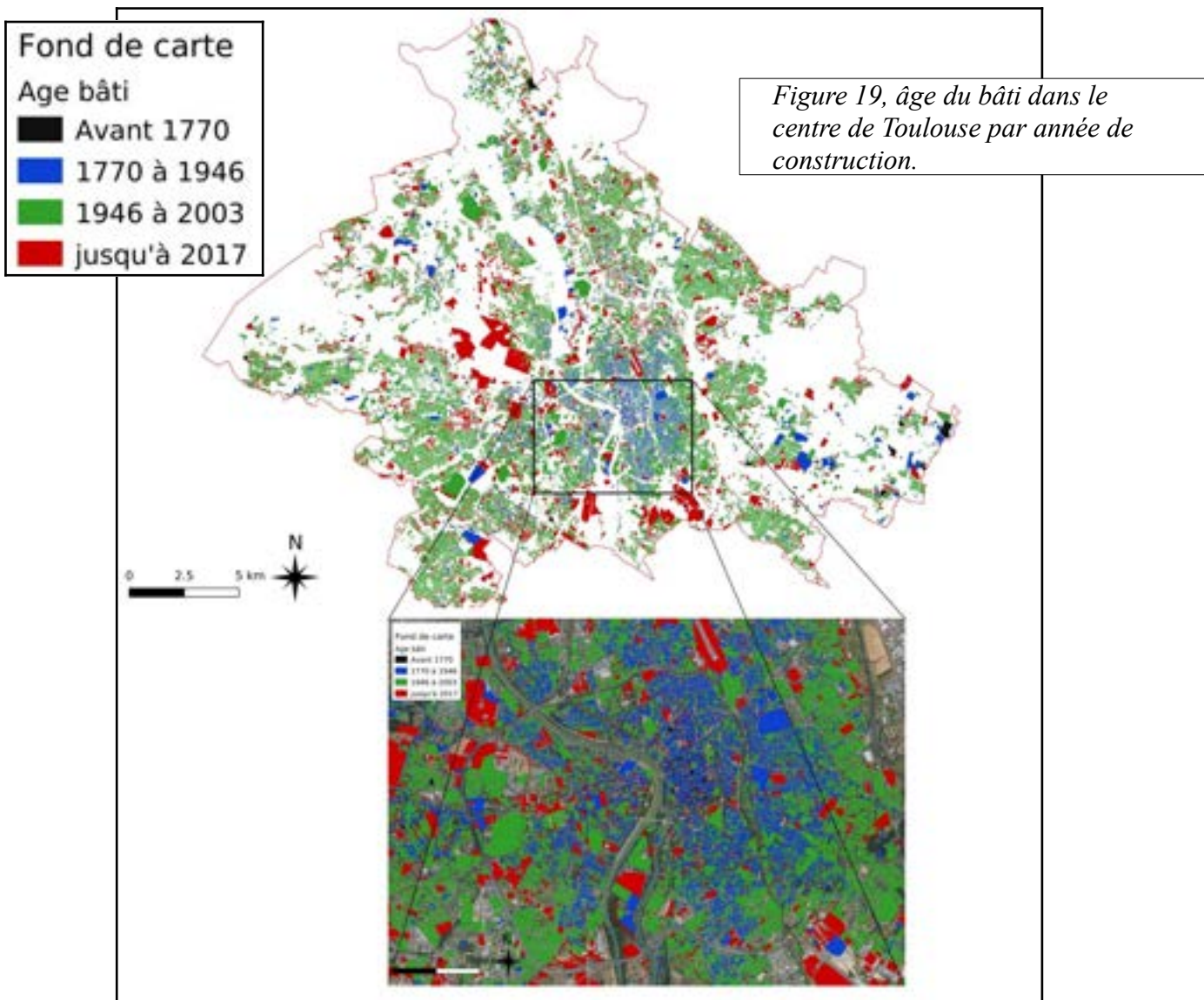


Figure 18, trame Verte et Bleue de Toulouse Métropole.

La Garonne est endiguée sur toute sa traversée de Toulouse, c'est seulement dans le nord où subsistent encore des ripisylves, là où l'Aussonnelle vient la rejoindre. C'est également à partir de là ou nous observons plus de cultures. Sur l'ouest de la Garonne, les tracés de canaux, comme le Canal du Midi, sont nettement visibles, contrairement à la cartes des LCZ. L'est Toulousain voit un morcellement de zones arborées, dans les vallées ou sur les reliefs, certains sont des forêts domaniales. A l'ouest du territoire se trouve sa plus grande étendue de LCZ type arbres hauts et denses avec la forêt de Bouconne. Nous pouvons noter qu'elle est située sur un point haut du territoire, les effets de relief se cumulant alors avec ceux de la végétation.

- L'âge du bâti

L'apport de l'âge du bâti est moins probant sur les communes péri urbaines de la métropole, qui sont pour la plupart vieilles de moins de quarante ans, que sur le centre ville de Toulouse au sein de l' « octogone » (figure 19). Les principales LCZ qui montrent des variations d'âge de bâti sont la LCZ 2 et 3, à savoir les zones bâties denses peu élevées (maisons de ville) et denses moyennement élevées. Pour la majorité, ce sont d'anciens quartiers populaires. L'information disponible étant l'année de construction, il faut être capable de déceler les LCZ n'ayant pas encore fait l'objet de rénovations urbaines marquées ou de grands projets urbains comme peuvent porter l'ANRU (Agence Nationale de la Renovation Urbaine). Les ateliers de co-constructions et le travail avec les autres départements pallient à cette absence de données. Ils peuvent aussi amener le choix de certains sites de mesures. Les sites peuvent, par exemple, être sélectionnés selon l'emplacement de futures rénovations et aménagements de quartiers pour ainsi disposer d'observations avant projet, pendant travaux, et après projet. Tout comme le relief, l'âge du bâti est rapporté via jointure spatiale en âge moyen par m² pour chaque LCZ.



Tout le pourtour Toulousain est assez récent, le bâti ne date peu voire pas d'avant les années soixante. C'est donc au sein de la ville de Toulouse qu'il faut aller chercher les variations d'âges les plus marquées. Il est alors possible de trouver des LCZ 3 (bâti dense de faible hauteur) anciennes qui sont les quartiers populaires. Nous remarquons ainsi que la rive gauche est moins ancienne que la droite, même si nous relevons encore des zones datant d'avant 1946 comme des cités jardins.

A partir de ce point, nous disposons de toutes les informations nécessaires pour mener à bien l'étape du choix des sites de mesures. En effet, grâce aux morphologies (via les LCZ), le relief, la TVB et les espaces de « passoires » énergétiques, le territoire peut-être analysé, théoriquement, au regard des grands facteurs d'influence du climat. Nous pouvons également ajouter les axes routiers majeurs, mais ceux-ci sont assez représentés et dessinés par les LCZ 8 autour desquelles ils s'organisent.

III.1.A.c. La campagne de mesures véhiculée

L'approche par la surface est une approche qualitative qui permet, au travers d'une analyse experte, de réaliser une lecture du territoire au regard du potentiel impact de la surface sur son atmosphère proche. Tous les phénomènes microclimatiques ne sont pas pilotés par l'occupation du sol. Les effets de l'orographie, de l'advection, etc. sont difficiles à estimer. Seules des mesures instrumentées ou la modélisation peuvent permettre de quantifier ces différences de température. Ainsi, il devient possible d'identifier des effets microclimatiques localisés.

A ces fins, une campagne de mesures a été planifiée en 2018, entre les mois d'avril et de juin, afin de correctement placer des stations sur un territoire qui est très étendu, avec une occupation du sol hétérogène et une topographie compliquée qui alterne des bassins versants et plaines à l'Est et des vallées/crêtes à l'ouest. L'équipe d'instrumentation (4M dans le texte), l'équipe VILLE et des membres extérieurs du CNRM participèrent à la campagne. Au total une vingtaine de personnes sont impliquées³ pour la réalisation d'une vingtaine de parcours divisés entre deux tracés : les parcours sur l'ouest de Toulouse Métropole puis les parcours sur l'est.

La démarche des parcours véhiculés de mesures de températures n'est pas nouvelle. Elle n'est d'ailleurs pas propre aux climatologues : des acteurs publics se sont pliés à l'exercice. L'ADEME, dans son guide « Surchauffe urbaine: recueil de méthodes de diagnostic et d'expériences territoriales (2018) » présente les mesures de températures véhiculées dans le cadre des études de l'ICU. Elle s'appuie alors sur l'expérience des études menées à Lyon par la collectivité. Le CEREMA de Nancy (2015) également, a réalisé des mesures véhiculées répétées en se basant sur une cartographie de LCZ. A Toulouse, nous pouvons noter sur l'étude du climat deux campagnes de mesures: la première a lieu à l'occasion du projet CAPITOUL où de nombreux parcours véhiculés sont conduits (Masson et al. 2008) ; la deuxième durant les projets PIRVE et EUREQUA où des mesures mobiles à vélo et à pied sont organisées. Les échelles spatiales sont alors beaucoup plus fines, les parcours sont de plusieurs dizaines de kilomètres pour CAPITOUL à quelques centaines de mètres pour EUREQUA dans un quartier au sud-ouest de Toulouse.

3 **Membres de l'Equipe VILLE** ,Bernard Emilie, De Munck Cécile, Dumas Guillaume, Goret Marine, Joulin Pierre Antoine, Lemonsu Aude, Le Roy Benjamin, Masson Valéry, Schoetter Robert
Membres de l'Equipe 4M : Aressy Patrick, Barrie Joël, Garrouste Olivier, Moulin Eric, Tzanos Diane, Bouhours Gilles
Membres du LISST : Hidalgo Julia, Rieublanc Sébastien

- Méthodologie des choix de parcours

Le design des parcours résulte d'une réflexion intégrant des contraintes temporelles, d'organisation et de méthodologie.

- Les parcours devaient répondre à une contrainte horaire. Ils devaient être réalisés à l'aide d'une voiture sur une durée théorique de 2h par parcours et ce, deux fois par jour. Le premier parcours a lieu en début d'après midi, le second après la nuit tombée, car nous souhaitons observer l'ICU de jour (faible) et de nuit (élevé).
- Une contrainte de point de départ et d'arrivée était imposée : tous les parcours partiront de Météo France. Ce point contraint le périmètre d'étude. Comme le territoire concerné par la campagne est délimité par celui de Toulouse Métropole, ce ne fût pas une limite majeure.
- Les aléas de la circulation, des déviations, de la météo ou des erreurs de parcours peuvent faire osciller la durée, certains axes sensibles devaient donc être évités, mais cela ne peut empêcher d'avoir des déconvenues lors des parcours qui ne sont pas anticipables.
- Pour obtenir les résultats probants, il était nécessaire de traverser le plus de transitions en termes de morphologies urbaines (d'une zone industrielle à une zone résidentielle, d'un centre-ville à la périphérie, etc.) ou naturelles (d'un point haut à un point bas, d'une forêt à un espace ouvert, etc.).

Les premiers tracés tentant de répondre à ces contraintes sont réalisés à la main sous QGIS. Les données présentées dans la partie III, choix des sites de mesures, sont mobilisées ainsi que des photos aériennes et l'apport de connaissances sensibles sur le territoire. Une fois les premiers parcours dessinés, ils sont discutés puis testés sur le terrain. Sont ensuite répétées les étapes dessin, discussion et test. Trois itérations ont eu lieu pour le parcours OUEST et deux pour l'EST (figure 20).



Figure 20, parcours EST et Parcours OUEST réunis (fond OSM et BING aeriels) .



- Choix du parcours OUEST : traverser le plus de transitions entre des tissus urbains différents

Pour le parcours OUEST , l'enjeu fût donc d'aller observer au nord des températures en des lieux traversant la Garonne puis suivre un axe parallèle à celle-ci et rentrer dans Toulouse. Pour atteindre le nord, les zones résidentielles de Tournefeuille (LCZ 6) de l'ouest sont alternées avec les zones d'activités du Pahin et d'En Jacca (LCZ 8) à Colomiers. Cette dernière est juxtaposée d'espaces végétalisés (LCZ basse végétation et forêt) comme champ et petits bois. La suite du parcours est une alternance de petites villes (LCZ-6) et de paysages agricoles avec bâti épars (LCZ 9), avec peu de ruptures dans les reliefs puisque nous sommes sur les terrasses de la Garonne.

Deux concessions majeures sont faites sur ce parcours. Elles concernent des Zones d'Aménagements Concertés (ZAC). La première est celle de Cornebarrieu avec la zones Monges Croix de Sud dans laquelle le premier parcours sillonnait les alentours des nouvelles constructions. La deuxième est celle de Blagnac, la ZAC Andromède avec un passage par les complexes industriels d'Airbus. La voiture est supposée la traverser minutieusement, oscillant entre tissus avec des constructions R+4/5 et R+1 et des espaces plus ouverts (LCZ 5,2 et parcs). Ces deux passages dans ces ZAC rallongent le parcours d'environ une heure, ils sont donc retirés. Il est envisagé de couvrir ces zones ultérieurement dans des études plus spécifiques.

- Choix du parcours EST : Observer l'îlot de Chaleur Urbain entre le coeur de Toulouse et l'est du territoire

Pour le parcours EST (figure 20), l'enjeu est d'obtenir, pour le retour du parcours du moins, une courbe d'îlot de chaleur urbain le plus proche possible à l'idéal théorique. Autrement dit, nous désirons avoir des entrées de ville avec des transitions entre territoires végétalisés et territoires peu urbanisés (LCZ 6 ou 5); puis de ces territoires à la ville centre (LCZ 3 et 2) . Sur le terrain, cela se matérialise dans la deuxième moitié du parcours par un passage en centre-ville par la Rue de Metz et la Place Esquirol, permettant ainsi de traverser la Garonne par le pont neuf vers Saint Cyprien, qui se situe sur la rive Gauche de la Garonne. Ce sont des espaces emblématiques du centre-ville de Toulouse, avec de fortes congestions urbaines. Dans la première moitié du parcours, le tracé mène aux coteaux du Lauragais les plus à l'est. Il traverse diverses variations de relief. Le parcours passe par les villes et villages de Quint-Fonsegrives, Drémil-Lafarge, Mons et Pin-Balma. Chaque ville présente un assemblage de LCZ 6 bâti résidentiel de type pavillon individuel et 5 bâtis de moyennes hauteurs et densités. Trois points marquent le tracé sur sa première moitié. D'abord un

passage sur l'île du Ramier au centre de Toulouse est effectué. C'est l'emplacement qui correspond au Parc des Expositions en déconstruction et les futures stations du projet LIFE (Chapitre II). Un second point correspond aux coteaux de Pech-David pour évoquer les effets du relief. Enfin, le tracé traverse l'université Paul Sabatier pour l'observation des températures sur son campus doté d'alignement de bâtiments R+4 et espaces verts.

Sur ce parcours, une seule concession est opérée. A l'est du parcours, initialement deux coteaux supplémentaires sont à traverser. Ils remontent vers Beaupuy avant de redescendre vers Pin-Balma. La contrainte temporelle des deux heures par parcours est la raison de cette réduction de tracé, son impact est limité car de nombreux coteaux et reliefs sont déjà traversés par le tracé final.

L'instrumentation du véhicule⁴ (figure 21) est réalisée par l'équipe du 4M et les données sont recueillies à l'aide d'une Campbell. Elle est équipée de sondes de température, de pression et d'humidité sur son toit et d'un capteur de rayonnement. Sur sa portière arrière-gauche est visible le capteur de température de surface.



Figure 21, la Renault Clio II instrumentée. La sonde de température est sur le toit, sur sa portière arrière gauche est visible le capteur de température de surface.

4 Renault Clio II

- Données recueillies : liste des parcours

Les parcours étaient « jumelés » comme indiqué auparavant. C'est-à-dire que pour chaque parcours réalisé l'après midi correspond un parcours réalisé le soir, sauf cas particulier et événement imprévu (absence, maladie, etc.). Le plus gros aléa fût en réalité la météo. En effet, pour qu'un parcours soit réalisé, il faut qu'il y ait un ciel dégagé et peu, voire, pas de vent. Or la période des parcours fût marquée par des temps pluvieux et gris, étalant ainsi la durée de la campagne sans pour autant diminuer le nombre de parcours.

La juxtaposition des parcours OUEST et EST complets (figure 22) laissent apparaître des différences. Ce sont en fait des erreurs de parcours ou des déviations dues à des travaux.

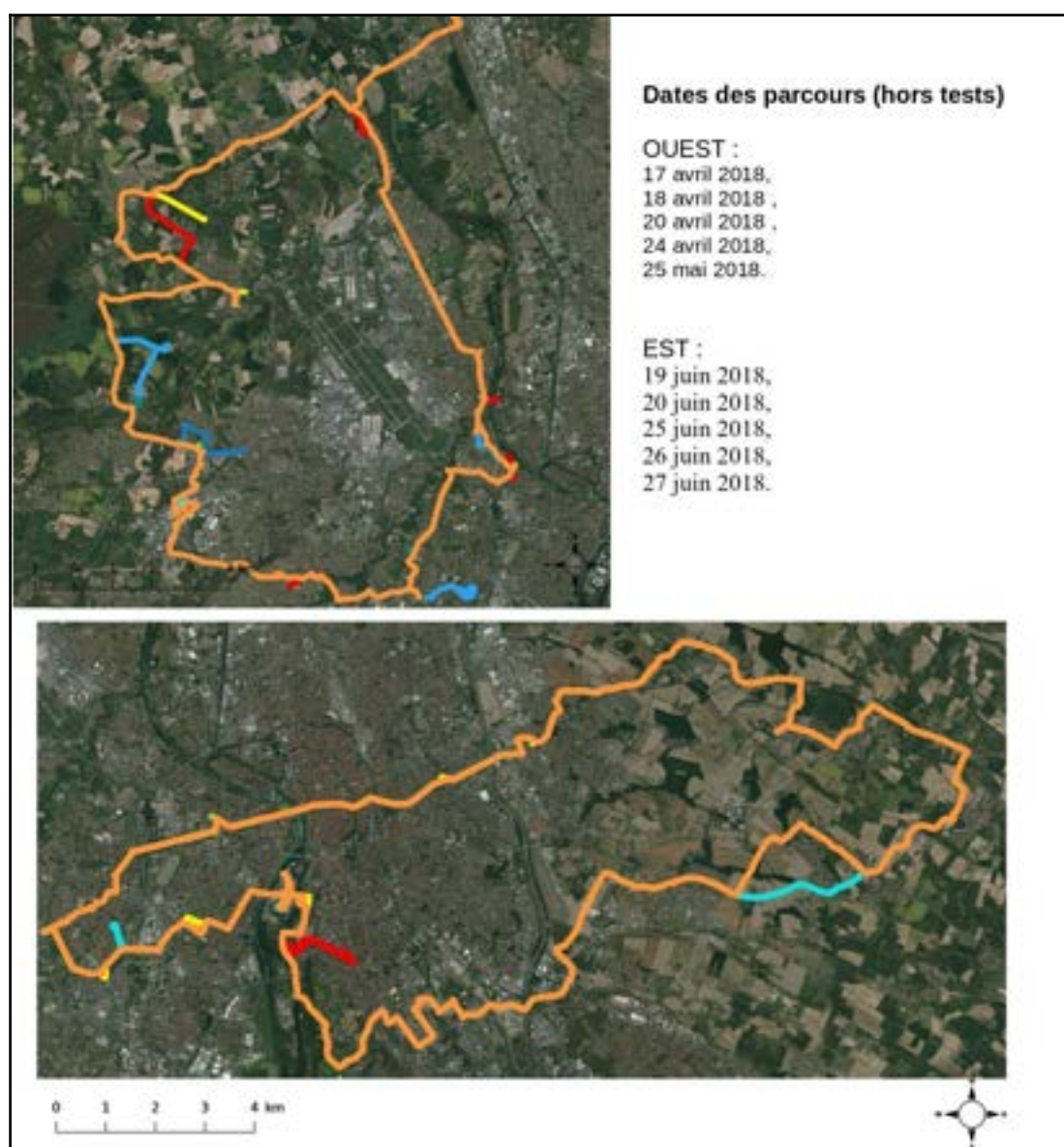


Figure 22, parcours EST et Parcours OUEST réunis (fond OSM et BING aeriels).

Exploitation de la donnée: post traitement

Pendant les parcours, toutes les secondes, ou presque, est recueillie une grande quantité de variables, dont les températures de l'air et de surface. Un post-traitement est appliqué (suppressions des doublons, suppressions des données dans le site de Météo France du démarrage et de l'arrivée, etc.). Deux corrections sont apportées à la température de l'air. Dans un premier temps, elle est corrigée de façon linéaire pour que celle de l'arrivée et du départ concordent. Ce type de correction est usité lors des parcours de courtes durées réalisés en conditions météorologiques dégagées si les points de départ et d'arrivée sont concomittants (Leconte, 2015). Il existe des méthodes qui corrigent les valeurs à partir de stations fixes présentes sur le parcours (Rodriguez & al., 2020). Cependant, nous ne disposons pas de suffisamment de stations pour appliquer cette méthode. Dans le cas de parcours de moins de 30mn, il est possible de travailler avec aucune correction, surtout si suffisamment de parcours sont effectués (Yan & al., 2020)

La seconde correction consiste à supprimer les périodes concordant avec des vitesses faibles en journée pour négliger les données qui peuvent correspondre à des périodes d'échauffement du capteur. Le calcul de la vitesse peut se faire selon plusieurs méthodes, la méthode Haversine, Cosinus ou avec Pythagore. La plus précise étant Haversine, car nos distances sont de l'ordre de quelques mètres ; il s'agit de la méthode que nous avons donc retenue. La suppression de ces données modifie alors l'amplitude de l'ICU observée de quelques dixièmes de degrés (figure 23).

Sur l'ensemble du parcours, le nombre de mesures supprimées est conséquent, mais l'impact de ces corrections sur la résolution spatiale est faible. Ainsi, pour chaque stop, feu de signalisation, rond-point, intersection, des données sont retirées. Ces suppressions s'opèrent donc sur une multitude de sites ponctuels qui ont un faible impact sur la résolution spatiale de la donnée tout le long du parcours.

Ce filtre est appliqué uniquement sur les parcours de l'après-midi car nous considérons que l'échauffement du capteur n'a pas lieu la nuit. Sur 7307 points de mesures, 4473 points sont réalisés à plus de 15kmh. Il demeure donc 61 % du nombre de mesures après correction. La traversée de la place Esquirol jusqu'au pont neuf compte 137 mesures retirées soit environ 4,8 % (figure 23) des données supprimées. La partie monument au mort/arc de triomphe compte pour 3,3 % . Chaque rond-point compte environ une dizaine de mesures supprimées. Les parcours corrigés sont ensuite mobilisables pour déterminer des points de mesures du futur réseau d'observation.

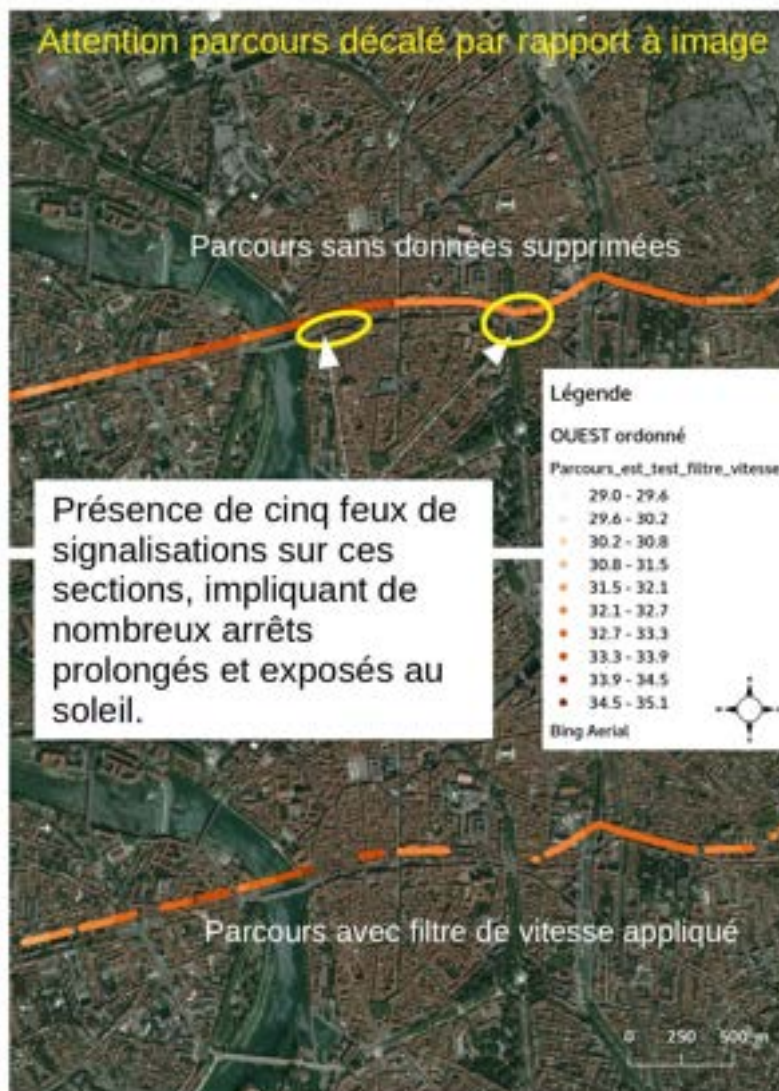


Figure 23, filtre appliqué sur la vitesse et zoom sur le centre-ville de Toulouse.

Comme nous le verrons par la suite, les valeurs des écarts de températures entre l'urbain et le rural dans l'après midi sont anormalement élevées. Ces températures élevées découlent de températures de surfaces élevées. Les observations montrent des valeurs de températures de l'urbain deux à trois fois supérieures que celles du rural. Par exemple, pour le 26/06/2018, les températures de l'urbain sont de 60 °C contre 25 °C.

- Résultats des parcours du soir avec intensité maximum de l'îlot de chaleur, réalisés après le coucher du soleil :

- **Parcours OUEST le soir le 17/04/2018:**

Pour l'ouest (figure 24 a), trois points peuvent être identifiés . Un point avec températures faibles sur l'ouest du parcours, au milieu des étendues agricoles. Un point avec des températures élevées se situe au nord-est, lorsque la Garonne est traversée et que nous rentrons dans l'axe industriel nord. Un second point chaud dans la ville de Toulouse aux alentours de la zone de Purpan, qui est un carrefour avec un trafic routier conséquent. L'ICU est marqué avec une amplitude de 9°C environ entre l'avenue de Grande-Bretagne (Purpan) et l'ouest de la Métropole (vers la forêt de Bouconne). Cette valeur est le maximum observé. Pour les autres soirs, les différences de températures maximums observés se trouvent dans le tableau 8.

Date	Minimum	Maximum	ICU
17/04/2018	11,52	19,79	8,27 °C
18/04/2018	15,4776	21,284	5,8 °C
20/04/2018	15,72	22,39	6,67 °C
24/04/2018	15,18	23,31	8,13 °C
05/04/2018	8,9636	15,29	6,33 °C

Tableau 8, minimums, maximums et îlots de chaleurs pour les différents parcours ouest effectués après le coucher du soleil, exprimés en °C.

- **Parcours EST le soir le 26/06/2018 :**

Pour l'est (figure 24 c), deux points sont à relever. Il n'y a pas de point avec des températures aussi élevées que l'urbain dans la zone des coteaux du Lauragais. Ensuite, les points avec les températures les plus faibles se situent dans les zones avec de forts effets de relief. L'amplitude de l'ICU mesuré au maximum ce soir se situe autour des 8 degrés.

-Résultats des parcours de l'après-midi, réalisés environ 1h30 après le zénith avec intensité maximum de l'îlot de chaleur

Pour l'ouest (figure 24 b), comme le soir, la section après la Garonne est sensiblement plus élevée en température. L'effet d'ICU, bien que moins marqué, est présent avec plus de 4 °C (au maximum). La zone chaude de l'avenue de Grande-Bretagne est moins marquée l'après midi. Nous relevons la multitude de petits îlots de chaleurs à chaque traversée d'une zone bâtie. Lorsque nous analysons les données sur les entrées et sorties de ville nous pouvons remarquer des décalages avec les températures mesurées, sûrement dû à l'inertie du capteur.

Les zones commerciales ou d'activité (LCZ8), traversées à multiples reprises dans ce secteurs ouest, montrent un excès de température moins marqué que le centre-ville mais néanmoins bien présent sur ce parcours du soir (21 °C versus 24,5°C en centre-ville à la même heure).

Pour le parcours situé à l'est l'après-midi (figure 24 d), l'îlot de chaleur est présent avec une amplitude d'environ 4,5°C au maximum. C'est à relativiser au regard des températures de surfaces. Contrairement au parcours ouest, les variations de températures observées dans l'est sont plus sujettes à des variations de températures inhérentes aux reliefs qu'aux espaces avec bâti.

La campagne de mesures permet de disposer d'un outil de lecture pour appréhender le territoire complémentaire aux autres cartographies disponibles. Il est à noter que le nord-est de la Métropole ne fait pas l'objet de parcours de mesures. Or, lors des rencontres avec les départements urbains, et en particulier avec le service de la planification et des permis de construire, ce secteur de la Métropole s'est révélé être en mutation rapide. Sur l'année 2019, presque un permis de construire sur deux octroyé concerne le secteur nord-est. La campagne étant terminée, nous n'étions pas en mesure de rajouter de parcours supplémentaires. Cependant ce point sera pris en compte dans le choix des sites de mesures avec des sites envisagés dans le secteur.

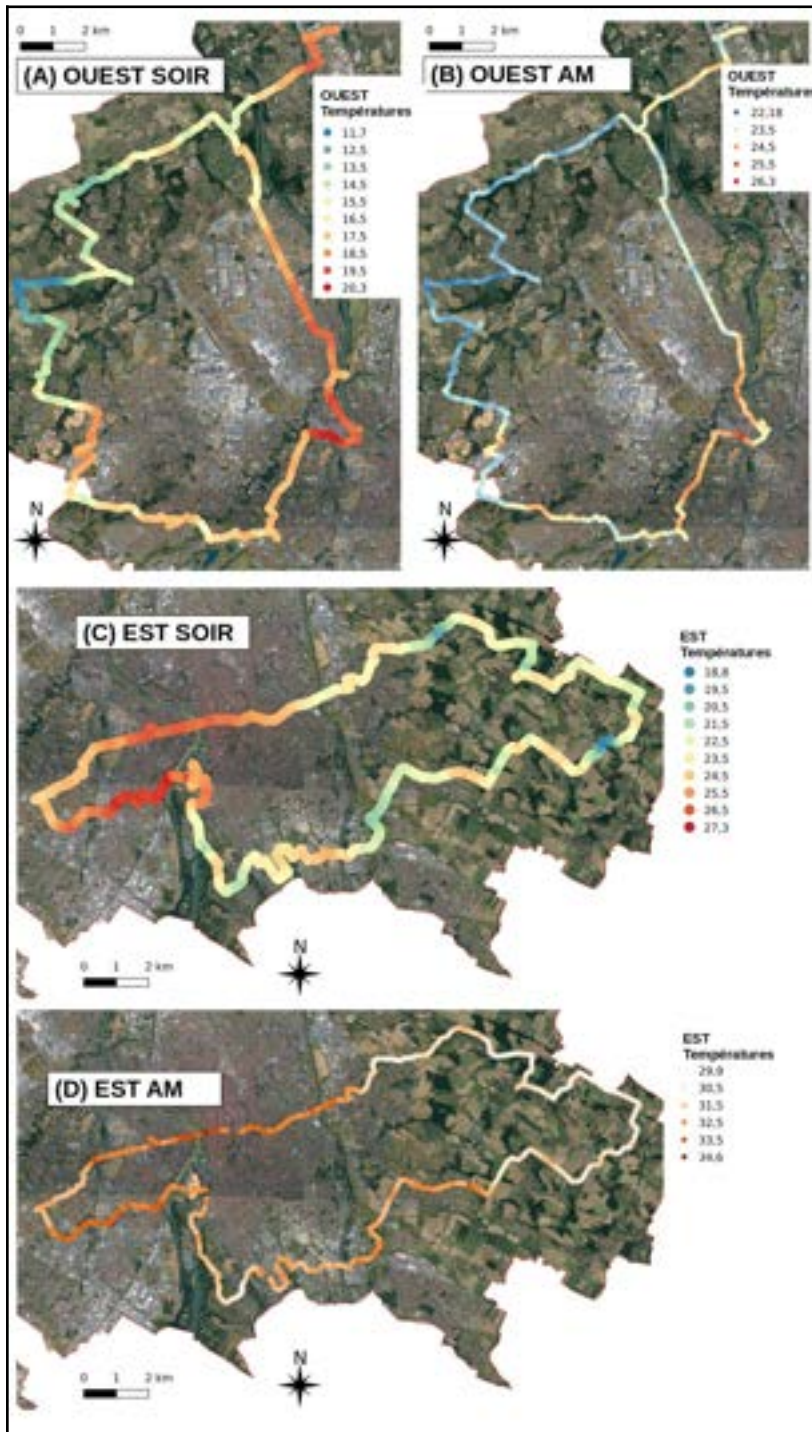


Figure 24, mesures pour l'ouest et l'est, AM et soir, jours avec les plus grandes intensités d'ICU sélectionnés.

La campagne de mesure vient compléter le panel d'outils de caractérisation et de description du territoire nécessaire à sa lecture climatique. Elle apporte, via des observations de variables météorologiques localisées, le versant terrain manquant à l'approche cartographique.

III.1.B. Choix des sites : la traduction de besoins opérationnels en sites de mesures

Le choix des sites de mesures est capital pour un réseau désirant monitorer l'ICU. Cette section propose de décrire la méthodologie du choix de chaque site. Ils sont mis en relations et regroupés à l'aide de thématiques ou de transects au regard de tous les éléments réunis jusqu'alors :

- Le cadre conceptuel fourni par l'OMM et des articles scientifiques (tableau 1).
- Les données cartographiques ou physiques comprenant LCZ, relief, TVB, densités de végétations et de bâti permettant d'appréhender le territoire sous différents aspects.
- Les résultats de la campagne de mesure véhiculée.
- Les doléances et des besoins des différents départements urbains contactés.
- Les objectifs de rendus comme:
 - Être capable de monitorer l'ICU en temps réel sous forme cartographique selon la méthode d'interpolation développée par le LISST.
 - Fournir des données de températures fiables pour produire toutes analyses ou études de formation, de spatialisation ou de quantification de l'ICU sur Toulouse Métropole.

III.1.B.a. Approche par transects et thèmes

A l'aide de toutes les informations réunies, une approche par étapes a été adoptée. Chaque point de mesure s'inscrit dans une thématique donnée pour un besoin ou une étude précise. Deux points peuvent alors être situés de part et d'autre du territoire tout en ayant le même thème, par exemple l'étude des LCZ 8 dites zones d'activités ou encore le thème « parcs » (figure 25). Lorsque des sites peuvent être connectés au même thème à l'aide d'une ligne invisible, cette ligne est appelée un transect. Par exemple, il existe un transect appelé «ICU est-ouest» (figure 26). Au total, huit transects et sept thèmes ont été créés. La section qui suit propose une description de la construction des différents thèmes et transects développés sur le territoire.

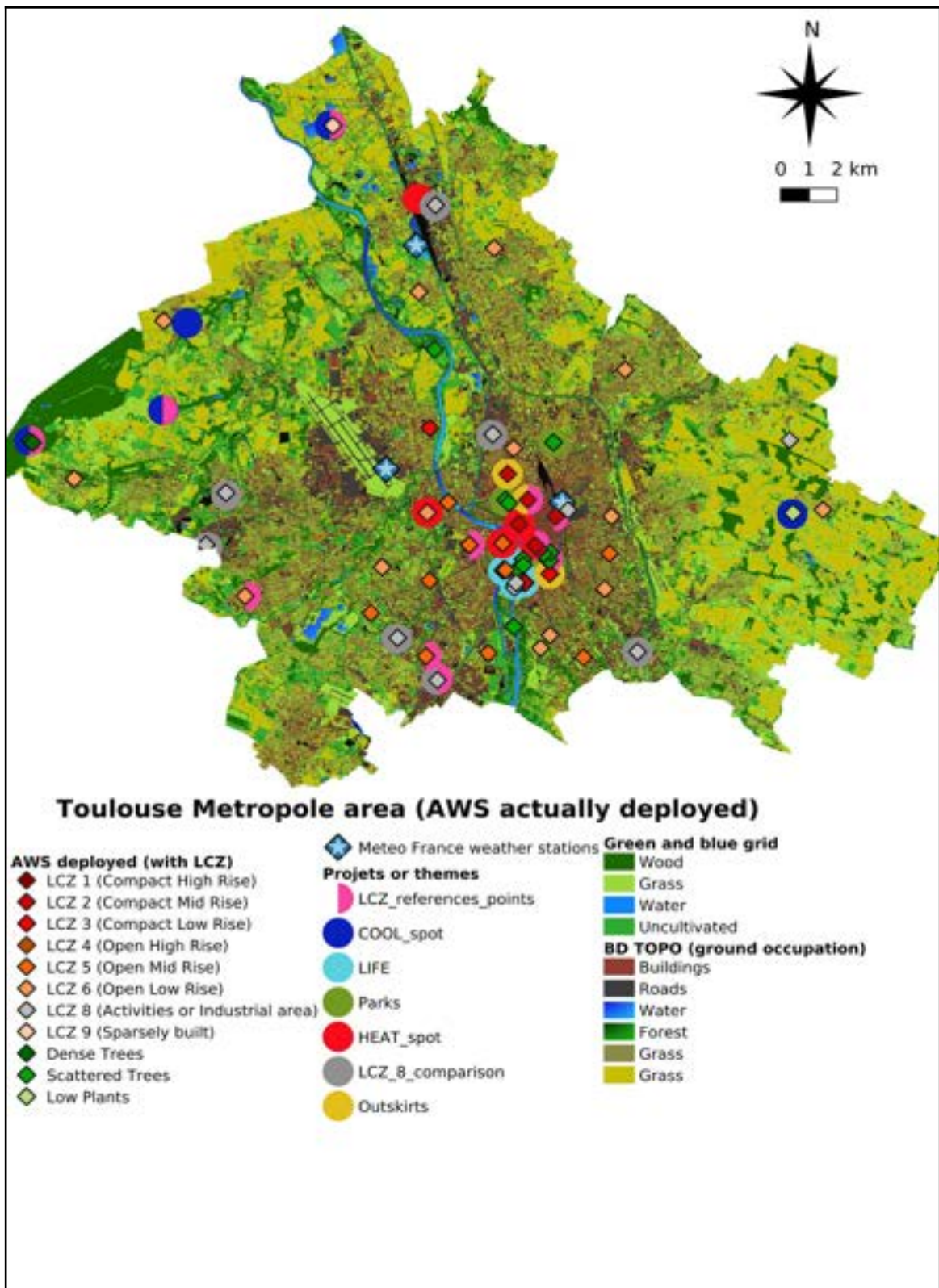


Figure 25, thèmes du réseau et LCZ de chaque point de mesure.

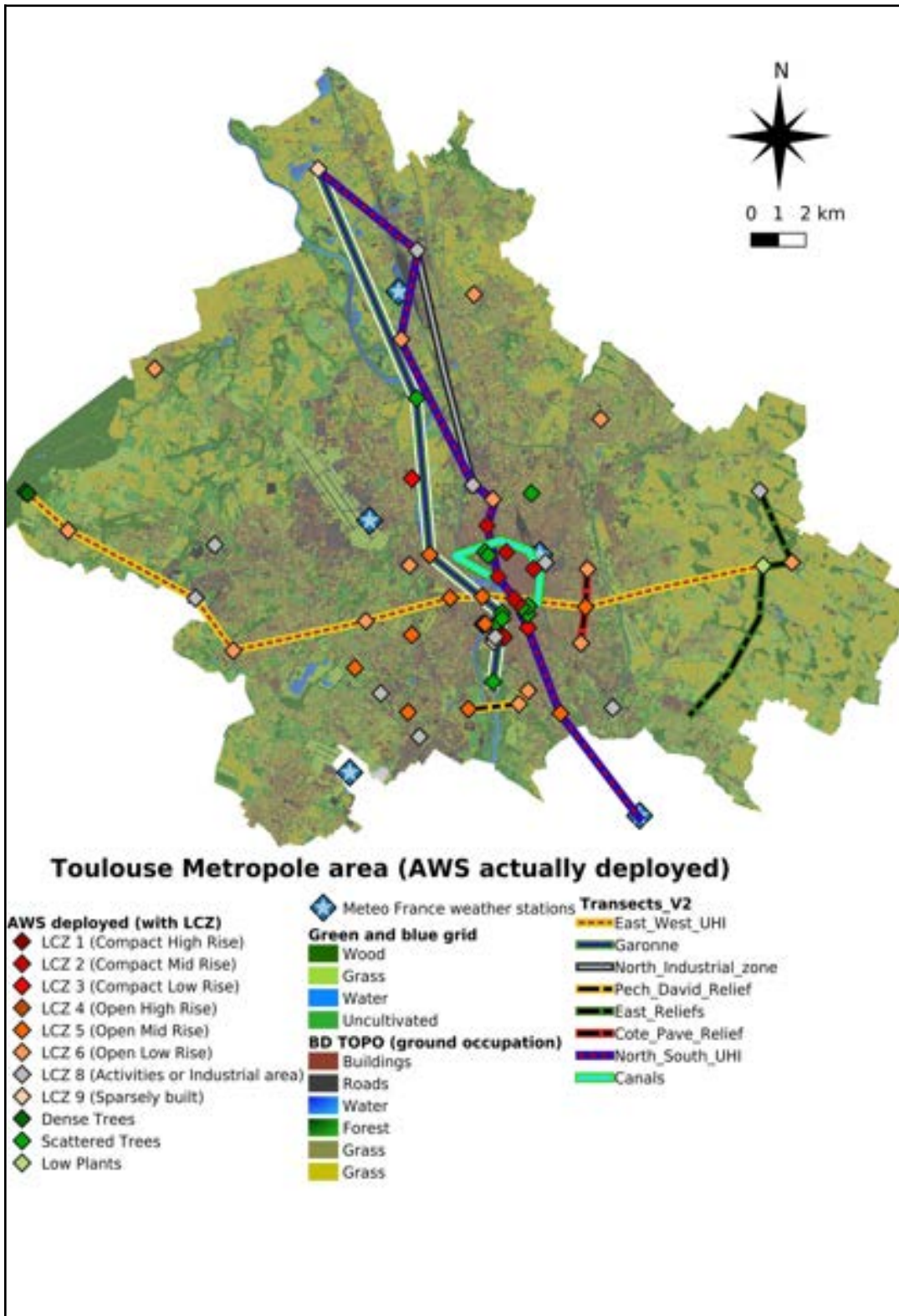


Figure 26, transects et LCZ de chaque point de mesure.

-Transect est-ouest : caractérisation de l'îlot de chaleur urbain

Pour le transect d'amplitude ICU est-ouest, qui se compose de 11 points, les LCZ permettent de calculer des estimations de l'amplitude thermique due à la ville. Les LCZ ont une disposition spatiale progressive (figure 15), avec une densité de construction croissante et une densité de végétation décroissante vers le centre-ville. Ce transect servira donc en premier lieu à la caractérisation de l'amplitude de l'ICU. Une fois le centre-ville dépassé, ce transect continue jusqu'aux coteaux de l'est dans le Lauragais. En outre, sur le site urbain hypothétiquement le plus chaud et l'espace vert le plus frais, les points de mesures sont respectivement attachés aux thèmes «point chaud» et «point frais», respectivement. Nous retrouvons ainsi des sites de mesures choisis grâce à la campagne de mesure.

-Transect Nord-sud : le gradient de températures du tissu industriel au centre-ville

La même méthode est alors appliquée au transect «nord-sud ICU». Ce transect s'étend au-delà de la zone métropolitaine pour se connecter à une station météo de Météo-France au sud, permettant au transect de contourner l'obstacle de la frontière politique de la zone métropolitaine.

-Transect Garonne : la température le long des abords du fleuve

La Garonne, qui traverse la ville, fait l'objet du transect éponyme. Il correspond à une suite d'espaces verts le long de la rivière à partir du nord de la ville. La principale difficulté de ce transect est que la rivière est contenue dans des digues de plus de dix mètres de haut. Il est difficile d'identifier les endroits où le sol est au niveau de la rivière, comme sur l'île d'Empalot. Une fois le réseau déployé, six sites seront dédiés à un tronçon de 25 km de la Garonne avec de bonnes conditions de mesure. La partie nord de la zone métropolitaine est constituée d'une série de secteurs industriels et textiles (LCZ 8; industriel) parallèles au fleuve. Les sites de ces secteurs sont associés à la partie nord du transect nord-sud de l'ICU.

-Transects de reliefs : observer les brises thermiques

Trois transects sont liés aux études portant sur le relief et les brises thermiques:

- « Reliefs de l'est » est associé aux coteaux à l'est.
- «Relief de la Côte Pavée» à la zone à l'est de la ville de Toulouse, c'est l'un des transects placés sur les deux reliefs notables du territoire.
- Le second transect prévu à cette fin est celui de «relief de Pech David», situé au sud du territoire.

Malgré l'effort dans le choix des emplacements afin de caractériser au mieux l'hétérogénéité du territoire, ces quatre transects ne couvrent pas toutes les variantes de chaque typologies de LCZ.

Or le réseau doit être capable de fournir des données pour des études par LCZ. Des sites de mesures supplémentaires hors transects sont alors choisis afin de compléter le potentiel d'analyse.

Comme nous l'avons vu, chaque LCZ peut être sélectionnée plusieurs fois en tenant compte de variables telles que le relief, l'âge du bâtiment, des densités de végétation ou du bâti ou encore de la situation géographique dans la zone étudiée. L'objectif est de permettre des analyses ayant pour base des intercomparaisons de LCZ comme le propose l'exercice en Chapitre V sur les LCZ 8 d'activités. Par exemple, s'il existe une zone LCZ 5-bâti ouvert et de hauteur moyenne suffisamment grande contenant à la fois un point d'altitude haut et bas, les deux points peuvent être sélectionnés car un seul des deux ne serait pas représentatif de l'ensemble de la zone. Les LCZ de types 6 (résidentiel) et 8 (activité), qui sont pour rappel parmi les LCZ les plus représentatives de la métropole toulousaine de par leurs surfaces, ont reçu une attention particulière. Ainsi, une LCZ 8 peut être choisie pour son trafic routier important alors qu'une autre sera choisie pour sa grande zone de bureaux avec un flux élevé de voitures uniquement le matin et en fin d'après-midi mais une quantité notable de chaleur rejetée par les systèmes de climatisations.

Un échantillonnage plus fin de chaque type de LCZ permettrait d'améliorer la caractérisation de la spatialisation de l'ICU. Néanmoins, dans le panel des sites choisis, des sites correspondant à leurs descriptions théoriques sur des territoires suffisamment grands pour y placer un capteur, en considérant cet emplacement comme représentatif de sa zone, sont disponibles pour les LCZ 8 d'activités, 6 pavillons individuels, 5 bâti de moyenne hauteur et peu dense et 3 bâti dense et de faible hauteur .

Sur le territoire, outre les LCZ qui n'existent pas, se trouvent des LCZ non mobilisables. Soit elles disposent de superficies insuffisantes, soit le bâti qui les compose est trop hétérogène.

Parmi ces LCZ, il est possible de citer la LCZ 1-bâti haut et dense. Elle est située en centre-ville de Toulouse et n'a pas la surface nécessaire pour être qualifiée réellement de cette typologie. C'est en fait un amalgame entre la 1-bâti haut et dense et la 2-bâti moyenne hauteur et dense.

Enfin il est aussi possible de trouver des LCZ qui ont été créées dans les années soixantes mais qui, dû à la rénovation urbaine qui s'opère sur ces territoires, ont subi d'importants changements et modifications. Par exemple, les zones LCZ 4-bâtiments de grande hauteur et peu

denses sont introuvables dans la métropole toulousaine . Soit elles ont évolué soit elles sont en train de le faire. Elles passent en zones LCZ 5-bâti de moyennes densités et hauteurs. C'est le cas par exemple du quartier d'Empalot ou de la Reynerie. Le réaménagement de ces espaces s'inscrit dans le cadre de la politique de la ville pour la rénovation des quartiers prioritaires. Empalot a donc beaucoup évolué en moins d'un siècle. Le quartier est passé de friches inhabitées et de sites industriels à un bidonville appelé le « champ du loup » puis aux grands ensembles des années soixante jusqu'à la démolition des tours du coeur de quartier en juin 2019⁵.

Concernant les LCZ non urbaines, le travail de recherche de sites est directement limité par le territoire imposé. En effet, comme mentionné précédemment, le réseau est limité par les frontières de l'agglomération toulousaine. Cependant, il existe une forêt suffisamment grande dans la partie ouest du territoire pour pouvoir abriter le site correspondant à la LCZ végétation dense et haute. En outre, il existe deux grandes zones agricoles à l'ouest et à l'est. Au moins un point d'échantillonnage a été placé dans chacune de ces zones. Il n'y a pas de plans d'eau suffisamment grands pour disposer d'un point de mesure sauf au nord près d'un lac dans un territoire agricole et à l'ouest de Toulouse dans le parc de la Ramée. Le point du nord, dans la commune de Saint-Jory est alors équipé et rattaché au thème des points « frais » .

Les parcs se situent entre les zones urbaines et non urbaines en termes de classification. Le thème des parcs a donc été créé principalement pour les représenter. C'est aussi en raison de leurs effets de rafraîchissement de leur environnement proche et pour les besoins du département des espaces verts que chaque parc dispose de plusieurs emplacements de mesures.

Enfin, des points situés en haut et en bas de chaque relief ont également été placés pour étudier les brises thermiques.

Il est espéré que la configuration actuelle puisse répondre à la plupart des besoins opérationnels et de recherche pour les années à venir. Pour rappel, les besoins opérationnels actuels concernent:

- Les variations temporelles de la différence de température entre ville-campagne
- La caractérisation de l'hétérogénéité spatiale de l'Îlot de Chaleur Urbain à partir d'une analyse par les morphologies urbaines à l'aide des Local Climate Zones
- La caractérisation d'effets locaux par les sites thématiques et les transects

5 <https://docplayer.fr/61239141-Les-coursives-d-empalot.html>

Comme indiqué en amont, certains départements urbains peuvent avoir des besoins particuliers, et certains nous ont déjà été communiqués comme l'observation des températures aux abords des canaux. Ces sites de mesure sont aussi sélectionnés en tant que thématiques à part entière tout en les considérant comme hors cadre de l'approche par LCZ ou des transects. En effet ils sont souvent placés sur des territoires mixtes, aux caractéristiques morphologiques urbaines trop variées pour être clairement identifiés comme une LCZ spécifique ou non représentatifs de leurs environnements. Le canal du Midi est un exemple concret de ce cas précis. Dans cette catégorie peut aussi être placé les choix des sites de mesures pour le projet LIFE, ou toutes les stations ne seront pas mobilisées pour une approche par LCZ ou pour la réalisation d'interpolations.

III.1.B.b. Quel nombre de sites d'observation pour des études d'ICU ?

En France, comme évoqué auparavant, les réseaux sont composés de quelques dizaines de stations (une soixantaine à Dijon, une trentaine à Rennes) ou moins. Des réseaux plus grands existent, en Asie par exemple, comprenant plusieurs centaines de stations (Chen & al., 2019). C'est en majorité dû à la taille de la ville, mais pas uniquement. Comme indiqué dans le chapitre II, un réseau peut avoir plusieurs formes, comme par exemple les transects ou les grilles. Si la taille de la maille d'une grille va déterminer le nombre de stations pour un territoire donné, l'approche par transect ne propose pas de chiffre à atteindre. Considérons qu'une station mesure son environnement dans un rayon de 300m. Il faut pour couvrir la métropole toulousaine un total de plus de 1600 stations. Ce chiffre étant disproportionné pour notre étude, une approche plus rationalisée s'impose. Le tableau 9 propose d'appréhender le nombre minimum et optimal de station au regard de l'étude envisagée.

Etude envisagée	Objectif de l'étude	Nombre de sites minimum	Nombre de sites optimaux
ICU classique	Comparer températures entre l'urbain et le rural	- 1 pour l'urbain - 1 pour le rural	1 par environnement autour de la ville-campagne 1 par section de l'hyper-centre urbain
ICU entre LCZ et rural	Comparer les différences de températures de chaque typologie de morphologie urbaine avec le rural	- 1 pour l'urbain - 1 pour le rural - 1 par LCZ présente sur le territoire	1 par LCZ de part et d'autre d'un transect qui relie les points du centre à ceux du rural
Intercomparaison entre LCZ	-Comparer les LCZ identiques entre elles, -Cartographier l'ICU avec des cartes d'interpolations spatiales.	- 2 pour chaque LCZ présente sur le territoire - 1 pour l'urbain - 1 pour le rural	Pour chaque LCZ désirée : -1 sur un point haut par relief -1 sur point bas par relief -1 par quartile de densités de végétation et de bâti, par exemple si la LCZ 6 du territoire oscille entre 20 et 40 % de densité de bâti, équiper une entre 20 et 25 %, une entre 25 et 30 %, etc. -1 avec âge du bâti ancien, par exemple du pavillonnaire d'avant les années 2000 -1 avec un âge de bâti plus récent, par exemple des maisons construites entre 2015 et 2020 -1 par quartile de distance entre le centre et le rural. Par exemple si la distance centre rural fait 12km, en choisir une entre 0 et 3, entre 3 et 6, etc.

Tableau 9, nombre de stations optimales d'un réseau au regard de l'étude envisagée.

Dans le premier cas d'étude, les stations servent à mesurer uniquement l'ICU classique⁶. Un nombre de stations correct minimum est de deux pour le centre-ville et deux pour le rural. En effet cela garantit à la fois une sécurité sur la mesure en cas de panne mais également de disposer de plusieurs points au centre et autour de la ville. Elles doivent être disposées à la même altitude si possible. L'écart entre les deux stations du centre-ville sont placées entre 500m et 1km l'une de l'autre. Celles du rural à deux points extérieurs, c'est à dire au moins 1 km après la tâche urbaine⁷.

Dans le second cas d'étude, ou l'objet est d'observer les écarts de températures entre différentes typologies de tissus urbains et ruraux, le nombre de station minimum augmente. Le principe est d'appliquer la méthode de transect que nous avons exposé précédemment entre les

6 Le terme « classique » fait référence aux études stricto-sensu des études sur l'ICU que nous développons dans le chapitre IV.2. .

7 La tâche urbaine s'observe par exemple à l'aide des cartographies « occupation du sol- zones construites » de l'IGN, disponibles gratuitement sur <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/occupation-du-sol-zones-construites>.

points du rural et le centre. Cette ligne va traverser une succession de tissus urbains tels que : pavillons individuels de zones résidentielles, petits collectifs, zones industrielles, espaces verts, champs de cultures, bâtis denses et peu élevés, etc., L'objectif est de placer un point de mesure sur chacun de ces tissus. Un site est sélectionné lorsque le tissu urbain dans un rayon de 300 m autour du point souhaité est similaire/homogène. Pour ce faire, l'approche par LCZ ou d'autres classifications de morphologies urbaines peuvent-être envisagées. Nous pouvons citer Corine Land Cover pour une approche simplifiée de la ville via l'occupation du sol, disponible gratuitement en ligne⁸, ou encore sur une classification LCZ enrichie de typologies locales spécifiques telles que celle employée à Paris pour les îlots de morphologies urbaines⁹.

Dans le troisième cas de figure, ou l'approche se veut comparative entre différentes LCZ, le principe est de sélectionner chaque morphologie urbaine présente sur le territoire plusieurs fois en variant les spatialités, les reliefs ou d'autres critères comme l'âge du bâti. Cette méthode est celle mobilisée au cours de cette thèse. Au total c'est environ une centaine de sites de mesure qui sont choisis pour le réseau de toulousain. Le nombre variera donc fortement d'une ville à l'autre et la taille ne sera pas proportionnelle au nombre. Lorsque le nombre de stations est trop conséquent, il est également possible de trouver entre réseaux semi-professionnels, professionnelles et amateurs.

En effet, avec l'arrivée de données de stations amateurs ou des véhicules instrumentés (Meier & al., 2017), et plus généralement de tout ce qui relève des sciences participatives, les données deviennent accessibles en quantité pour de nombreux territoires. Ces données peuvent être mobilisées pour atteindre le nombre de mesures nécessaires.

Une fois le réseau théorique conçu, il est nécessaire de choisir la technologie des capteurs et de les déployer. Cette étape est réalisée en différentes vagues. Comme il n'est pas possible, pour des raisons de moyens humains ou financiers, de tout déployer sur la durée d'une thèse, des choix sont faits pour prioriser certains sites à d'autres.

8 <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/corine-land-cover-2012>.

9 <https://geoweb.iau-idf.fr/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=14b3444dfabe46978eec94cc97e5c8a5>

III.1.C. Présentation de la solution technique

Le choix des capteurs dépend des variables que à mesurer. De plus, pour chaque variable, plusieurs technologies de capteurs existent. Pour chacune d'entre elles, il existe des guides, des normes ou des études comparatives (tableau 2). L'OMM ou encore Météo-France via sa Direction des Systèmes d'observations (DSO) disposent de documents pour accompagner le choix de capteurs.

Dans le cas d'un monitoring de l'ICU, la variable température est au centre des attentions. Les autres variables ne sont pas à ignorer pour autant si nous voulons garantir un potentiel usage étendu du réseau à d'autres études de climat urbain. Un réseau uniquement composé de sondes de température sous abri disposera, à coût équivalent, de plus de sites de mesures qu'un réseau à base de stations météorologiques. En effet ces dernières mesurent plus de variables (force et direction du vent, pluviométrie, rayonnement, pression, etc.) mais le coût à l'unité est plus élevé, ainsi que les contraintes de pose (poids de la station, prises au vent, etc.). Un compromis est alors à trouver au regard du budget, des capacités de pose, d'entretien et du nombre de sites envisagés.

Les services climatiques de Toulouse Métropole se sont construits autour de stations météo complètes, puisqu'au-delà des études portant sur l'ICU, ce sont des services climatiques plus larges qui sont à termes visés. L'ajout de variables apportant des informations sur le vent ou la pluie autorisent ces possibilités d'évolutions.

III.1.C.a. Présentation du capteur et des données mesurées

Le choix du capteur s'est porté sur les stations de la marque DAVIS. Ce choix découle de multiples facteurs.

- La précision des mesures

Une étude de la DSO comparant diverses stations amateurs a été réalisée . Il en ressort que la sonde de température des DAVIS offre une précision suffisante pour des études d'ICU. Elle est de l'ordre de 0.1°C. A la base ces stations ont été conçues pour le monde des grandes productions agricoles californiennes. Exposées à de forts rayonnements solaires, ces stations disposent d'un bouclier de protection avec ventilation passive. Elles s'adaptent donc parfaitement à un contexte urbain français ou les durées et l'intensité d'exposition seront probablement inférieures à cause des ombres portées de la végétation ou du bâti et aux conditions météorologiques différentes de celles de la Californie. Nous comptons par exemple à Toulouse 2120 heures d'ensoleillement contre 3254 en Californie.

D'autres variables comme l'humidité ou la pression disposent aussi des précisions nécessaires pour des études de climatologie urbaine. Les variables concernant la pluviométrie et le vent sont quant à elles moins fiables. Mais dans un milieu urbain, ces deux variables sont compliquées car leurs qualités dépendent plus des emplacements choisis que de leurs capteurs.

-Les retours d'expériences

Nous l'avons vu dans les tableaux de la partie II, les retours d'expériences sont des outils intéressants pour réaliser des choix sur les composantes des services climatiques. Les capteurs n'échappent pas à la règle. Or les stations DAVIS, avant leur mise en place sur Toulouse Métropole, composent le parc du territoire rennais. Fort d'une trentaine de stations, ce réseau a permis des travaux généraux sur l'ICU (Foissard, 2015), sa caractérisation (Dubreuil & al, 2011), l'impact des formes urbaines sur celui-ci (Foissard & al.,2019) ou sa relation avec des types de temps météorologiques (Foissard & al., 2010). Ces retours positifs permettent de vérifier la capacité de ce capteur à fournir des données de qualité pour les analyses scientifiques.

-Les capacités de développement et de recherches

Au début des réflexions, la Métropole souhaite se doter d'un réseau de mesures pour observer l'ICU. Un partenariat entre le Master Eco-Ingenierie de l'INP-T, le CNRM et le LISST permet la réalisation d'un atelier composé de six étudiants autour de cette demande. L'atelier réponds, avec le département de l'environnement de Toulouse Métropole, à la demande et propose un réseau de stations météorologiques pour l'étude de l'ICU construit sur une utilisation des LCZ, l'emplacement des bâtiments publics et les futurs projets d'aménagement. Le travail de l'atelier est ensuite prolongée avec un stage de six mois, porté par un des six étudiants qui avait participé à l'atelier, pour déployer les premières stations. Les contraintes de temps et de moyens qu'imposent ces types d'exercices ne permettent pas de réaliser à la fois des capteurs sur mesure avec des entreprises privées et le déploiement de la solution. L'utilisation de modèles de stations météo tout en ayant déjà fait leurs preuves est donc recherchée.

La Métropole, qui avait obtenu le soutien financier du projet Smart City, émet le souhait de disposer de données acheminées en temps réel. A cette époque, ni le réseau de Rennes, ni celui de Dijon et des sondes Hobo disposent d'acheminement automatiques des données. L'OMM ne propose pas de guides pour équiper des stations semi-professionnelles avec transmission via l'« IOT ». C'est du côté des disciplines de l'électronique, de l'informatique et des logiciels open source qu'il faut se tourner. Dans le tableau 3 du chapitre II, les fabricants de composants électroniques privés sont montrés comme source de documentation pour réaliser des choix de

capteurs ou de communication. En 2015 par exemple, lors d'un forum organisé par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) a été présentée une solution pour des stations météorologiques à base de Raspberry (Savic & al., 2015). Aujourd'hui, l'exercice d'équiper des instruments de mesures pour la météo avec des nano-ordinateurs s'est multiplié (Gheorghe & al., 2018, Tenzin & al., 2017) du côté des disciplines de l'électronique. C'est lors de cet atelier de groupe et du stage que s'est alors construit le choix des nano-ordinateurs dotés de logiciels libres et des systèmes de télécommunications basses fréquences. Le réseau SigFox et le logiciel Weewx sont sélectionnés à l'issue d'un benchmark pour leur disponibilité (le Raspberry ne dispose pas en 2016 de carte réseau Lora par exemple), leur facilité d'utilisation et l'absence de licences (le logiciel weewx est libre). Le caractère local de la start-up toulousaine SigFox rentre aussi dans l'équation. Le budget également est un critère déterminant. L'enveloppe financière est limitée et le souhait d'élargir à d'autres variables que la température est déjà présent. La solution du milieu de gamme évolutif proposé par Davis se révèle alors être judicieuse.

Ainsi, la qualité des mesures garantie par la DSO, les multiples retours d'expériences des recherches menées par l'université de Rennes et les volontés d'avoir une approche multi-variables dans un laps de temps limité et dans un budget serré¹⁰ ont porté le choix des stations de la marque DAVIS et des Raspberry pi dotés du logiciel WEEWX. Le modèle choisi est l'itération la plus récente de son produit de milieu de gamme : La station VANTAGE PRO II. C'est un produit qui peut s'améliorer via des capteurs supplémentaires au besoin, apportant ainsi de la souplesse.

III.1.C.b. Mât de déport

Rapidement, le processus de co-construction du réseau, avec les différents services urbains, permet d'identifier les mâts d'éclairages comme réceptacles idéaux des stations. Cependant, sans déport, la station est fixée contre un poteau, ce qui peut induire des biais sur les variables mesurées, notamment la pluviométrie, les vents et la température. Un bras de déport est co-construit pour permettre plus d'amplitude dans les positions des capteurs par rapport aux candélabres (Annexe I.). Chaque bras dispose de deux attaches pour feuillard et d'un déport de cinquante cm plus la station. Ainsi, un capteur peut être placé jusqu'à soixante-cinq centimètres de son support.

¹⁰ Une station vaut environ 500€, si nous rajoutons les frais annexe comme la location d'une nacelle, l'achat du Raspberry, du mât de déport et de la carte SigFox avec abonnement, le total est de 1000€

III.1.C.c. Solution technique finale retenue

Sur chaque site de mesure, la combinaison de hardware et software se compose de sept éléments (figure 27).

- La station DAVIS VANTAGE PRO II équipée d'un mât de déport. Ils font partie de la composante observation, c'est la couche capteur du réseau IoT.
- Une console de transmissions fait lien entre la station et le Raspberry via la présence d'un datalogger dans lequel les données reçues de la station sont stockées avant d'être lues par le Raspberry. C'est le début de la composante monitoring et de la partie communication du réseau IoT.
- Un Raspberry équipé d'une carte de télécommunication SIGFOX, du logiciel WEEWX et d'une suite logicielle composée pour organiser les données et les envoyer. Les données y sont organisées, stockées et envoyées à intervalles fixes. C'est la partie communication du réseau IoT.
- Sur internet, les données arrivent sur un premier serveur où la donnée brute est stockée, c'est le premier niveau de sauvegarde des données. Elles sont transmises via « *Application Programming Interface* » (API, interface de programmation) vers les plate-formes IA data et OpenDataSoft. La première étant interne à la Métropole, la seconde étant ouverte au public. C'est la composante support d'applications du réseau IoT et la partie base de données des services climatiques décrite dans le chapitre II.2.E .
- Enfin les données sont organisées et une mise en forme est opérée. C'est ce que réalise la plate-forme de la caisse des dépôts via le portail cartographique de l'ICU ou bien l'équipe IA data du département du numérique pour d'autres post-traitements. C'est la composante application du réseau IoT et la partie partage du service climatique décrite dans le chapitre II.2.F..

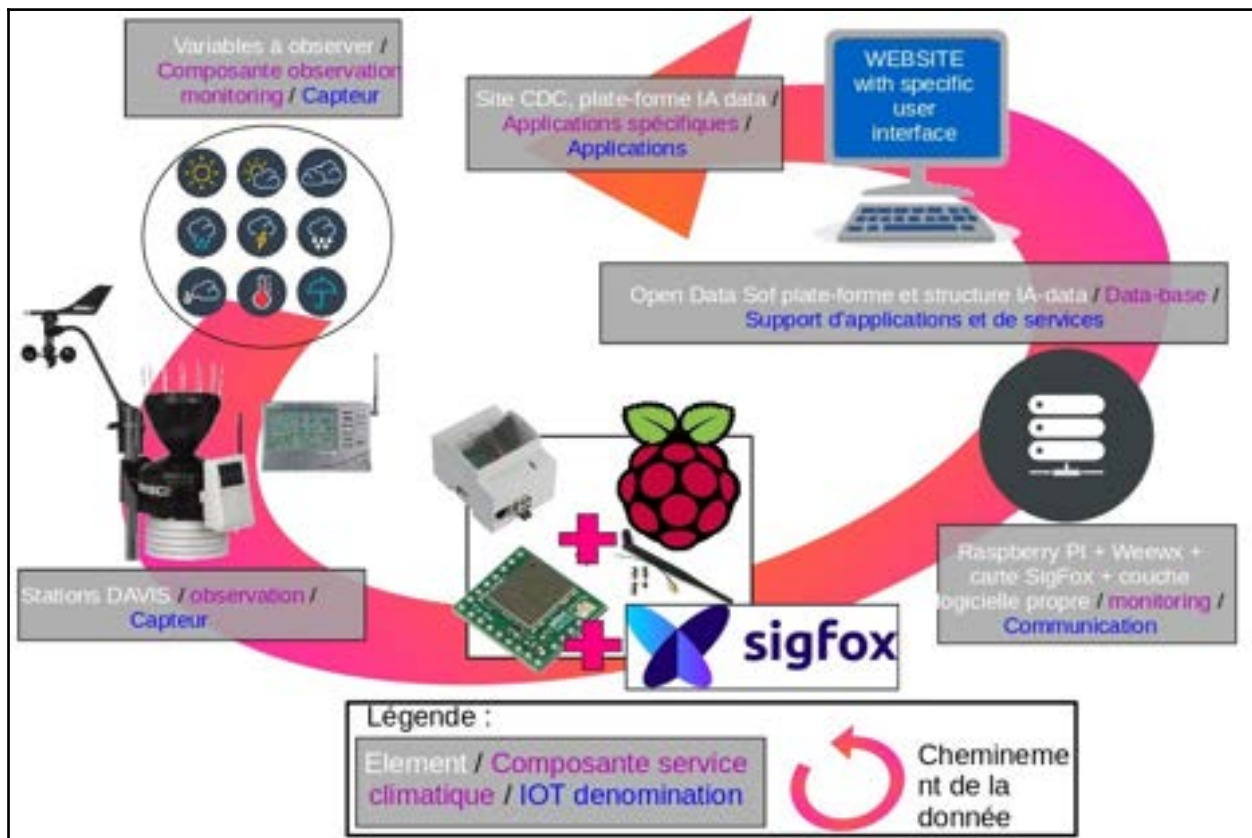


Figure 27, solution technique complète, hardware et software.

III.1.D. Déploiement des stations météo

Une fois le choix des capteurs et la solution technique validés, le déploiement peut commencer. Plusieurs facteurs rentrent en jeu durant la transposition des sites choisis sur papier, concernant le réseau théorique, à la pratique de terrain. Une recherche de compromis constante s'opère entre le choix des bâtiments d'installation, les activités humaines, la végétation,...

Pour commencer, si les emplacements potentiels pour chaque site ne sont pas suffisants, le choix des sites ne s'opérera pas librement. Cela rajoute une contrainte et peut impacter la qualité des données. Sur Toulouse Métropole la fixation doit se faire sur un poteau d'éclairage ou assimilé. Cette nécessité pose problème dans deux cas de figure. Le premier concerne les espaces les plus urbanisés car lorsque les rues sont étroites les mâts disparaissent pour devenir des fixations murales ou des luminaires aux sols. Le second cas porte sur les grands espaces agricoles et de végétation. Dans ces espaces, soient les mâts se raréfient soit il n'y pas d'emplacement à proximité pour placer le nano-ordinateur à l'abri.

En effet chaque station météo est électriquement autonome car elle dispose d'une batterie et d'un petit panneau solaire. Elle utilise une connexion sans fil pour envoyer des données à une console qui se connecte à un Raspberry Pi qui transmet à son tour des messages au serveur de la

ville. Cette partie du processus nécessite de l'énergie électrique. Le choix d'un mât nécessite alors aussi la possibilité viable de mettre en place un Raspberry Pi avec une console à une distance de maximum quelques centaines de mètres selon les obstacles. Ces appareils peuvent être placés dans n'importe quel bâtiment public, comme une école primaire, un lycée, une mairie ou une bibliothèque. En de rares occasions, des collaborations peuvent être faites avec des entreprises privées ou même des citoyens. Ce n'est pas la solution privilégiée et n'est utilisée que si nécessaire pour des sites vraiment nécessaires du réseau. La principale difficulté à utiliser une structure non publique est la perte d'autonomie, qui n'est pas totalement compatible avec la volonté d'un réseau à long terme. C'est pourquoi seuls trois sites présentent de telles collaborations (dans la forêt de Bouconne (LCZ arborée) et à proximité de la Garonne et d'un site industriel (LCZ 8)).

Lorsque les poteaux sont disponibles en nombre suffisant, l'emplacement doit respecter de nombreuses conditions. Toutes les règles à prendre en compte sont fournies dans la littérature. Par exemple, l'OMM fournit un guide complet (tableau 1) basé sur des années d'études et Météo-France fournit les mêmes types de documents de préconisations. Il existe même des associations qui proposent des recommandations aux passionnés de météorologie comme Infoclimat¹¹).

Pour savoir si un emplacement est valide, chaque site doit être évalué au regard de sa capacité à fournir des données qui ont du sens par rapport aux variables à observer. En d'autres termes, un site peut fournir une bonne position pour les enregistrements de température, d'humidité et de pression et en même temps être dans un piètre endroit pour recueillir des données sur le vent et la pluie. Par conséquent, une évaluation doit être effectuée pour chaque type de données séparément.

Comme la priorité de ce réseau était l'étude de l'ICU, la température était la seule variable pour laquelle aucun compromis ne pouvait être fait. Ici, nous passons brièvement en revue les choix opérés et ce qu'ils impliquent sur le déploiement d'un réseau de ce type.

Au final, les seules contraintes déterminantes sont la présence d'un mât adapté et le temps. Sous-jacente dans chaque étape de l'étude, le temps demeure une contrainte puissante. Le temps nécessaire pour contacter chaque organisme, trouver les personnes en charge, se plier aux démarches, faire des relances, toutes ces étapes sont particulièrement chronophages.

III.1.D.a. Du choix du mât au déploiement du réseau

Premièrement, le poteau lui-même doit être éloigné de toute structure ou bâtiment. Le problème des ombres apparaît alors puisqu'il est difficile de trouver des pôles dans la ville avec strictement le même cycle d'ombres et de lumières. Or il existe une recommandation d'avoir pour

11 <https://forums.infoclimat.fr/>

chaque site 30% d'exposition à la lumière par jour. Certains poteaux ne sont pas exposés au soleil le matin, tandis que d'autres le sont. D'autres sites de mesures sont de leurs côtés rapidement engloutis par les ombres en fin d'après-midi. Cela est principalement dû à la hauteur des éléments environnants comme les bâtiments ou les arbres. Sur les 73 capteurs déployés, un seul site de mesure ne respecte pas volontairement cette restriction. Ce capteur unique est situé derrière de grands immeubles et est quasi constamment dans l'ombre. Dans toute la zone entourant ce site de mesure, correspondant à un mix entre les zones LCZ 1 et 2, les mâts sont rares ou mal situés. Les rues sont étroites et de nombreuses lumières sont fixées sur les façades des bâtiments.

Une fois le mât sélectionné, la hauteur de chaque capteur doit être prise en compte. Avec une durée opérationnelle souhaitée de plus de 10 ans, les expositions au vandalisme, à la dégradation et à la vulnérabilité à la circulation des véhicules doivent être minimisées sans affecter la qualité des données. Ainsi, les hauteurs de tous les capteurs sont comprises entre 3 m et 5 m du sol. Cela coïncide également avec des hauteurs non normalisées acceptables tant que l'emplacement est à plus de 1 m d'une surface. En effet les recommandations évoquent une hauteur d'homme soit environ 1,80m mais des études ont déjà observé que des hauteurs plus élevées conviennent (Pigeon, 2007).

Pour éviter les perturbations, la distance entre la station et le poteau doit être comprise entre 25 cm et 60 cm. Pour ce faire, une entreprise privée a donc été chargée de concevoir un bras déport spécial pour fixer la station à cette distance du poteau. Parce que les caractéristiques de chaque mât varient en terme de hauteur, de diamètre et de méthode de fixation au sol, une société est mandatée pour effectuer des tests mécaniques. L'objectif est de s'assurer que les poids des stations ne mettent pas en danger l'intégrité physique et l'équilibrage des mâts. Les caractéristiques technologiques des capteurs sont fournies pour vérifier la conformité vis à vis des transmissions de données et d'alimentations électriques. L'objectif est de s'assurer que les stations météorologiques ne perturbent pas la communication sans fil ou les signaux électriques des lampadaires. Chaque emplacement doit être validé par le département de l'éclairage public avant son déploiement.

Une fois le poteau idéal sélectionné, nous recherchons un emplacement dans ses alentours pour y placer le nano-ordinateur et la console de liaison. Chaque site nécessite un bâtiment ou un abri disposant de l'électricité à proximité. Le boîtier est à placer en priorité dans les structures en essayant de respecter l'ordre suivant :

- établissements publics dépendant de la Métropole ou de la ville de Toulouse (ateliers, bureaux, crèches, etc.)

- établissements privés ou publics partenaires de la Métropole ou de la ville de Toulouse (musées, pépinières d'entreprises, régie de transports, etc.)

- établissements publics hors établissements communaux (collèges, lycées, universités, pôle emploi, etc.)

- établissements communaux des membres de la métropole (mairies, écoles, ateliers municipaux, etc.)

- établissements privés (bureau d'étude, commerce, usine, etc.)

- particuliers

Lorsque cela est nécessaire, une convention peut être rédigée. Comme indiqué auparavant, le besoin d'avoir un établissement à proximité est une contrainte qui a pesé dans l'emplacement de nombreux capteurs. Aujourd'hui, certains capteurs ne sont pas encore équipés d'une console et d'un Raspberry à proximité. Cela peut être dû à une pose récente (stations LIFE) ou des formalités administratives lentes. Dès lors que le choix du mât est validé, la pose du capteur peut s'envisager.

III.1.D.b. Spatialisation du réseau à la fin 2020

Le réseau est déployé par vague selon la priorisation définie en amont lors du choix des sites de mesures. Ainsi, son déploiement est organisé en six vagues. Il reste encore aujourd'hui des capteurs à déployer et le réseau a encore des objectifs de croissance. Nous pouvons évoquer une dizaine de capteurs supplémentaire pour observer les températures aux alentours du Canal du Midi et de Brienne. Des capteurs doivent être installés pour compléter les études présentées dans le Chapitre IV et V, environ une quinzaine. Dans ce lot se trouve également les emplacements des nouveaux quartiers, absents pour le moment du réseau (Andromède à Blagnac et Cartoucherie à Toulouse pour ne citer qu'eux). Aujourd'hui le réseau se construit autour de 73 stations (Figure 28) et sous stations.

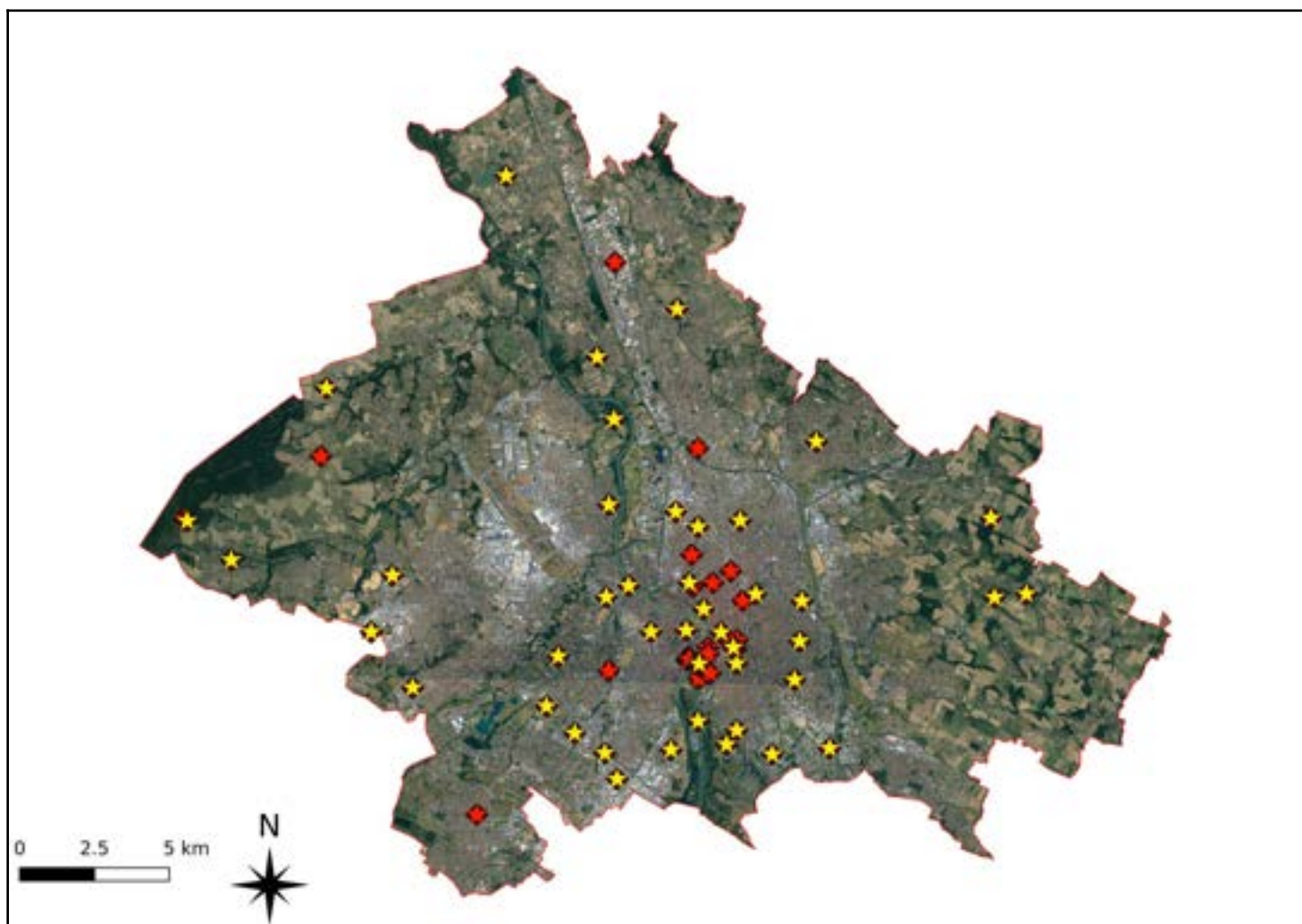


Figure 28, stations en place au mois d'aout 2020. En rouge celles qui ne sont pas connectées à des Raspberry à l'heure actuelle .

Parmi les sites nous pouvons observer :

-Toutes les LCZ. Les LCZ 8 – bâti d’activité, 2 – bâti dense de moyenne hauteur et 6 – bâti bas de faible densité sont les plus représentées. Nous comptons 16 capteurs pour la 8 des tissus d’activités et 13 capteurs pour la 2 et 6 des bâtiments de hauteurs et densités moyennes et des pavillons individuels . De nombreuses stations du projet LIFE sont classées dans ces catégories puisque l’île du Ramier est majoritairement composé de LCZ 8. Ensuite cela concorde avec la représentativité spatiale de ces LCZ sur le territoire d’étude.

-Tous les reliefs disposent d’un point de mesure. Pech David au sud, la cote Pavée à l’est de la ville de Toulouse et les coteaux du Lauragais. Pour chaque point « haut », un équivalent « bas » a été cherché.

-Le projet LIFE qui compte une dizaine de stations, représente une grande part du réseau.

-Tous les parcs de la ville de Toulouse disposent d’au moins un capteur. Compans Cafarelli dispose de 2 stations, le jardin des plantes de 4. Cette partie du réseau est encore en cours d’élaboration.

III.2. Composantes monitoring, base de données et partage: de services climatiques à un objet IoT

De la station météo à la plate-forme d'open data de la Métropole, la donnée suit un chemin semé d'embûches. Tout commence ainsi avec la suite de capteurs, ils observent des données puis les transmettent au Raspberry via la console de communication. Une fois réceptionnée par le Raspberry, tout un traitement a lieu avant d'être encore envoyée sous forme de message à des intervalles de temps fixes vers les serveurs internet de la métropole ou ils seront mis à disposition. Cette partie revient sur ces étapes et les choix qui y ont été opérés ainsi que l'approche IoT abordée.

En soi, des services climatiques à base de réseau de stations sont un réseau d'IoT si ce n'est que leur composante application est rattachée à la climatologie. C'est pour cela qu'aux yeux de l'architecture interne des données de la ville, le réseau est traité comme un autre objet structuré IoT ou une «cyberinfrastructure» et ses données sont mélangées avec toutes les autres. C'est à dire que les services climatiques ne disposent pas d'une plate-forme propre, mais d'un espace qui leur est propre au sein des autres données collectées par la métropole.

Un projet IoT est composé de différentes fonctionnalités. Comme observé dans le tableau 3, des références existent pour aborder le monde de l'internet des objets. Certaines d'entre elles proposent des simplifications du monde de l'IoT autour de quatre composantes (Patel & al., 2016).

- Les terminaux représentent les extrémités du réseau. C'est là que sont placés les capteurs, dans ce cas, les stations météorologiques, c'est la couche capteur de l'IoT. C'est la composante observation des services climatiques.
- Vient ensuite la passerelle, c'est le Raspberry Pi avec la carte Sigfox. C'est la composante de l'émission des données.
- Arrive ensuite le concentrateur ou le noyau central, qui est le serveur Web qui reçoit les données, c'est le support d'application. C'est la composante base de données et partage.
- La dernière partie concerne les applications, c'est identique à la composante éponyme des services climatiques.

III.2.A. Transmission de la donnée : la passerelle

Le réseau mesure en temps quasi réel (toutes les 15 minutes) six variables physiques : la vitesse et la direction du vent, le taux de pluie, la température, la pression et l'humidité. Une Métropole est rodée à la mise en place de réseaux remontant des informations vers des centrales : feux de signalisations, transports, réseaux électriques, gestion de l'eau. Cependant l'utilisation des nano-ordinateurs représente un premier pas vers le monde de l'IoT pour la Métropole au-delà de ces réseaux classiques habituels. C'est pour cela que la Direction de l'Innovation et la Direction Numérique ont été associées dès le départ aux discussions pertinentes. D'ailleurs le budget initial est réparti à parts égales entre la Direction de l'Innovation et celle de l'Environnement.

Les données sont contrôlées à l'aide de plusieurs routines pour éviter les données erronées ou corrompues, les clones ou tout autre problème. Par exemple, le Raspberry Pi vérifie l'heure tous les jours ou après une panne de courant. Si l'heure n'est pas reçue, il n'envoie aucune donnée tant qu'il ne sait pas quelle heure il est.

Les données sont enveloppées dans un message toutes les 15 minutes et envoyées au serveur de la ville. Étant donné que le message doit avoir au maximum 12 octets, une méthode spécifique a été développée pour intégrer toutes les informations nécessaires dans chaque message avec un minimum de compromis (figure 29). Par exemple, les formats de date et d'heure ne suivent pas la norme ISO 8601 pour des raisons évidentes de taille.

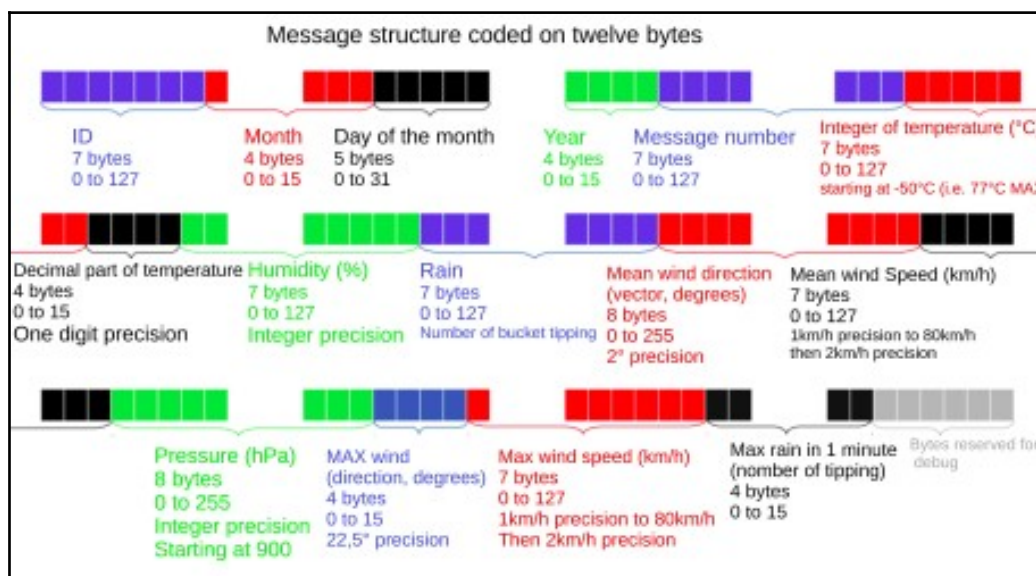


Figure 29, structure des messages des données envoyées au serveur de la ville (figure tirée du mémoire de stage de M2 de Gérald Louit encadré durant la thèse).

Il existe aussi une autre structure de message pour les sous-stations. Ces dernières n'envoient pas autant de variables, seules les températures et humidités sont relevées. Puisque la

limite de message par jour est de 140, les données des sous-stations doivent couvrir 24h dans les quelques dizaines de messages restant. Il a été décidé d'envoyer un message toutes les 45mn comprenant trois données (une par quart-d'heure). De plus, au lieu d'envoyer la valeur de température complète, seulement sa différence par rapport à la station principale est envoyée

Puisque les stations météorologiques ne communiquent pas entre elles, le réseau possède une structure dite verticale et est appelé réseau passif ou réseau en forme d'étoile.

En tant que technologie de télécommunications, la plupart du réseau utilise une connexion Ethernet filaire (norme IEEE 802.3); cependant, en raison du manque de points de réseau sur le territoire, il est plus facile d'utiliser les transmissions sans fil au sein d'un système global pour le service général de radiocommunication par paquets (GPRS) de communications mobiles (GSM) ou d'autres technologies sans fil telles que la norme IEEE 802.15.4. Dans le cas de la Métropole, un réseau étendu à faible consommation d'énergie (LPWAN) a été choisi en raison de l'utilisation de Sigfox.

Le réseau est encore en développement c'est pourquoi seulement 45 stations transmettent via un Raspberry Pi. Les premières stations émettent depuis juin 2019, et 34 stations ont enregistré des données au cours de l'été 2019. À l'achèvement, avant la fin de 2022, le réseau devrait comprendre environ 100 stations météorologiques.

III.2.B. Stockage de la donnée : le noyau central

Toutes les données arrivent dans une application web¹² développée par Open Data Soft. Ici, le message hexadécimal envoyé par les Raspberry se transforme en une succession de variables compréhensibles telles que la température en degrés Celsius, la force des vents en mètres par secondes etc. Cette étape inclut aussi des traitements tels que la standardisation des heures et des dates. Les données rentrent alors dans la composante livraison avec l'accès aux citoyens des données.

Pour accompagner les mesures nous trouvons également les méta-données. Elles garantissent la possibilité aux usagers externes, scientifiques ou non, de manipuler les données dans un cadre d'utilisation précis. Elles fournissent des informations sur les capteurs, leurs emplacements, leurs environnements. Elles sont essentielles à ce type de réseau mais sont aujourd'hui partiellement présentes. En effet, seules quelques informations de premier ordre sont fournies : latitude, longitude, altitude, etc. Encore en construction, elles seront disponibles à terme également sur cette plateforme.

12 <https://data.toulouse-metropole.fr/explore/?sort=modified>

Pour les citoyens, les services climatiques actuels de la Métropole s'arrêtent à cette étape pour le moment. En revanche pour les départements de la Métropole, dont ceux cités dans la partie sur la co-construction, la donnée n'est pas encore livrée, elle doit encore être modifiée dans la composante « livraison ».

III.2.C. Livraison de la donnée et applications

Dans la composante partage, la livraison de la donnée a une place à part. Elle fait lien entre les fournisseurs et utilisateurs de la donnée. C'est l'instant où les données sont mises en forme pour coïncider avec la composante des applications souhaitées. Nous retrouvons ainsi dans cette composante des services climatiques un aspect transdisciplinaire plus marqué que d'autres. Nous l'avons vu dans le chapitre II, des disciplines relevant du graphisme peuvent par exemple intervenir (Sedlmair & al., 2012).

Prenons le cas du département en charge de la rédaction du PLUi-H. Ils désirent mobiliser des cartographies de l'ICU dans la conception de leurs doctrines ou des zonages du territoire. Une cartographie de l'ICU à un instant donné ne suffit donc pas. En revanche des cartes de persistance de l'ICU, comme celles développées dans le projet MApUCE sont plus à même de leur servir. Pour que l'application soit effective, la donnée doit donc être livrée sous une forme manipulable.

Dans la conception actuelle des services climatiques, la composante livraison est la moins avancée car dépendante du travail de cette thèse. Les applications souhaitées sont connues grâce aux rencontres avec les services et la mise en place d'une participation active. Cependant la livraison d'une donnée formalisée n'a pas encore eu lieu. À ce jour, seul la plate-forme de l'équipe IA data (Chapitre II figure 9) et le portail cartographique de la CDC (Chapitre II figure 10) font office de mise en forme et de visualisation de la donnée.

La formalisation de la donnée revêt deux aspects. Le premier concerne la conception graphique. Des utilisateurs vont par exemple décider qu'ils veulent les cartographies découpés selon les territoires des pôles territoriaux de la métropole ou par quartier. C'est un travail de « data visualist ». D'un autre côté ces mêmes utilisateurs veulent uniquement visualiser ces cartographies lorsque l'ICU est maximum. Un travail de fond apparaît alors, avec une démarche scientifique, c'est le travail du « data analyst ». Dans le cadre des services climatiques de la Métropole de Toulouse, la partie « data visualization » appartient à l'équipe IA data, du département du numérique. La partie analyse de la donnée relève de cette thèse et ces analyses vont être exposées dans le chapitre suivant.

Aujourd'hui, l'objet Iot n'est pas finalisé, il lui reste plusieurs points pour être complet. Tout d'abord il est nécessaire de créer un protocole d'assurance et de contrôle de la qualité (AQ / CQ) bien documenté. Celui-ci étant aujourd'hui absent.

Ensuite le réseau à vocation à durer entre 10 et 15 ans. C'est long pour ce type de technologies. Le maintien en conditions opérationnelles (MCO) est à ce jour inexistant, c'est un chantier à mener avec la direction du numérique dans le cadre de la co-construction des services climatiques.

Enfin, deux points concernent les technologies et la solution technique retenue. En premier lieu le réseau a pour ambition de passer à un type IoT actif. Cela signifie qu'un utilisateur pourra interagir avec un Raspberry Pi ou équivalent pour demander des informations ou des messages spécifiques, tels que l'état de la qualité du signal ou la fréquence des données collectées entre la console et la station. Un partenariat est actuellement en place avec des chercheurs universitaires pour développer cette partie du système. Dans un second temps, il va être réfléchi à l'internalisation complète de la suite logicielle et matérielle. C'est-à-dire que les stations, Raspberry et systèmes de télécommunications seraient réunis en un seul objet conçu pour la métropole. Cela permet d'éviter la multiplication de matériel, de fournisseurs, de technologies et facilite l'élaboration du MCO. Aujourd'hui la direction du numérique pousse à l'élaboration d'une équipe dédiée à l'IoT, comme cela a été le cas avec l'équipe IA data. Les services climatiques à base de stations météo verraient alors les composantes capteurs, transmission et stockage de facto directement lié à cette nouvelle équipe.

III.3. Conclusion

Ce chapitre s'est organisé en deux axes, chacun construit autour d'une composante des services climatiques tels qu'ils sont décrits dans le chapitre II.

- **La composante observation : récupérer des données pertinentes**

Les sites de mesures sont organisés selon des thèmes et des transects. Au total, nous comptons 8 transects et 7 thèmes avec un peu plus de 70 stations. Nous pouvons évoquer le transect est-ouest qui relie la forêt de Bouconne à Mondouzil en traversant le centre-ville qui sert à caractériser l'intensité de l'ICU. Comme thème notable, nous pouvons relever celui des LCZ 8 d'activités. Nous y trouvons toutes les stations qui occupent un territoire qualifié de zone d'activités, de bureaux ou de commerces relevant de la LCZ 8. Ces regroupements sont réalisés à l'aide d'une approche cartographique. Elle composée de cartes de Local Climate Zones, du relief, des densités de végétation et de l'âge du bâti, couplée à une campagne de mesure.

L'approche par thèmes et transects est une approche croisée qui permet d'envisager les études de l'ICU selon différents axes, comme les reliefs, les LCZ ou la spatialisation des températures. Les futures études que doit permettre le réseau sont également considérées comme l'observation des brises thermiques. L'approche thématique ou par transects n'est pas nouvelle, mais elle propose, dans ce chapitre, un cadre méthodologique qui permet de sortir de l'approche purement experte et de limiter les données en entrées à des données accessibles et visuellement évocatrices. Ainsi d'autres disciplines comme l'urbanisme peuvent s'emparer de la méthode pour des reproductions sur d'autres territoires. L'utilisateur peut donc analyser son réseau pour savoir si ce dernier est complet ou du moins suffisant.

- **Composante monitoring, base de données et partage**

La composante transmission, base de données et partage de la donnée est présentée. Les services climatiques sont alors abordés sous l'angle de l'internet des objets. Cet éclairage permet d'observer l'intégration de cette composante par le département du numérique de la Métropole. La structure d'un réseau IOT et celle d'un service climatique à base de réseau de stations météorologiques présentent de nombreuses similitudes. Les acteurs de l'urbain, du moins ceux en charge de l'information géographique sont plus à même de l'envisager en tant que tel que par services climatiques qui renvoient davantage à son application métier.

- **La solution technique retenue**

La solution technique retenue permet de faire cohabiter des coûts définis avec un réseau d'une taille suffisante, tout en permettant une gestion interne à la Métropole du réseau par sa simplicité d'utilisation. Le choix s'est alors porté sur la DAVIS vantage pro II et des Raspberry avec cartes de télécommunications SigFox.

Chapitre IV. Caractérisation de l'Îlot de Chaleur Urbain sur la métropole de Toulouse

IV.1. Récupération, organisation et évaluation des données disponibles.....	127
IV.1.A. Quantité de données.....	127
IV.1.B. Qualité des données.....	128
IV.1.C. Informer sur l'état du réseau et fiabiliser les calculs.....	129
IV.2. L'îlot de chaleur classique.....	131
IV.2.A. Evaluer une étude d'ICU.....	131
IV.2.B. Analyses de l'ICU sur la base de réseaux de mesures de température de l'air proposées par la littérature.....	133
IV.2.C. Choix des stations, des temporalités et résultats.....	133
IV.3. Approche par type de temps et saisonnière.....	140
IV.3.A. Le concept de type de temps	140
IV.3.B. Les types de temps de Toulouse.....	141
IV.3.C. L'attribution des types de temps au jeu de données des capteurs.....	144
IV.3.D. La représentativité des types de temps.....	146
IV.3.E. L'ICU selon les saisons et les types de temps.....	148
IV.4. Analyse spatiale infra-urbaine (Local Climate Zones).....	156
IV.4.A. L'approche par Local Climate Zones et effectif sur Toulouse.....	156
IV.4.B. Analyse infra-urbaine pour conditions optimales annuelles et saisonnière et par situation météorologique.....	159
IV.4.C. Conclusion sur l'analyse spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain sur Toulouse.....	169

Le réseau de mesures est le cœur actuel des services climatiques de Toulouse Métropole. Cependant si son intégration et sa gestion en tant qu'objet IoT sont considérablement engagées comme nous l'avons exposé dans les parties précédentes, il reste encore à démontrer la pertinence de sa présence. Cette pertinence se concrétise, se réalise, au travers de la dernière composante des services climatiques à savoir la mobilisation d'applications par les départements de la Métropole.

Ces applications sont produites par le monde scientifique pour répondre aux besoins des départements urbains. Un pont est alors bâti lors duquel ces besoins sont traduits en questions scientifiques. Derrière la demande de monitorer l'ICU de Toulouse résident par exemple les questions scientifiques sur la caractérisation de l'ICU d'un territoire. Quelle est son intensité, sa forme, sa récurrence ou encore sa spatialisation ? Sous quelles conditions météorologiques le phénomène se produit-il avec la plus forte intensité ?

Pour l'intégration dans les documents d'urbanisme ou la mobilisation par les pôles territoriaux, les questions portent plus sur les études d'écarts de températures entre les différentes morphologies urbaines. Quels sont et où sont les types de tissus urbains les plus frais ou chauds comparativement au centre de Toulouse ? Comment les températures de ces espaces interagissent au regard du cycle diurne ? Ces études se concrétisent par exemple à l'aide de l'approche par *Local Climate Zones*.

Cette partie présente donc les analyses produites à l'aide des données du réseau au travers de multiples approches en vue d'une part de mieux connaître la variabilité de l'ICU et d'autre part de transformer à terme ces analyses en applications pour les départements urbains. Les résultats sont exposés et décomposés selon trois approches :

- La première est la caractérisation de l'ICU. C'est l'approche qui se veut la plus traditionnelle. Elle est à la fois généraliste et classique. Elle mobilise les comparaisons de températures entre l'urbain et le rural selon une situation météorologique unique pour caractériser son amplitude ou encore sa fréquence.
- La deuxième est l'approche via le concept de type de temps sensibles. Chaque jour du jeu de données est classé selon une situation météorologique récurrente pour le territoire étudié. Le concept de type de temps sensibles et les types de temps de Toulouse sont rappelés. L'analyse de l'ICU est ensuite approfondie à l'aide de ce nouveau prisme de lecture.
- La troisième concerne l'approche par Local Climate Zones. C'est-à-dire les morphologies urbaines. Elles sont alors mobilisées pour élaborer les échelles infra urbaines. Les données des capteurs sont désormais comparées au regard des caractéristiques de leurs environnements. Les morphologies viennent donc compléter la caractérisation de l'ICU en apportant des informations spatiales.

Pour réaliser ces analyses, les données brutes sont traitées en trois étapes¹ (figure 30):

- La première étape concerne la récupération et le nettoyage de la donnée des capteurs. Les données sont récupérées depuis la plate-forme Open Data de la Métropole puis traitées pour que les données soient manipulables.

« On attrape l’orange et nous l’épluchons »

- La seconde concerne la récupération de données de la station Météo-France de Blagnac. Cette étape permet d’attribuer un type de temps sensible à chaque jour de la série d’étude et donc la création d’un fichier quotidien d’informations à appeler pour les analyses traitant de l’ICU sous diverses conditions météorologiques. Ces informations sont extérieures au réseau de mesures.

« Nous saisissons un presse orange, un verre et nous nous installons »

- La troisième partie contient les analyses et calculs appliqués sur des données nettoyées et croisées avec d’autres critères comme les types de temps ou la localisation des station via le prisme des morphologies urbaines.

« Nous coupons l’orange en deux, nous en tirons un jus rempli de vitamines C »

¹ Toutes les analyses sont produites via le logiciel R et sa suite de bureau Rstudio version R 3.5.3 (2019-03-11)

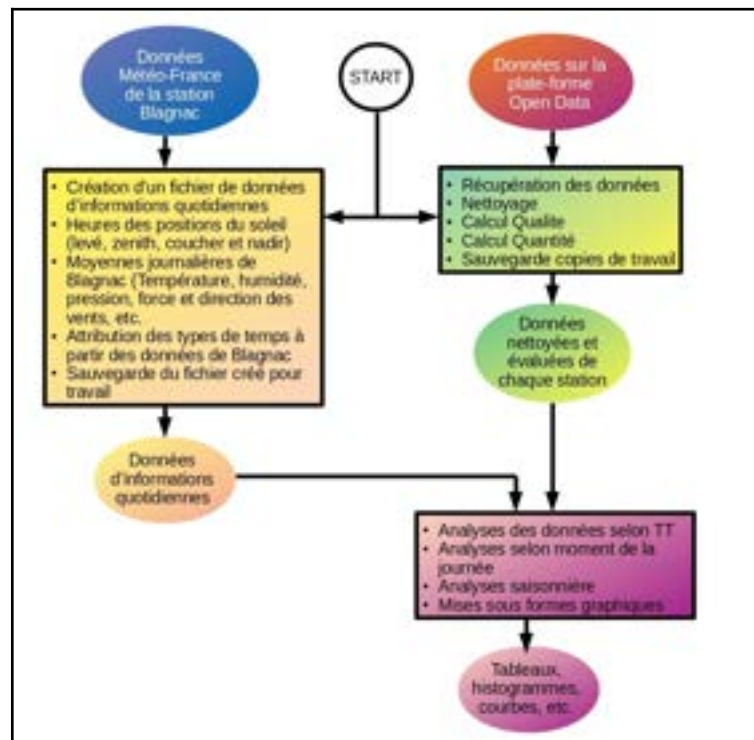


Figure 30, algorithme général : le traitement de l'information brute pour produire des analyses de l'ICU.

IV.1. Récupération, organisation et évaluation des données disponibles

Comme nous l'avons vu dans les parties précédentes, la donnée brute est disponible en téléchargement sur une application web appelée Open Data Soft. Chaque suite de capteur, composée au maximum d'une station et de trois sous-stations, dispose d'un fichier propre. Celui-ci incrémente chaque quinze minutes les dernières données de la suite de capteur à laquelle il est lié. C'est donc possible de calculer pour chaque station la quantité de données recues par rapport à celles que nous aurions dû recevoir sur une période donnée. Il est également possible de calculer, parmi les données reçues, lesquelles sont utilisables en filtrant les valeurs nulles.

IV.1.A. Quantité de données

La quantité de données correspond au nombre de données reçues sur le nombre de données que l'on aurait dû recevoir depuis la mise en marche effective du boîtier d'émission. Le réseau a commencé à émettre début juin 2019 avec des stations comme Valade ou Météopole. Mais d'autres stations sont plus récentes, comme celles du projet LIFE déployées durant l'été 2020 et équipées de Raspberry seulement depuis novembre/décembre de la même année.

La quantité permet de situer le niveau d'émission d'un Raspberry par rapport aux autres, notamment en donnant des informations sur la qualité du réseau SigFox. Nous considérons qu'un Raspberry qui émet à moins de 90 % éprouve des difficultés. Elles peuvent provenir du bâtiment s'il dispose de murs épais par exemple ou bien si le Raspberry est placé dans une salle sans fenêtre, au milieu d'interférences électroniques comme une pièce pour serveurs informatiques. À minuit le Raspberry se synchronise en demandant l'heure et la date, c'est seulement s'il reçoit cette trame d'information qu'il émettra lors de la journée, il doit donc être capable d'émettre mais aussi de correctement recevoir le réseau. Ces difficultés ont été déjà évoquées dans la partie concernant le déploiement du réseau et le choix des sites de mesures.

IV.1.B. Qualité des données

La qualité de la donnée correspond de son côté non pas aux messages reçus mais à ceux qui sont utilisables dans le lot. En effet le Raspberry n'envoie un message que si deux conditions sont réunies:

- il a pu établir une connexion avec la console et le datalogger.
- Il a reçu une synchronisation du temps à minuit ou lors de sa mise sous-tension (volontaire ou non).

Si la console n'a pas pu établir une liaison avec la station, le Raspberry, si synchronisé à minuit, enverra malgré tout un message, indiquant la valeur -50°C dans le champ température. De même si le capteur a eu un problème, la valeur 70°C est enregistrée. Enfin les données reçues sont considérées comme bonnes car des sécurités existent (cf. Chapitre III,2.A.) pour supprimer les doublons ou valeurs aberrantes. Nous pouvons donc déterminer, sur le total de messages recus, lesquels sont utilisables. C'est la qualité des données.

Si la quantité nous informe de la qualité du signal SigFox de la station, la qualité des données nous informe sur la liaison entre la console et la station. Considérons la station Quinze Sols, située dans un espace arboré loin de sa console et du datalogger. Le Raspberry émet avec des taux supérieurs à 90 %, mais la grande majorité des données sont inutilisables car estampillées du -50°C, indiquant des problèmes de liaisons entre console et station.

IV.1.C. Informer sur l'état du réseau et fiabiliser les calculs

Pour la gestion du réseau, une mauvaise quantité nous informe sur le besoin de changer d'emplacement pour le Raspberry, comme ce fût le cas à Mondonville pour la station de l'école Caroline Aigle. Nous pouvons également doter des sites d'antennes SigFox pour amplifier le signal. Cette solution n'a pour le moment jamais été expérimentée, principalement dû au coût d'achat et de mise en œuvre.

Une mauvaise qualité nous informe plutôt du besoin d'équiper de répéteurs . Ces boîtiers autonomes permettent de fiabiliser la liaison entre la station et sa console sur de longues distances. C'est le cas par exemple des parcs Compans Cafarelli et du Jardin des Plantes, déjà équipés de ces équipements, ou de la station des espaces végétalisés des Quinze Sols à Blagnac au nord de Toulouse.

Enfin, le principal objectif des informations sur la quantité et la qualité de données nous permettent également de valider l'utilisation d'une station sur une période donnée pour les analyses. Si nous prenons le cas de moyennes journalières, nous ne pouvons pas nous permettre de mobiliser une station qui aurait envoyé des données utilisables que pendant six heures, cela fausserait les résultats. C'est pourquoi le calcul de la quantité et de la qualité de données est répété selon différentes périodes. Il est donné pour la journée, le mois, la saison et sur le jeu global (c'est-à-dire depuis juin 2019). Pour la suite des calculs et des analyses, une moyenne n'est calculée que si la qualité et la quantité d'un jeu de données sur la période étudiée est supérieure à 75 % (tableau 10).

Période	Nombre de stations mobilisables (seuil 75%)	Nombre de stations mobilisables (seuil 50%)
Total de chaque station (depuis dates d'émissions)	26	36
Été 2019	13	30
Automne 2019	26	29
Hiver 2019	24	31
Printemps 2020	26	28
Été 2020	29	34
Automne 2020	31	38

Tableau 10, qualité et quantité des données reçues depuis juin 2019 et par saisons exprimées en nombre de stations.

Avec les stations du projet LIFE, équipées fin novembre et début décembre 2020, le réseau dispose de plus de 80 % de ses capteurs équipés de Raspberry. Le nombre de stations mobilisables avec plus de 75 % de données devrait s'élever à 38 stations au terme de l'hiver 2020. Des progrès sont donc encore nécessaires pour fiabiliser de nombreuses stations.

Il convient de mentionner ici les méthodologies pour traiter les jeux de données incomplets. Il existe des méthodes statistiques pour combler les manques de données (Shtiliyanova & al., 2017; Xu & al., 2013; Kajewska-Szkudlarek & al., 2018). Cependant pour des raisons de temps elles ne sont pas exploitées dans cette thèse. D'autant plus que l'un des objectifs est d'avoir un réseau « *plug and collect* » (branche et collecte) avec le moins de retouches sur la donnée derrière.

Pour les mêmes raisons, aucune correction n'est réalisée pour corriger les biais de températures du capteur dus à l'exposition solaire, bien que des méthodes statistiques existent (Hubbard & Lin, 2002, Cornes & al., 2020). Les stations Davis ont d'ailleurs fait le sujet d'évaluation sur les biais des valeurs de températures et leurs occurrences (Bell & al., 2015). Le biais dû à l'insolation des DAVIS est plus fort lors d'un angle solaire relativement faible (moins de 30°). Il est de l'ordre de 0.4°C en fin de journée. Cela est dû à la forme de la station avec la structure du pluviomètre et du boîtier au-dessus du bouclier anti-radiatif.

IV.2. L'îlot de chaleur classique

Dans cette première partie décrivant les analyses produites, nous exposons la caractérisation de l'ICU selon la dichotomie classique de l'urbain et du rural, exprimant les différences de températures de l'air de ces deux espaces. Comme nous l'avons vu en introduction c'est une étude que le monde scientifique a mené à maintes reprises depuis Luke Howard en 1833. Les termes ici « classique » ou « traditionnel » ne font pas référence à des études passées ou dépassées mais plus à une forme d'exercice cadré et consensuellement reconnu.

IV.2.A. Evaluer une étude d'ICU

Comme le souligne Stewart 2011, cette approche existe depuis plusieurs décennies mais n'est pas aisée à maîtriser. Il y déroule une critique systématique des études scientifiques publiées d'ICU réalisées entre 1950 et 2007 dans différentes langues majeures. Stewart estime alors que la moitié des études observées sont jugées comme irrecevables scientifiquement. Cela peut venir d'une incompréhension du concept même d'ICU, d'un manque de description des protocoles suivis ou encore d'un mauvais choix de sites de mesures. Son travail permet de positionner une étude de caractérisation de l'ICU face à neuf critères d'évaluation.

Le réseau déployé dans le cadre de cette thèse passe correctement huit de ces neuf critères (en version originale et avec traduction dans le tableau 11). Un de ces critères est actuellement incomplet, mais il ne gêne pas la mise en place d'analyses. Il concerne les métadonnées. Elles sont à ce jour en effet limitées à un tableur sur l'Opendata² de Toulouse Métropole contenant les données minimales exigées (coordonnées géographiques, identifiants, altitude, nom, etc.). Cela peut poser problème lors d'une évaluation concrète par des pairs extérieurs non familiarisés avec le travail mené durant cette thèse. Les métadonnées seront cependant complétées durant un travail ultérieur à la thèse.

2 <https://data.toulouse-metropole.fr/explore/dataset/stations-meteo-en-place/table/>

N°=	Critère	Mise en application
1	<i>Operational test and conceptual model are aligned;</i> (compréhension pratique et théorique de la réalisation des mesures de températures en milieu urbain)	Les mesures sont réalisées sous le niveau de la canopée urbaine, au regard des recommandations de l'OMM à savoir une certaine distance des bâtiments et avec un niveau d'ensoleillement suffisant.
2	<i>Operational definitions are explicitly stated;</i> (compréhension de ce qu'est l'ICU tant spatialement que temporellement)	L'ICU est ici clairement étudié comme la différence de température de l'air entre l'urbain et le rural avec un zoom spécifique sur les différences de températures réalisées durant la nuit.
3	<i>Instrument specifications are explicitly stated;</i> (présentation du matériel utilisé)	Les stations sont présentées, identiques et ont été évaluées qualitativement par la DSO de Météo France.
4	<i>Site metadata are appropriately detailed;</i> (présentation des sites de mesures)	Les métadonnées sont décrites partiellement (Annexe 2), en effet il manque l'aspect graphique (photos, croquis, plans, etc.). Critère incomplet mais qui n'impacte pas la qualité de la donnée physique.
5	<i>Field sites are representative of the local-scale surroundings;</i> (les sites de mesures sont choisis pour représenter leurs environnements homogènes)	L'utilisation des LCZ a été mobilisée pour remplir ce rôle. Les sites de mesures sont choisis au regard de leurs LCZ et d'autres critères.
6	<i>Number of replicate observations is sufficiently large;</i> (les données doivent être suffisantes pour éviter des effets de saisons ou de spécificités climatiques)	Les données sont prises tous les jours sur une période de plus d'un an.
7	<i>Weather effects are passively controlled;</i> (l'ICU est calculé en considérant les conditions météorologiques)	L'utilisation des types de temps et de données météorologiques pallie à ce critère. Certains types de temps propices au développement de l'ICU sont sélectionnés pour réaliser les calculs.
8	<i>Surface effects are passively controlled;</i> (les sites doivent être d'une élévation similaire)	Les sites de mesures d'élévation particulière sont évincés du jeu de données (comme la station Pech David) pour le calcul de l'amplitude de l'ICU.
9	<i>Temperatures are measured synchronously.</i> (les mesures sont synchronisées)	Les Raspberrys sont synchronisés via des requêtes de temps sur le réseau SigFox et les messages sont envoyés synchronisés toutes les 15mn.

Tableau 11, neufs critères d'évaluation d'une étude d'ICU selon I.D. Stewart (2011) et leur mise en application dans la thèse.

IV.2.B. Analyses de l'ICU sur la base de réseaux de mesures de température de l'air proposées par la littérature

Une fois les critères remplis, les travaux d'analyse peuvent être réalisés sereinement. La littérature propose plusieurs types d'analyses généralistes de l'ICU de canopée urbaine classique à savoir la différence de température entre « l'urbain » et le « rural » à quelques mètres au-dessus du sol, sous le niveau des arbres et des bâtiments. Pour rappel, selon le septième critère, elles sont toutes produites en se basant à minima sur une situation météorologique optimum pour l'observation de l'ICU. Cela signifie la présence d'un ciel dégagé, l'absence de pluie et un vent faible voir nul.

La première analyse potentielle est de considérer tout le jeu de données, nous parlons alors d'ICU moyen (Landsberg, 1970). Nous sectionnons alors dans ce cas le jeu de données en années par séries de quatre saisons consécutives ou selon l'année calendaire. Les analyses peuvent ensuite être poussées au regard de différents instants de la journée, tout en gardant en tête que, l'approche standard caractérise l'ICU juste avant le lever du soleil (Chow & al., 2006). L'ICU est observé à cet instant car c'est aussi le moment où les températures minimales sont relevées. Elles sont aussi disponibles sur de nombreux sites de mesures comme les stations des réseaux climatologiques. Aujourd'hui les réseaux nationaux relèvent les valeurs à des fréquences élevées en continu. Nous pouvons également découper les données selon un cycle jour et nuit en se servant des heures de lever et de coucher du soleil (Azevedo & al., 2016). Par extension nous pouvons mobiliser différentes tranches horaires définies autour des moments de la journée choisis tels que les deux ou trois heures précédant le lever du soleil ou son coucher ; le zénith ou le milieu de la nuit à plus ou moins une heure, etc. Cela permet de lisser les données et d'éviter toute anomalie dû par exemple à une mesure ponctuelle unique aberrante ou absente. Il peut ensuite être mené des études sur des périodes très spécifiques comme un mois ou encore une vague de chaleur pour une année donnée (Cheval & al., 2009, Richard & al., 2020). L'approche par mois ou par événements, bien que pertinente, n'est pas mobilisée dans le cadre de cette thèse.

IV.2.C. Choix des stations, des temporalités et résultats

Étudier l'ICU selon le sens classique du terme consiste donc à caractériser des différences de températures entre les cœurs de villes et leurs espaces les plus végétalisés. Dans le cas de Toulouse Métropole, l'analyse porte sur la différence entre 5 stations, trois pour l'urbain (St Cyprien, Valade et Carmes) et 2 pour le rural (Bouconne à l'ouest, Mondouzil à l'est). La situation géographique de ces stations est observable sur la figure 31.

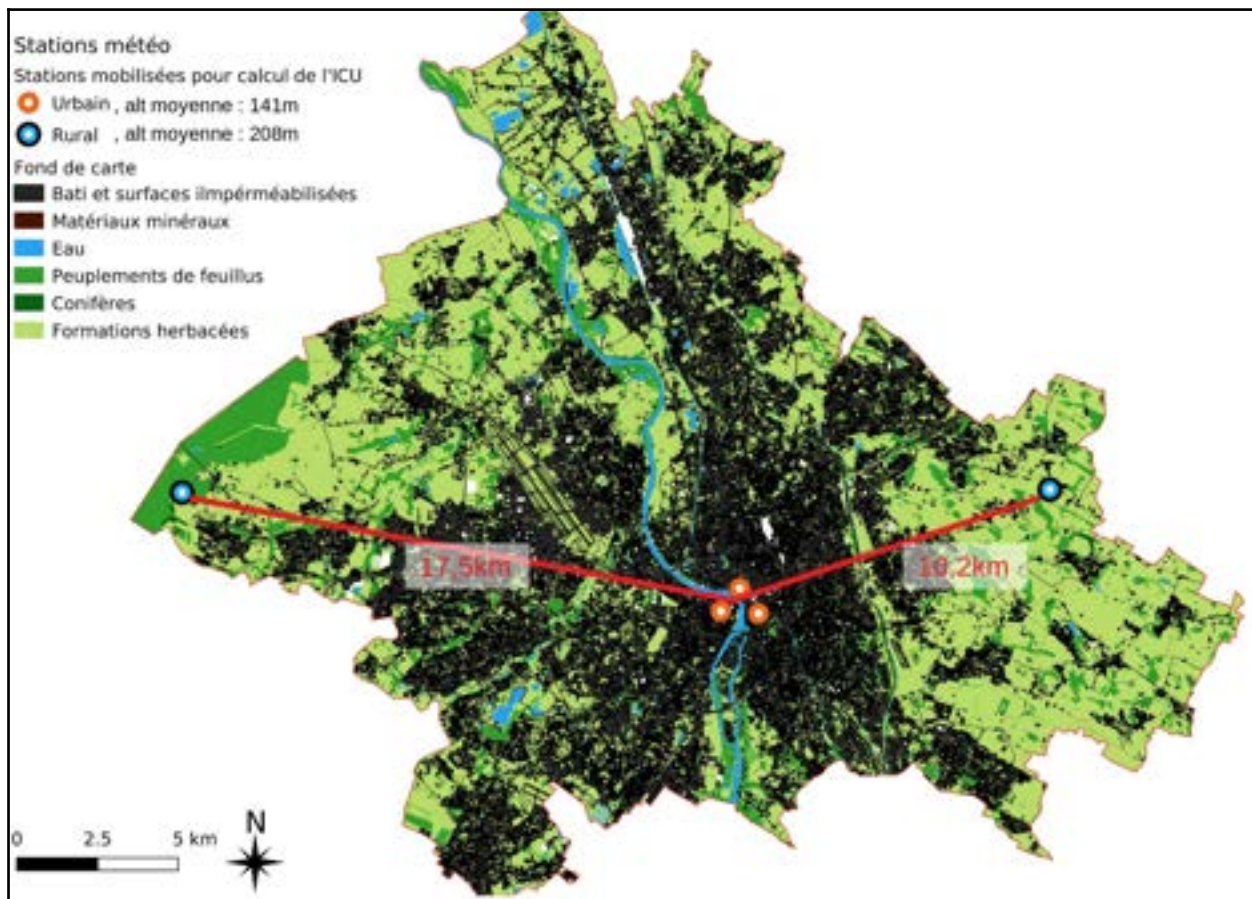


Figure 31, position des stations servant à l'étude de l'ICU classique de Toulouse Métropole.

Les emplacements sont choisis au regard de leur environnement sur un rayon de 250 m et de leur situation géographique au sein de la métropole comme le décrit la méthodologie des choix des sites du chapitre III. Les éloignements de 10 à 17 km entre l'urbain et le rural sont pertinents pour appréhender l'amplitude de l'ICU de Toulouse. En effet ils sont assez proches de la « tâche urbaine » mais suffisamment encerclés d'espaces fortement végétalisés. La différence d'altitude entre le centre-ville et les points ruraux est de 60m. Ce n'est donc pas parfait, mais demeure proche du négligeable si nous appliquons l'hypothèse d'un gradient vertical de température classique de $-0.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Sur l'ouest du territoire le long du transect du centre urbain à la station de Bouconne, les ruptures topographiques sont nettes, éloignées et de faibles intensités (entre 5 et 10 m en moyenne). C'est dû à la structure en terrasses de la Garonne. A l'est les reliefs sont plus marqués avec des dénivelés parfois de 30 mètres sur 200 mètres et un paysage de collines.

C'est donc pour pallier aux différences entre l'est et l'ouest que deux points sont choisis pour mesurer l'ICU, comme le suggère certains auteurs (Mohsin & Cough, 2012). D'autres points devraient être sélectionnés pour améliorer la mesure d'amplitude de l'ICU comme au nord ou au

sud ou encore un point bas dans l'est de la Métropole. Au sud la difficulté réside dans l'absence de points potentiels car le territoire de Toulouse Métropole ne s'étend pas au-delà des zones péri-urbaines. Les coteaux de Pech David, bien que situés au sud et fortement végétalisés, sont quant à eux exclus puisque le relief est trop prononcé et ne représente pas ses environs. Dans le nord les seuls points potentiels se situent dans la commune de Saint Jory, mais les espaces aquatiques proches et le récent placement de la station empêchent son intégration dans les calculs ici présents.

En complément de ces cinq stations, les données de la station Météo-France de Blagnac sont utilisées pour trier les jours « idéaux » à la formation de l'ICU selon trois variables :

- Le vent moyen journalier est faible, c'est-à-dire inférieur à un seuil de 2 m/s^{-1} . C'est un seuil arbitraire basé sur des études de différentes villes (Morris & al., 2001, McGregor & al., 2006, Yow, 2007).
- Le cumul de pluie journalier exprimé en millimètres est nul.
- La nébulosité est faible. C'est-à-dire que sa valeur est inférieure à 3 octas sur une échelle de 0 à 8¹ allant de ciel parfaitement dégagé au ciel intégralement couvert.

La période considérée s'étend sur quatre saisons consécutives du premier juillet 2019 au 30 juin 2020. Sont donc pris en compte pour déterminer l'ICU classique 53 jours idéaux répondant à ces critères une fois le filtrage effectif, sur un total de 366 jours considérés. Nous comptons 13 jours en hiver, 12 au printemps, 18 en été et 10 en automne.

1 Selon la définition proposée par Météo-France, disponible en ligne à l'adresse :<http://www.meteofrance.fr/publications/glossaire/152825-nebulosite>

Le calcul de l'ICU correspond à la moyenne, sur un instant précis, des différences des valeurs de températures moyennes de l'urbain et du rural pour chaque pas de temps du moment (15 mn, appelé i). Le nombre de pas de temps pris en compte dépend donc de la période observée, par exemple pour les positions du soleil (lever, coucher, zénith et nadir) ce sont à chaque fois 9 pas de temps qui sont sélectionnés, soit deux heures consécutives. Autrement dit :

$$\overline{\text{ICU}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Turb}_i - \text{Trur}_i)$$

$$\text{Turb}_i = \frac{(\text{Tvalade}_i + \text{Tcarmes}_i + \text{Tcyprien}_i)}{3}$$

Où :

$$\text{Trur}_i = \frac{(\text{Tbouconne}_i + \text{Tmondouzil}_i)}{2}$$

Pour certaines périodes il est possible que toutes les stations ne soient pas utilisées car des données sont indisponibles puisque le seuil de mobilisation d'une station est fixé à 75 %. C'est le cas de Bouconne et Valade qui ont été arrêtées pendant un mois sur l'ensemble du jeu. Les calculs sont cependant réalisés malgré l'absence de leurs valeurs. Ce sont alors les stations de Mondouzil (rural), de Carmes et de St-Cyprien (urbain) qui servent alors de référence. Les résultats n'en deviennent pas faux pour autant, la plupart des études n'utilisant qu'un seul point dans le rural et l'urbain. Les résultats des données de Toulouse pour la période du 01 juillet 2019 au 30 juin 2020 un ICU moyen sont dans le tableau 12.

Le tableau 12 et les suivants fournissent également le nombre de jours mobilisés pour les calculs ainsi que la qualité de l'effectif. Lorsque les calculs sont réalisés sur plus de 30 jours, l'annotation « robuste » est attribuée, entre 20 et 30, c'est « moyen » et entre 10 et 20 c'est « faible ». Si pour l'analyse moins de 10 jours sont disponibles alors il n'y a pas de calculs réalisés sur la période. Cette annotation n'invalide pas les calculs mais permet de regarder les résultats avec un œil précautionneux.

Variables	Urbain-Rural (en °C)
Nombre de jour/Qualité	53/Robuste
Tout le jeu de données	1.88
Lever du soleil (ICU classique)	2.33
Lever plus 3h	0.84
Zénith	1.18
Zénith plus 3h	1.11
Coucher du soleil	1.53
Coucher du soleil plus 2h	3.35
Milieu de la nuit (nadir)	2.4
Jour	1.24
Nuit	2.52
ICU max pas de temps unique	6.8 °C (le 03-07-2019 après le coucher)
ICU moyen max plage horaire	5.46 °C (le 21-05-2020 après le coucher)

Tableau 12, écarts de températures moyens (en °C) entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien) et rurales (Bouconne et Mondouzil), selon différentes périodes du jour, sur quatre saisons consécutives, pour des conditions météorologiques dégagées, sans pluie et avec un vent faible ou nul.

À partir des calculs de l'ICU pour chaque pas de temps il est possible de dresser l'évolution de l'écart de température (en °C) moyen sur 24 h (figure 32). Nous pouvons également répéter l'opération en « glissant » les saisons, le jeu de données considéré reste sur quatre saisons consécutives. Les différences de températures moyennes en conditions optimales de chaque année sont superposées. La variation de l'ICU inter-annuelle semble réduite. Le pic d'intensité est atteint aux alentours de 20h UTC, soit entre le coucher du soleil et le milieu de la nuit. Les horaires ne sont pas normalisés par rapport au cycle du soleil, cet horaire de pic représente donc une moyenne. Nous observons après ce pic à 20h une réduction rapide de l'écart de température.

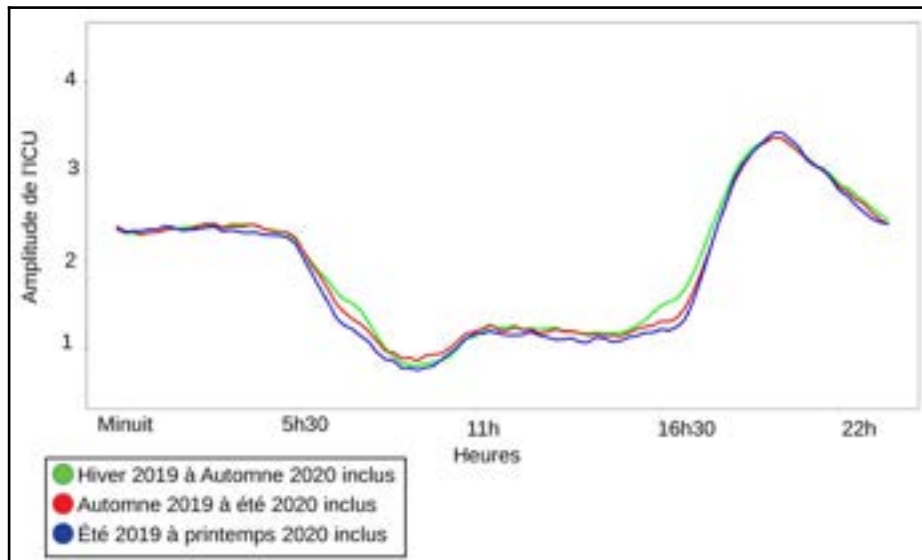


Figure 32, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h (en °C) entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien) et rurales (Bouconne et Mondouzil), sur quatre saisons consécutives, pour des conditions météorologiques dégagées, sans pluie et avec un vent faible ou nul (53 jours, 48 jours et 56 jours pour les 3 années étudiées). Temps non-normalisé par rapport au soleil.

Cette approche de l'ICU est basique car l'urbain n'est observé qu'au regard de ses stations centrales et le rural qu'au regard des stations aux environnements végétalisés. Elle se veut sommaire car l'approche météorologique et saisonnière est absente, seules les conditions anticycloniques annuelles étant observées.. Cependant elle présente plusieurs avantages. Elle permet en premier lieu d'appréhender l'intensité de l'ICU pour un territoire. En l'occurrence pour Toulouse Métropole sur une situation météorologique dégagée, nous savons que l'ICU oscille en moyenne entre 1 et 3,4 °C sur une journée sur une année complète avec une moyenne journalière de 1,88 °C. Ces valeurs, qui s'obtiennent en observant la variabilité temporelle de l'ICU, peuvent servir de comparaison avec l'ICU d'autres villes en théorie et en pratique.

En effet, les chercheurs ont tenté de relier la taille et la population des villes à l'amplitude assez rapidement dans les recherches. Oke, en 1973, présente déjà une analyse en ce sens. Depuis l'exercice a été répété et affiné. La métropole compte 771 132 habitants mais en prenant en compte l'aire urbaine au complet, l'agglomération atteint 1 360 514 habitants.. L'îlot de chaleur théorique maximum d'une ville américaine serait alors de plus de 11°C². Pour une ville Européenne comme Toulouse, la valeur théorique est de 8,27°C. Sur une année, le maximum observé est de 6,8°C à

² La formule d'une ville Nord Américaine est $ICU = 2,96 \log(\text{Population}) - 6,41$.

Toulouse, soit une valeur plus faible que le théorique. Cela peut s'expliquer par l'étalement et l'éclatement de l'aire urbaine, mais également les critères de définitions de celle-ci³.

Nous pouvons aussi comparer la forme de l'ICU moyen sur la journée. En observant les valeurs obtenues, nous remarquons que l'ICU le plus élevé se mesure après le coucher du soleil, aux alentours de 20h UTC. Cet ICU marqué après le coucher n'est pas une forme standard de l'ICU. La littérature présente plutôt un ICU avec une intensité maximum au milieu de la nuit, c'est le cas de villes comme Londres, Uppsala, Edmonton ou Saint-Louis (Oke & al., 2017), Birmingham (Chapman & al., 2015), ou même des villes tropicales comme Singapour (Chew & al., 2020) leur forme est plus en plateau, c'est à dire que l'écart de température augmente légèrement après le coucher du soleil jusqu'au milieu de la nuit avant de redescendre. En revanche des villes comme Ghent en Belgique (Caluwaerts & al, 2020) ou encore le réseau couvrant la Hollande-Méridionale autour de La Haye aux Pays-bas⁴ (Golroudbary & al., 2018) présentent des formes similaires à Toulouse. En terme de fréquence, cette valeur supérieure de l'intensité de l'ICU maximum après le coucher du soleil n'est pas systématique, sur le jeu de données et ses 53 jours considérés, l'ICU maximum est dans $\approx 75\%$ des cas après le coucher du soleil. Le quart restant se partage sans surprise entre le milieu de la nuit ($\approx 13\%$), le lever du soleil ($\approx 9\%$) et parfois le zénith ($\approx 2\%$).

À ce stade de l'analyse, c'est un portrait robot, une esquisse qui a été dessinée de l'amplitude et de la temporalité de l'intensité l'ICU. Il est désormais possible d'approfondir la recherche en se dotant de nouveaux prismes de lecture. L'un d'entre eux est d'aborder l'ICU au regard de nouvelles conditions météorologiques mais aussi de sa variabilité saisonnière. Cela introduit donc l'approche par type de temps.

3 Une aire urbaine en Europe ou aux Etats Unis ne se calcule pas de la même manière. En France c'est l'INSEE qui définit les méthodes de calcul.

4 Ce réseau d'ailleurs mobilise aussi des stations de la marque DAVIS dont les Vantage Pro II.

IV.3. Approche par type de temps et saisonnière

Le type de temps, de son nom usité « type de temps sensible » représente la caractérisation et description d'une journée au regard de ses conditions météorologiques au sein d'une longue série temporelle. Des variables telles que la force et la direction du vent, l'humidité, la pluviométrie ou encore la pression sont mobilisées pour différencier les journées entre elles. C'est une classification qui dispose de multiples usages en climatologie et en prévision. Nous pouvons citer par exemple le suivi des températures (Benatya, 2009) ou encore la réalisation d'atlas météo-climatiques à des fins de formations ou pour affiner les connaissances pour un territoire donné (Lassègues, 2011).

Dans l'étude présentée ici, chaque type de temps permet de réaliser des analyses de l'ICU en considérant d'autres données et conditions météorologiques que celles des jours idéaux. L'analyse peut ensuite être approfondie au-delà des types de temps en rajoutant la composante des saisons. Ainsi par exemple un jour de ciel nuageux avec un air chargé en humidité et avec un vent faible du nord-ouest sera pris en considération en été, au printemps, en automne et en hiver. Cette approche apporte une nouvelle grille de lecture par rapport à l'ICU plus traditionnel ou les conditions météorologiques sont figées.

IV.3.A. Le concept de type de temps

D'un point de vue épistémologique, le concept de « type de temps » est apparu à la fin du dix-neuvième siècle sous l'égide des météorologistes. Il a été par la suite repris par d'autres disciplines telles que la géographie, qui a su contribuer à la définition du concept. Ce syntagme a alors oscillé pendant presque un siècle entre description analytique et synthétique des états atmosphériques observés (Vigneau, 2004). Un tournant se réalise en 1973 avec le Congrès de l'Union Géographique Internationale (UGI). Les échanges qui s'y déroulent permettent de confirmer, de justifier, de proposer, de contextualiser et d'interroger le concept. Ils se nourrissent à la fois d'un point de vue francophone mais aussi en parallèle des approches anglo-saxonnes, ces dernières différant largement (Douguedroit, 2004). Durant les années qui suivent, le concept se sédimente autour de la fusion entre description de l'état de l'atmosphère et de l'état des circulations atmosphériques, coïncidant avec les nouvelles approches de la climatologie dite « compréhensive » (Douguedroit, 2003).

Un type de temps possède deux composantes distinctes : la temporalité et la spatialité. Si la temporalité a été consensuellement réglée pour stipuler que le type de temps se caractérise sur 24H, l'échelle spatiale n'a, quant à elle, pas encore trouvé son consensus. Il y a d'un côté la trinité de la climatologie macro/més/micro et de l'autre côté les réalités territoriales locales. La notion

d'échelle régionale a émergé, notamment portée par des travaux comme ceux de Jean Mounier (Douguedroit, 1980; Meynier, 1980) mais les contours demeurent encore flous. De nos jours nous observons des approches plurielles avec des complémentarités des unes par rapport aux autres, nous évoquons par exemple les approches « statiques » ou « météorologiques » (Lassègues, 2011). Dans l'approche météorologique, comme son intitulé l'indique, le domaine d'étude est construit au regard des phénomènes météorologiques que l'on peut y observer (Madec, 2009) : il ne doit pas les découper mais se structurer autour d'eux. Comme la taille de certains phénomènes varie d'une période à une autre, le domaine lui aussi peut fluctuer, par exemple au regard des saisons. L'approche statique crée un lien de corrélation entre petite échelle et grande échelle. Elle relie les statistiques de champs observés à fine échelle avec celles usitées dans les classifications de types de temps à une plus grande échelle (Benatya, 2009). Les deux approches demeurent complémentaires.

Au début des années 2000, les classifications de types de temps se sont multipliées. Cela est dû à l'essor de l'utilisation d'algorithmes statistiques assistés par ordinateur permettant de manipuler de larges jeux de données météorologiques (Jolliffe et Phillip, 2010). Des travaux ont donc émergé pour comparer les méthodes mais aussi retravailler les définitions et théories (Beck, 2010). C'est le cas de l'action COST-733 (Tveito O. & al., 2016). Elle a pour but de coordonner au niveau européen les recherches sur le sujet des classifications en types de temps entre 2004 et 2010. L'action permet d'inventorier les classifications existantes, leurs méthodes, les moyens de validation ou encore les applications envisagées. Cette action aboutit à des publications dans la veine des comparaisons ou des présentations de classifications (Beck & al. , 2009; Philipp & al., 2009) qui ont émergé au début des années 2000.

De nos jours, l'exercice des types de temps est courant, et de nombreux territoires disposent de classification, c'est le cas de Toulouse.

IV.3.B. Les types de temps de Toulouse

Dans le cadre du travail sur le périmètre du réseau, c'est-à-dire Toulouse Métropole, la classification de type de temps disponible considère l'ensemble de la métropole comme étant doté d'un système de type de temps identiques. La classification est réalisée selon des méthodes statistiques supervisées et résulte de travaux sur les données de la station météo Météo France de Blagnac, au nord-ouest de Toulouse (Hidalgo 2014 ; Jouglà & al., 2019) sur des données s'étalant de 1998 à 2008. Certains de ces travaux eux ont été menés durant les projets MApUCE et ACCLIMAT, déjà introduits auparavant.

Sur le territoire Toulousain nous dénotons dans la classification utilisée 11 types de temps. Ils s'organisent autour de 11 clusters de données. Le terme cluster renvoie à la méthode statistique supervisée mobilisée pour générer la classification, à savoir K-means.

La mobilisation des types de temps a deux avantages dans le cadre des services climatiques développés à Toulouse. Le premier est de disposer, tout comme les *Local Climate Zones*, d'un outil de langage qui fait pont entre la climatologie et le vécu des individus ou des techniciens en demande d'analyses climatiques (Hidalgo & al., 2018). En effet si le type de temps 2, ou encore le cluster 2, parle aux initiés, sa traduction en « jour avec du vent d'Autan » est plus évocatrice. Les types de temps de Toulouse et de ses alentours, ainsi que leurs descriptions générales et détaillées se trouvent dans tableau 13. Pour la suite des analyses, les intitulés des types de temps utilisés sont indiqués en gris dans le tableau.

Tableau 13 (page suivante), types de temps de Toulouse Métropole. Son contenu provient d'un document de travail interne au projet MApUCE (Hidalgo, 2016).

Intitulé du Type de temps sensible / Code (pour légendes des graphiques et textes)	Description générale	Descriptif détaillé
<p>Situation typique d'été bien ensoleillé avec vent du NO (Cluster 8) / Chaud/NO</p> <p>Situation ensoleillée, très chaude en été, avec vent faible du NO (Cluster 9) / Très chaud/vent faible</p> <p>Situation typique d'été bien ensoleillée avec vent du SE (Cluster 7) / Chaud/SE</p> <p>Situation typique d'hiver bien ensoleillé sans vent (Cluster 5) / Anticyclone hiver</p>	<p>Le ciel est clair avec une forte stabilité atmosphérique et forte insolation.</p>	<p>C'est le type de jour le plus fréquent en été avec plus de 50% des jours en été pour ce cluster. La température est relativement élevée, tant en été où la Tmax d'été est de 30°C (étant la Tmax moyenne du cluster de 25°C), qu'en hiver, Tmax d'hiver est de 10°C (la Tmax moyenne du cluster est de 13°C) pour un vent de NO qui peut être relativement fort surtout en été et en hiver avec des pics à 4 et 6 m/s respectivement dans l'après midi. Il n'y a pas de forte précipitation mais l'humidité spécifique est assez élevée en été et en automne (> 0.01 kg/kg).</p> <p>C'est un type de jour très fréquent dans toutes les saisons. En été, la température peut monter jusqu'à 40°C, mais les jours sont froids et ensoleillés en hiver (la Tmax moyenne du cluster est de 10°C). Le vent souffle de l'Ouest le matin à NO l'après midi et puis SO à nouveau dans la soirée. La vitesse du vent varie elle aussi entre 2 m/s le matin à 4 m/s en milieu de journée à 2 m/s à nouveau en fin de journée.</p> <p>C'est un type de jour typiquement d'été avec plus de 50% des jours de ce cluster. Il est absent en hiver. En été, la température peut atteindre les 40°C, caractérisée par une grande amplitude thermique et un vent de SE persistant mais faible (2 - 3.5 - 25 m/s au matin, dans l'après midi et le soir respectivement).</p> <p>Situation très ensoleillée typique de l'hiver. Le rayonnement solaire global maximum, Rgmax, est de 800W/m² en été et 250 W/m² en hiver. Il est peu fréquent en été avec de températures élevées (Tmax=30°C, Tmax moyenne du cluster =27°C) et froid en hiver (Tmax=0C, Tmax moyenne du cluster=9C). Le vent est très faible, de 1 à 2 m/s, et souffle du sud le matin avec un léger tournant au sud-est l'après midi. Ce type de jour est très fréquent en région Toulousaine.</p>
<p>Situation avec du vent d'Autan (Cluster 2) / Autan</p> <p>Situation pluvieuse avec vent de SE (Cluster 1) / Pluie /SE</p>	<p>Le flux de vent provient du sud-est</p>	<p>Relativement fréquent surtout au printemps et en automne, correspond à des situations de vent d'Autan très fort en milieu de journée (4-7-4 m/s en moyenne). Le vent est plus faible en été mais ce type de temps est très peu présent dans cette saison. Il n'y a pas de précipitation appréciable pour ce type de jour.</p> <p>C'est un type de jour qui ressemble au précédent en terme de température mais beaucoup moins fréquent. Le vent est plus faible (2m/s en moyenne) et les précipitations sont relativement fortes dans l'après midi. Le vent peut atteindre 5 ou 6 m/s en moyenne en été, mais il y a très peu de jours attribués à ce cluster dans cette saison (9 jours). C'est un type de jour plus commun dans les inter-saisons (printemps et automne).</p>
<p>Situation de forte pluie (Cluster 4) / Pluie</p> <p>Situation de très forte pluie (Cluster 10) / Pluie forte</p>	<p>Les précipitations sont marquées</p>	<p>Ce type de jour est fortement précipitant dans l'après midi avec des ciels nuageux (RG 400 W/m² en été et 150 W/m² en hiver). Le vent du NO est faible le matin (2 m/s en moyenne) et s'accélère dans l'après midi par la présence d'orages. La pluie fait que le taux d'humidité spécifique est relativement élevé en été et en automne (en moyenne > 0.01 kg/kg). Ce type de jour n'est pas très fréquent mais sa répartition est équilibrée tout au long de l'année.</p> <p>Des précipitations plus intenses que dans le cluster précédent, tant le matin que l'après midi. Il présente un vent fort de O-NO. Seulement 8 jours sont attribués à ce cluster dont la moitié en automne.</p>
<p>Situation typique d'hiver avec des précipitations faibles (Cluster 0) / Hiver nuageux</p> <p>Situation avec du vent fort de NO typique des inter-saisons et de l'hiver (Cluster 3) / Vent NO</p> <p>Situation nuageuse avec vent fort du NO et précipitations (Cluster 6) Pluie/NO</p>	<p>Le vent vient du nord-ouest avec ou sans précipitations.</p>	<p>Vent faible du O-NO-O assez constant en intensité, autour de 2m/s. C'est un type de jour typique d'hiver, avec 50% des jours du cluster, et avec un peu de précipitation. Il est absent en été.</p> <p>Très fréquent dans les inter-saisons et l'hiver. Vent fort du NO (4-6-4 m/s en moyenne). Direction du vent très stable.</p> <p>Vent fort de NO (4-6-4 m/s en moyenne) avec précipitations tout le long de la journée. C'est un type de jour avec une très faible amplitude thermique, qui est assez froid en été (Tmax moyenne = 18°C). Il est typique des inter-saisons et de l'hiver où le cycle de RG d'été présente une déformation le matin, sûrement due à une forte présence nuageuse</p>

Le deuxième avantage à mobiliser le concept des types de temps autour des services climatiques de Toulouse est de maintenir la continuité avec des travaux déjà engagés. En effet la collectivité intègre la classification au sein de certains documents et travaux, notamment ceux menés avec l'agence d'urbanisme Aua/T et des services en charge du Plan Local d'Urbanisme intercommunal et de l'Habitat. La continuité capitalise un socle de connaissances communes et offre une aide à la réalisation des services climatiques, car réduisant les phases d'acculturation.

IV.3.C. L'attribution des types de temps au jeu de données des capteurs

Le travail sur les types de temps concerne en premier lieu l'attribution de chaque journée du jeu de données à un des 11 clusters existants émanant des études pour Toulouse. Depuis le 01 juin 2019 ou l'émission des données commence jusqu'au 16 décembre 2020 date de fin de l'échantillon de travail, 554 jours sont à attribuer. Pour cela, la méthodologie mobilise les moyennes journalières et leurs distances par rapport aux moyennes des clusters de chaque type de temps (tableau 14).

Cluster number	$AT = T_{max} - T_{min}$ (°C)	FF (m.s ⁻¹)	DD (quadrants)	PP (mm.h ⁻¹)	q (g.kg ⁻¹)
Hiver nuageux (0)	5.60	1.43	3.7	0.071	5.07
Pluie/SE (1)	7.31	2.59	2.0	0.297	8.42
Autan (2)	6.19	6.25	2.1	0.016	7.09
Vent/NO (3)	3.43	4.27	3.9	0.065	5.07
Pluie (4)	6.44	3.13	3.6	1.003	9.42
Anticyclone hiver (5)	9.75	2.37	1.9	0.012	5.67
Pluie/NO (6)	5.05	4.56	3.7	0.436	7.21
Chaud/SE (7)	11.08	2.62	1.9	0.014	10.45
Chaud/NO (8)	7.23	2.38	3.8	0.089	10.82
Très chaud/vent faible (9)	12.49	1.80	3.8	0.059	7.03
Pluie forte (10)	4.15	5.01	3.1	1.938	9.03

Tableau 14, les types de temps et leurs valeurs moyennes observées à Toulouse. Delta de température en °C, force et direction moyenne du vent, exprimées en m/s et en quadrans (0-90 ° => 1, 90-180 ° => 2, 180-270 => 3, 270-360 => 4), pluie moyenne par heure et humidité spécifique en g/kg (tirée de Hidalgo & al., 2018).

A partir de la classification existante, basée sur la période 1998 à 2008, nous attribuons selon un calcul de distances Euclidiennes chaque jour de la période d'étude (01/06/2019 au 16/12/2020) à l'un des 11 type de temps existant. Nous obtenons l'histogramme visible sur la figure 33.

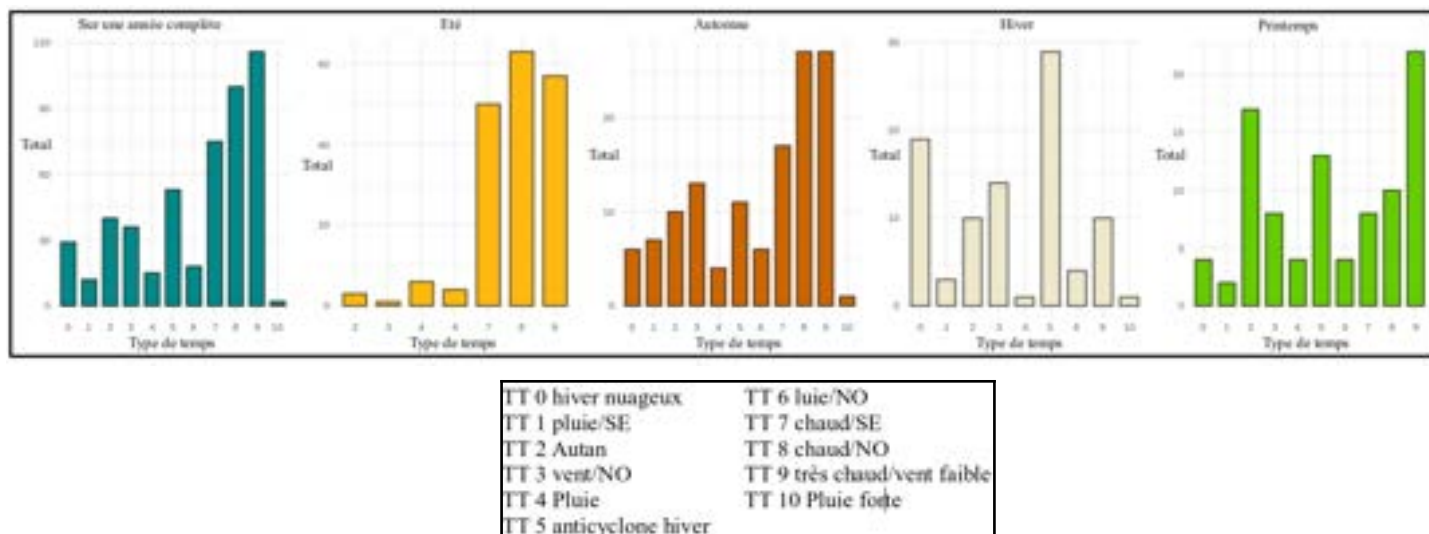


Figure 33, histogramme des types de temps sur le jeu de données (01/06/2019 au 16/12/2020) au global et par saisons. De gauche à droite : global, été, automne, hiver et printemps.

Il est ensuite possible sur la même figure d'observer les types de temps obtenus pour chaque saison. Nous remarquons alors sans surprise que l'effectif de chaque type de temps rapporté à chaque saison varie drastiquement. Considérons en automne les types de temps Autan (2) et Vent/NO (3). Nous dénombrons respectivement 21 et 23 jours en automne et moins de 5 de chaque en été.

Pour rappel, une qualification de la quantité de données du réseau a été mise en place (Robuste/moyen/faible). Si un calcul est réalisé avec moins de 10 données, il n'est pas livré aux services. Nous pouvons observer alors que les jours de pluies, quelles que soient les saisons, ne dépassent pas les 10 jours. Ce sont les types de temps Pluie (4), Pluie/NO (6) et Pluie forte (10). Sur l'ensemble des données d'une année, seul le type de temps Pluie/NO (6), qui correspond à un jour nuageux avec vent fort du nord ouest et précipitations, dépasse les 20 jours.

De même, il est important de déterminer quels types de temps sont à considérer comme identiques par rapport à leurs influences sur l'ICU. Dans ce cas, nous nous intéressons alors à la représentativité statistique.

IV.3.D. La représentativité des types de temps.

Le jeu de données s'étalant sur un an et demi, l'effectif des types de temps est suffisant pour une analyse en moyenne annuelle. Cependant des limites se font sentir pour une approche saisonnière. En effet, sur l'ensemble des jours étudiés, il n'y a qu'un hiver et un printemps mais deux automnes et étés. De facto, un travail a été réalisé pour déterminer quels sont les types de temps qui peuvent être regroupés au regard de leur variabilité de l'ICU. Pour cela, une méthode de différences des médianes via le test Wilcoxon (tableau 15) est mobilisée.

saison	TT	Qualité TT9		Qualité TT3		Qualité TT2		Qualité TT3		Qualité TT5		Qualité TT7		Qualité TT8		Qualité TT9	
		TT9	TT3	TT2	TT3	TT2	TT3	TT5	TT7	TT8	TT9	TT8	TT9	TT8	TT9		
SPRING	2							0,021 limite						0,564 limite			0,005 limite
	5			0,021 limite										0,006 limite			0,798 limite
	8			0,564 limite				0,006 limite									0,0004 limite
	9			0,005 limite				0,798 limite						0,0004 limite			0,0004 limite
SUMMER	7													0,000 robuste			0,778 robuste
	8												0,778 robuste			1,59E-05 robuste	1,59E-05 robuste
	9												1,59E-05 robuste			0,778 robuste	
AUTUMN	1			0,150 limite		0,150 limite		0,590 limite		0,004 limite		0,001 limite		0,636 limite			0,004 limite
	2			0,590 limite		0,054 moyen		0,054 moyen		4,43E-05 moyen		0,000 limite		0,005 moyen			3,91E-05 moyen
	3			0,054 moyen		4,43E-05 moyen		4,83E-07 moyen		4,83E-07 moyen		7,22E-06 limite		0,034 moyen			4,68E-07 moyen
	5			0,004 limite		4,43E-05 moyen		4,83E-07 moyen		4,83E-07 moyen		0,142 limite		0,000 moyen			0,982 moyen
	7			0,001 limite		0,000 limite		7,22E-06 limite		0,142 limite		0,142 limite		4,20E-05 limite			0,110 limite
	8			0,636 limite		0,005 moyen		0,034 moyen		0,000 moyen		4,20E-05 limite		0,110 limite			6,01E-05 moyen
WINTER	0			0,347 limite		0,347 limite		0,729 limite		0,020 limite							0,598 limite
	2		0,347 limite					0,332 limite		0,962 limite							0,521 limite
	3		0,729 limite					0,332 limite		0,962 limite							0,305 limite
	5		0,020 limite					0,962 limite		0,002 limite							0,296 limite
	9		0,598 limite					0,521 limite		0,305 limite							0,296 limite

Tableau 15, résultats du test Wilcoxon par Type de temps. Lorsque la valeur est inférieure à 0,05, alors on considère avec 95 % de certitude que les deux types de temps comparés sont différents.

C'est un test non-paramétrique de comparaison entre deux échantillons indépendants. Chaque série d'ICU calculé selon la méthode classique avant le lever du soleil pour chaque type de temps de chaque saison est comparée aux autres séries. En d'autres termes nous cherchons à savoir quelles sont les valeurs de l'ICU qui sont différentes lorsque nous comparons un type de temps à un autre. Il en ressort ainsi que:

- En été, les situations de chaud/SE (7) sont groupées avec très chaud/vent faible (9)). Chaud/NO (8) est mis à part.
- En hiver, les types de temps hiver/nuageux (0), Autan (2), Vent/NO (3) et très chaud/vent faible (9) sont regroupés, l'anticyclone hiver (5) est mis à part.
- Au printemps, Autan (2) et chaud/NO (8) sont mis ensemble ainsi que le très chaud/vent faible (9) avec l'anticyclone hiver (5).
- Enfin en automne les situations très chaud/vent faible (9), chaud/SE (7) et l'anticyclone hiver (5) sont regroupés. Le chaud/NO (8) est seul. Les Pluie/SE (1), Autan (2) et Vent/NO (3) sont placés dans un troisième groupe.

Naturellement, les intersaisons (printemps et automne) disposent d'une plus grande diversité de types de temps, reflétant une plus grande variabilité météorologique. Nous comptons alors 3 groupes en automne constitués de 7 types de temps. Quelle que soit la saison, le type de temps chaud/NO (8) semble être une situation à part des autres. Enfin le type de temps très chaud/ vent faible (9) semble disposer de similitudes avec le chaud/SE (7) et l'anticyclone/hiver (5).

IV.3.E. L'ICU selon les saisons et les types de temps.

Une fois les types de temps attribués et regroupés, il est possible de déterminer l'ICU correspondant à l'écart entre l'urbain et le rural selon deux optiques :

- au regard des saisons (tableau 16 et figure 34)
- selon des types de temps par saison (tableau 17 et figure 35).

Variables	Urbain-Rural (en °C)	Hiver	Printemps	Eté	Automne
Nombre de jour/Qualité	53/Robuste	13/limite	12/limite	29/moyen	28/moyen
Tout le jeu de données	1.88	1.65	2.01	2.1	1.85
Lever du soleil (ICU classique)	2.33	1.74	2.41	2.96	2.27
Lever plus 3h	0.84	1.04	0.74	0.79	0.67
Zénith	1.18	1.46	1.46	1.14	0.83
Zénith plus 3h	1.11	1.23	1.44	1.07	0.94
Coucher du soleil	1.53	1.32	1.65	1.85	1.4
Coucher du soleil plus 2h	3.35	2.38	3.66	3.96	3.24
Milieu de la nuit (nadir)	2.4	1.64	2.58	3.05	2.21
Jour	1.24	1.31	1.36	1.3	1.08
Nuit	2.52	1.92	2.8	3.13	2.52
ICU max pas de temps unique	6.8 °C (le 03-07-2019 après le coucher)	3.47 °C (le 11-01-2020 au lever)	5.85 °C (le 25-05-2020 après le coucher)	6.8 °C (le 03-07-2019 après le coucher)	4.95 °C (le 01-12-2017 après le coucher)
ICU moyen max plage horaire	5.46 °C (le 21-05-2020 après le coucher)	3.12 °C (le 29-12-2019 après le coucher)	5.46 °C (le 21-05-2020 après le coucher)	5.6 °C (le 08-07-2020 après le coucher)	4.48 °C (le 19-09-2019 après le coucher)

Tableau 16, écarts de températures moyens (en °C) entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien) et rurales (Bouconne et Mondouzil) selon différentes périodes du jour, pour chaque saison, sous des conditions météorologiques dégagées, sans pluie et avec un vent faible ou nul.

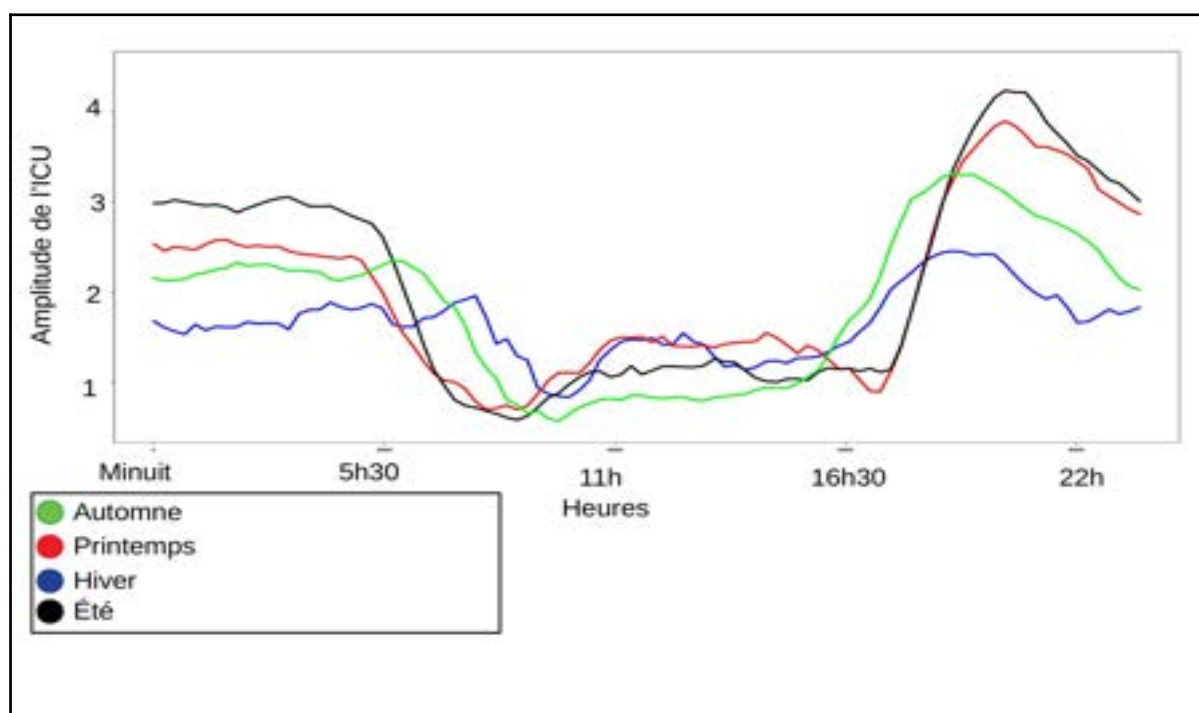


Figure 34, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h (en °C) entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien) et rurales (Bouconne et Mondouzil), par saison, sous des conditions météorologiques dégagées, sans pluie et avec un vent faible ou nul.

Saison	Hiver		Printemps		Été		Automne		
Types de temps observés	5	2309	28	95	8	79	579	8	123
Qualité/effectif	Moyen/29	Robuste/54	Moyen/27	Robuste/35	Robuste/63	Robuste/107	Robuste/76	Moyen/29	Robuste/56
Tout le jeu de données	1,53 °C	1,35 °C	1,31 °C	1,85 °C	1,83 °C	1,79 °C	1,9 °C	1,95 °C	1,94 °C
lever du soleil (ICU classique)	1,9 °C	1,48 °C	1,49 °C	2,16 °C	2,13 °C	2,75 °C	2,35 °C	1,54 °C	1,31 °C
lever +3h	1,42 °C	0,86 °C	0,85 °C	0,94 °C	1,26 °C	0,9 °C	0,9 °C	1,09 °C	0,98 °C
zénith	1,28 °C	1 °C	0,95 °C	1,31 °C	1,23 °C	1,06 °C	0,86 °C	1,04 °C	0,9 °C
zénith +3h	1,12 °C	1,08 °C	1,1 °C	1,32 °C	1,39 °C	1,12 °C	0,96 °C	1,16 °C	0,91 °C
coucher	1,13 °C	1,17 °C	1,17 °C	1,52 °C	1,68 °C	1,7 °C	1,31 °C	1,45 °C	1,02 °C
Coucher +2h	1,58 °C	1,69 °C	1,72 °C	3,02 °C	2,87 °C	3,26 °C	2,54 °C	2,58 °C	1,53 °C
nadir	1,69 °C	1,43 °C	1,7 °C	2,35 °C	2,46 °C	2,8 °C	2,3 °C	1,7 °C	1,34 °C
jour	1,34 °C	1,06 °C	1,05 °C	1,33 °C	1,41 °C	1,25 °C	1,14 °C	1,21 °C	1,01 °C
nuit	1,51 °C	1,56 °C	1,82 °C	2,49 °C	2,64 °C	2,59 °C	2,08 °C	1,83 °C	1,32 °C
ICU max par pas de temps	4,7 °C (lever le 08/01/2020)	6,2 °C (lever le 14/12/2019)	4,34 °C (nadir le 08/04/2020)	5,65 °C (après le coucher 20/05/2020)	6,83 °C (après le coucher 09/07/2019)	6,8 °C (après le coucher 17/07/2019)	4,95 °C (après le coucher le 03/09/2019)	4,68 °C (après le coucher 18/09/2019)	4,38 °C (coucher le 20/09/2019)
ICU max par plage	3,8 °C (lever le 25/01/20)	5,6 °C (lever le 16/12/2019)	4 °C (nadir le 11/04/2020)	5,45 °C (21/05/2020)	6,11 °C (après le coucher 13/07/2019)	5,6 °C (après le coucher 08/07/2020)	4,56 °C (lever le 17/09/2020)	4,48 °C (après le coucher le 19/09/2019)	4,16 (lever le 14/11/2020)

Tableau 17, écarts de températures moyens (en °C) entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien) et rurales (Bouconne et Mondouzil) selon différentes périodes du jour, par saison, pour chaque groupe de types de temps.

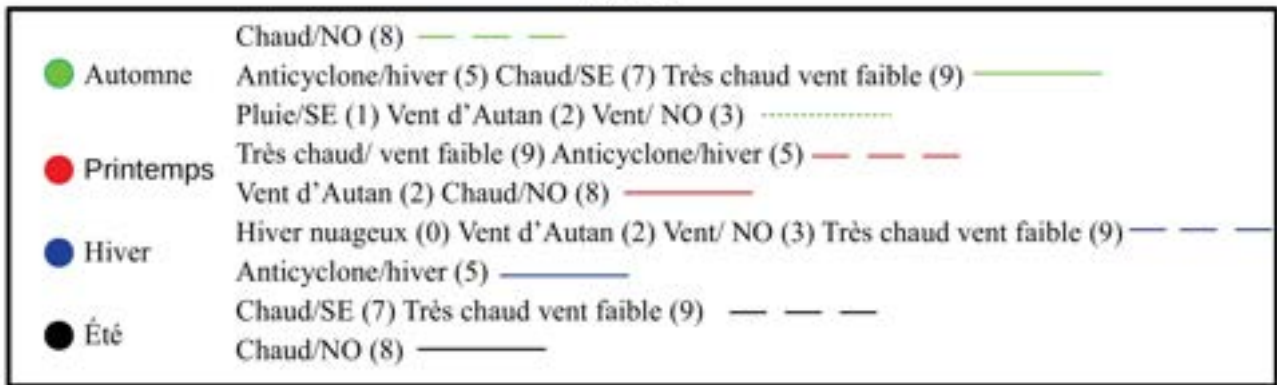
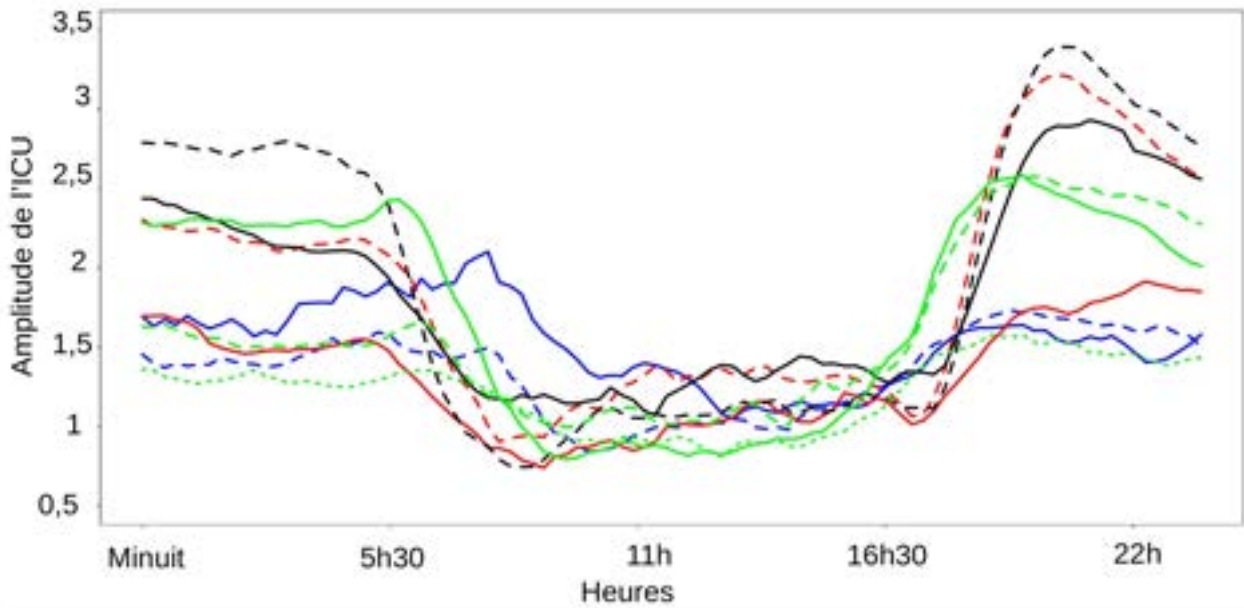


Figure 35, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h (en °C) entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien) et rurales (Bouconne et Mondouzil), par saison, pour chaque groupe de types de temps.

IV.3.E.a. Un Îlot de Chaleur aux intensités et durées différentes d'une saison à une autre

L'ICU observé entre les stations urbaines et rurales ne possède pas les mêmes intensités en fonction des saisons. De même pour le taux de réchauffement/refroidissement, avec par exemple +2,5 °C en 4 h à la tombée de la nuit en été pour le groupe de type de temps chaud/été/SE (7) et chaud/été (9) et +1,5 °C pour le type de temps chaud/NO (8). Nous pouvons alors noter, suite à cette croissance rapide de l'écart de température de fin de journée la présence d'un pic d'intensité pour certains types de temps après le coucher du soleil. En effet, l'intensité maximum (3,26°C) est atteinte lors des jours chauds d'été (chaud/été/SE (7) et chaud/été (9)) après le coucher du soleil, vers 21h30 UTC. Le même type de temps très chaud/vent faible (9), couplé avec celui en condition d'anticyclone/hiver (5) présente la seconde plus grande intensité à ce moment au printemps avec un

peu plus de 3°C de moyenne. Les intensités maximales de ces deux groupes de type de temps peuvent être deux fois plus élevées que les moyennes avec respectivement 5,85°C au printemps et 6,8°C en été. Nous retrouvons d'autres intensités maximales au dessus de 6°C à d'autres saisons, comme en hiver, elles interviennent parfois avant le lever du soleil avec 6,2°C pour les types de temps hiver/nuageux (0) vent d'Autan (2) vent/NO (3) et très chaud/vent faible (9).

Les jours de vent faible en été ont de surcroît la particularité de maintenir l'ICU le plus élevé pendant la nuit, avec une moyenne de 2,8°C au milieu de la nuit et 2,75°C avant le lever du soleil. Ce maintien nocturne est également visible à des intensités moindres sur la plupart des autres types de temps et saisons avec des variations de l'ICU de moins de 0,5°C entre minuit et le lever du soleil. De surcroît, de par le cycle et la position du soleil en été, l'ICU de cette saison est aussi le plus court en durée, car il dure environ 8 heures au dessus de 1,5°C.

Il est notable que quels que soient les types de temps ou les saisons observés, l'ICU de fin de matinée et de l'après midi tourne autour de 1°C, avec des moyennes basse à 0,85°C et haute vers 1,4°

Les ICU les plus marqués s'observent donc la nuit avec un ICU moyen saisonnier oscillant entre 1,43°C et 2,8°C d'une saison à l'autre. Ce sont alors ses intensités et ses durées qui varient. Enfin les moments de ses intensités maximales ne se mesurent pas systématiquement après le coucher du soleil, notamment en hiver, où le maximum de l'ICU a lieu en fin de nuit, comme décrit ci-après.

IV.3.E.b. L'îlot de Chaleur d'hiver

Un îlot de chaleur moins intense mais plus long

L'îlot de Chaleur observé en hiver est spécifique à bien des égards. En premier lieu il est l'ICU le plus faible en début de nuit (1,58°C après le coucher du soleil). Mais c'est également un ICU long, qui dure presque 12h. Il découle d'un temps d'ensoleillement réduit qui impacte son ICU de fin de journée et d'après le coucher du soleil. Mais au-delà de la durée d'ensoleillement, la présence régulière de nuages affecte son intensité.

L'impact de la nébulosité.

En effet, c'est en hiver que l'on trouve la nébulosité moyenne la plus élevée s'approchant des 5 octas de moyenne contre 3 ou 4 pour les autres saisons. C'est en hiver également que les rejets de chaleur liés aux activités humaines sont élevés (en particulier dû à l'utilisation du chauffage). Si l'évolution temporelle de l'ICU sur les figures 34 et 35 montre l'ICU selon des conditions dégagées

ou selon divers type de temps, elles ne permettent pas de considérer les effets de la nébulosité sur l'ICU. Il est alors pertinent de s'intéresser aux jours d'hiver avec une couverture nuageuse importante (supérieure à 6 octas), sans vent ni pluie car ils sont propices au développement d'un ICU.

Nous obtenons les valeurs moyennes et l'évolution temporelle d'un ICU fortement lié aux rejets anthropiques (figure 36 et tableau 18), les apports de chaleur du soleil étant limités par la couverture nuageuse.

Variabes	Moyennes
Nombre de jour/Qualité	12/limite
Tout le jeu de données	1.53
Lever du soleil (ICU classique)	1.46
Lever plus 3h	1.07
Zénith	1.1
Zénith plus 3h	1.5
Coucher du soleil	1.54
Coucher du soleil plus 2h	1.88
Milieu de la nuit (nadir)	1.63
Jour	1.3
Nuit	1.77
ICU max pas de temps unique	2.93 °C (le 01-12-2019 au lever)
ICU moyen max plage horaire	2.66 °C (le 28-12-2019 après le coucher)

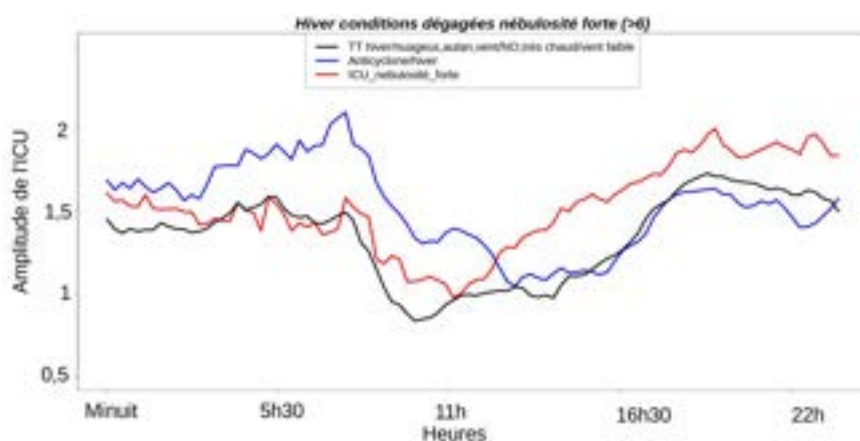


Figure 36, évolution de l'écart de température moyen sur 24h (en °C) entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien) et rurales (Bouconne et Mondouzil), selon plusieurs situations météorologiques d'hiver: nuageuse venteuse, anticyclonique et nébulosité élevée (>6).

Tableau 18, écarts de température moyens (en °C) entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien) et rurales (Bouconne et Mondouzil) selon différentes périodes du jour, en hiver, pour des conditions météorologiques dégagées sans pluie, avec un vent faible ou nul et une nébulosité élevée (>6).

Les résultats montrent alors un ICU de 1,53°C de moyenne équivalent à celui du type de temps anticyclone/hiver (5). Avec 1,77°C d'écart moyen entre l'urbain et le rural de nuit et une moyenne maximum après le coucher du soleil à 1,88°C, les observations sont supérieures à celles des deux groupes de types de temps d'hiver. Sur l'évolution temporelle, nous constatons nettement une croissance de l'écart des températures de 0,15 °C/h continu à partir de 11h UTC environ jusqu'à 17h30 UTC. Une fois le soleil couché, l'écart avec le rural semble se maintenir aux alentours de

1,63°C. Nous pouvons émettre l'hypothèse que cet écart de température est en grande partie l'effet du chauffage.

Comme la nébulosité n'est pas une variable mobilisée dans la classification des types de temps, cette aspérité n'est observable qu'en limitant manuellement les seuils sur des variables cibles. De même la significativité n'est opérée pour regrouper les type de temps volontairement que sur l'ICU du lever du soleil pour rester dans l'approche classique, empêchant les types de temps de se démarquer sur les valeurs de l'ICU après le coucher et donc d'observer cette évolution temporelle spécifique, créant un léger biais méthodologique.

IV.3.E.c Les intersaisons propices à des variations particulières de l'îlot de Chaleur ?

Les types de temps de l'automne sont intéressants au regard de leur plus faible ICU de jour (1,12 °C en moyenne) pour les trois groupes de types de temps concernés. Le printemps enfin dispose de l'une des plus grandes intensités de l'ICU après le coucher du soleil pour les types de temps anticyclone/hiver (5) et très chaud/vent faible (9) avec 3,02°C. Les intersaisons comme le printemps et l'automne peuvent être difficiles à étudier car, caractérisées par une plus forte instabilité atmosphérique, elles présentent une grande variabilité entre des jours d'une même situation en début et en fin de saison. De plus l'attribution d'un type de temps présente plus de difficultés lorsque les conditions météorologiques changent au cours de la journée, ce qui arrive souvent dans ces saisons.

L'application de l'approche par types de temps sensibles dans l'analyse des conditions microclimatiques urbaines est récente. Il est ainsi difficile de trouver des cas comparatifs. De plus, les types de temps relevant de classification décrivant des conditions locales (comme par exemple le vent d'Auran à Toulouse ou un flux de mousson en Asie du Sud-Est à Singapour), il n'est pas aisé de faire le pont d'une étude à une autre. L'unique condition météorologique comparable demeure la condition anticyclonique dégagée, c'est-à-dire sans vent, pluie ou nuages, alors décrite en début de chapitre. Nous pouvons cependant noter leur récente multiplication, que ce soit pour analyser l'intensité et la spatialité de l'ICU, couplées à de l'imagerie satellitaire de températures de surface (Hardin & al., 2018 ; Zhang & al. 2014) ou pour analyser les effets d'une condition météorologique en particulier, comme la pluie (Golroudbary & al., 2014). En termes d'intensité cependant des comparaisons peuvent être réalisées pour des villes identiques. Par exemple en France, Dijon et Rennes disposent d'intensités d'ICU sur les jours optimaux d'été aux alentours de 6°C alors que la valeur est plutôt de 4°C à Toulouse, même si les maximums sont du même acabit. L'analyse par type de temps est utile pour des analyses locales d'ICU, mais n'est pas un outil idéal pour de l'intercomparaison entre villes sous des climats différents.

IV.4. Analyse spatiale infra-urbaine (Local Climate Zones)

IV.4.A. L'approche par Local Climate Zones et effectif sur Toulouse

L'approche par saisons et types de temps permet d'approfondir l'analyse du cycle de l'ICU au regard de temporalités et de conditions météorologiques variées. Cependant l'analyse de la température reste exprimée au regard de la différence entre l'urbain et le rural. Seuls deux environnements sont comparés, à la fois dans leurs caractéristiques (végétation, taux d'imperméabilisation, fraction de bâti, etc.) et dans leurs spatialisations (l'un situé dans le « cœur » de la zone urbaine, l'autre à l' « extérieur »). Pour approfondir la caractérisation spatiale de l'ICU à l'intérieur même de la ville, il est alors pertinent de mobiliser le concept des LCZ présentées en amont. D'autant plus que comme indiqué dans les parties précédentes, un effort particulier a été fourni pour avoir une bonne répartition spatiale des stations au regard des différents types de LCZ. En effet, elles ont permis de choisir les sites et de les regrouper selon des similitudes en termes d'usages et de morphologies urbaines. Les températures rapportées par les stations peuvent alors être analysées au travers de ce nouveau prisme. L'écart des températures s'exprime alors entre chaque LCZ observée et le rural de référence.

De nombreuses études d'ICU sont basées sur les LCZ. Il y a deux approches qui se démarquent. D'un côté nous observons des études où les LCZ sont rattachées aux sites de mesures une fois le réseau en place. Cela peut-être parce que le réseau est antérieur à la démocratisation des LCZ ou bien parce que le choix de mesures n'était pas dépendant des utilisateurs des données. Dans ce cas de figure nous évoquons les réseaux amateurs de Netatmo (Fenner & al., 2017) ou les réseaux répartis selon des méthodes aléatoires. De l'autre côté nous disposons d'études, comme la thèse ici-présente où le concept des LCZ est directement mobilisé pour le placement des capteurs. Les sites sont donc choisis au regard de leurs LCZ et sont différenciés par leurs caractéristiques. Dans ce deuxième cas nous pouvons noter par exemple le réseau de Szeged, disposant d'une vingtaine de stations sur une année et réalisant des analyses de températures par LCZ selon plusieurs critères (Skarbit & al., 2017). Moyennes annuelles et saisonnières sont les premières analyses présentées. Les minimums, maximums, selon les cycles journaliers diurnes et nocturnes sont aussi étudiés. Les vitesses du refroidissement nocturne des LCZ sont observées puis comparées. La météo de chaque journée du jeu est analysée et les jours « idéaux » à la formation de l'ICU sont triés via la formule développée par Oke (Oke, 1998). A l'opposé de ces réseaux à l'effectif réduit mais de qualité se situent les réseaux amateurs. Nous notons dans ce cas des études de comparaisons de températures entre LCZ (Fenner, 2017) selon les saisons, les années, etc.

Quelles que soient les études, l'approche de l'ICU via le prisme des LCZ se veut être une inter-comparaison sans avoir pour autant une approche spatiale de ces LCZ. Dans la grande majorité des cas, seules les distances des stations observées par rapport au centre urbain sont exprimées. Au-delà de cela, une LCZ-8 d'activité, par exemple, sera traitée de la même manière qu'elle soit au centre de l'aire urbaine du territoire d'étude ou bien tout à l'est sur un relief au milieu d'espaces agricoles. Des sous-groupes peuvent être construits à partir de variables telles que l'imperméabilisation ou la densité de bâti, mais la spatialisation n'est pas mobilisée.

Dans les analyses qui suivent, nous reprenons les types d'analyses produites dans les parties précédentes tout en essayant de mobiliser la question de la spatialisation. Des analyses sont donc réalisées entre certaines LCZ identiques au regard de leurs caractéristiques et situations géographiques.

Dans cette analyse, toutes les LCZ ne sont pas représentées ni mobilisées. Dans la catégorie LCZ urbaines, la LCZ bâti dense et haut (1), bâti léger (7) et industrie lourde avec forts rejets de chaleurs anthropiques type métallurgie (10) sont absentes sur l'agglomération toulousaine. Ensuite les stations sont utilisées également au regard de leur date de mise en service comme la LCZ grand ensemble (4), trop récente et qui est donc ici retirée du jeu d'analyse. Les LCZ bâti dense et moyennement élevé sont soit toutes utilisées dans le cadre du calcul de l'ICU (Carmes, St-Cyprien, Valade), soit ne sont pas assez anciennes pour être étudiées (Gastou et Maréchal-Juin, deux stations du LIFE). Bouconne et Mondouzil, seules représentant des LCZ bâti épars et forêt, seront ici utilisées à titre de comparaison avec les autres LCZ. Il reste donc 7 LCZ sur 11. Enfin, les stations sont mobilisées au regard de la qualité des données disponibles. En effet, comme nous l'avons signifié, pour qu'une station soit mobilisée durant cette étude, elle doit disposer de suffisamment de données. A savoir compter dans chaque saison depuis l'hiver 2019 jusqu'à l'automne 2020 un taux de données utilisables supérieur ou égal à 75 %. Il reste alors 20 stations mobilisables, leur répartition et effectifs s'observent sur la figure 37.

Pour la suite, les analyses décrivent l'écart de température entre chaque LCZ et le rural selon chaque saison, type de temps et moment de la journée.

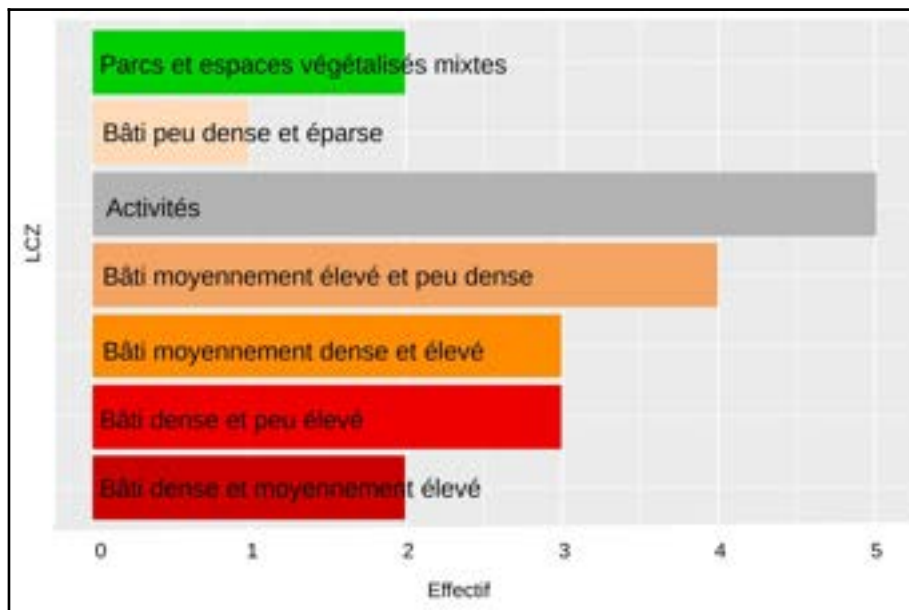


Figure 37, répartition des 20 stations émettrices triées par LCZ disposant de plus 75 % de données par saisons sur la période s'étalant de l'hiver 2019 à l'automne 2020.

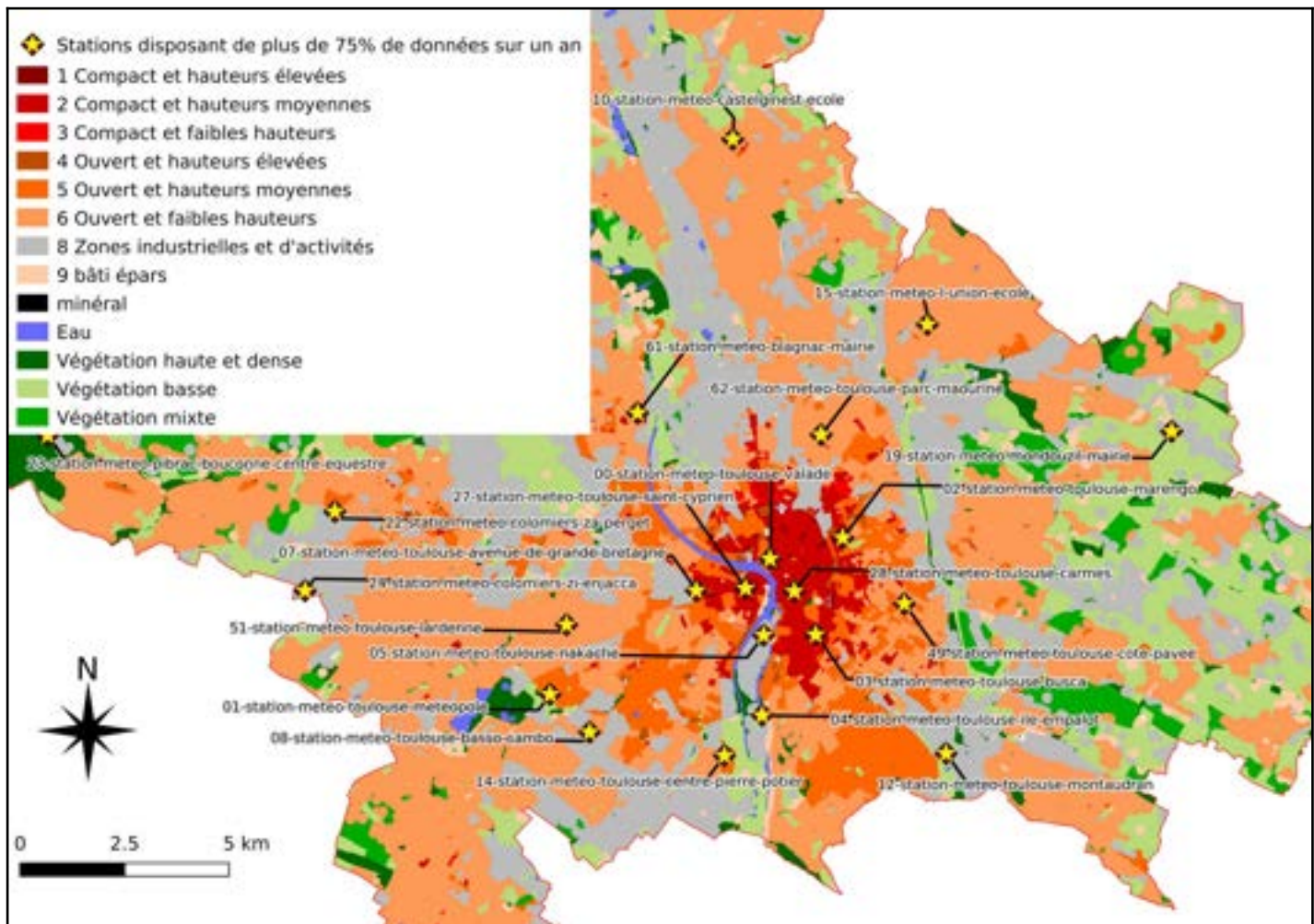


Figure 38, répartition spatiale des stations émettrices triées par LCZ disposant de plus 75 % de données par saisons sur la période s'étalant de l'hiver 2019 à l'automne 2020.

IV.4.B. Analyse infra-urbaine pour conditions optimales annuelles et saisonnière et par situation météorologique

Il s'agit maintenant de caractériser la variabilité spatiale de l'îlot de chaleur à échelle infra-urbaine, non seulement entre les différents types de quartiers mais aussi entre quartiers similaires mais situés à divers endroits de la ville. Pour ce faire, les écarts de températures entre chaque Local Climate Zone et le rural de référence (stations Bouconne et Mondouzil) sont observés sous conditions météorologiques optimales sur l'année (56 jours), par saisons (18 jours en automne, 13 en été, 12 au printemps, 13 en hiver) mais également selon les types de temps pour chaque saison. Les résultats sont exposés dans les tableaux 20 et 21 en fin de chapitre et les figures 39 et 40. Les écarts de température sont notamment comparés avec 3 villes disposant d'études sur les LCZ :

- Une ville Européenne de taille moyenne : Szeged (Hongrie). Elle dispose d'un réseau de stations fixe sur la ville et sur plusieurs LCZ.

- Une ville d'Amérique latine disposant de classes LCZ propres (des regroupements sont effectués, par exemple la LCZ 2 bâti de hauteur et densité moyennes est mélangée avec la LCZ 4 bâti ouvert et haut : Presidente Prudente (Bresil). Ce sont des mesures mobiles en situations dégagées qui sont effectuées.

- Enfin, une ville d'Asie avec Xi'an (Chine). Etendue et disposant d'un urbanisme en grille elle propose des LCZ de taille considérable même si certaines sont sous représentées (comme la LCZ 8 d'activité). Ce sont des mesures fixes et ponctuelles placées en des points clefs de chaque zone.

Les résultats qui suivent explorent les ICU entre les différentes LCZ et le rural selon trois groupes. Les Parcs et espaces végétalisés mixtes, les zones de bâti bas et dense et les autres: pavillons individuels, petits collectifs et zones d'activités. Ces groupes découlent des résultats observés et proposent une approche thématifiée pour chaque LCZ.

IV.4.B.a. Les parcs urbains et espaces végétalisés mixtes

- **Un tissu urbain hétéroclite**

Deux stations seulement sont mobilisées ici : une sur l'île d'Empalot au sud et une dans un parc urbain au nord de la ville, le parc Maourines. Le premier est un espace avec de grands arbres à proximité de la Garonne (50 mètres) et à élévation similaire. Le second est un parc urbain mixte avec espace de plantes grasses et basses, espaces aquatiques (lac et ruisseau), un bosquet (20000m²)

et le bâtiment en bois des Jardins du Muséum (1800m² d'emprise au sol), dédié au monde végétal et animal. Le parc de Borderouge étant entouré d'espaces urbains de types LCZ 5 et n'étant pas de taille suffisante pour couvrir un rayon de 250m² autour de la station, l'influence de cette typologie de bâti est à considérer.

Ces deux espaces sont donc différents, à la fois dans les éléments qui les composent mais aussi dans leur spatialité par rapport à la ville ; cela impacte leurs températures. D'autres parcs sont équipés de capteurs, notamment deux en centre-ville: le Jardin des plantes et Compans Cafarelli. Ils ne sont cependant pas mobilisés ici car les données sont insuffisantes sur certaines saisons.

- **Un cycle diurne particulier**

La LCZ parcs urbains et espaces végétalisés mixtes (LCZ 11) de Toulouse présente l'évolution temporelle d'ICU la plus atypique. Son cycle journalier peut être divisé en trois parties.

- **La fin de la nuit**

En moyenne annuelle, en fin de nuit, l'écart de température avec le rural est presque nul. Nous observons alors 0,07°C au milieu de la nuit et 0,18°C au lever du soleil avec 0,34°C de moyenne sur la nuit. Cet effet est également visible sur la moyenne saisonnière, en particulier en automne et au printemps sur les moyennes nocturnes (0,13°C et 0,66°C) et sur les écarts avec le rural au milieu de la nuit (-0,09°C et 0,35°C). En été l'écart est le plus élevé avec 1,28°C de moyenne la nuit et 0,65°C au milieu de la nuit. Avec l'approche en types de temps, la lecture s'affine et l'effet se produit particulièrement sur les situations anticyclone/hiver (TTS5) et très chaud/vent faible (TTS9).

- **Du lever au coucher du soleil**

A partir du lever du soleil, l'écart de température augmente. Il passe de 0,58°C au zénith à 1,02°C trois heures plus tard jusqu'à 1,52°C au coucher du soleil en moyenne sur l'année. A ce moment-là, cette LCZ présente des températures similaires à l'urbain. En toute saison, ce fait s'observe à chaque fois. La plus forte croissance de l'écart température entre le lever et le coucher du soleil s'opère en hiver avec 1,91 °C, alors que la durée du jour est réduite. Les types de temps, une fois regroupés, atténuent ce phénomène lors des calculs de moyennes, notamment car la significativité statistique s'opère sur le lever du soleil comme expliqué au début du chapitre. C'est

alors au printemps pour les conditions anticyclone/hiver (5) et très chaud/vent faible (9) que l'on observe une augmentation de la différence de température de 0,91°C sur la journée.

A l'issue de cette augmentation, en fin d'après midi, la différence de température avec le rural est égal avec celui de l'urbain du centre par rapport au rural. Ces écarts peuvent être supérieurs. En effet en automne et hiver, en moyenne au coucher du soleil, nous relevons 1,54°C contre 1,4°C et 1,46°C contre 1,32°C. En automne, c'est le type de temps anticyclone/hiver (5) chaud/SE (7), très chaud vent faible (9) qui présente cet écart supérieur en fin de journée, avant le coucher du soleil.

- Du coucher jusqu'au milieu de la nuit

A partir du coucher du soleil, l'écart de température diminue rapidement, passant à 0,75°C deux heures après le coucher en moyenne annuelle. Cet effet s'observe sur toutes les saisons, cependant c'est en hiver qu'il est le plus important. Durant cette saison, la valeur de l'écart de température entre les parcs et espaces végétalisés (LCZ 11) avec le rural passe de 1,42°C à -0,55°C entre le coucher et le milieu de la nuit. Ces espaces sont donc capables de se refroidir rapidement de nuit grâce à leur haut taux de végétation et à des configurations aérées.

A noter qu'en plusieurs occasions, notamment en hiver, cette LCZ dresse des similitudes sur les valeurs de températures observées avec la LCZ du bâti ouvert et bas (6) type pavillons individuels ou petits collectifs. La végétation est l'élément qui prend le dessus dans le refroidissement de ces espaces la nuit, alors que c'est l'urbain qui prend le pas dans la journée.

• Un tissu urbain aux températures parfois moins élevées que le rural

Comme nous venons de le voir, les parcs et espaces végétalisés mixtes (LCZ 11), sont les seuls à disposer, à de multiples reprises, de températures inférieures au rural en conditions optimales à la formation de l'ICU. Cela s'observe avec l'écart maximal de température durant la nuit en hiver, où elle est plus fraîche jusqu'à 1°C que le rural, avec une moyenne à -0,23°C et un max à -0,55°C au milieu de la nuit.

En automne, au printemps et en été cela s'observe juste après le lever du soleil avec des moyennes proches du zéro (respectivement -0,25°C, 0,15°C et 0,15°C). Cette différence négative de température avec le rural ne s'observe pas avec plus de précision lorsque l'on mobilise l'approche des types de temps, d'autant plus en hiver. Le groupe formé des situations Hiver nuageux (0) Vent d'Autan (2) Vent/ NO (3) Très chaud vent faible (9) noie l'information. Il convient de noter que ce

phénomène ne s'accroît pas avec la nébulosité. Avec une nébulosité moyenne journalière supérieure à 6 sur 8, l'écart avec le rural est de $0,36^{\circ}\text{C}$ en moyenne la nuit.

Comme indiqué en amont, cette LCZ est un tissu mixte, composé d'espaces verts et de bâti ayant deux représentants sur le jeu de données considéré: le parc Maourines au nord de la ville et l'île d'Empalot, au sud entouré par la Garonne. Lorsque nous les comparons séparément au rural, nous nous apercevons alors que le parc de Maourines est plus froid, à $-0,56^{\circ}\text{C}$ en moyenne la nuit mais également à $-0,68^{\circ}\text{C}$ au milieu de la nuit et $-0,72^{\circ}\text{C}$ au lever du soleil en hiver. L'écart de l'île d'Empalot est moins marqué, avec $0,09^{\circ}\text{C}$ en moyenne la nuit et $-0,34^{\circ}\text{C}$ et $-0,3^{\circ}\text{C}$ au lever du soleil. Le parc est donc ici plus frais qu'un espace proche de la Garonne.

- **Les parcs urbains: un territoire oublié de la climatologie mais central pour l'urbanisme**

La LCZ 11, ici attribuée aux parcs urbains, dispose de relativement peu de ressources bibliographiques mobilisables selon une approche par type de temps, par saison, le focus se faisant en général sur les conditions dégagées propices à l'ICU. Pour les études comparatives de LCZ entre différents sites de mesures, il est possible de disposer de stations dans plusieurs parcs ou espaces verts. Seulement, si ces derniers ne sont pas de taille suffisante (cf Maourines), il est difficile de mobiliser leurs données pour de la modélisation spatiale cartographique de l'îlot de chaleur. Ce point est déjà relevé par exemple lors des travaux à l'aide du réseau de Rennes, où celui-ci dispose de stations placées dans des parcs et dans un cimetière. La question de l'échelle, du micro-local au local, se pose avec pertinence pour les parcs. Il existe alors, lorsque les parcs s'y prêtent, la possibilité de réaliser des études avec parcours de mesures traversant des parcs (Yan & al., 2018). Des études existent également en mobilisant plusieurs stations autour d'un seul parc (Lee & al., 2009) pour en observer le potentiel de rafraîchissement. Au final donc, peu d'entre elles opèrent une intercomparaison de parcs d'une même ville selon des conditions météorologiques diverses. Pourtant, l'urbanisme est aujourd'hui, en France du moins, focalisé sur ces espaces qui servent de lieux de rencontres, de vie et de loisirs. Nous notons par exemple la démarche de Toulouse qui souhaite se doter d'un espace vert supplémentaire sur l'île du Ramier et qui sert de cadre d'étude pour le projet LIFE. Il existe aussi le projet concernant la transformation des berges du canal en coulée verte ou encore le projet « 100 000 arbres » (dont la plupart sont planifiés pour densifier les espaces verts déjà existants). Le réseau de Toulouse compte aujourd'hui 4 stations dans des parcs publics (Jardin des Plantes, Compans Cafarelli, Maourines, Casselardit maison de retraite) et 3 dans des espaces végétalisés publics urbains (Quinze Sols, île d'Empalot et Pech David). Des études sont

donc à mener pour compléter et approfondir les observations actuelles à partir de l'ensemble de ces points de mesures.

IV.4.B.b. Les faubourgs avec bâti dense et bas : plus chauds que les centres-villes

Une autre LCZ dispose d'une évolution de température unique: la LCZ de bâti bas et dense, que l'on retrouve dans les faubourgs qui encerclent le centre-ville ou dans le centre de certaines communes du péri-urbain.

- **La LCZ la plus proche de l'urbain en température**

Elle est systématiquement la LCZ la plus éloignée du rural en température comparée aux autres LCZ étudiées. Mise en relation avec la LCZ 2 du coeur urbain, la LCZbâti dense est moins chaude la nuit avec 1,79°C en moyenne contre 2,58°C à l'année. De jour, c'est l'inverse, les températures de la LCZ 3 dépassent celles du centre avec 1,42°C contre 1,31°C. Ce tissu suit en de nombreuses occasions le pic après le coucher du soleil des différences de température observées pour le centre ville avec le rural.

L'écart avec l'urbain n'est pas constant, il se crée en particulier après le lever du soleil et avant le coucher du soleil, il est alors nul au zénith. Ces espaces, plus bas et plus ouverts que la LCZ bâti moyennement dense et haut (2) disposent de facteurs de vue du ciel élevés. Ils sont exposés au soleil plus tôt mais également plus tard, ce qui explique cette différence de température. Au zénith, l'angle du soleil est donc moins impacté par les différences de bâti de ces deux LCZ.

Les trois LCZ dense et bâti bas (3) mobilisées ici sont spatialement éloignées. Si la station du Busca et de Marengo sont relativement proches du centre-urbain (1,56km et 2km), la troisième se situe dans le centre-ville d'une commune du péri-urbain: Blagnac. Cette station se situe dans le coeur de la ville, un tissu ancien et dense avec des petites rues. Ce type de tissu est difficile à trouver hors de la ville de Toulouse. Si nous observons uniquement les données de cette station en comparaison du centre urbain, nous constatons une très légère différence de température de jour (en moyenne 0,22°C avec un pic à 0,87°C trois heures après le lever du soleil). La surchauffe de cette typologie de LCZ n'est donc pas uniquement due à sa proximité du centre urbain. En journée, l'ICU Toulousain, bien que faible autour des 1°C n'est pas concentrique par rapport à Toulouse. D'autres communes, comme Cugnaux au sud-ouest, sont désormais équipées de capteurs pour vérifier cette hypothèse.

En saison, l'effet se répète, les faubourgs sont plus chauds que l'urbain à de nombreuses reprises. La différence de température la plus marquée apparaît alors en été après lever du soleil (0,65°C). En particulier sur le type de temps très chaud/vent faible et chaud/SE (79) avec 1,43°C de différence avec le rural contre 0,97°C entre le centre et le rural.

- **Un îlot de chaleur constant en hiver.**

L'approche par saisons permet de mettre en exergue le comportement particulier des LCZ3 en hiver. Cette LCZ a la particularité d'être la seule à posséder un caractère constant en saison sur le cycle diurne de son ICU, avec une moyenne de 1,18°C le jour et de 1,11°C la nuit.

Cette LCZ dispose donc des mêmes taux de rafraîchissement et de chauffe que le rural. En intersaison, en automne, elle montre une variation de la différence de température peu élevée, d'environ 0,5°C là où les autres LCZ sont autour de 1°C d'oscillation. En hiver et en intersaisons, en conditions optimales, ce tissu urbain ne chauffe donc pas autant que l'urbain.

- **Un tissu urbain plus chaud que le centre dans d'autres villes**

Dans la ville de Xi'an, en Chine, la LCZ bâti dense et bas dispose d'un ICU moyen plus prononcé que la LCZ 2 en été en conditions dégagées de nuit comme de jour sur plusieurs sites, ce qui n'est pas le cas ici. A Xi'an, c'est d'ailleurs la LCZ la plus chaude derrière la LCZ E routes pavées et sols nus. Cette LCZ n'est pas présente à Toulouse en suffisamment grande surface pour être étudiée à l'exception de certains parkings de centres commerciaux. La LCZ-3 bâti dense et bas de Xi-an est parsemée d'espaces considérablement différents de celle de Toulouse. Elle dispose d'une densité de bâti supérieur à celle de Toulouse, avec des taux pouvant atteindre 75 %, et les structures bâti en métal par exemple. De plus elles sont adjacentes à de grandes LCZ 8, ce qui n'a pas d'équivalent à Toulouse. Au sud-ouest de Xi-an se trouve une LCZ 3 récente équipée d'un point de mesures. Cette zone construite avec un urbanisme maîtrisé se compose de bâtiments neufs et d'un taux de couverture végétal accru. Les mesures de températures relevées sont alors en dessous de la LCZ 2. L'étude de Xi-an se concentre sur les conditions optimales à l'ICU en été uniquement, c'est donc le seul point de comparaison disponible. La ville de Szeged dispose également d'une LCZ-3 plus chaude que la LCZ 2, y compris la nuit. Cet effet s'observe sur la moyenne annuelle en conditions dégagées et également sur le jour type de l'ICU au mois d'août. Nous retrouvons également pour Szeged cette légère élévation des températures prématurée au lever du soleil de la LCZ 3 sur le cycle diurne de l'ICU. Pour cette ville également, aucun pic de température n'est relevé pour cette LCZ après le coucher du soleil. Les écarts de températures maximums sont quand

même observés 1h après le coucher du soleil. La LCZ 3 de Szeged est pourtant assez comparable avec celle de Toulouse, à la fois sur sa spatialité par rapport au centre et sur les éléments qui la composent. Enfin, la ville de Presidente Prudente, au Brésil, propose également des températures moyennes sur leurs mesures mobiles plus élevées pour cette LCZ par rapport à l'urbain de référence (Cardoso & al., 2018). Cependant, pour finir, à Dublin, la LCZ 3 bâti dense et bas possède des températures moins élevées que la LCZ 2 la nuit, comme à Toulouse (Mills & al, 2014).

- **Un tissu urbain voué à disparaître**

Ce tissu urbain est en de nombreux endroits sur la ville un vestige en transition à Toulouse. En effet petit à petit il se transforme en LCZ-2 via le biais de la promotion immobilière et de la surélévation de son bâti. C'est une transformation lente mais très probablement inéluctable, sauf en cas de zone protégée autour de bâtiments remarquables. Le quartier du Busca par exemple ne devrait pas voir sa transformation s'arrêter dans les prochaines années. Le centre-ville de Blagnac au contraire devrait rester assez figé car entourant un monument historique. La classification en LCZ-2 devrait donc gagner en surface sur le territoire toulousain. La transition serait faite alors avec la LCZ 5, tissu de moyenne hauteur et densité, que l'on retrouve ailleurs dans le territoire.

IV.4.B.c. Tissu d'activités, zones pavillonnaires, petit collectifs : même comportement

- **Des écarts de températures proches et des spécificités ponctuelles**

Les LCZ restantes, à savoir bâti d'activité (8), bâti moyennement haut et ouvert (5) et zones pavillonnaires (6) présentent des écarts de températures similaires la nuit à l'année: 0,5°C de différence entre elles. Le jour, elles sont toujours proches avec 0,3°C d'écart. Cela s'observe en toute saison. Les différences se situent surtout la nuit. En effet ce groupe de LCZ ne présente pas le pic post coucher du soleil que l'on observe toujours pour la différence urbain/rural. Il est présent en été et au printemps, mais absent en automne et en hiver.

Premier fait notable, au coucher du soleil, les zones de bâti de moyennes hauteurs et densités (LCZ 5) disposent de l'écart le plus élevé de température avec le rural comparé aux autres LCZ, en particulier en automne (1,42°C) et en été (2,04°C). Après le coucher, cette écart diminue rapidement. A contrario, les LCZ 6 du pavillon et 8 du tissu industriel continuent de voir la différence avec le rural augmenter (tableau 19).

LCZ	Coucher	Coucher +2 h	Total
Pavillon individuel (LCZ 6)	0,96 °C	1,69 °C	+0,73 °C
Hauteur et densité moyenne (LCZ 5)	1,42 °C	0,98 °C	-0,44 °C
Zones d'activités (LCZ 8)	1,03 °C	1,93 °C	+0,9 °C

Tableau 19, écarts de températures moyens (en °C) et évolution des températures entre les LCZ Pavillon individuel (LCZ 6), Hauteur et densité moyenne (LCZ 5) et Zones d'activités (LCZ 8) avec le rural (Bouconne et Mondouzil), au coucher du soleil puis deux heures après, en automne.

Ce fait s'observe aussi via l'approche par type de temps en été selon la situation Chaud/SE (TTS 7) Très chaud vent faible (TTS 9), au printemps pour les jours très chaud/ vent faible (TTS 9) Anticyclone/hiver (TTS 5) et en automne pour les jours Anticyclone/hiver (TTS 5) Chaud/SE (TTS 7) Très chaud vent faible (TTS 9).

Autre fait notable , les LCZ d'activités (8) ne montrent pas de températures pas spécialement plus élevées en journée que les autres tissus. Elles sont souvent pointées du doigt lors des études d'ICU de températures de surface, car elles se composent de nombreux bâtiments en métal, et d'une quantité importante de sols minéralisés du fait de la présence parkings. Elles semblent donc ressortir, aux yeux des collectivités et urbanistes, comme des zones clefs pour lutter contre l'ICU. Ceci met en exergue le fréquent mélange opéré entre ICU de surface et de l'air. Au regard de ces éléments mais également de l'effectif correct de cette typologie de LCZ sur le territoire, ici constitué de 5 stations ; elle fait l'objet d'un focus dans le chapitre V.

- **Des tendances répétées selon les situations**

Ces trois LCZ, à savoir le bâti industriel et d'activités (8), bâti ouvert et moyennement élevé (5) et les pavillons individuels (6) présentent à de nombreuses occasions des écarts de températures équivalents avec le rural comme nous venons de le voir. Entre elles, elles jouissent d'une remarquable stabilité dans leurs différences de température. Les tendances sont alors :

- la LCZ 8 des tissus d'activités est plus chaude la nuit.

- la LCZ 5 du bâti de hauteur et densité moyennes est la plus chaude en fin de jour.

- la LCZ 6 du pavillon individuel oscille entre les températures de la LCZ 8 en automne et en été. En hiver et printemps elle est plus proche de la LCZ 5, excepté en journée en hiver et après le coucher au printemps. Avec l'approche des types de temps, nous observons que ce tissu urbain est le plus proche des températures du rural en hiver et en automne dans la journée, avec des écarts de température de 0,25°C au lever du soleil pour les situation Hiver nuageux (0) Vent d'Autan (2) Vent/NO (3) Très chaud vent faible (9).

- **Des tissus urbains disparates d'un territoire à un autre**

A Szeged, la LCZ 5 du bâti de moyenne hauteur et densité est également plus chaude que la LCZ 6 du résidentiel peu dense. Cette dernière, ouverte et dotée de surfaces végétalisées, permet une chauffe limitée en journée et un refroidissement correct la nuit. A Xi an, ce n'est pas le cas, la LCZ 5 dispose de températures plus faibles que la LCZ 6. Dans la ville Brésilienne de Presidente Prudente, la LCZ du bâti de moyenne hauteur et densité est présente mais pas la LCZ du résidentiel. Les écarts de température avec la référence sont légèrement moins grands que ceux de la LCZ bâti dense et bas et bâti moyen et dense. La LCZ 8 du tissu d'activité ne dispose pas assez de site d'études pour pouvoir être comparé.

- **La local climate zone 5 bâti de moyennes hauteur et densités, un espace majeure pour l'urbanisme français et les études de climatologie urbaine ?**

La LCZ 5 est importante en urbanisme à bien des égards et donc pour le futur des études de climatologie urbaine. En effet elle présente la future évolution de la LCZ 6 mais également la LCZ la plus représentative des nouveaux quartiers et des Zones d'Aménagements Concertées. A Toulouse nous notons sur les dix dernières années les quartiers de Borderouge, de Montaudran et de la Cartoucherie. Dans le péri-urbain nous relevons Vidailhan à Balma, Andromède à Blagnac ou encore Monges Croix de Sud à Cornebarrieu. Ces nouveaux quartiers sont particuliers, car le bâti dispose d'usages multiples, nous y trouvons des immeubles de bureaux, des logements, des parcs

mais aussi une grande diversité architecturale sur les mêmes espaces. Le réseau de la Métropole ne possède pas de stations dans ces nouveaux quartiers, c'est donc un terrain d'expérimentation encore à explorer, d'autant plus que de nombreuses opérations similaires vont rentrer dans leurs phases de constructions d'ici les prochaines années. Nous pouvons également citer dans cette catégorie le cas des éco-quartiers, dont l'essor les dernières années fournit un signal fort sur les tendances actuelles en matière de construction de la ville. Ces territoires servent aussi de terrain d'expérimentation pour l'urbanisme (Bonard & al., 2010) mais également pour les études de climat (Athamema, 2012), avec parfois des déclinaisons locales (cf. le projet Ilot de Fraîcheur à Montaudran porté, entre autres, par le Laboratoire de Recherche en Architecture de Toulouse) ou des initiatives privées (Veolia et le « cooling pavement »¹).

1 <https://www.veolia.com/en/solutions/heart-cities-reducing-heat-islands-water>

IV.4.C. Conclusion sur l'analyse spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain sur Toulouse.

Des parcs de plantes grasses aux faubourgs du début du XIX^{ème} siècle, les Local Climate Zones ici étudiées présentent de nombreux visages. Il en ressort des évolutions temporelles variées des écarts de température avec le rural. Les raisons sont multiples : couvert végétal, ouverture des bâtiments, sols imperméabilisés, proximité de la Garonne, etc. Lorsque l'on rajoute la composante des types de temps, les grilles de lectures se multiplient.

Si l'été est alors la période propice à l'étude de l'ICU et y rencontre son intensité la plus élevée, les autres saisons fournissent aussi des caractéristiques particulières de l'ICU. L'hiver nous observons par exemple des ICU constants pour les LCZ bâti dense et bas pour les types de temps du groupe Hiver nuageux (0) Vent d'Autan (2) Vent/ NO (3) Très chaud vent faible (9). En intersaison, le vent d'Autan et le chaud/NO atténuent considérablement l'intensité de l'ICU autour de 1°C pour tous les tissus urbains (groupe Pluie/SE (1) Vent d'Autan (2) Vent/ NO (3) en automne et Vent d'Autan (2) Chaud/NO (8) au printemps).

Dans de nombreuses occasions, une lecture approfondie au cas par cas est exigée, comme par exemple les LCZ 3 (bâti dense et bâti bas, maisons de ville), pour observer l'intensité de l'ICU d'une ville du périurbain comme Blagnac. Les parcs et espaces végétalisés mixtes, en particulier les deux mobilisés ici, exigent des traitements différenciés. Le futur ajout dans les comparaisons des parcs de Compans Cafarelli et du Jardin des plantes doivent permettre d'affiner les observations présentes ici. La LCZ 8 du tissu d'activité, bien représentée sur le territoire, fait l'objet d'un focus dans le chapitre suivant.

Automne 2019 à hiver 2020

variables/nom station	Urbain/ rural	LCZ3	LCZ 5	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 11
Période	année	année				
Nombre de jour/Qualité	56/robuste	56/robuste				
Tout le jeu de données	1.95	1.59	0.91	0.86	0.99	0.46
Lever du soleil (ICU classique)	2.4	1.72	0.67	0.68	0.9	0.18
Lever plus 3h	0.81	1.23	0.82	0.47	0.62	0.07
Zénith	1.23	1.29	1.07	0.7	0.75	0.58
Zénith plus 3h	1.2	1.37	1.02	0.78	0.73	1.02
Coucher du soleil	1.61	1.53	1.52	1.26	1.29	1.52
Coucher du soleil plus 2h	3.33	2.22	1.2	1.72	1.97	0.75
Milieu de la nuit (nadir)	2.37	1.7	0.57	0.78	0.99	0.07
Jour	1.31	1.42	1.04	0.78	0.82	0.67
Nuit	2.58	1.79	0.88	0.99	1.23	0.34
ICU max pas de temps unique	5.88 °C (le 27-06-2020 après le coucher)	4.63 °C (le 06-08-2020 après le coucher)	4.35 °C (le 30-11-2020 au lever)	4.03 °C (le 27-06-2020 après le coucher)	4.2 °C (le 06-08-2020 après le coucher)	5.05 °C (le 06-08-2020 après le coucher)
ICU moyen max plage horaire	5.6 °C (le 08-07-2020 après le coucher)	4.3 °C (le 19-07-2020 après le coucher)	3.75 °C (le 06-08-2020 après le coucher)	3.54 °C (le 19-07-2020 après le coucher)	3.95 °C (le 19-07-2020 après le coucher)	4.39 °C (le 06-08-2020 après le coucher)

Tableau 20, écarts de températures moyens (en °C) entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien), rurales (Bouconne et Mondouzil) et LCZ, selon différentes périodes du jour, sur quatre saisons consécutives, sous des conditions météorologiques dégagées, sans pluie et avec un vent faible ou nul.

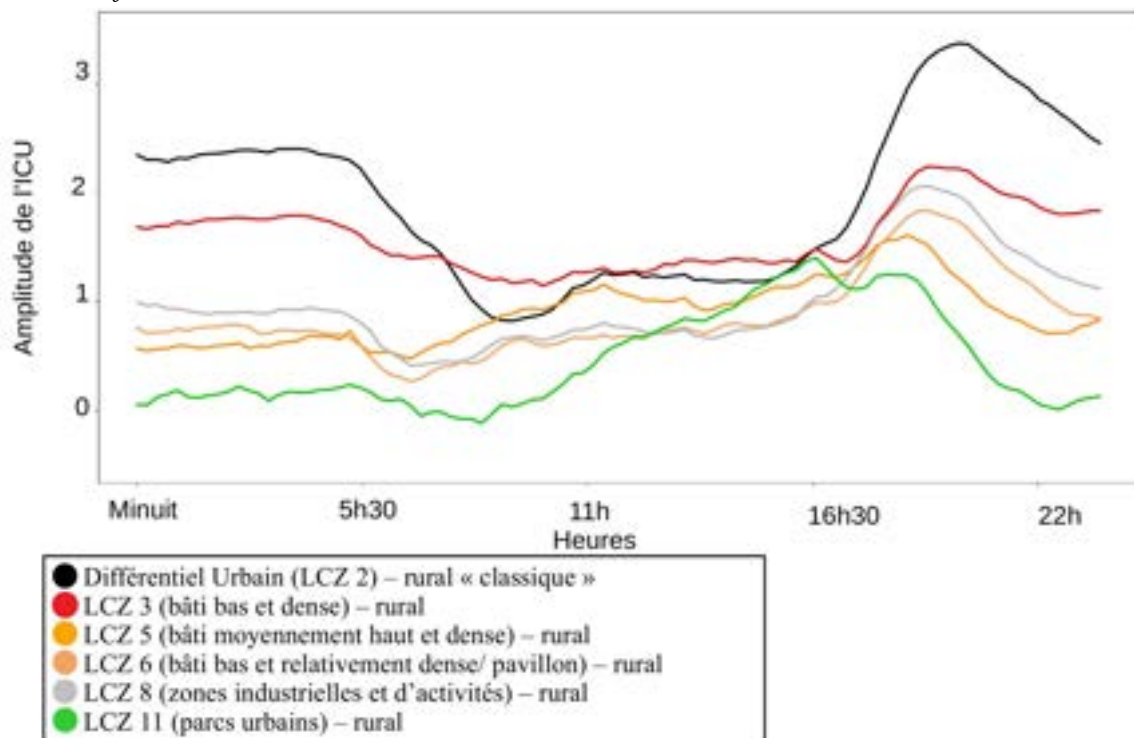
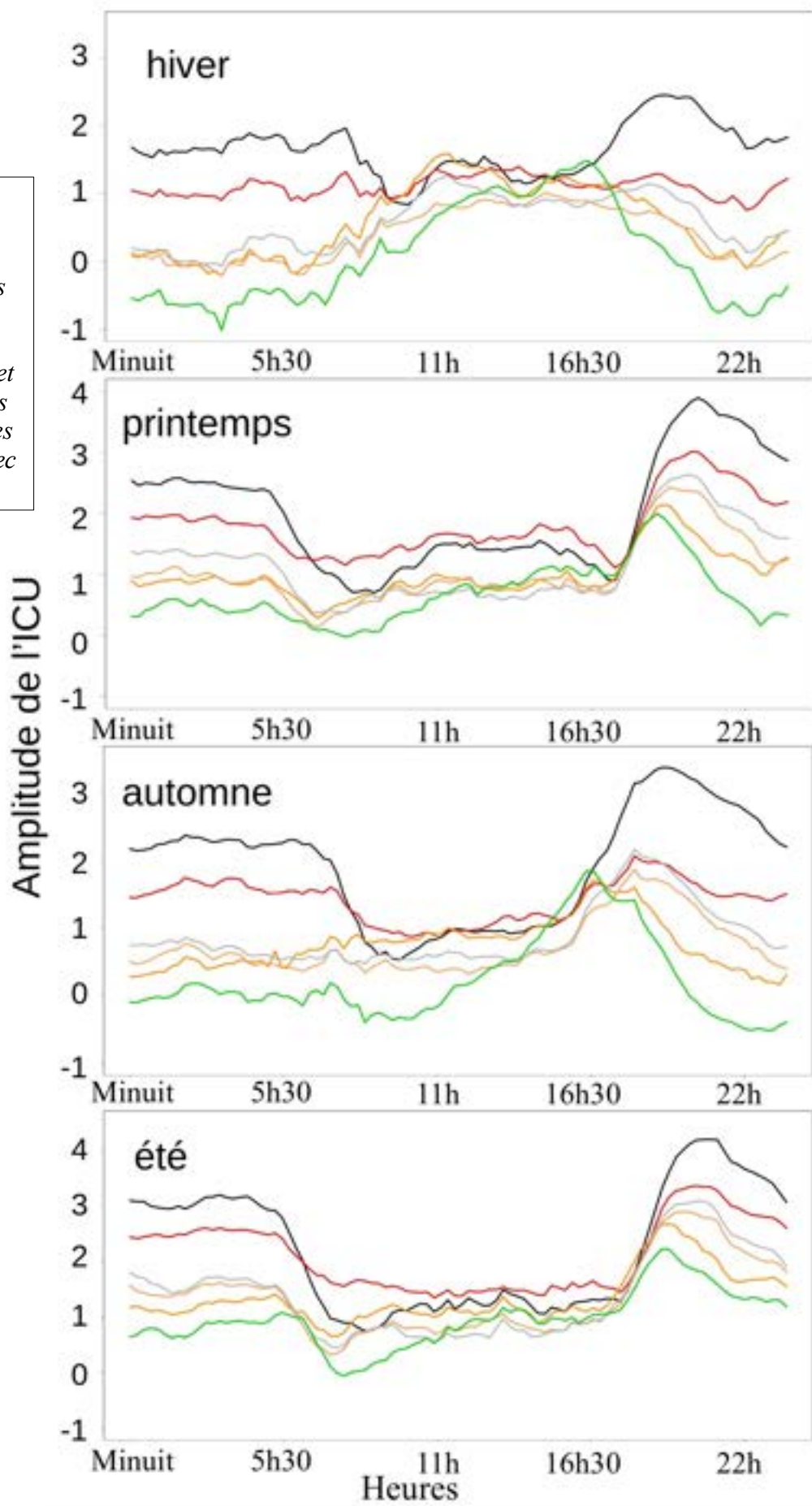


Figure 39, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h (en °C), entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien), rurales (Bouconne et Mondouzil) et LCZ, sur quatre saisons consécutives, sous des conditions météorologiques dégagées, sans pluie et avec un vent faible ou nul.

Figure 40, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h (en °C), entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien), rurales (Bouconne et Mondouzil) et LCZ, par saison, sous des conditions météorologiques dégagées, sans pluie et avec un vent faible ou nul.



- Différentiel Urbain (LCZ 2) – rural « classique »
- LCZ 3 (bâti bas et dense) – rural
- LCZ 5 (bâti moyennement haut et dense) – rural
- LCZ 6 (bâti bas et relativement dense/ pavillon) – rural
- LCZ 8 (zones industrielles et d'activités) – rural
- LCZ 11 (parcs urbains) – rural

Tableau 21, écarts de températures moyens (en °C), entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien), rurales (Bouconne et Mondouzil) et LCZ, selon différentes périodes du jour; par saison, sous des conditions météorologiques dégagées, sans pluie et avec un vent faible ou nul.

		Hiver				
variables/les stations	Urban/ rural	LCZ3	LCZ 5	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 11
Saison	Hiver	hiver				
Nombre de jour/Qualité	13/limite	13/limite				
Tout le jour de données	1.65	1.1	0.58	0.39	0.57	0.08
Lever du soleil (ICU classique)	1.74	1	0.01	-0.09	0.19	-0.40
Lever plus 3h	1.04	1.14	1.19	0.66	0.9	0.36
Zénith	1.46	1.3	1.43	0.85	1.13	0.91
Zénith plus 3h	1.23	1.22	1.12	0.93	0.85	1.19
Coucher du soleil	1.32	1.14	1.22	0.94	0.88	1.42
Coucher du soleil plus 2h	2.38	1.19	0.59	0.64	1	0.06
Milieu de la nuit (nadir)	1.64	1.02	0.09	0.09	0.17	-0.55
Jour	1.31	1.18	1.09	0.71	0.81	0.72
Nuit	1.92	1.11	0.41	0.28	0.52	-0.23
ICU max pas de temps unique	3.47 °C (le 11-01-2020 au lever)	2.97 °C (le 06-01-2020 au milieu de la nuit)	2.8 °C (le 06-01-2020 au milieu de la nuit)	2.12 °C (le 06-01-2020 au milieu de la nuit)	2.54 °C (le 06-01-2020 au milieu de la nuit)	2.65 °C (le 06-01-2020 au milieu de la nuit)
ICU moyen max plage horaire	3.12 °C (le 29-12-2019 après le coucher)	2.04 °C (le 29-12-2019 après le coucher)	2.14 °C (le 29-12-2019 après le coucher)	1.22 °C (le 20-02-2020 après le coucher)	2.06 °C (le 29-12-2019 après le coucher)	1.38 °C (le 05-02-2020 au milieu de la nuit)

		Printemps				
variables/les stations	Urban/ rural	LCZ3	LCZ 5	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 11
Saison	Printemps	Printemps				
Nombre de jour/Qualité	12/limite	12/limite				
Tout le jour de données	2.01	1.81	0.98	1.04	1.16	0.68
Lever du soleil (ICU classique)	2.41	1.78	0.85	0.88	1.26	0.42
Lever plus 3h	0.74	1.23	0.52	0.37	0.51	0.15
Zénith	1.46	1.62	0.9	0.88	0.7	0.74
Zénith plus 3h	1.44	1.72	0.89	0.86	0.72	1.04
Coucher du soleil	1.65	1.68	1.4	1.38	1.37	1.46
Coucher du soleil plus 2h	3.66	2.76	1.4	2.06	2.27	0.88
Milieu de la nuit (nadir)	2.58	1.95	0.87	1.03	1.41	0.35
Jour	1.36	1.55	0.88	0.82	0.8	0.72
Nuit	2.8	2.14	1.18	1.34	1.65	0.66
ICU max pas de temps unique	5.85 °C (le 25-05-2020 après le coucher)	4.33 °C (le 22-05-2020 après le coucher)	3.37 °C (le 03-05-2020 après le coucher)	3.97 °C (le 31-03-2020 après le coucher)	4.08 °C (le 25-05-2020 après le coucher)	2.9 °C (le 03-05-2020 après le coucher)
ICU moyen max plage horaire	5.46 °C (le 21-05-2020 après le coucher)	3.8 °C (le 21-05-2020 après le coucher)	2.95 °C (le 03-05-2020 après le coucher)	3.12 °C (le 14-04-2020 après le coucher)	3.42 °C (le 21-05-2020 après le coucher)	2.02 °C (le 28-05-2020 au milieu de la nuit)

		Eté				
variables/les stations	Urban/ rural	LCZ3	LCZ 5	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 11
Saison	été	été				
Nombre de jour/Qualité	13/limite	13/limite				
Tout le jour de données	2.22	2.12	1.36	1.36	1.41	0.97
Lever du soleil (ICU classique)	3.12	2.56	1.29	1.56	1.67	0.88
Lever plus 3h	0.99	1.64	0.81	0.5	0.61	0.15
Zénith	1.22	1.43	1.09	0.81	0.65	0.82
Zénith plus 3h	1.19	1.49	1.07	0.8	0.74	0.99
Coucher du soleil	2.17	2.09	2.06	1.9	1.95	1.64
Coucher du soleil plus 2h	3.98	3.16	1.91	2.51	2.73	1.55
Milieu de la nuit (nadir)	3.09	2.43	1.13	1.51	1.74	0.65
Jour	1.49	1.71	1.23	1.01	0.99	0.86
Nuit	3.2	2.65	1.61	1.91	2.04	1.28
ICU max pas de temps unique	5.88 °C (le 27-06-2020 après le coucher)	4.63 °C (le 06-06-2020 après le coucher)	4.13 °C (le 06-06-2020 après le coucher)	4.03 °C (le 27-06-2020 après le coucher)	4.2 °C (le 06-06-2020 après le coucher)	5.05 °C (le 06-06-2020 après le coucher)
ICU moyen max plage horaire	5.6 °C (le 08-07-2020 après le coucher)	4.3 °C (le 19-07-2020 après le coucher)	3.75 °C (le 06-06-2020 après le coucher)	3.54 °C (le 19-07-2020 après le coucher)	3.95 °C (le 19-07-2020 après le coucher)	4.39 °C (le 06-06-2020 après le coucher)

		Automne				
variables/les stations	Urban/ rural	LCZ3	LCZ 5	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 11
Saison	automne	automne				
Nombre de jour/Qualité	18/limite	18/limite				
Tout le jour de données	1.92	1.41	0.76	0.73	0.88	0.23
Lever du soleil (ICU classique)	2.33	1.58	0.56	0.46	0.63	0
Lever plus 3h	0.56	0.99	0.76	0.38	0.5	-0.25
Zénith	0.91	0.95	0.91	0.38	0.59	0.06
Zénith plus 3h	1.02	1.17	1	0.6	0.64	0.89
Coucher du soleil	1.4	1.3	1.42	0.96	1.06	1.54
Coucher du soleil plus 2h	3.32	1.92	0.98	1.69	1.93	0.58
Milieu de la nuit (nadir)	2.22	1.51	0.31	0.59	0.77	-0.09
Jour	1.1	1.16	0.96	0.57	0.68	0.39
Nuit	2.65	1.69	0.71	0.91	1.14	0.13
ICU max pas de temps unique	4.77 °C (le 16-09-2020 après le coucher)	3.23 °C (le 08-09-2020 après le coucher)	4.35 °C (le 30-11-2020 au lever)	3.17 °C (le 08-09-2020 après le coucher)	3.27 °C (le 12-09-2020 après le coucher)	2.6 °C (le 24-10-2020 après le coucher)
ICU moyen max plage horaire	4.43 °C (le 16-09-2020 après le coucher)	2.9 °C (le 16-09-2020 après le coucher)	2.43 °C (le 24-10-2020 après le coucher)	2.88 °C (le 08-09-2020 après le coucher)	2.89 °C (le 16-09-2020 après le coucher)	2.34 °C (le 21-11-2020 après le coucher)

Chapitre V. Inter-comparaison du micro-climat des zones d'activités en été

V.1. Une morphologie urbaine caractéristique et une rareté d'observations.....	172
V.2. Présentation des sites d'observations, situations géographiques et période d'étude.....	173
V.3.Résultats.....	176
V.3.A. Des évolutions temporelles de l'ICU entre LCZ d'activités et rural similaires à la différence urbain/rural.....	179
V.3.B. Les effets de l'ensoleillement prolongé.....	179
V.3.C. Les espaces à proximité: un gisement de fraîcheur potentiel ?.....	180
V.3.D. L'effet des vents est légèrement perceptible.....	181
V.4. Des espaces à surveiller.....	184

V.I. Une morphologie urbaine caractéristique et une rareté d'observations

Comme nous l'avons démontré dans les résultats jusqu'ici, la LCZ 8 d'activité, constituée de 5 sites d'observation dans les analyses, ne dispose pas de températures plus élevées que le centre urbain en journée ou la nuit, allant à la rencontre de sa réputation de « four »... En de rares occasions, les températures relevées sont les plus proches de celles que nous observons pour la référence du rural, surtout sur l'après-midi. Plusieurs explications sont à avancer.

D'abord les zones industrielles et d'activités (LCZ 8) proposent de nombreuses variations urbanistiques d'un pays à un autre. En effet, l'urbanisme à la française construit ces espaces différemment des tissus d'activités que l'on peut observer dans les pays d'Amérique du Nord. Par exemple, nous citons les États-Unis et les « *malls* », avec de hauts taux d'imperméabilisation et des bâtiments imposants. En France, ces espaces proposent parfois des allées arborées, mais également des petits espaces de verdure ou encore des noues. De plus, le bâti est rarement élevé au-delà de R+ 2 (10 mètres) ou équivalent. Enfin, la structure et les matériaux des bâtiments, leurs isolations, les rejets de climatiseurs sont autant de points qui peuvent différer d'un pays à un autre, d'un continent à un autre. Ceci s'oppose finalement aux centres urbains (LCZ 2) ou zones résidentielles (LCZ 6) qui présentent plus de similitudes, du moins en Europe.

Cette disparité existe également d'une ville à l'autre. Toulouse ne dispose pas de sites industriels lourds type métallurgie, pétrochimie, chantier navals, etc., qui seraient d'ailleurs classés en Industrie Lourde LCZ10. En revanche le territoire dispose de certains espaces remarquables relevant de cette typologie de LCZ8. Au nord-ouest de Toulouse se trouve notamment la LCZ 8 la plus grande en surface, répartie autour de l'aéroport. C'est le complexe d'Airbus¹. Il se divise sur plusieurs sites. D'un côté au nord-est de l'aéroport, nous relevons de grands bâtis en blocs compacts et des espaces ouverts tout autour, incluant espaces imperméabilisés type tarmac ou bien des champs, parfois en culture. Au sud-ouest se situe la zone mixte plus dense composée de bureaux et de certains sites d'assemblages d'Airbus de Saint-Martin du Touch, presque entièrement imperméabilisée. Ces deux espaces sont les deux extrêmes de cette typologie de LCZ d'activités sur le territoire. Entre les deux, nous observons de grandes zones commerciales, des zones d'entrepôts professionnels du secteur du Bâtiment Travaux Publics (BTP), et une quantité importante de zones d'activités très imperméabilisées avec des activités tertiaires.

1 Ces sites ne disposent pas de stations, la société pense que les Raspberry seraient une faille de sécurité dans leurs locaux au niveau de l'espionnage industriel.

C'est au regard de cette diversité que les classifications de LCZ sont adaptées aux territoires sur lesquels elles s'appliquent. Pour illustrer ce propos, nous citons, dans le cas de Toulouse, ces nombreuses zones de bureaux. Ces espaces, bien que disposant de structures et d'une organisation spatiale du bâti plus proche de la LCZ 5 bâti de hauteur et densité moyennes sont classés ici en LCZ 8 d'activité. Les activités humaines et leurs imperméabilisations supérieures à celles de la LCZ 5 prennent alors le pas dans la classification sur la structure des bâtiments (Hidalgo & al., 2019).

De par ces différences entre LCZ 8 d'activités d'un territoire à un autre, l'exercice de comparaison international devient périlleux. Cependant nous constatons que dans la littérature, les températures des LCZ 8 ne sont effectivement pas élevées en journée (Zhang & al., 2021), ou même la nuit (Skarbit & al., 2017) avec des écarts marqués par rapport aux centres urbains. Cependant ce type de tissu est également spatialement éloigné des cœurs urbains, et donc éloignés des intensités maximums des ICU concentriques. Ils sont aussi parfois en sous-représentation, de nombreuses villes ne disposant pas plus d'une zone d'activités observée. C'est le cas des deux études citées qui ne proposent qu'une station pour les LCZ 8², toutes deux situées à la limite de la tâche urbaine. Le manque de site peut venir soit de la difficulté d'équiper ces sites, d'une insuffisance d'espaces représentatifs de cette typologie de LCZ ou d'un manque d'intérêt pour ces espaces. Par exemple dans le cas des réseaux amateurs comme Netatmo où les stations appartiennent à des particuliers, il est difficile de trouver des stations sur ces sites d'activités (Fenner & al., 2017). A Birmingham, le réseau mobilise majoritairement des écoles et des sites équipés du wi-fi. De fait, le réseau dispose d'une sous représentativité de cette typologie de tissus urbains (Chapman & al., 2015).

V.2. Présentation des sites d'observations, situations géographiques et période d'étude

Or, parmi toutes les stations disposées sur le territoire Toulousain, la LCZ tissu d'activité (8) est bien représentée. Elle permet donc de réaliser une inter-comparaison de cette typologie. Les Zones de bureaux, de commerces ou encore industrielles sont couvertes en différents points du territoire (figure 41).

2 En réalité, le réseau dispose de deux sites d'observations classées LCZ 8 mais l'une est située au centre de la zone, l'autre à l'espace de transition de cette même zone avec le tissu résidentiel.

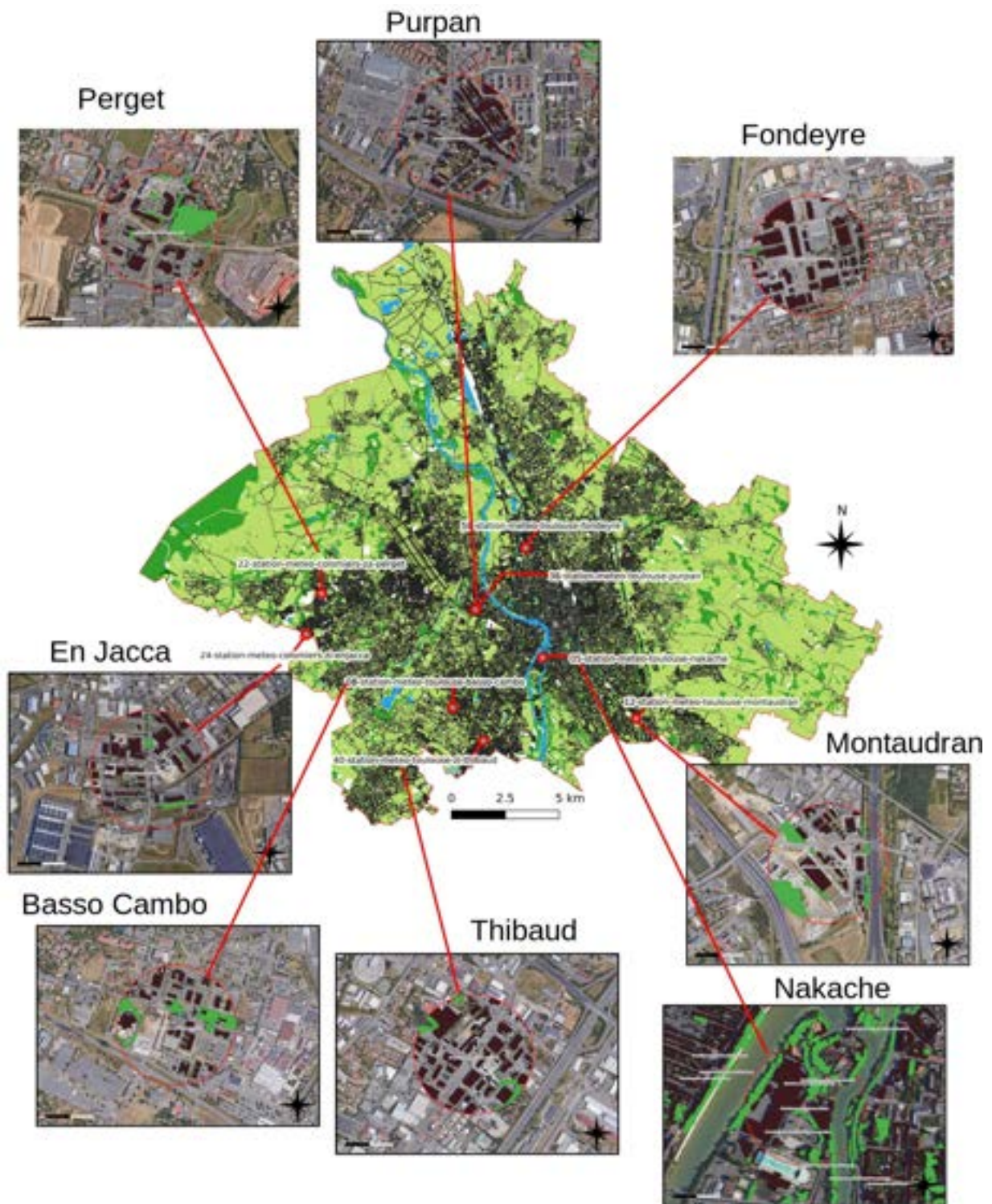


Figure 41, emplacement des LCZ8 et zone tampon de 250m sur fond satellite.

La liste des LCZ 8 est la suivante :

- La zone Thibaud, au sud-ouest, est un tissu industriel dédié à la construction. Les structures ne sont pas élevées mais le taux d'imperméabilisation est important. C'est une LCZ 8 de référence dans le sens où elle correspond fidèlement à la description de ce type de tissus dans le cadre théorique établi par Stewart and Oke en 2012.

- La zone En Jacca, située à l'ouest, est aussi une zone d'activité du BTP³ avec du gros œuvre. Les structures bâties sont plus imposantes et la végétation un peu plus présente, l'espace entre bâtiments est large. Nous pouvons la considérer aussi comme une LCZ 8 de référence.

- La zone du Perget, placée juste au nord de la zone En Jacca, est une zone de centres commerciaux (Boulangier, Décathlon) accolée à des bâtiments de bureaux et au Lycée International. Les espaces sont ouverts, l'imperméabilisation est plus faible et la végétation présente.

- La zone de Basso Cambo, située au nord de Thibaud et au sud d'En Jacca, sur l'ouest du territoire, est une zone majoritairement de bureaux. Le bâti est principalement de type R+2 voire R+3 (10-12mètres). L'imperméabilisation est élevée mais la végétation est également présente.

- La zone de Montaudran, située au sud-est du Territoire, est plus mixte car mélangeant BTP et bureaux. C'est un espace qui dans un rayon de 250 mètres a subi ces dernières années de grandes modifications avec la construction de bâtiments imposants (le bâtiment B612 est à 150m de la station, c'est une structure de 25000 mètres carrés dont les côtés font environ 130 par 80 mètres et de plusieurs étages de haut). Sa construction ayant été achevée en 2018, la zone de Montaudran est conservée dans les analyses, ses modifications majeures datant d'avant juin 2019.

- La zone de Fondeyre, située à Toulouse au nord de la ville, est principalement une zone de fret avec des grands bâtiments de logistiques. L'imperméabilisation est élevée et la végétation peu marquée malgré la présence de quelques alignements de grands arbres. La station n'est pas dans l'emplacement le plus central de la zone, l'empêchant d'être considéré comme LCZ 8 de référence. Ce fait s'explique par la présence d'un local technique de Toulouse Métropole, facilitant la pose de l'équipement.

- La zone de Nakache est un espace atypique à de nombreux égards. Situé dans le centre de la ville de Toulouse sur l'île du Ramier, il se compose de grands bâtiments en métal puisque c'est l'ancien parc des expositions de la ville. Ancien car aujourd'hui le site est en déconstruction (cf. projet LIFE présenté en partie III). Dans un rayon de 250 mètres, nous trouvons donc de grands bâtiments (les bureaux de la piscine Nakache, l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse), mais également de nombreux espaces arborés et bien entendu, aquatiques via la présence de la Garonne. Il est donc difficile de le considérer comme un digne représentant de la LCZ 8 d'activités

3 Bâtiment Travaux Publics.

mais c'est également le tissu qui s'en rapproche le plus en étant dans une situation centrale par rapport à l'aire urbaine.

- Enfin la zone de Purpan, qui présente également des caractéristiques particulières. Point chaud de la campagne de mesure, le point se situe sur un rond-point qui marque la délimitation de plusieurs groupes bâtis, faisant de cette station le centre d'un espace composite. Au sud-ouest de la station se situe un groupe de petits commerces et de bureaux. A l'est, se trouve le complexe de l'hôpital de Purpan qui s'étale sur plus de 30Ha . Au nord se situe un centre commercial avec divers commerces. Enfin le rond-point où est positionné le capteur est particulièrement usité, avec des congestions urbaines répétées et quotidiennes, principalement dûes à la jonction des périphériques et l'artère qu'est l'avenue de Grande Bretagne qui mène au centre-ville.

Une dernière station de la catégorie tissu d'activité, située au nord de la ville a été mise en place dans la zone d'activité de Saint-Alban. N'étant pas active à ce jour elle ne sera pas considérée pour les analyses, portant ainsi le total des stations utilisées ici à huit.

Pour approfondir la question de la surchauffe de ces espaces, l'analyse se focalise sur l'été selon les deux groupes de conditions météorologiques retenues dans les résultats précédents, à savoir les types de temps très chaud/vent faible et chaud/SE (79), ainsi que chaud/NO (8). Pour profiter du nombre de stations le plus grand, seul l'été 2020 est gardé et plus particulièrement les mois de juillet et d'août.

V.3.Résultats

L'évolution temporelle des différences de températures entre l'urbain et le rural mais également chaque LCZ et le rural sont montrées sur la figure 42. Le tableau 22 présente les valeurs pour chaque moment de la journée, chaque type de temps et chaque station.

variables/ nom station	Urbain- rural	LCZ 8	Nakache	Basso Cambo	Montau dran	Perget	Enjacca	Purpan	Thibaud	Fondeyr e
TT	Très chaud/vent faible - chaud/SE (79)		Très chaud/vent faible -chaud/SE (79)							
Nombre de jour/Qualité	35/robuste		35/Robuste							
Tout le jeu de données	1.88	1.15	1.51	1.24	1.39	0.75	0.86	1.64	1.37	1.66
Lever du soleil (ICU classique)	2.76	1.52	2.13	1.58	1.61	1.2	1.09	2.11	1.71	2.44
Lver plus 3h	0.86	0.53	0.64	0.73	0.76	0.15	0.35	1	0.77	0.8
Zénith	0.98	0.46	0.79	0.43	0.82	0.08	0.17	0.64	0.52	0.62
Zénith plus 3h	1.04	0.57	0.74	0.58	1	0.23	0.33	0.86	0.67	0.84
Coucher du soleil	1.68	1.42	1.49	1.55	1.7	1.11	1.25	2.03	1.64	1.95
coucher du soleil plus 2h	3.23	2.16	2.69	2.29	2.37	1.61	1.84	2.93	2.51	2.74
milieu de la nuit (nadir)	2.8	1.62	2.24	1.75	1.72	1.15	1.22	2.31	1.86	2.38
jour	1.24	0.76	0.99	0.84	1.06	0.39	0.53	1.14	0.95	1.11
nuit	2.69	1.63	2.16	1.74	1.86	1.17	1.23	2.22	1.94	2.32
ICU max pas de temps unique	5.88 °C (le 07-07-2020 après le coucher)	4.2 °C (le 06-08-2020 après le coucher)	5.2 °C (le 25- 07-2020 après le coucher)	5.85 °C (le 06-08-2020 au lever)	4.5 °C (le 22-07-2020 après le coucher)	4.2 °C (le 06- 08-2020 après le coucher)	4.7 °C (le 05-08-2020 après le coucher)	5.9 °C (le 07-07-2020 après le coucher)	5.65 °C (le 06-08-2020 au milieu de la nuit)	5.4 °C (le 13-07-2020 après le coucher)
ICU moyen max plage horaire	5.6 °C (le 08-07-2020 après le coucher)	3.95 °C (le 19-07-2020 après le coucher)	4.79 °C (le 25-07-2020 après le coucher)	5.01 °C (le 07-08-2020 au lever)	4.16 °C (le 04-08-2020 après le coucher)	3.64 °C (le 19-07-2020 après le coucher)	4.12 °C (le 06-08-2020 après le coucher)	5.69 °C (le 08-07-2020 après le coucher)	5.19 °C (le 07-08-2020 au milieu de la nuit)	5.65 °C (le 06-08-2020 après le coucher)

variables/ nom station	Urbain- rural	LCZ 8	Nakache	Basso Cambo	Montaud ran	Perget	Enjacca	Purpan	Thibaud	Fondeyre
TT	Chaud/NO (8)		Chaud/NO (8)							
Nombre de jour/Qualité	27/moyen		27/moyen							
Tout le jeu de données	1.73	1.02	1.56	1.01	1.46	0.47	0.62	1.23	1.27	1.42
Lever du soleil (ICU classique)	2.01	1.1	1.67	1.08	1.55	0.51	0.67	1.33	1.29	1.38
Lver plus 3h	1.26	0.72	1.19	0.68	1.02	0.24	0.47	0.83	1.05	1.05
Zénith	1.22	0.72	1.25	0.65	1.09	0.27	0.36	0.66	0.91	1.19
Zénith plus 3h	1.3	0.73	1.22	0.65	1.17	0.28	0.32	0.82	0.91	1.34
Coucher du soleil	1.55	1.03	1.46	1.03	1.47	0.55	0.62	1.38	1.2	1.46
coucher du soleil plus 2h	2.62	1.64	2.29	1.69	2.2	0.9	1.14	2.1	2	2.03
milieu de la nuit (nadir)	2.21	1.24	1.82	1.24	1.83	0.48	0.66	1.52	1.49	1.55
jour	1.37	0.82	1.31	0.77	1.2	0.34	0.46	0.93	1.05	1.25
nuit	2.5	1.46	2.11	1.47	1.88	0.82	1	1.88	1.7	1.89
ICU max pas de temps unique	5.35 °C (le 26-07-2020 après le coucher)	4.16 °C (le 26-07-2020 après le coucher)	4.7 °C (le 26- 07-2020 après le coucher)	4.9 °C (le 26- 07-2020 après le coucher)	4.55 °C (le 19-07-2020 après le coucher)	3.3 °C (le 26- 07-2020 après le coucher)	4.3 °C (le 26- 07-2020 après le coucher)	5.4 °C (le 26- 07-2020 après le coucher)	4.75 °C (le 24-07-2020 après le coucher)	6.25 °C (le 18- 07-2020 après le coucher)
ICU moyen max plage horaire	5.07 °C (le 26-07-2020 après le coucher)	3.98 °C (le 26-07-2020 après le coucher)	4.54 °C (le 26- 07-2020 après le coucher)	4.56 °C (le 26- 07-2020 après le coucher)	3.81 °C (le 29- 07-2020 après le coucher)	3.07 °C (le 26- 07-2020 après le coucher)	4.82 °C (le 26- 07-2020 après le coucher)	5.03 °C (le 26- 07-2020 après le coucher)	4.5 °C (le 26- 07-2020 après le coucher)	5.81 °C (le 11- 07-2020 après le coucher)

Tableau 22, écarts de températures moyens (en °C), entre les stations des zones d'activités (LCZ 8) et les rurales (Bouconne et Mondouzil), selon différentes périodes du jour, sous conditions météorologiques d'été: type de temps chaud/SE et très chaud/vent faible (7-9) et type de temps chaud/NO (8).

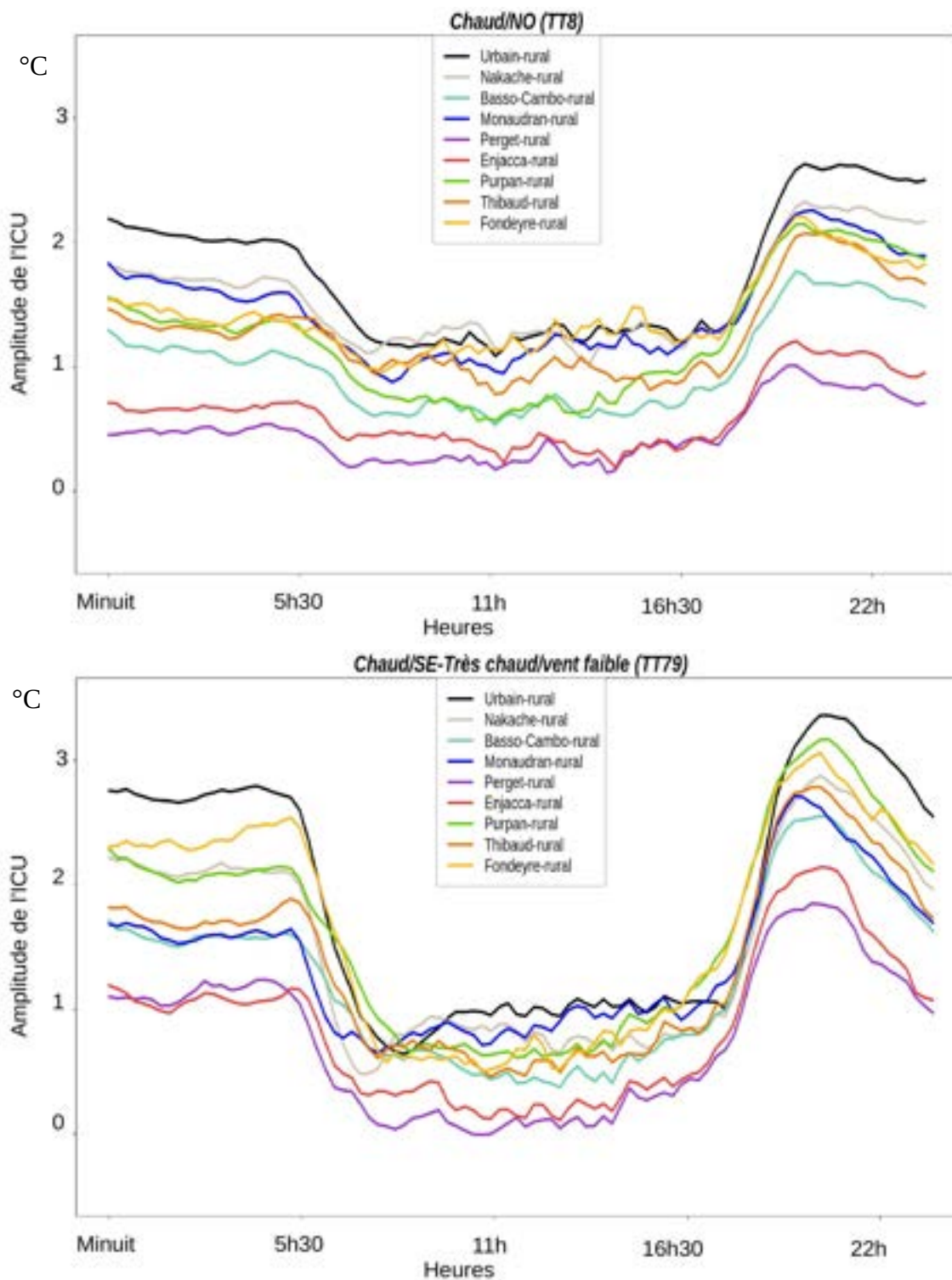


Figure 42, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h (en °C) entre les stations des zones d'activités (LCZ 8) et les rurales (Bouconne et Mondouzil), sous conditions météorologiques d'été: type de temps chaud/SE et très chaud/vent faible (7-9) et type de temps chaud/NO (8).

V.3.A. Des évolutions temporelles de l'ICU entre LCZ d'activités et rural similaires à la différence urbain/rural.

De nuit comme de jour, quel que soit le type de temps considéré, les différentes zones d'activités étudiées révèlent des écarts de température de l'ordre de un peu plus d'un degré entre elles. Ainsi elles oscillent entre 1,1°C et 2,3°C d'écart avec le rural entre minuit et le lever du soleil ; entre 0°C et 1°C le jour et entre 1,7°C et 3°C un peu avant le coucher du soleil jusqu'à minuit. Quels que soient les types de temps observés, les évolutions de température suivent la même forme que la différence urbain-rural pour chaque groupe de type de temps considéré

- Tout comme les écarts de température entre l'urbain et le rural, les différences entre les zones d'activités par rapport au rural sont moins élevées lors des type de temps chaud été/NO (8) que ceux des situations chaud/SE et très chaud/vent faible (79). En effet lors des jours chaud/NO (8), la nébulosité moyenne est relativement élevée, à savoir 4,7 sur 8, l'influence du soleil est donc amoindrie. A titre de comparaison la nébulosité moyenne du groupe type de temps chaud/SE et très chaud/vent faible (79) est de 0,87 sur 8. Nous observons ainsi des variations de températures relativement faibles entre la nuit et le jour (environ 0,6°C).

- En comparaison, les conditions nuageuses optimales permettent aux jours chaud/SE et très chaud/vent faible (79) de disposer de variations avec le rural plus marquées avec des maximums proches de 6°C d'écart (Purpan et Basso Cambo). De plus les températures décroissent la nuit relativement au même rythme que l'urbain donnant des écarts de températures évoluant de manière parallèle avec des écarts constants les unes par rapport aux autres. Les bâtiments de ces espaces d'activités, moins élevés et dotés de matériaux différents du centre ville comme les métaux, couplés à une disposition du bâti aérée leur permettent donc d'avoir le même comportement de refroidissement que l'urbain. Celui-ci étant plus dense mais avec des matériaux qui emmagasinent théoriquement moins de chaleur. De plus, les activités humaines sont limitées après le coucher du soleil, ce qui facilite le refroidissement.

V.3.B. Les effets de l'ensoleillement prolongé

Une nuance est cependant à noter, avant le coucher du soleil, les stations creusent plus rapidement l'écart avec le rural que ne le fait l'urbain. Cela est probablement dû à des expositions

au soleil plus longues des LCZ 8 d'activités dûes à des facteurs de vue du ciel importants dans ces espaces. Ce phénomène s'observe facilement en réalisant les différences de températures entre l'urbain et les LCZ 8 (figure 43). Nous notons alors deux creux sur les courbes d'écart de températures. L'un se situe avant le coucher du soleil aux alentours de 17h UTC, il est particulièrement prononcé pour Fondeyre, au nord de la ville, et Purpan, au centre-ouest de la ville, avec un centre urbain moins chaud de presque 1°C par rapport à ces zones d'activités. Le même comportement se produit également avec moins d'intensité le matin, juste après le lever du soleil, vers 7h30 UTC et avec un centre urbain jusqu'à 0,5°C moins chaud que les zones d'activités.

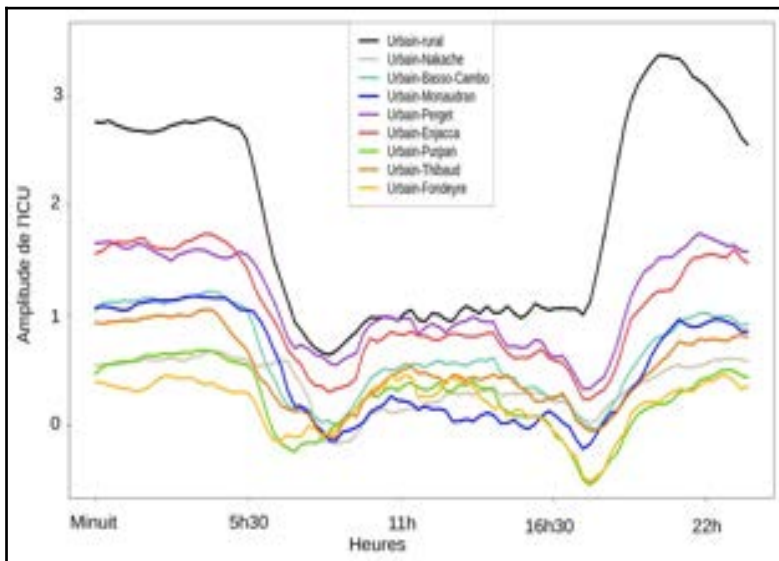


Figure 43, évolution de l'écart de température moyen sur 24h (en °C), entre les stations urbaines (Valade, Carmes et St Cyprien) et les zones d'activités (LCZ 8), sous conditions météorologiques d'été: type de temps chaud/SE et très chaud/vent faible (7-9).

Ce fait permet alors de confirmer les observations de la campagne de mesure qui soulignent les températures élevées du rond Point de Purpan en après midi et le soir, malgré le tissu composite des alentours de la station. Nous observons après le coucher du soleil, aux alentours de 22h, des températures de magnitude équivalente entre l'urbain et Purpan.

V.3.C. Les espaces à proximité: un gisement de fraîcheur potentiel ?

La station qui présente des températures les plus proches de celles du rural, et donc la plus fraîche des stations, est alors celle du Perget. Elle est située à l'ouest de Toulouse et proche de la forêt de Bouconne. Elle montre un écart de température avec le rural de respectivement de 0,47°C et 0,67°C pour le type de temps chaud/NO (8) et chaud/SE et très chaud/vent faible (79). Elle est suivie de près par En Jacca, elle aussi située à l'ouest du territoire, à 2km à vol d'oiseau du Perget. Les deux stations présentent des caractéristiques divergentes. En effet En Jacca est une zone d'activité du BTP et de logistique. La station est donc entourée dans un rayon de 250mètres de petites et moyennes (moins de 100m² d'emprise au sol) structures métalliques basses (R+1) et des espaces très ouverts (espace entre bâti supérieur à 25m), bien que peu végétalisés et dotée d'espaces

de sols nus. Dans un rayon de 500 mètres autour de la station, nous observons un peu plus de variété avec des friches mais également deux entrepôts massifs de logistique (R+2 et plus de 1000 m² d'emprise au sol). La zone du Perget, quant à elle, est un espace mixte, nous énumérons dans un rayon de 250 mètres des bureaux (R+3), des bâtiments commerciaux imposants (R+2) et un espace vert doté d'un groupement d'arbres. Dans un rayon de 500 mètres nous notons du résidentiel mais également deux carrières des sites de fabrications de tuiles en terre cuite pour les toitures.

Ces deux stations sont donc situées à distance équivalente de la ville à l'ouest, à altitude équivalente, dans deux espaces aux morphologies distinctes bien que de même LCZ. Elles disposent des températures les plus fraîches du jeu de données des LCZ8 et sont sensiblement identiques dans leurs évolution diurne l'une par rapport à l'autre, sur tout type de temps (d'été).

Deux raisons sont à avancer, d'abord la distance au centre, 11 km environ, correspond à deux fois plus que les zones de Thibaud, Fondeyre, Basso-Cambo et Montaudran qui sont aux alentours de 5 km du centre. Ensuite, elles sont à l'orée de l'urbain, avec à l'ouest de ces deux espaces des espaces végétalisés. Ce sont des espaces de fortes ruptures de températures avec leurs alentours, donnant alors les « falaises » / « cliffs » d'un transect typique de l'ICU à travers une agglomération (chapitre I), favorisant ainsi les effets de ventilation, d'autant plus que des effets de topographie sont à envisager pour l'ouest de la station du Perget avec le passage de l'Ausonnelle. Cet effet a été observé dans la campagne de mesure (chapitre III), qui traverse la zone et montre de nets gradients de températures.

V.3.D. L'effet des vents est légèrement perceptible

On peut observer que Nakache, la station de l'île du Ramier située au centre et entourée par la Garonne, la station de Montaudran, au sud-est, ainsi que Fondeyre, au nord et dans une moindre mesure (car uniquement sur le type de temps chaud/NO) sont celles qui se rapprochent le plus de l'urbain en journée en termes de températures. Nakache est d'ailleurs quasi systématiquement la plus chaude des LCZ8 par rapport au rural lorsque le vent vient du NO. Mais c'est également une station qui se rafraîchit rapidement la nuit, probablement grâce aux échanges d'air avec les espaces arborés et aquatiques environnants, particulièrement en conditions de vents de SE. Lors de ces conditions de vent SE, c'est Purpan et Fondeyre qui sont les zones les plus chaudes, en particulier de nuit. Afin de poursuivre plus en détail l'analyse, sont isolés les jours avec vent du NO >3m/s pour le type de temps chaud/NO (8) et de vent de SE >3ms selon le type de temps chaud/SE (7). Ceci représente un effectif respectif de 21 jours et de 5 jours.

variables/ nom station	Urbain- rural	Nakache	Basso Cambo	Montaudr an	Purpan	Thibaud	Fondeyre
TT	Chaud/NO (8)	Chaud/NO (8)					
Nombre de jour/Qualité	21/moyen	21/moyen					
Tout le jeu de données	1,7	1,5	0,94	1,41	1,16	1,19	1,35
Lever du soleil (ICU classique)	1,96	1,61	1,05	1,51	1,28	1,2	1,32
Lever plus 3h	1,35	1,19	0,76	1,07	0,86	1,1	1,06
Zénith	1,28	1,28	0,64	1,1	0,71	0,95	1,14
Zénith plus 3h	1,38	1,27	0,65	1,19	0,89	0,94	1,38
Coucher du soleil	1,61	1,49	0,99	1,47	1,37	1,18	1,47
coucher du soleil plus 2h	2,31	2,02	1,37	1,96	1,75	1,63	1,8
milieu de la nuit (nadir)	2,16	1,76	1,19	1,77	1,46	1,41	1,49
jour	1,43	1,32	0,77	1,21	0,95	1,07	1,23
nuit	2,22	1,89	1,24	1,83	1,59	1,5	1,64
ICU max pas de temps unique	5,13 °C (le 01-12-2017 au milieu de la nuit)	4,65 °C (le 10-07-2020 après le coucher)	4,15 °C (le 01-07- 2020 au milieu de la nuit)	4,55 °C (le 10-07-2020 après le coucher)	4,45 °C (le 01-07-2020 au milieu de la nuit)	4,1 °C (le 10-07-2020 après le coucher)	4,25 °C (le 10-07-2020 après le coucher)
ICU moyen max plage horaire	4,45 °C (le 01-07-2020 au milieu de la nuit)	3,75 °C (le 03-07-2020 après le coucher)	3,24 °C (le 01-07- 2020 au lever)	3,55 °C (le 11-07-2020 après le coucher)	3,85 °C (le 01-07-2020 au milieu de la nuit)	3,22 °C (le 23-08-2020 après le coucher)	3,81 °C (le 11-07-2020 après le coucher)

variables/ nom station	Urbain- rural	Nakache	Basso Cambo	Montaudr an	Purpan	Thibaud	Fondeyr e
TT	Très chaud/vent faible -chaud/ SE (79)	Chaud/SE (7)					
Nombre de jour/Qualité	5/faible	5/faible					
Tout le jeu de données	1,32	0,8	0,87	0,7	1,38	0,86	1,19
Lever du soleil (ICU classique)	2,81	2,33	2,31	1,51	2,56	2,27	2,5
Lever plus 3h	0,46	-0,01	0,74	0,29	1,14	0,47	0,78
Zénith	0,58	-0,03	0,01	0,3	0,63	0,01	0,14
Zénith plus 3h	0,53	-0,14	-0,08	0,32	0,65	0,01	0,25
Coucher du soleil	0,7	0,21	0,23	0,32	1,02	0,21	0,82
coucher du soleil plus 2h	1,48	1,11	0,84	0,7	1,41	0,76	1,5
milieu de la nuit (nadir)	2,74	2,27	2,27	1,53	2,63	2,38	2,56
jour	0,78	0,21	0,43	0,41	1	0,39	0,68
nuit	1,61	1,24	1,02	1,04	1,39	1,04	1,6
ICU max pas de temps unique	4,4 °C (le 11- 08-2020 au milieu de la nuit)	3,95 °C (le 30-07-2020 au lever)	5,85 °C (le 10-07-2020 au lever)	3,2 °C (le 01-12- 2017 au milieu de la nuit)	4,95 °C (le 20-07- 2020 au milieu de la nuit)	5,85 °C (le 30-07- 2020 au milieu de la nuit)	4,75 °C (le 30-07- 2020 au milieu de la nuit)
ICU moyen max plage horaire	3,95 °C (le 19-08-2020 au milieu de la nuit)	3,56 °C (le 30-07-2020 au milieu de la nuit)	5,01 °C (le 07-08-2020 au lever)	2,73 °C (le 30-07- 2020 au milieu de la nuit)	4,15 °C (le 07-08- 2020 au milieu de la nuit)	5,39 °C (le 07-08- 2020 au milieu de la nuit)	3,87 °C (le 19-08- 2020 au milieu de la nuit)

Tableau 23, écarts de températures moyens (en °C), entre les stations d'activités (LCZ 8) et les rurales (Bouconne et Mondouzil), selon différentes périodes du jour, selon des types de temps en été chaud/SE (7) et chaud/NO (8), avec un vent moyen supérieur à 3m/s.

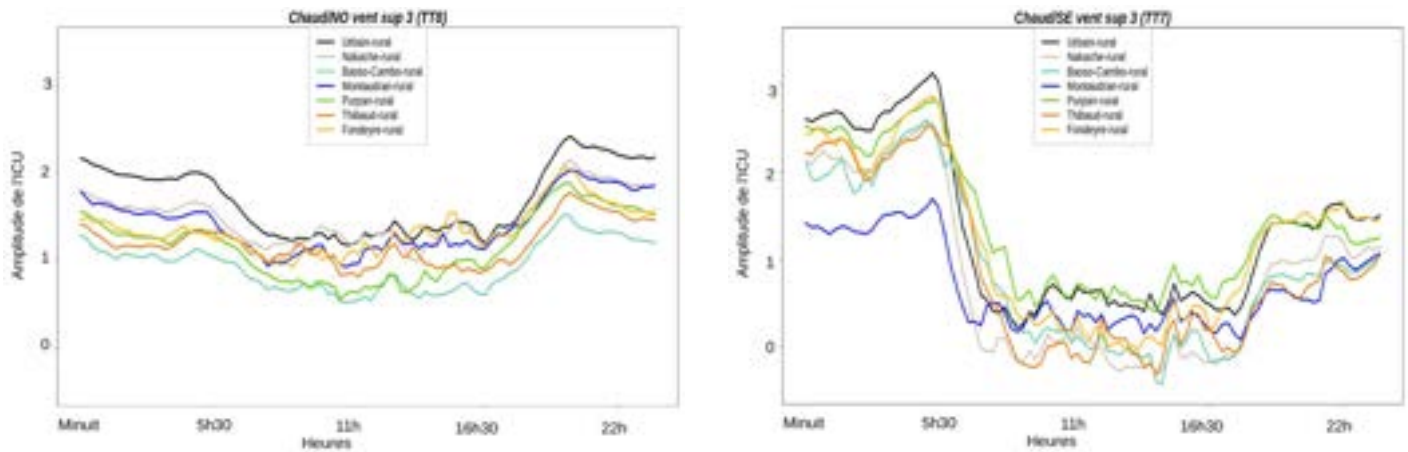


Figure 44, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h (en °C), entre les stations des zones d'activités (LCZ 8) et les rurales (Bouconne et Mondouzil), selon des types de temps en été chaud/SE (7) et chaud/NO (8), avec un vent moyen supérieur à 3m/s.

Bien que l'effectif de jours soit limité pour les conditions de vent de SE, des informations sont observables. Il ressort par exemple que sous condition de vent de SE, Montaudran, située au sud-est de la ville à 5km du centre, est clairement plus fraîche, de l'ordre de 1°C la nuit, que les autres zones d'activité. En journée, la station à l'ouest de la ville, Purpan, située à 3,5km du centre, semble être impactée par ce dernier car disposant de températures plus élevées que l'urbain, d'où une différence de température supérieure à celle du centre par rapport au rural. L'influence est cependant faible, de l'ordre de quelques dixièmes de degrés. De plus, en vent de SE, Purpan dispose quasi-systématiquement des écarts les plus élevés avec le rural, quel que soit le moment de la journée considéré.

En situation de vent de NO, Purpan semble profiter des effets du vent en journée car les écarts de températures sont moins élevées que lors des situations de vent de SE, proportionnellement aux comportements des autres stations. Enfin, pour les stations Basso-Cambo et Thibaud, situées au sud-ouest, les vents impactent peu les différences de températures avec le rural, n'étant pas dans situés sur leurs axes par rapport à l'urbain. Fondeyre, au nord du centre, paraît impactée en milieu d'après midi.

Seules donc les stations à une distance raisonnable (moins de 5km) du centre-ville et dans l'axe des vents dominants voient leurs comportements thermiques influencés. Cependant les variations observées sont faibles.

V.4. Des espaces à surveiller

Plusieurs investigations restent encore à mener pour les LCZ de tissu d'activité. En premier lieu il conviendrait de compléter le réseau, afin d'approfondir ces analyses, à la fois sur la variabilité du comportement thermique entre LCZ8, mais aussi en relation avec les autres zones proches. Il reste par exemple, au nord de Toulouse, une LCZ 8 à équiper dans la zone de St-Alban, d'autant plus que c'est un point sélectionné par rapport aux résultats de la campagne de mesures. Il peut servir aussi de comparaison avec les zones du Perget et d'En Jacca car il est également situé à plus de 10 km du centre mais sans les espaces végétalisés dans les alentours proches. Ensuite est étudiée la possibilité d'équiper un centre-commercial. Plusieurs sites sont éligibles et présentent des intérêts. Nous évoquons le centre E. Leclerc de Blagnac pour pouvoir comparer avec le centre-ville de cette commune qui est, comme montré dans l'analyse des LCZ 3 bâti bas et dense, particulièrement élevé en températures. Il y a également à proximité un grand espace vert avec la station des Quinze Sols, la comparaison de ces trois points peuvent mettre en évidence un îlot de chaleur sur la commune de Blagnac.

Observer le changement d'occupation du sol représente un deuxième axe de travail à mener. En effet le site de Nakache a déjà aujourd'hui changé de visage, avec deux bâtiments de plusieurs milliers de mètres carrés détruits et un futur parc en construction (cf requalification de l'île du Ramier et le projet LIFE, présenté à plusieurs reprises dans le chapitre II et III). Les stations équipées vont monitorer et tenter de quantifier le gain apporté par cette requalification, d'autant plus que, comme nous l'avons vu, la station Nakache est aujourd'hui un point chaud, qui ne semble donc pas tirer profit de ses espaces environnants, excepté la nuit.

Enfin, un point est à mettre en exergue, les zones d'activités sont aujourd'hui des territoires d'enjeux urbanistiques pour certaines directions de la Métropole. La direction de l'aménagement s'y intéresse par exemple, que ce soit par rapport aux nouvelles lois sur l'imperméabilisation des sols ou bien la quantité de foncier public disponible dans le cadre du projet 100 000 arbres de Toulouse. Ces espaces attirent aussi de nouvelles organisations des transports. Par exemple, la construction de la future ligne de métro qui relie les LCZ 8 des bureaux d'Airbus du sud-est de la ville à ceux de l'ouest de la ville transforme ces espaces conçus pour la voiture. Ils deviennent des espaces de déplacements piétons, et donc sujets aux questions de confort thermique au même titre que d'autres LCZ. A ce titre, le monde scientifique a un rôle à jouer dans le cadre des services climatiques de la Métropole, que ce soit pour guider dans les aménagements ou rédiger des

recommandations. Certains travaux sont déjà engagés. En effet, à la demande de Tisséo, le service de transport de Toulouse Métropole, une note a été rédigée en décembre 2020. Elle a pour objectif de fournir au cahier des charges environnemental de Tisséo une approche des enjeux de l'ICU pour l'aménagement des espaces publics aux alentours des sorties de la prochaine ligne de métro.

Enfin l'été 2020, qui sert d'ancrage temporel pour cette étude, est une saison particulière car la Covid 19 a possiblement impacté les rejets de chaleur anthropique de ces espaces, en particulier les zones de bureaux avec les effets du télétravail. Le travail est donc à réitérer en 2021, si les conditions sont revenues à la normale.

VI. Conclusion générale et perspectives

VI. Conclusion générale et perspectives.....	187
VI.A. Un mot pour conclure.....	188
VI.B. Perspectives: Les études sur le climat au service de l'urbanisme contemporain....	191

VI.A. Un mot pour conclure

Les services climatiques renvoient à un terme usité depuis le début des années 1980 dans la littérature scientifique anglo saxonne, bien que les travaux de recherche et d'observation qui ont contribué à renforcer notre capacité scientifique actuelle à offrir ces services datent de plus d'un siècle.

Dès lors ce vocable n'eût de cesse de trouver ses marques/chercher ses repères, entre mot-valise, notion et concept. Cette thèse s'inscrit dans le mouvement et l'accélération des études sur les services climatiques parues depuis 2014 dans lesquelles ceux-ci sont considérés comme une interface entre des utilisateurs et fournisseurs d'information climatique. Ces études élaborent les services climatiques dans un cadre où leur objectif est de produire du contenu scientifique d'analyse du climat (passé, présent ou futur) afin de fournir des informations calibrées pour que des utilisateurs spécifiques entreprennent des mesures d'atténuation et d'adaptation. Ainsi les services climatiques ne se définissent plus par ce qu'ils peuvent être et ce qu'ils peuvent apporter à la société mais par ce qu'ils sont : une mise à disposition et une servitisation de la science pour des applications pilotées.

Cette thèse propose un éclairage applicatif de ce mouvement des services climatiques pensé pour des utilisateurs via un focus sur des services intégrés urbains et le déploiement d'un réseau de stations météorologiques pour des études climatologies urbaines. Les utilisateurs sont ici matérialisés par les départements techniques de Toulouse Métropole. L'approche de ces services climatiques s'ancre dans une absence de hiérarchisation entre les fournisseurs et utilisateurs des services, couplée à des méthodes de travail relevant de la participation. La mise en place de cette démarche de participation, en particulier à l'aide de processus de co-construction, et d'une gouvernance articulée autour d'une organisation des besoins et des compétences fait l'objet du deuxième chapitre de la thèse. L'approche alors adoptée, plus orientée sciences humaines et sociales, est de considérer les services climatiques à base de réseaux de mesures comme un objet inter et pluri disciplinaire. Pour mettre davantage en exergue le caractère transversal, les services climatiques à base de réseaux de mesures sont abordés au travers de leurs composantes. Ils sont ainsi divisés et organisés autour de cadres théoriques distincts et de disciplines scientifiques associées. Cette approche par composantes définit le type de compétences attendues dans chaque étape de la construction des services climatiques, facilitant ainsi les mises en relations et les choix d'interlocuteurs parmi les acteurs. La thèse revêt dans ce travail la forme d'un état de l'art catégorisé mais propose de manière sous-jacente une approche didactique et démystificatrice des services climatiques, en particulier pour un public de non-initiés à l'instar des urbanistes.

La deuxième partie de cette thèse s'articule autour de la mise en place opérationnelle des deux composantes principales de services climatiques à base de réseaux de mesure. Ces composantes relèvent alors de la climatologie et, par extension, du monde scientifique impliqué dans les services climatiques toulousains. En reprenant l'état de l'art alors exposé dans le chapitre II, autour de chaque composante des services climatiques, le travail a porté sur le réseau de mesures basé sur des stations météorologiques au travers de la validation de la solution technique retenue, de la sélection des sites de mesures, de son déploiement et de l'exploitation de ses résultats.

Le choix des sites d'observation est détaillé à l'aide d'une approche catégorisée entre des outils cartographiques et des mesures de terrain. Le relief, la Trame Verte et Bleue (TVB), l'âge du bâti et les morphologies urbaines sont mobilisés pour sélectionner chaque point de mesure. Une campagne de mesure véhiculée a également été effectuée. Le réseau de stations météorologiques devient alors un objet organisé en thèmes et transects raccrochés à des objectifs d'études scientifiques (Chapitre III). Nous pouvons citer par exemple le thème des morphologies urbaines, qui couvre toutes les typologies de bâti en de multiples points que nous observons sur la Métropole. L'aspect Internet des Objets (IoT) est également abordé, envisageant les services climatiques comme la couche application d'un objet IoT. Cette approche par le réseau et non via le service permet une intégration plus souple dans les départements en charge de la gestion de l'information géographique. Ces services sont en effet habitués à gérer des réseaux IoT ; il est permis de citer les données du trafic routier et piétons, du stationnement ou de l'éclairage.

Concernant l'exploitation des résultats, l'îlot de chaleur urbain est analysé au travers de multiples prismes de lecture selon une démarche incrémentale en terme de précision temporelle et spatiale (Chapitre IV) . Dans un premier temps l'approche classique d'écart de température entre l'urbain et le rural est mobilisée et explicitée, révélant un îlot de chaleur maximum annuel moyen après le coucher du soleil de 3,35°C. Les saisons et situations météorologiques approfondissent ensuite cette approche classique. Ainsi l'îlot de chaleur en été dispose d'une intensité de début de nuit de 3,95°C en moyenne avec un maximum observé le 03/07/2019 de 6,8°C. La caractérisation de l'îlot de chaleur est réalisée ensuite selon une approche infra-urbaine par la mobilisation des morphologies et du concept de « Local Climate Zones ». Ce concept permet de classer le territoire en diverses typologies à partir de la hauteur du bâti, de sa densité, de la présence de la végétation ou encore des activités humaines qui s'y déroulent. Les températures de ces typologies sont ensuite croisées avec l'approche par types de temps et les saisons. Le centre urbain, ses faubourgs, les parcs, les zones d'activités, les zones résidentielles et les petits collectifs sont ainsi classés au regard du comportement journalier des écarts de températures entre chacun de ces

territoires et le rural, représenté par la forêt de Bouconne et la commune de Mondouzil. Les résultats montrent des faubourgs plus chauds que l'hyper centre en journée et disposant d'un ICU journalier constant autour de 1°C en hiver. Les parcs se rafraîchissent correctement la nuit mais se comportent comme l'urbain en journée. Les tissus d'activités ne sont pas les lieux les plus chauds en journée ni la nuit et partagent de nombreuses similitudes dans leurs écarts de températures par rapport au rural avec les petits collectifs et les pavillons individuels.

Concernant le focus réalisé sur la LCZ d'activités (Chapitre V). L'analyse des écarts de températures observés avec le rural est approfondie au regard de la spatialisation par rapport à l'aire urbaine, la distance au centre ou les caractéristiques de chaque site de mesures. Ainsi les résultats montrent qu'en condition de vent de sud-est, une zone hétérogène à l'ouest du centre, composée d'un centre commercial et d'un hôpital, est la plus chaude des sites considérés. C'est également le point disposant des températures les plus élevées des zones d'activités toutes situations confondues en fin d'après midi. Les deux zones industrielles et commerciales de l'ouest du territoire, situées à plus de 10km du centre, se rafraîchissent correctement la nuit, profitant de leurs alentours végétalisés. Les zones industrielles et d'activités du sud-est (dédiées au Bâtiment Travaux Publics), du nord (dédiée au fret et à la logistique) et du sud-est (bureaux) montrent des écarts faibles de température avec l'hyper-centre, en particulier la zone de bureaux lors des conditions de vent du nord-ouest. Enfin la zone industrielle située sur l'île du Ramier au centre de Toulouse et abritant l'ancien Parc des Expositions, dispose de températures élevées malgré la présence de la Garonne. La requalification engagée de cet espace en parc public permettra d'observer l'impact sur les températures du changement d'occupation.

VI.B. Perspectives : Les études sur le climat au service de l'urbanisme contemporain

- **Traduire les résultats en documents d'urbanisme.**

Tous les résultats produits et présentés dans cette thèse présentent une mise en forme qui se veut relevant d'une démarche de climatologie urbaine et non de l'urbanisme. De fait, la traduction de ces résultats en applications diverses opérationnelles par les départements de la Métropole, n'est pas encore effective et représente une part importante du travail qui reste à accomplir. Pendant les prochains mois et années, le partenariat avec la Métropole se poursuivra au travers de cette transformation de données scientifiques vers des outils urbanistiques. Ainsi, le principal enjeu des services climatiques, à savoir délivrer une information calibrée pour des utilisateurs définis et spécifiques à l'appui de méthodes scientifiques, sera concrétisé. Le travail à mener est donc double. Il faut continuer la production d'analyses thématiques scientifiques à partir du réseau de mesure, mais également les traduire et les implanter dans les méthodes et logiques de travail des départements urbains.

- **Étendre le réseau à des nouvelles thématiques et renforcer des existantes**

Parmi les territoires encore peu étudiés, nous pouvons citer les quartiers récents relevant des Zones d'Aménagements Concertés, dont l'étude pourrait être enrichie grâce à de nouveaux points de mesures. Ces nouveaux espaces qui se présentent comme le futur de l'urbain, sont absents des analyses et sont le foyer de nombreux enjeux pour la construction de la ville de demain. Ce sont des espaces mixtes, pour lesquels la classification des morphologies urbaines est parfois difficile, tant l'hétérogénéité du bâti et des activités de ces espaces peut être élevée.

Les brises urbaines et l'effet de rafraîchissement des parcs urbains doivent être également étudiés. Plusieurs espaces verts sont actuellement équipés de stations météorologiques en de multiples points à cette fin. Le réseau doit donc être densifié dans un premier lieu puis des inter comparaisons de parcs doivent être étudiées.

- **Considérer l'urbanisme du neuf et de l'ancien, de l'habitat et de l'activité**

Les études de climatologie à diriger sont probablement à considérer selon deux points de vue urbanistiques. Le premier est de répondre aux besoins d'extension de la ville existante. Il porte sur la construction des Eco-quartiers ou encore des ZAC ou de la promotion immobilière. La

collectivité est alors en demande d'outils de contrôle, de gestion mais aussi d'évaluation des prochains ouvrages, en particulier au regard d'impact sur le climat (adaptation et atténuation).

Le deuxième point de vue s'aborde sur l'urbanisme de requalification, de rénovation ou de réaménagement de la ville. Les acteurs sont alors en attente ici d'outils plus précis, d'une finesse spatiale des analyses encore difficile à produire pour la climatologie. Les interrogations se focalisent sur l'effet d'un arbre, d'un plan d'eau ou de l'aménagement d'un espace public, comme une rue ou une place.

Un réseau de stations météorologiques peut-être un outil inadéquat pour suivre l'évolution des températures lors de la construction d'une Zone d'Aménagement Concertée car les temporalités sont différentes. En effet, la construction d'une ZAC, par phase, s'étend sur plusieurs années, il est délicat d'y placer un site d'observation sur une durée aussi longue sans qu'il soit bougé, abîmé et maintenu en service. En revanche un réseau demeure un bon outil pour monitorer un espace déjà en existant.

- **Multiplier les sources d'observations**

Certaines variables mesurées par le réseau, comme la température de l'air, sont récupérables via les sciences participatives. Les téléphones, voitures ou stations amateurs font parties intégrantes de ces nouvelles sources de données mobilisables. De fait, elles peuvent enrichir les observations du réseau existant de Toulouse. Le principal enjeu est ici de compléter les approches. Par exemple les voitures traversent des espaces sans bâti ou mâts pour positionner les stations, fournissant des mesures inaccessibles via le réseau. D'un autre côté les stations déployées observent sans interruptions, contrairement aux voitures qui ne traversent pas tous les espaces en continu.

- **Observer la tendance des services climatiques en France**

C'est la première fois qu'une collectivité territoriale française se dote d'un tel réseau de mesures dans l'objectif d'intégrer ses résultats dans la production de ses documents dans le cadre d'une démarche de services climatiques intégrés. Comme indiqué auparavant, les services climatiques de Toulouse sont développés autour d'utilisateurs et d'applications spécifiques. De fait, des retours d'expériences sont attendus, afin de nourrir des initiatives similaires et aider les structures, privées ou publiques, qui souhaiteraient disposer ou proposer de tels services.

Il est plus discuté du pourquoi avons-nous besoin de services climatiques et de leur nécessité, que de ce qu'ils sont ou de comment ils devraient être organisés*.

*Adapté de Harjanne, A. (2017). Servitizing climate science—Institutional analysis of climate services discourse and its implications. *Global environmental change*, 46, 1-16 : « Looking at the discussions on climate services in the WMO Bulletins, discourses specifying current organizational failings and justifying the need for change are much more prevalent than discourses describing the new paradigm. That is, *why climate services are necessary and needed is discussed much more than what climate services are or how they should be organized, developed and delivered.* »

Bibliographie

Bibliographie scientifique.....	196
Lois, chartes, documents de l'OMM et divers.....	205

Bibliographie scientifique

- AKBARI, Hashem et KOLOKOTSA, Dionysia. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy and Buildings*, 2016, vol. 133, p. 834-842.
- AKRICH Madeleine, « Co-construction », in CASILLO I. avec BARBIER R., BLONDIAUX L., CHATEAURAYNAUD F., FOURNIAU J.-M., LEFEBVRE R., NEVEU C. et SALLES D. (dir.), *Dictionnaire critique et interdisciplinaire de la participation*, Paris, GIS Démocratie et Participation, 2013, ISSN : 2268-5863. URL : <http://www.dicopart.fr/en/dico/co-construction>.
- ALCHAPAR, Noelia L., CORREA, Erica N., et CANTÓN, M. Alicia. Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones. *Energy and Buildings*, 2014, vol. 69, p. 22-32.
- ALLAIN, Rémy. Morphologie urbaine. *Géographie, aménagement et architecture de la ville*, 2004.
- ALLIS, E., et al. The future of climate services World Meteorol. Organ. Bull, 2019, vol. 68, p. 50-4.
- ATHAMENA, Khaled. *Modélisation et simulation des microclimats urbains: Etude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers*. 2012. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes (ECN).
- ATANA, Nishtha, PURI, Sahil, AHUJA, Mehak, et al. A survey and comparison of relational and non-relational database. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2012, vol. 1, no 6, p. 1-5
- ATKINSON, B. W. Numerical modelling of urban heat-island intensity. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, vol. 109, no 3, p. 285-310.
- AUDOUX, Christine et GILLET, Anne. Recherche partenariale et co-construction de savoirs entre chercheurs et acteurs: l'épreuve de la traduction. *Revue Interventions économiques. Papers in Political Economy*, 2011, no 43.
- AUER, A. H., 1978: Correlation of land use and cover with meteorological anomalies. *J. Appl. Meteor.*, 17, 636-643
- AZEVEDO, Juliana Antunes, CHAPMAN, Lee, et MULLER, Catherine L. Quantifying the daytime and night-time urban heat island in Birmingham, UK: A comparison of satellite derived land surface temperature and high resolution air temperature observations. *Remote Sensing*, 2016, vol. 8, no 2, p. 153.
- BACQUÉ, Marie-Hélène et GAUTHIER, Mario. Participation, urbanisme et études urbaines. *Participations*, 2011, no 1, p. 36-66.
- BAKLANOV, A., GRIMMOND, C. Sue B., CARLSON, D., et al. From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services. *Urban Climate*, 2018, vol. 23, p. 330-341.
- BALÁZS, Bernadett, UNGER, János, GÁL, Tamás, et al. Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modelling, verification and extension. *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 2009, vol. 16, no 3, p. 275-287.
- BALCHIN, William George Victor et PYE, Norman. A micro-climatological investigation of bath and the surrounding district. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1947, vol. 73, no 317-318, p. 297-323.
- BARANKA, Györgyi, BOZÓ, L., KOMAC, Blaž, et al. Urban Heat Island Gold Standard and Urban Heat Island Atlas. In : *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*. Springer, Cham, 2016. p. 41-70.
- BECHTEL, B., Zakšek, K., & Hoshyaripour, G. (2012). Downscaling land surface temperature in an urban area: A case study for Hamburg, Germany. *Remote Sensing*, 4(10), 3184-3200.
- BECHTEL, Benjamin, ALEXANDER, Paul J., BÖHNER, Jürgen, et al. Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015, vol. 4, no 1, p. 199-219.
- BECK, Christoph et PHILIPP, Andreas. Evaluation and comparison of circulation type classifications for the European domain. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2010, vol. 35, no 9-12, p. 374-387.
- BELL, Simon, CORNFORD, Dan, et BASTIN, Lucy. How good are citizen weather stations? Addressing a biased opinion. *Weather*, 2015, vol. 70, no 3, p. 75-84.
- BENATYA, R. Classification par régimes de temps pour un suivi climatique des températures sur la France. *Rapport de stage de fin d'études, Ecole Nationale de la Météorologie, Météo-France, Toulouse, France*, 2009.

- BESSE, Jean-Marc. Le paysage, espace sensible, espace public. *Meta: Research in Hermeneu*, 2010.
- BESSEMBINDER, Janette, TERRADO, Marta, HEWITT, Chris, et al. Need for a common typology of climate services. *Climate Services*, 2019, vol. 16, p. 100135.
- BEURET, Jean-Eudes. Concertation (démarche de). *Casillo I. avec Barbier R., Blondieux L., Chateauraynaud F., Fourniau JM., Lefebvre R., Neveu C. et Salles D.(éd.), Dictionnaire critique et interdisciplinaire de la participation, Paris, GIS Démocratie et Participation, ISSN, 2013, p. 2268-5863.*
- BIGOT Sylvain, DUCHE Sarah, MADELIN Malika, ROME Sandra. ÉTUDE DU CLIMAT URBAIN: POUR UNE MISE À DISPOSITION DE NOUVEAUX SERVICES CLIMATIQUES. *Bulletin de la Société Géographique de Liège, Société Géographique de Liège, 2017, BSLG [En ligne], 68 (2017/1) - Climatologie,, 68 (2017), pp.13-36. Halshs-02153176*
- BOCHET, Béatrice et RACINE, Jean-Bernard. Connaître et penser la ville: des formes aux affects et aux émotions, explorer ce qu'il nous reste à trouver. Manifeste pour une géographie sensible autant que rigoureuse. *Géocarrefour*, 2002, vol. 77, no 2, p. 117-132.
- BOKWA, Anita, HAJTO, Monika J., WALAWENDER, Jakub P., et al. Influence of diversified relief on the urban heat island in the city of Kraków, Poland. *Theoretical and applied climatology*, 2015, vol. 122, no 1-2, p. 365-382.
- BONARD, Yves et MATTHEY, Laurent. Les éco-quartiers: laboratoires de la ville durable. *Cybergeog: European Journal of Geography*, 2010, vol. 9.
- BUONTEMPO, Carlo, HEWITT, Chris D., DOBLAS-REYES, Francisco J., et al. Climate service development, delivery and use in Europe at monthly to inter-annual timescales. *Climate Risk Management*, 2014, vol. 6, p. 1-5.
- BRASSEUR, Guy P. et GALLARDO, Laura. Climate services: Lessons learned and future prospects. *Earth's Future*, 2016, vol. 4, no 3, p. 79-89.
- CALUWAERTS, Steven, HAMDY, Rafiq, TOP, Sara, et al. The urban climate of Ghent, Belgium: A case study combining a high-accuracy monitoring network with numerical simulations. *Urban Climate*, 2020, vol. 31, p. 100565.
- CARDOSO, Renata dos Santos et AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. Urban heat island analysis using the 'local climate zone' scheme in Presidente Prudente, Brazil. 2018.
- CASH, David W., BORCK, Jonathan C., et PATT, Anthony G. Countering the loading-dock approach to linking science and decision making: comparative analysis of El Niño/Southern Oscillation (ENSO) forecasting systems. *Science, technology, & human values*, 2006, vol. 31, no 4, p. 465-494.
- CHABROT, Christophe. La métropole dans les réformes territoriales françaises. 2013.
- CHANDLER, Tony John. *The climate of London*. Hutchinson, 1965. p292
- CHANGNON, S.A., HOWARD, J.C., DURRENBERGER, R.W., HOSLER, C.L., MCKEE, T.B., 1980. Examples of applications of climatic data and information provided by state climate groups. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 61 (12), 1567-1569.
- CHAPMAN, Lee, BELL, Cassandra, et BELL, Simon. Can the crowdsourcing data paradigm take atmospheric science to a new level? A case study of the urban heat island of London quantified using Netatmo weather stations. *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, no 9, p. 3597-3605.
- CHAPMAN, Lee, MULLER, Catherine L., YOUNG, Duick T., et al. The Birmingham urban climate laboratory: an open meteorological test bed and challenges of the smart city. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, vol. 96, no 9, p. 1545-1560.
- CHEN, Yu-Cheng, YAO, Chun-Kuei, HONJO, Tsuyoshi, et al. The application of a high-density street-level air temperature observation network (HiSAN): Dynamic variation characteristics of urban heat island in Tainan, Taiwan. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 626, p. 555-566.
- CHEVAL, Sorin, DUMITRESCU, Alexandru, et BELL, Aurora. The urban heat island of Bucharest during the extreme high temperatures of July 2007. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, vol. 97, no 3-4, p. 391-401.
- CHING, J., MILLS, G., SEE, L., et al. Wudapt (World Urban Database and Access Portal Tools): An international collaborative project for climate relevant physical geography data for the world's cities. In : *96th American Meteorological Society Annual Meeting, New Orleans, LA*. 2016. p. 9-14.

- CHEW, Lup Wai, LIU, Xuan, LI, Xian-Xiang, *et al.* Interaction between heat wave and urban heat island: A case study in a tropical coastal city, Singapore. *Atmospheric Research*, 2021, vol. 247, p. 105134.
- CHOW, Winston TL et ROTH, Matthias. Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2006, vol. 26, no 15, p. 2243-2260.
- CHRISTEL, Isadora, HEMMENT, Drew, BOJOVIC, Dragana, *et al.* Introducing design in the development of effective climate services. *Climate Services*, 2018, vol. 9, p. 111-121.
- CLOZIER, René. Les terrasses fluviales. *L'Information Géographique*, 1936, vol. 1, no 1, p. 13-16.
- CORNES, Richard C., DIRKSEN, Marieke, et SLUITER, Raymond. Correcting citizen-science air temperature measurements across the Netherlands for short wave radiation bias. *Meteorological Applications*, 2020, vol. 27, no 1, p. e1814.
- CORTEKAR, Jörg, THEMESSEL, Matthias, et LAMICH, Katja. Systematic analysis of EU-based climate service providers. *Climate Services*, 2020, vol. 17, p. 100125.
- DANDIN, Philippe, CORRE, Lola, et L'HÔTE, David. Drias, une stratégie de service pour l'adaptation. *Villes et climat*, p. 15
- DANIELS, Elizabeth, BHARWANI, Sukaina, et BUTTERFIELD, Ruth. The Tandem framework: a holistic approach to co-designing climate services. SEI Discussion Brief. Stockholm Environment Institute, 2019
- DEANDREIS, C., LEMOND, J., DANDIN, P., *et al.* Recent progress towards climate services in France. *Pollution Atmosphérique*, 2013, p. 120-128
- DE LAPPARENT, B., ROUX, J., RICHARD, Yves, *et al.* Mesures de la température et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain à Dijon.
- DOUGUEDROIT, Annick. Quelle «exception française» en matière de «types de temps»? *Norois. Environnement, aménagement, société*, 2004, no 191, p. 33-39.
- DOUGUEDROIT A., 2003: L'évolution de la climatologie in Per ricordare Mario Pinna, P. Ghelardoni ed., *Memorie Soc. Geo. Italiana*, LXX, 27-43.
- DOUGUÉDROIT, Annick. Les climats de la bordure océanique de la péninsule ibérique. J. Mounier: Les climats océaniques des régions atlantiques de l'Espagne et du Portugal. *Méditerranée*, 1980, vol. 40, no 4, p. 92-93.
- DUBREUIL, Vincent, QUÉNOL, Hervé, FOISSARD, Xavier, *et al.* Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain à Rennes. 2011.
- DUMAS, Guillaume, *Conception et mobilisation des cartographies des « Zones Climatiques Locales », entre recherche en climatologie urbaine et métiers de l'urbanisme.* Mémoire de master 2 Ville Habitat et Transition Ecologique, sous la direction de Julia Hidalgo et Fabrice Escaffre. 2016.
- ELIASSON, Ingegård. The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and urban planning*, 2000, vol. 48, no 1-2, p. 31-44.
- FAST, Jerome D., TORCOLINI, Joel C., et REDMAN, Randy. Pseudovertical temperature profiles and the urban heat island measured by a temperature datalogger network in Phoenix, Arizona. *Journal of applied meteorology*, 2005, vol. 44, no 1, p. 3-13.
- FAUCHER, Daniel. La largeur des vallées du Lauragais et du Toulousain. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, 1930, vol. 1, no 2, p. 215-221.
- FAUCHEUX, Sylvie et NICOLAÏ, Isabelle. Environnement et société: de l'évaluation du risque à son acceptabilité. 2005.
- FAVRO, K. Introduction. Legicom. *Revue thématique de droit de la communication*, 2016, vol. 56, p. 3-12.
- FENNER, Daniel, MEIER, Fred, BECHTEL, Benjamin, *et al.* Intra and inter 'local climate zone' variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. *10.14279/depositonce-10378*, 2017.
- FERGUSON, Grant et WOODBURY, Allan D. Urban heat island in the subsurface. *Geophysical research letters*, 2007, vol. 34, no 23.
- FOISSARD, Xavier. *L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique: application à l'agglomération rennaise.* 2015. Thèse de doctorat. Rennes 2.

- FOISSARD, X., DUBREUIL, V., et QUÉNOL, Hervé. Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). *Urban Climate*, 2019, vol. 29, p. 100490.
- FOISSARD, Xavier, QUÉNOL, Hervé, et DUBREUIL, Vincent. L'influence de la variabilité des facteurs météorologiques sur l'occurrence et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain à rennes en 2010. In : *Actes de colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. 2011. p. 261-266.
- FOUURIAT, Michel. La co-construction. *Le management des chefs de service dans le secteur social et médico-social: Repères, enjeux, perspectives*, 2014.
- GHEORGHE, A. C. et CHIRAN, M. S. Raspberry Pi Based Weather Station. *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, 2018, vol. 18, no 2, p. 63-66.
- GILBERT, Léna. Les outils de la concertation: un nouvel impératif?. 2018.
- GOBER, Patricia, BRAZEL, Anthony, QUAY, Ray, *et al.* Using watered landscapes to manipulate urban heat island effects: how much water will it take to cool Phoenix?. *Journal of the American Planning Association*, 2009, vol. 76, no 1, p. 109-121.
- GOLROUDBARY, Vahid Rahimpour, ZENG, Yijian, MANNAERTS, Chris M., *et al.* Urban impacts on air temperature and precipitation over The Netherlands. *Climate Research*, 2018, vol. 75, no 2, p. 95-109.
- GOOSEN, H., DE GROOT-REICHWEIN, M. A. M., MASSELINK, L., *et al.* Climate Adaptation Services for the Netherlands: an operational approach to support spatial adaptation planning. *Regional Environmental Change*, 2014, vol. 14, no 3, p. 1035-1048.
- GRIMMOND, C. S. B., BOUCHET, Veronique S., MOLINA, L. T., *et al.* , Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services Volume I: Concept and Methodology, 2019
- GRIMMOND, C. S. B., BOUCHET, Veronique S., MOLINA, L. T., *et al.* Integrated Urban Weather, Environment and Climate Services (IUWECS): WMO Guidance and Best Practice Cities Examples. In : 10th International Conference on Urban Climate/14th Symposium on the Urban Environment. AMS, 2018.
- HARDIN, A. W., LIU, Y., CAO, G., *et al.* Urban heat island intensity and spatial variability by synoptic weather type in the northeast US. *Urban climate*, 2018, vol. 24, p. 747-762.
- HARJANNE, Atte. Servitizing climate science—Institutional analysis of climate services discourse and its implications. *Global environmental change*, 2017, vol. 46, p. 1-16.
- HÉNON, Aurélien, MESTAYER, Patrice G., LAGOUARDE, Jean-Pierre, *et al.* An urban neighborhood temperature and energy study from the CAPITOUL experiment with the SOLENE model. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, vol. 110, no 1-2, p. 177-196.
- HEWITT, Chris, MASON, Simon, et WALLAND, David. The global framework for climate services. *Nature Climate Change*, 2012, vol. 2, no 12, p. 831-832.
- HIDALGO, Julia et JOUGLA, Renaud. On the use of local weather types classification to improve climate understanding: An application on the urban climate of Toulouse. *PloS one*, 2018, vol. 13, no 12, p. e0208138.
- HIDALGO, Julia, DUMAS, Guillaume, MASSON, Valéry, *et al.* Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations. *Urban Climate*, 2019, vol. 27, p. 64-89.
- HOWARD, Luke. *The Climate of London: deduced from Meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis*. W. Phillips, George Yard, Lombard Street, sold also by J. and A. Arch, Cornhill; Baldwin, Cradock, and Joy, and W. Bent, Paternoster Row; and J. Hatchard, Picadilly, 1818.
- HUBBARD, Kenneth G. et LIN, X. Realtime data filtering models for air temperature measurements. *Geophysical research letters*, 2002, vol. 29, no 10, p. 67-1-67-4.
- HUBSCHMAN, Jacques. Les terrasses récentes de la Garonne et leur évolution. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, 1975, vol. 12, no 3-4, p. 137-147.
- JACOB, Robert L., CATLETT, Charlie, BECKMAN, Peter H., *et al.* Early results from the Array of Things. *AGUFM*, 2017, vol. 2017, p. H41J-1599.
- JOLLIFFE, Ian T. et PHILIPP, Andreas. Some recent developments in cluster analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2010, vol. 35, no 9-12, p. 309-315.

- JOUGLA, Renaud, HIDALGO, Julia, et POUPONNEAU, Béatrice. Identification des situations météorologiques locales pour une cinquantaine de villes françaises. *La Météorologie*, 2019.
- JOURDAIN, Sylvie, ROUCAUTE, Émeline, DANDIN, Philippe, et al. Le sauvetage de données climatologiques anciennes à Météo-France: De la conservation des documents à la mise à disposition des données. *La Météorologie*, 2015
- KAJEWSKA-SZKUDLAREK, Joanna et STAŃCZYK, Justyna. Filling missing meteorological data with Computational Intelligence methods. In : *ITM Web of Conferences*. EDP Sciences, 2018. p. 00015.
- KARLICKÝ, Jan, HUSZÁR, Peter, HALENKA, Tomáš, et al. Multi-model comparison of urban heat island modelling approaches. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, vol. 18, no 14, p. 10655-10674.
- KŁYSIK, Kazimierz et FORTUNIAK, Krzysztof. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland. *Atmospheric environment*, 1999, vol. 33, no 24-25, p. 3885-3895.
- KOTOVA Lola, TERRADO Marta, KRZIC Aleksandra, DJURDJEVIC Vladimir, GARRETT Nathalie, STRATCHAN Jane, BESSEMBINDER Janette, Lessons and practice of co-developing Climate services with users, EUROPEAN CLIMATE OBSERVATIONS , MONITORING AND SERVICES INITIATIVE, 2017
- KUHN, Thomas S. The structure of scientific revolutions: University of Chicago press. *Original edition*, 1962.
- LACOMBE, M., BOUSRI, D., LEROY, M., et al. WMO field intercomparison of thermometer screens/shields and humidity measuring instruments. World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods, Report, 2011, no 106
- LANDSBERG, H. E. Meteorological observations in urban areas. In : *Meteorological Observations and Instrumentation*. American Meteorological Society, Boston, MA, 1970. p. 91-99.
- LE BRAS, David, SEIGNEURET, Natacha, et TALANDIER, Magali. *Métropoles en chantiers*. 2016.
- LE ROY, B., Lemonsu, A., Kounkou-Arnaud, R., Brion, D., & Masson, V. (2019). Long time series spatialized data for urban climatological studies: A case study of Paris, France. *International Journal of Climatology*.
- LECONTE, Francois, BOUYER, Julien, CLAVERIE, Rémy, et al. Using Local Climate Zone scheme for ICU assessment: Evaluation of the method using mobile measurements. *Building and Environment*, 2015, vol. 83, p. 39-49.
- LEE, Sang-Hwa, LEE, Kyoo-Seock, JIN, Wen-Cheng, et al. Effect of an urban park on air temperature differences in a central business district area. *Landscape and Ecological Engineering*, 2009, vol. 5, no 2, p. 183-191.
- LÉVESQUE, Benoît. Le partenariat: une tendance lourde de la nouvelle gouvernance à l'ère de la mondialisation. *Enjeux et défis pour les entreprises publiques et d'économie sociale*. 2001.
- LI, Yishan et MANOHARAN, Sathiamoorthy. A performance comparison of SQL and NoSQL databases. In : 2013 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM). IEEE, 2013. p.15-19
- LIU, M. Recherche-action et dynamique de développement. *Recherches-système en*, 1995.p. 295.
- LIU, Jun, ZHANG, Binbin, et LV, Baolei. An intelligent framework of Automatic Weather Station
- LOURENÇO, Tiago Capela, SWART, Rob, GOOSEN, Hasse, et al. The rise of demand-driven climate services. *Nature Climate Change*, 2016, vol. 6, no 1, p. 13-14.
- LÚCIO, Filipe Domingos Freires et GRASSO, V. The global framework for climate services (GFCS). *Climate Services*, 2016, p. 2-3.
- LUGEN, Marine. Framing Climate Services: Logics, Actors, and Implications for Policies and Projects. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no 10, p. 1047.
- LUO, Zhiwen et ASPROUDI, Christina. Subsurface urban heat island and its effects on horizontal ground-source heat pump potential under climate change. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 90, p. 530-537.
- MADEC, T., F. Baraer, J.Y. Le Vourc'h, C. Conseil, V. Pourret, 2009 : Recherche méthodologique et réalisation d'une climatologie de paramètres atmosphériques à maille fine. Partie III : Définition et échantillonnage de dates étalon. *Théâtres A, B, C. Rapports d'étude*.
- MAHON, Roché, GREENE, Christina, COX, Shelly-Ann, et al. Fit for purpose? Transforming National Meteorological and Hydrological Services into National Climate Service Centers. *Climate Services*, 2019, vol. 13, p. 14-23.

- MASSON, Valéry, HIDALGO, Julia, AMOSSÉ, Alexandre, *et al.* Urban Climate, Human behavior & Energy consumption: from LCZ mapping to simulation and urban planning (the MapUCE project). In : *9th International Conference on Urban Climate*. 2015.
- MASSON, Valéry, BONHOMME, Marion, SALAGNAC, Jean-Luc, *et al.* Solar panels reduce both global warming and urban heat island. *Frontiers in Environmental Science*, 2014, vol. 2, p. 14.
- MASSON, Valéry, LEMONSU, Aude, HIDALGO, Julia, *et al.* Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 2020, vol. 45, p. 411-444.
- MCGREGOR, G. R., BELCHER, S., HACKER, J., *et al.* London's urban heat island. *A report to the Greater London Authority, Centre for Environmental Assessment, Management and Policy, King's College London*, 2006, p. 12-22. cité par OKE, Timothy R., MILLS, Gerald, CHRISTEN, Andreas, *et al.* *Urban climates*. Cambridge University Press, 2017, p219 graphique 7.17.
- MCNIE, Elizabeth C. Delivering climate services: organizational strategies and approaches for producing useful climate-science information. *Weather, Climate, and Society*, 2012, vol. 5, no 1, p. 14-26.
- MEYNIER, André. Jean Mounier. Les climats océaniques des régions atlantiques de l'Espagne et du Portugal. *Norois*, 1980, vol. 105, no 1, p. 139-141.
- MICHAUX, Valery, DEFELIX, Christian, et RAULET-CROSET, Nathalie. Boosting territorial multi-stakeholder cooperation, coordination and collaboration: strategic and managerial issues. *Management Avenir*, 2011, no 10, p. 122-136.
- MILLNER, A., 2012. Climate prediction for adaptation: who needs what? *Clim. Change* 110 (1), 143–167.
- MINERVA, Roberto, BIRU, Abyi, et ROTONDI, Domenico. Towards a definition of the Internet of Things (IoT). *IEEE Internet Initiative*, 2015, vol. 1, no 1, p. 1-86
- MIRZAEI, Parham A. et HAGHIGHAT, Fariborz. Approaches to study urban heat island—abilities and limitations. *Building and environment*, 2010, vol. 45, no 10, p. 2192-2201.
- MOHSIN, Tanzina et GOUGH, William A. Characterization and estimation of urban heat island at Toronto: impact of the choice of rural sites. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, vol. 108, no 1-2, p. 105-117.
- MONNOYER-SMITH, Laurence et CHARREYRON-PERCHET, Anne. Les grandes métropoles face au changement climatique. In : *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*. FFE, 2016. p. 27-29.
- MORIN, Elodie. Interopérabilité de protocole de communication adaptatifs basse-consommation pour des réseaux de capteurs. 2018. Thèse de doctorat. // Morin Elodie, Interoperability of communication protocole for low consumption sensors networks. *IoT Standards landscape and future evolutions (European Telecommunications Standards Institute 2016, technical report)*
- MORRIS, C. J. G., SIMMONDS, Ian, et PLUMMER, Neil. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, vol. 40, no 2, p. 169-182.
- MORRISON, William, KOTTHAUS, Simone, GRIMMOND, C. S. B., *et al.* A novel method to obtain three-dimensional urban surface temperature from ground-based thermography. *Remote sensing of environment*, 2018, vol. 215, p. 268-283.
- MÜLLER, Nicole, KUTTLER, Wilhelm, et BARLAG, Andreas-Bent. Analysis of the subsurface urban heat island in Oberhausen, Germany. *Climate research*, 2014, vol. 58, no 3, p. 247-256.
- MÜLLER, Catherine L., CHAPMAN, Lee, GRIMMOND, C. S. B., *et al.* Sensors and the city: a review of urban meteorological networks. *International Journal of Climatology*, 2013, vol. 33, no 7, p. 1585-1600.
- MÜLLER, Catherine L., CHAPMAN, Lee, GRIMMOND, C. S. B., *et al.* Toward a standardized metadata protocol for urban meteorological networks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, vol. 94, no 8, p. 1161-1185.
- MURTY, Rohan Narayana, MAINLAND, Geoffrey, ROSE, Ian, *et al.* Citysense: An urban-scale wireless sensor network and testbed. In : *2008 IEEE conference on technologies for homeland security*. IEEE, 2008. p. 583-588
- NAPOLY, Adrien, GRASSMANN, Tom, MEIER, Fred, *et al.* Development and application of a statistically-based quality control for crowdsourced air temperature data. *Frontiers in Earth Science*, 2018, vol. 6, p. 118.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL, *et al.* A climate services vision: First steps toward the future. *National Academies Press*, 2001.

- NOCKE, Thomas, STERZEL, Till, BÖTTINGER, Michael, *et al.* Visualization of climate and climate change data: An overview. *Digital earth summit on geoinformatics*, 2008, p. 226-232.
- OKE, Peter R., OKE, T. R., OKE, T. R., *et al.* Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. 2006
- OKE, T. R. An algorithmic scheme to estimate hourly heat island magnitude. In : *Preprints of the Second Urban Environment Symposium, November 1998, Albuquerque, NM, USA*. 1998. p. 80-83.
- OKE, Tim R. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment (1967)*, 1973, vol. 7, no 8, p. 769-779.
- OKE, Timothy R., MILLS, Gerald, *et* VOOGT, J. A. *Urban climates*. Cambridge University Press, 2017.
- OKE, T. R. Urban observations. Guide to meteorological instruments and methods of observation, Part II of Observing Systems, WMO-No. 8. *World Meteorological Organization, II-11-1–II-11-25*, 2008.
- OKE TR. 2006. Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology* 84: 179–190.
- OLMEDO, Élise. *Cartographie sensible: tracer une géographie du vécu par la recherche-crédation*. 2015. Thèse de doctorat. Université Panthéon-Sorbonne-Paris I.
- ÖZDIRLIK, Burcu, Terrin, Jean-Jacques. *La conception en question: la place des usagers dans les processus de projet*. Ed. de l'Aube, 2015.
- PANERAI, Philippe, DEMORGON, Marcelle, *et* DEPAULE, Jean-Charles. *Analyse urbaine*. Marseille : Parenthèses, 1999.
- PANET-RAYMOND, Jean *et* BOURQUE, Denis. *Partenariat ou pater-nariat?: la collaboration entre établissements publics et organismes communautaires oeuvrant auprès des personnes âgées à domicile*. Université de Montréal, Groupe de recherche en développement communautaire, 1991.
- PATEL, Keyur K., PATEL, Sunil M., *et al.* Internet of things-IOT: definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application & future challenges. *International journal of engineering science and computing*, 2016, vol. 6, no 5.
- PHILIPP, Andreas, BARTHOLY, Judit, BECK, Christoph, *et al.* Cost733cat–A database of weather and circulation type classifications. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2010, vol. 35, no 9-12, p. 360-373.
- PHILIPS Céline, *Surchauffe urbaine : recueil de méthodes de diagnostic et d'expériences territoriales*, collection « ils l'ont fait », ADEME, 2017
- PIGEON, Grégoire. *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine-projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOUL*. 2007. Thèse de doctorat.
- PLANTON Serge, Robert Vautard *et* Amélie Rajaud, Note THEMA Développer les services climatiques, Commissariat général au développement durable, 2018
- QUENAULT, Béatrice. La résurgence/convergence du triptyque «catastrophe-résilience-adaptation» pour (re) penser la «fabrique urbaine» face aux risques climatiques. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, 2014, vol. 5, no 3.
- REN, Chao, NG, Edward Yan-yung, *et* KATZSCHNER, Lutz. Urban climatic map studies: a review. *International journal of climatology*, 2011, vol. 31, no 15, p. 2213-2233
- RICHARD, Yves, EMERY, Justin, DUDEK, Julita, *et al.* How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban climate*, 2018, vol. 26, p. 258-274.
- RICHARD, Yves, POHL, Benjamin, REGA, Mario, *et al.* Is Urban Heat Island intensity higher during hot spells and heat waves (Dijon, France, 2014–2019)?. *Urban Climate*, 2021, vol. 35, p. 100747.
- RICHARD, Yves, DUDEK, J., EMERY, Justin, *et al.* Les Local Climate Zones face à la canicule de 2018 à Dijon. *Le Changement Climatique, la variabilité et les risques climatiques*, 2019, p. 253.
- ROBINSON, P., The London Meteorological Monitoring Network. 2010, M.S. thesis, Department of Geography, King's College London, 356 pp.
- RODRÍGUEZ, Laura Romero, RAMOS, José Sánchez, FÉLIX, José Luis Molina, *et al.* Urban-scale air temperature estimation: development of an empirical model based on mobile transects. *Sustainable Cities and Society*, 2020, vol. 63, p. 102471.

- SAVIĆ, Trifun et RADONJIĆ, Milutin. One approach to weather station design based on Raspberry Pi platform. In : *2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*. IEEE, 2015. p. 623-626.
- SEDLMAIR, Michael, MEYER, Miriah, et MUNZNER, Tamara. Design study methodology: Reflections from the trenches and the stacks. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 2012, vol. 18, no 12, p. 2431-2440.
- SENEAL Gilles, « Environnement urbain : cartographie d'un concept », *Environnement Urbain / Urban Environment* [En ligne], Volume 1 | 2007, mis en ligne le 24 novembre 2015, consulté le 28 novembre 2019. URL : <http://journals.openedition.org/eue/824>
- SHTILYANOVA, Anastasiya, BELLOCCHI, Gianni, BORRAS, David, *et al.* Kriging-based approach to predict missing air temperature data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, vol. 142, p. 440-449.
- SKARBIT, Nóra, STEWART, Iain D., UNGER, János, *et al.* Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the 'local climate zones' of Szeged, Hungary. *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, p. 582-596.
- SOREIDE, Nancy N., SUN, Charles L., KILONSKY, Bernard J., *et al.* A climate data portal. In : *MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 01CH37295)*. IEEE, 2001. p. 2315-2317
- STEWART, Iain D. Why should urban heat island researchers study history?. *Urban Climate*, 2019, vol. 30, p. 100484.
- STEWART, Iain Douglas. *Redefining the urban heat island*. 2011. Thèse de doctorat. University of British Columbia.
- STEWART, Iain D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 2011, vol. 31, no 2, p. 200-217.
- STEWART, Ian D. et OKE, Tim R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, vol. 93, no 12, p. 1879-1900.
- STEWART Iain Douglas, Developing a Field Guide to Identify Local Climate Zones in Cities, 10th International Conference on Urban Climate/14th Symposium on the Urban Environment, AMS, 2018
- STEWART, Iain et OKE, T. R. Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer. In : *Eighth Symposium on Urban Environment, Phoenix, AZ*. 2009.
- STREET, Roger B. Towards a leading role on climate services in Europe: a research and innovation roadmap. *Climate Services*, 2016, vol. 1, p. 2-5.
- STREET, R.B.; Buontempo, C.; Mysiak, J.; Karali, E.; Pulquério, M.; Murray, V.; Swart, R. How could climate services support disaster risk reduction in the 21st century. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2019, 34, 28–33.
- TAYLOR, Andrea L., DESSAI, Suraje, et DE BRUIN, Wändi Bruine. Communicating uncertainty in seasonal and interannual climate forecasts in Europe. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, vol. 373, no 2055, p. 20140454
- TENZIN, Sonam, SIYANG, Satetha, POBKURUT, Theerapat, *et al.* Low cost weather station for climate-smart agriculture. In : *2017 9th international conference on knowledge and smart technology (KST)*. IEEE, 2017. p. 172-177.
- TOMLINSON, C. J., Chapman, L., Thornes, J. E., & Baker, C. (2011). Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: a review. *Meteorological Applications*, 18(3), 296-306.
- TOUATI, Najla, GARDES, Thomas, et HIDALGO, Julia. A GIS plugin to model the near surface air temperature from urban meteorological networks. *Urban Climate*, 2020, vol. 34, p. 100692.
- TREMEAC, Brice, BOUSQUET, Pierre, DE MUNCK, Cecile, *et al.* Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. *Applied Energy*, 2012, vol. 95, p. 102-110.
- TVEITO, Ole Einar, HUTH, Radan, PHILIPP, Andreas, *et al.* COST Action 733: harmonization and application of weather type classifications for European Regions; final scientific report. 2016.
- UITTENBROEK, Caroline J., JANSSEN-JANSEN, Leonie B., et RUNHAAR, Hens AC. Mainstreaming climate adaptation into urban planning: overcoming barriers, seizing opportunities and evaluating the results in two Dutch case studies. *Regional environmental change*, 2013, vol. 13, no 2, p. 399-411.

- VIGNEAU, Jean-Pierre. Un siècle de «type de temps». Epistémologie d'un concept ambigu. *Norois. Environnement, aménagement, société*, 2004, no 191, p. 11-13.
- VINCENT, Katharine, DALY, Meaghan, SCANNELL, Claire, *et al.* What can climate services learn from theory and practice of co-production?. *Climate Services*, 2018, vol. 12, p. 48-58.
- VAUGHAN, Catherine et DESSAI, Suraje. Climate services for society: origins, institutional arrangements, and design elements for an evaluation framework. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2014, vol. 5, no 5, p. 587-603.
- VAUGHAN, Catherine, DESSAI, Suraje, et ZEBIAK, Stephen. Toward effective climate services: lessons for design and evaluation. In : EGU General Assembly Conference Abstracts. 2014.
- WANNER, Heinz et FILLIGER, Paul. Orographic influence on urban climate. *Weather and Climate*, 1989, p. 22-28.
- WARREN, Elliott L., YOUNG, Duick T., CHAPMAN, Lee, *et al.* The Birmingham Urban Climate Laboratory—A high density, urban meteorological dataset, from 2012–2014. *Scientific data*, 2016, vol. 3, no 1, p. 1-8.
- WEBBER, Sophie et DONNER, Simon D. Climate service warnings: cautions about commercializing climate science for adaptation in the developing world. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2017, vol. 8, no 1, p. e424.
- WEBBER, Sophie. Putting climate services in contexts: advancing multi-disciplinary understandings: introduction to the special issue. 2019.
- XU, Cheng-Dong, WANG, Jin-Feng, HU, Mao-Gui, *et al.* Interpolation of missing temperature data at meteorological stations using P-BSHADE. *Journal of Climate*, 2013, vol. 26, no 19, p. 7452-7463.
- YAN, Chunhua, GUO, Qiuping, LI, Hongyong, *et al.* Quantifying the cooling effect of urban vegetation by mobile traverse method: A local-scale urban heat island study in a subtropical megacity. *Building and Environment*, 2020, vol. 169, p. 106541.
- YAN, Hai, WU, Fan, *et* DONG, Li. Influence of a large urban park on the local urban thermal environment. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 622, p. 882-891.
- YANG, Jiachuan, WANG, Zhi-Hua, *et* KALOUSH, Kamil E. Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a 'silver bullet' for mitigating urban heat island?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 47, p. 830-843.
- YOW, Donald M. Urban heat islands: observations, impacts, and adaptation. *Geography Compass*, 2007, vol. 1, no 6, p. 1227-1251.
- ZHANG, Yunwei, ZHANG, Jili, ZHANG, Xiaoqian, *et al.* Analyzing the Characteristics of UHI (Urban Heat Island) in Summer Daytime Based on Observations on 50 Sites in 11 LCZ (Local Climate Zone) Types in Xi'an, China. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no 1, p. 83.
- ZHANG, Fang, CAI, Xiaoming, *et* THORNES, John E. Birmingham's air and surface urban heat islands associated with Lamb weather types and cloudless anticyclonic conditions. *Progress in physical geography*, 2014, vol. 38, no 4, p. 431-447.
- ZHAN, Wenfeng, JU, Weimin, HAI, Shuoping, *et al.* Satellite-derived subsurface urban heat island. *Environmental science & technology*, 2014, vol. 48, no 20, p. 12134-12140.
- ZHENG, Yingsheng, REN, Chao, XU, Yong, *et al.* GIS-based mapping of Local Climate Zone in the high-density city of Hong Kong. *Urban Climate*, 2018, vol. 24, p. 419-448.
- Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., ... & Sobrino, J. A. (2019). Satellite remote sensing of surface urban heat islands: progress, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, 11(1), 48.
- ZULIANI, Jean-Marc. Effets de proximité et développement métropolitain des services de haut niveau: le cas de Toulouse. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, 1998, vol. 2, no 1, p. 33-45.

Lois, chartes, documents de l'OMM et divers

- Charte de la participation du public, pour améliorer l'efficacité de la citoyenneté des décisions ayant un impact sur le cadre de vie, Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2016.
- Décret n° 2011-194 du 21 février 2011 portant création d'une mission « Etalab » chargée de la création d'un portail unique interministériel des données publiques, *JO*, 22 février 2011 ; Circulaire du 26 mai 2011, relative à la création du portail unique des informations publiques de l'état « data.gouv.fr » par la mission « Etalab » et l'application des dispositions régissant le droit de réutilisation des informations publiques.
- European Telecommunications Standards Institute works (BESEN, Stanley M. The European telecommunications standards institute: A preliminary analysis. Telecommunications policy, 1990, vol. 14, no 6, p. 521-530.)
- Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services, 2018 WMO Guideline series
- Implementation Plan of the Global Framework for Climate Services, WMO, 2014
- Lassègues Pierre (DClim/DEC), Evelyne Pesin (CNRM/RETIC), Bruno Joly (CNRM/GMAP), Dominique Giard (CNRM/RETIC), Thumette Madec (DIRO/BEC), Cécile Gautier (DIRSO/BEC). Guide méthodologique pour les classifications par types de temps (action RETIC B95+), Météo-France Toulouse, 2011.
- Loi n°= 85-729 du 18 juillet 1985 relative à la définition et à la mise en œuvre de principes d'aménagement.
- loi n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République (NOTRe)
- loi n° 2015-1779 du 28 décembre 2015 relative à la gratuité et aux modalités de réutilisation des informations du secteur public
- NO, EXPERT GUIDE. The Davis Instruments Vantage Pro2 wireless AWS—an independent evaluation against UK-standard meteorological instruments. 2009
- Ordonnance n°=2106-1060 du 03 août 2016 portant réforme des procédures destinées à assurer l'information et la participation du public à l'élaboration de certaines décisions susceptibles d'avoir une incidence sur l'environnement
- SMM-CD Working Group, 2019:The guidance booklet on the WMO-Wide Stewardship Maturity Matrix for Climate Data. Document ID:WMO-SMM-CD-0002.Version: v03r00 20190131
- World Meteorological Organization, Guide to Instruments and Methods of Observation Volume III – Observing Systems, 2018, p.371-398
- World Meteorological Organization, Guide to Instruments and Methods of Observation Volume III – Observing Systems, 2018, p.81-112
- WMO Guidelines on the Role, Operation and Management of National Meteorological and Hydrological Services, 2017

Liste des figures et tableaux

Figures.....	208
Tableaux.....	211

Figures

- Figure 1, Résumé des différents types d'ICU (source Oke & al., 2017). Les différentes caractéristiques des ICU sont synthétisées (A). Les différences de températures conceptualisées pour les quatre types d'ICU (B).
- Figure 2, Formation de l'ICU selon le cycle diurne et la dichotomie schématique urbain/rural (crédits : CNRS).
- Figure 3, La spatialité de l'îlot de chaleur selon de multiples situations géographiques de jour et de nuit (image tirée de Masson & al., 2020).
- Figure 4.A et 4.B. , Spatialité et amplitude schématiques de l'ICU en conditions météorologiques favorables calmes : ciel dégagé et vents faibles (images tirées de Oke & al., 2017). La carte isotherme (A) montre le gradient de température selon le degré d'urbanisation. La coupe (B) montre la température de surface et de l'air d'une ligne qui va du point 1-2.
- Figure 5, schématisation des composantes de services climatiques urbains type (Grimmond & al., 2019).
- Figure 6, Processus de co-construction et disciplines associées aux deux composantes observation/monitoring, database and sharing.
- Figure 7 , les 5 différentes formes et spatialisations de réseaux d'observations, inspiré par Robinson, 2010.
- Figure 8, propositions et variations graphiques autour des cartographies de l'ICU. Ces cartes sont disponibles sur un site internet dédié
- Figure 9, quelques impressions d'écrans de la plate-forme IA data dans sa version actuelle, encore en construction. Elle doit être agrémentée des études produites à l'issue de cette thèse.
- Figure 10, portail web co-construit par la branche informatique de la Caisse des Dépôts, la Métropole et le Centre National de Recherches Météorologiques.
- Figure 11, la destruction de l'ancien parc des exposition (à gauche) et les effets de rafraîchissement du futur parc (à droite) sont étudiés dans le cadre du projet LIFE. Images tirées du site internet de Toulouse Métropole dédiée au projet.
- Figure 12, charte d'organisation des services climatiques urbains au sein de la Métropole. Le schéma montre les niveaux hiérarchiques sur la priorisation des besoins, non du décisionnel, les compétences au sein de la métropole, les besoins exprimés et le rôle joué pour les services climatiques.

- Figure 13, les 17 zones climatiques classiques (Stewart et Oke) et les 11 que l'on utilise à Toulouse.
- Figure 14, canevas explicatif d'une fiche LCZ.
- Figure 15, cartographie LCZ de Toulouse Métropole.
- Figure 16, relief de Toulouse Métropole à 1m de précision.
- Figure 17, deux exemples de LCZ 8 présentes sur l'agglomération de Toulouse, montrant la variabilité intra-LCZ des surfaces perméables et de la végétation.
- Figure 18, trame Verte et Bleue de Toulouse Métropole.
- Figure 19, âge du bâti dans le centre de Toulouse par année de construction.
- Figure 20, parcours EST et Parcours OUEST réunis (fond OSM et BING aerials) .
- Figure 21, la Renault Clio II instrumentée. La sonde de température est sur le toit, sur sa portière arrière gauche est visible le capteur de température de surface.
- Figure 22, parcours EST et Parcours OUEST réunis (fond OSM et BING aerials). Et le véhicule instrumenté.
- Figure 23, filtre appliqué sur la vitesse et zoom sur centre-ville de Toulouse.
- Figure 24, mesures pour l'ouest et l'est, AM et soir, jours avec les plus grandes intensités d'ICU sélectionnées.
- Figure 25, thèmes du réseau et LCZ de chaque point de mesure.
- Figure 26, transects et LCZ de chaque point de mesure.
- Figure 27, solution technique complète, hardware et software.
- Figure 28, stations en place au mois d'aout 2020. En rouge celles qui ne sont pas connectées à des Raspberry à l'heure actuelle .
- Figure 29, structure des messages des données envoyées au serveur de la ville. (tiré du mémoire de stage de M2 de Gérald Louit encadré dans lors de cette thèse)
- Figure 30, algorithme général : le traitement de l'information brute pour produire des analyses de l'ICU
- Figure 31, position des stations servant à l'étude de l'ICU classique de Toulouse Métropole
- Figure 32, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h en °C entre l'urbain et le rural sous conditions météorologiques optimales à la formation de l'ICU (53jours, 48 jours et 56 jours pour les 3 années étudiées). Temps non-normalisé par rapport au soleil.
- Figure 33, histogramme des types de temps sur le jeu de données (01/06/2019 au 16/12/2020) au global et par saisons. De gauche à droite : global, été, automne, hiver et printemps.
- Figure 34, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h en °C entre l'urbain et le rural sous conditions météorologiques optimales à la formation de l'ICU par saison.

- Figure 35, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h en °C entre l'urbain et le rural par saison sous conditions météorologiques variées.
- Figure 36, évolution journalière moyenne de l'ICU pour 3 situations météorologiques d'hiver.
- Figure 37, répartition des 20 stations émettrices triées par LCZ disposant de plus 75 % de données par saisons sur la période hiver 2019 à automne 2020.
- Figure 38, répartition spatiale des stations émettrices triées par LCZ disposant de plus 75 % de données par saisons sur la période hiver 2019 à automne 2020.
- Figure 39, évolution de l'écart de température annuel moyen sur 24 h en °C entre les LCZ et le rural sous conditions météorologiques optimales à la formation de l'ICU.
- Figure 40, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h en °C entre les LCZ et le rural sous conditions météorologiques optimales à la formation de l'ICU par saison.
- Figure 41, emplacement des LCZ8 et zone tampon de 250m sur fond satellite.
- Figure 42, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h en °C entre les zones d'activités et le rural sous conditions météorologiques d'été (type de temps chaud/SE et très chaud/vent faible (7-9) et type de temps chaud/NO (8)).
- Figure 43, évolution des écarts de températures moyennes sur 24h (en °C) entre l'urbain et les LCZ 8 d'activités en été selon les types de temps très chaud/ vent faible et chaud /SE (7-9).
- Figure 44, écart moyen sur 24 h de température (en °C) entre LCZ8 d'activités et le rural pour les jours de vent de NO (à gauche) et de vent de SE (à droite).

Liste des tableaux

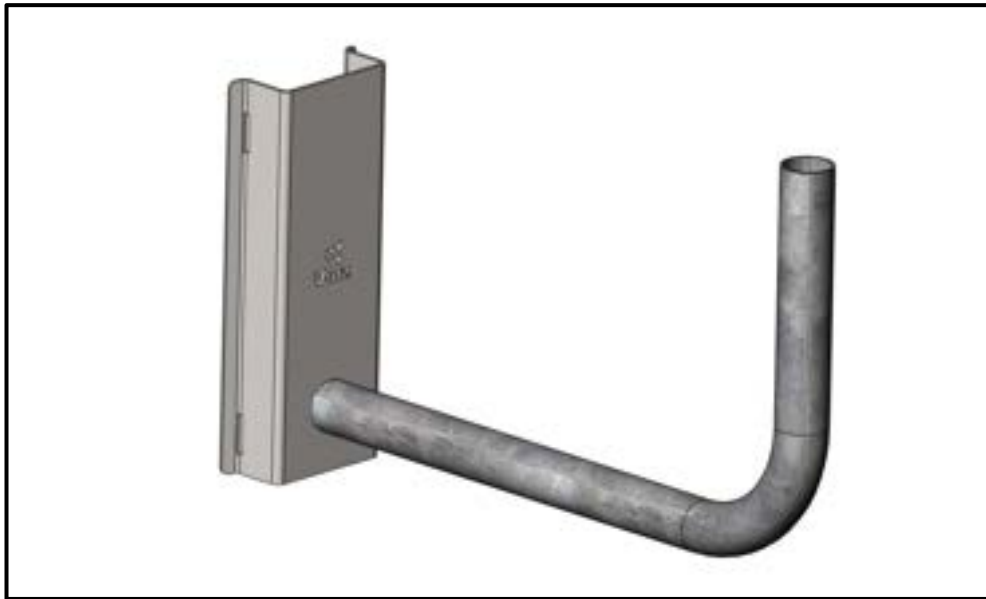
- Tableau 1, proposition bibliographique pour l'aide au choix des sites de mesure d'un réseau d'observation à base de stations météorologiques et monitoring de l'îlot de chaleur. Les sources sont classées selon leurs typologies et leurs buts.
- Tableau 2, proposition bibliographique pour l'aide au choix des capteurs d'un réseau d'observation à base de stations météorologiques. Les sources sont classées selon les types de capteurs et l'origines de leurs évaluations/comparaisons.
- Tableau 3, proposition bibliographique pour l'aide au choix des technologies de communication d'un réseau d'observation à base de stations météorologiques. Les sources sont classées selon leurs sujets et leurs buts.
- Tableau 4, proposition bibliographique pour l'aide à l'organisation des données produites à partir d'un réseau d'observation à base de stations météorologiques. Les sources sont classées selon leurs types et objectifs.
- Tableau 5, proposition bibliographique pour l'aide à la livraison et la mise en forme de la donnée produite par un réseau d'observation à base de stations météorologiques.
- Tableau 6, proposition bibliographique pour porter un regard sur la transversalité des services climatiques. Les sources sont classées selon leurs types et leurs buts.
- Tableau 7, acteurs, secteurs des services climatiques de Toulouse. Ils sont organisés selon le niveau de participation et les composantes où ils interviennent.
- Tableau 8, minimums, maximums, îlots de chaleurs pour les différents parcours ouest effectués après le coucher du soleil, exprimés en °C.
- Tableau 9, nombre de stations optimales d'un réseau au regard de l'étude envisagée.
- Tableau 10, qualité et quantité des données reçues depuis juin 2019 et par saisons exprimé en nombre de stations.
- Tableau 11, neuf critères d'évaluation d'une étude d'ICU selon I.D. Stewart (2011) et leur mise en application dans la thèse.
- Tableau 12, écarts de températures moyens entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien) et rurales (Bouconne et Mondouzil) selon différentes périodes du jour pour des conditions météorologiques dégagées, sans pluie et avec un vent faible ou nul.
- Tableau 13, types de temps de Toulouse Métropole. Son contenu provient d'un document de travail interne au projet MApUCE (Hidalgo, 2016).

- Tableau 14, les types de temps et leurs valeurs moyennes observées à Toulouse. Delta de température en °C, force et direction moyenne du vent, exprimées en m/s et en quadrans (0-90 ° => 1, 90-180 ° => 2, 180-270=> 3, 270-360=>4), pluie moyenne par heure et humidité spécifique en g/kg (tirée de Hidalgo & al., 2018).
- Tableau 15, résultats du test Wilcoxon par Type de temps. Lorsque la valeur est inférieure à 0,05, alors on considère avec 95 % de certitude que les deux types de temps comparés sont différents.
- Tableau 16, écarts de températures moyens entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien) et rurales (Bouconne et Mondouzil) selon différentes périodes du jour pour chaque saison sous conditions météorologiques idéales.
- Tableau 17, écarts de températures moyens entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien) et rurales (Bouconne et Mondouzil) selon différentes périodes du jour pour chaque groupe de types de temps pour chaque saison.
- Tableau 18, évolution de l'écart de température moyen sur 24 h en °C entre l'urbain et le rural sous conditions météorologiques optimales à la formation de l'ICU avec nébulosité élevée (>6) en hiver.
- Tableau 19, écarts moyens de températures (en °C) entre LCZ Pavillon individuel (LCZ 6), Hauteur et densité moyenne (LCZ 5) et Zones d'activités (LCZ 8) avec le rural au coucher et au coucher plus deux heures, en automne.
- Tableau 20, écarts de températures moyens entre les stations urbaines (Valade, Carmes, St Cyprien), rurales (Bouconne et Mondouzil) et LCZ selon différentes périodes du jour selon conditions météorologiques optimales à la formation de l'ICU sur quatre saisons consécutives.
- Tableau 21, écarts de température moyens selon moments de la journée en °C entre les LCZ et le rural sous conditions météorologiques diverses par saison.
- Tableau 22, écarts de températures moyens entre les zones d'activités (LCZ 8) et le rural (Mondouzil et Bouconne) selon différentes périodes du jour selon les types de temps en été 2020.
- Tableau 23, écarts de températures moyens entre les stations d'activités (LCZ 8) et rurales (Mondouzil et Bouconne) selon différentes périodes du jour selon types de temps en été 2020 et vent supérieur à 3m/s.

Annexes

I. Bras de départ.....	214
II. Métadonnées.....	216

Annexe I. Bras de déport



Ci-dessus : Schéma 3D du bras de déport, conçu avec la société Volx

Ci-dessous : exemples de stations placées, avec les deux feuillards de visibles et le déport réalisé par rapport au mât



Annexe II. Métadonnées des stations (Mars 2021)

(telles que livrées sur la plate-forme Open data de Toulouse Métropole*)

longitude	latitude	altitude	id_nom	id_numero	emission	installation	type_stat	ic2	ville	biti	vng_haute	geoport
1.449093882	43.5949312	144.58	36-station-meteo-toulouse-parc-jardin-des-plantes-grand-roi	36-N	2019-02-07	TH		11	Toulouse	66522.5471	49492.6382	43.5949312;1.449093882
1.478675314	43.60763006	142.81	11-station-meteo-toulouse-soupetard	11-V	2017-06-26	ISS		6	Toulouse	40409.1838	1289.4065	43.60763006;1.478675314
1.425715643	43.56198034	143.58	14-station-meteo-toulouse-centre-pierre-poter	14-V	2017-06-26	ISS		5	Toulouse	21274.005	6957.2383	43.56198034;1.425715643
1.430521315	43.62939389	136.8	09-station-meteo-toulouse-la-salade	9-V	2017-06-26	ISS		5	Toulouse	53713.7334	1756.4243	43.62939389;1.430521315
1.378182343	43.58950885	154.89	51-station-meteo-toulouse-lardenne	51-V	2019-02-07	ISS		6	Toulouse	40519.8967	17772.4366	43.58950885;1.378182343
1.397801209	43.60768823	150.58	36-station-meteo-toulouse-purpan	36-V	2019-02-07	ISS		8	Toulouse	44154.8983	156.2942	43.60768823;1.397801209
1.40676837	43.61121544	131.41	41-station-meteo-toulouse-avenue-de-casselardit	41-V	2019-02-07	ISS		11	Toulouse	11002.3848	30064.3467	43.61121544;1.40676837
1.403908727	43.55261844	147.9	40-station-meteo-toulouse-zi-fribaud	40-V	2019-04-15	ISS		8	Toulouse	58638.7097	6071.4005	43.55261844;1.403908727
1.452060306	43.58843456	143.41	03-station-meteo-toulouse-busca	3-V	2017-06-26	ISS		3	Toulouse	75096.3447	7593.2534	43.58843456;1.452060306
1.5264801812	43.63373354	206.4	19-station-meteo-mondouzi-mairie	19-V	2017-06-26	ISS		9	Mondouzi	5649.7569	25795.1132	43.63373354;1.5264801812
1.467598713	43.56121264	149.66	37-station-meteo-toulouse-universite-paul-sabatier	37-V	2019-02-07	ISS		5	Toulouse	38600.5351	14305.5848	43.56121264;1.467598713
1.441660877	43.61258438	139.66	46-station-meteo-toulouse-chalets	46-N	2019-04-15	ISS		2	Toulouse	92331.8301	6395.1042	43.61258438;1.441660877
1.441291712	43.58533929	136.21	63-station-meteo-toulouse-LIFE-soufflot	63-V	2020-10-02	TH		2	Toulouse	43126.8364	26098.3	43.58533929;1.441291712
1.398311543	43.56059847	146.9	26-station-meteo-toulouse-reynerie	26-V	2019-04-15	ISS		4	Toulouse	29055.0656	28860.0938	43.56059847;1.398311543
1.450647723	43.59324316	143.75	38-station-meteo-toulouse-parc-jardin-des-plantes	38-V	2019-02-07	ISS		11	Toulouse	41756.4423	74400.8488	43.59324316;1.450647723
1.452130935	43.59544272	145.47	38-station-meteo-toulouse-parc-jardin-des-plantes-gros-har	38-N	2019-02-07	TH		11	Toulouse	40758.5186	77059.9306	43.59544272;1.452130935
1.433410432	43.61133989	136.3	42-station-meteo-toulouse-parc-compans-colarelli	42-N	2019-02-07	TH		11	Toulouse	53098.629	54417.323	43.61133989;1.433410432
1.300503372	43.59567409	185.8	24-station-meteo-colomiers-zi-espaca	24-V	2017-06-26	ISS		8	Colomiers	32315.7782	2782.158	43.59567409;1.300503372
1.454209429	43.60735735	147.49	44-station-meteo-toulouse-jean-poures	44-N	2019-04-15	ISS		2	Toulouse	85099.9576	8862.2964	43.60735735;1.454209429
1.528494834	43.60985175	160.63	31-station-meteo-mons-station-epuration	31-V	2019-04-15	ISS		12	Mons	511.4025	18738.5769	43.60985175;1.528494834
1.399229722	43.58541619	153.9	52-station-meteo-toulouse-cepere	52-N	2019-02-07	ISS		5	Toulouse	26344.5343	12866.7057	43.58541619;1.399229722
1.491330098	43.56336218	143.55	12-station-meteo-toulouse-montaudran	12-V	2017-06-26	ISS		8	Toulouse	26233.4341	20950.0072	43.56336218;1.491330098
1.416393889	43.59744133	139.35	07-station-meteo-toulouse-avenue-de-grande-bretagne	7-V	2017-06-26	ISS		5	Toulouse	45678.5798	5189.4015	43.59744133;1.416393889
1.459479547	43.6094731	164.86	02-station-meteo-toulouse-marengo	2-V	2017-06-26	ISS		3	Toulouse	63360.0531	15948.2852	43.6094731;1.459479547
1.43638064	43.58807645	137.25	05-station-meteo-toulouse-nakache	5-V	2019-04-15	ISS		8	Toulouse	48405.9794	27845.7474	43.58807645;1.43638064
1.440123984	43.59268047	137.05	06-station-meteo-toulouse-ecluse	6-N	2019-04-15	ISS		13	Toulouse	14261.793	25665.8567	43.59268047;1.440123984
1.452699988	43.56827514	155.94	53-station-meteo-toulouse-porsan	53-V	2019-02-07	ISS		6	Toulouse	41015.8636	11090.6186	43.56827514;1.452699988
1.451848418	43.59278278	143.47	38-station-meteo-toulouse-parc-jardin-des-plantes-guestdes	38-N	2019-02-07	TH		11	Toulouse	46115.9576	63116.5673	43.59278278;1.451848418
1.431863473	43.61245993	135.41	42-station-meteo-toulouse-parc-compans-colarelli	42-V	2019-04-15	ISS		11	Toulouse	38264.7361	52085.4192	43.61245993;1.431863473
1.436834217	43.58903752	136.77	05-station-meteo-toulouse-LIFE-hal-1	5-N	2020-10-02	TH		8	Toulouse	43527.7938	31323.8639	43.58903752;1.436834217
1.221884564	43.62858974	212.7	23-station-meteo-pibrac-bouconne-forest	23-N	2019-02-07	TH		10	Pibrac	163.9033	150497.8795	43.62858974;1.221884564
1.438051307	43.6048192	143.13	00-station-meteo-toulouse-valade	0-V	2017-06-26	ISS		2	Toulouse	86867.8907	17286.5321	43.6048192;1.438051307
1.437787331	43.58917972	132.97	05-station-meteo-toulouse-port-barlieue	5-N	2020-10-02	TH		8	Toulouse	41012.7203	31212.0008	43.58917972;1.437787331
1.373732608	43.57441578	156.1	01-station-meteo-toulouse-metropole	1-V	2017-06-26	ISS		5	Toulouse	19290.4474	1489.945	43.57441578;1.373732608
1.445442331	43.59798029	145.91	28-station-meteo-toulouse-carnes	28-V	2019-04-15	ISS		2	Toulouse	131119.7564	2383.1509	43.59798029;1.445442331
1.425674104	43.63381884	132.8	58-station-meteo-toulouse-fondrye	58-V	2019-02-07	ISS		8	Toulouse	60009.0006	553.3777	43.63381884;1.425674104
1.44027254	43.59114868	140.53	06-station-meteo-toulouse-LIFE-sud-est-pointe	6-N	2020-08-15	ISS		13	Toulouse	26869.3171	29274.2338	43.59114868;1.44027254
1.476286095	43.58383021	166.55	45-station-meteo-toulouse-st-exupery	45-V	2019-02-07	ISS		6	Toulouse	42319.6682	13070.0013	43.58383021;1.476286095
1.483381599	43.65582282	161.35	15-station-meteo-union-ecole	15-V	2017-06-26	ISS		6	Union	40021.8692	2954.0629	43.65582282;1.483381599
1.436663157	43.57083382	139.36	04-station-meteo-toulouse-le-empalot	4-V	2019-02-07	ISS		11	Toulouse	4670.4102	54280.2977	43.57083382;1.436663157
1.39933257	43.68132641	127.36	50-station-meteo-biagnac-quanz-sob	50-V	2019-04-15	ISS		11	Biagnac	314.4879	79882.8717	43.68132641;1.39933257
1.448637078	43.56396456	233.25	13-station-meteo-toulouse-pech-david	13-V	2017-06-26	ISS		11	Toulouse	2380.407	41317.3615	43.56396456;1.448637078
1.432182289	43.59002335	139.24	65-station-meteo-toulouse-LIFE-bartheres	65-V	2020-10-02	TH		2	Toulouse	43894.2835	17096.3526	43.59002335;1.432182289
1.38566893	43.56643283	157.2	08-station-meteo-toulouse-basso-combo	8-V	2017-06-26	ISS		8	Toulouse	26468.35	12992.0279	43.56643283;1.38566893
1.478122452	43.59549387	203.08	49-station-meteo-toulouse-cote-pavee	49-V	2019-04-15	ISS		6	Toulouse	31969.2204	26397.4834	43.59549387;1.478122452
1.345824309	43.54121956	164.4	21-station-meteo-cugnaux-general-de-gaule	21-V	2020-08-15	ISS		6	Cugnaux	38868.7769	5320.1891	43.54121956;1.345824309
1.448938214	43.61822354	139.97	34-station-meteo-toulouse-TESO	34-V	2020-08-15	ISS		8	Toulouse	67597.911	1129.83	43.61822354;1.448938214
1.431440256	43.58915507	139.49	65-station-meteo-toulouse-LIFE-iagas	65-V	2020-10-02	TH		2	Toulouse	40148.2474	21287.4995	43.58915507;1.431440256
1.447218488	43.59632101	144.86	28-station-meteo-toulouse-carnes-ozenne	27-N	2019-04-15	TH		2	Toulouse	103193.2713	16093.2447	43.59632101;1.447218488
1.318186198	43.57914314	160.47	25-station-meteo-tournefeuille-residentiel	25-V	2019-02-07	ISS		6	Tournefeuille	39419.2843	1019.2206	43.57914314;1.318186198
1.223229255	43.62797752	210.3	23-station-meteo-pibrac-bouconne-centre-ecuriste	23-V	2019-04-15	ISS		10	Pibrac	3151.9418	100895.0166	43.62797752;1.223229255
1.432537468	43.58941217	141.78	65-station-meteo-toulouse-LIFE-garonne	65-V	2020-08-15	TH		2	Toulouse	41525.3402	20999.393	43.58941217;1.432537468
1.408942	43.587697	149.4	30-station-meteo-toulouse-george-sand	30-V	2020-12-10	ISS		6	Toulouse	46110.260	33623.012	43.587697;1.408942
1.241883645	43.61642579	193.4	18-station-meteo-brax-ecole	18-V	2017-06-26	ISS		6	Brax	30135.7248	58508.0681	43.61642579;1.241883645
1.452503125	43.63158812	136.86	62-station-meteo-toulouse-parc-macourin	62-V	2019-02-07	ISS		11	Toulouse	24118.124	13065.5832	43.63158812;1.452503125
1.424571801	43.69496197	125.5	10-station-meteo-castelnest-ecole	10-V	2017-06-26	ISS		6	Castelnest	24990.8251	14719.5178	43.69496197;1.424571801
1.43627445	43.58721072	137.53	64-station-meteo-toulouse-LIFE-nakache-parking	64-N	2020-08-15	ISS		8	Toulouse	53429.699	21442.9194	43.58721072;1.43627445
1.432608305	43.62096327	134.35	43-station-meteo-toulouse-minimes	43-N	2019-02-07	ISS		3	Toulouse	62252.7976	11445.3573	43.62096327;1.432608305
1.35242748	43.73414898	116.33	33-station-meteo-saint-jory-chapelle-beldou	33-V	2019-02-07	ISS		9	Saint Jory	9540.7607	18686.5264	43.73414898;1.35242748
1.278005343	43.64830394	184.38	29-station-meteo-pibrac-route-mondonville	29-N	2020-08-15	ISS		9	Pibrac	4444.2426	4186.3943	43.64830394;1.278005343
1.432088253	43.58937464	138.97	65-station-meteo-toulouse-LIFE-gastou	65-V	2020-10-02	ISS		2	Toulouse	39520.3093	21546.9116	43.58937464;1.432088253
1.436585221	43.58366122	138.19	66-station-meteo-toulouse-LIFE-est-stadium	66-N	2020-08-15	TH		8	Toulouse	15580.8714	15825.4592	43.58366122;1.436585221
1.431004052	43.59814671	136.91	27-station-meteo-toulouse-saint-cyprien	27-V	2019-04-15	ISS		2	Toulouse	87136.6657	12250.6774	43.59814671;1.431004052
1.439645467	43.58551107	139.33	63-station-meteo-toulouse-LIFE-marechal-juri	63-V	2020-10-02	ISS		2	Toulouse	30014.0792	20864.2336	43.58551107;1.439645467
1.440449656	43.58539848	138.55	63-station-meteo-toulouse-LIFE-debut-soufflot	63-V	2020-10-02	TH		2	Toulouse	30576.5139	27612.7708	43.58539848;1.440449656
1.396387095	43.70871587	123.61	18-station-meteo-saint-alban-leon-jouhaux	18-N	2019-04-15	ISS		8	Saint Alban	40394.221	1416.4615	43.70871587;1.396387095

Variables des métadonnées

-Intitulé et type des stations :

-id_nom et id_numero.

L'id et le nom sont les informations pour différencier chaque station, chaque nom contient la ville et à nouveau l'id, mais également son appartenance à un projet (comme LIFE). L'id_nom peut être utilisé pour télécharger chaque station en reconstruisant l'url comme suivant :

```
https://data.toulouse-metropole.fr/explore/dataset/  
+ id_nom comme : 01-station-meteo-toulouse-metropole  
+ /information/
```

-installation.

La date de placement de la station sur poteau. Cette date ne signifie pas sa mise en réseau et donc l'émission des données.

-type_station.

Le réseau se compose de deux types de stations, les ISS et les TH. Les ISS, signifiant Integrated Sensor Suite, fait référence à la DAVIS vantage PRO II dotée de capteurs mesurant la température, la pluviométrie, la force et la direction du vent et enfin la pression et l'humidité relative. Les capteurs TH, signifiant Temperature & Humidity mesurent, comme leurs noms le suggèrent, la température et l'humidité relative.

-Emission.

Cette variable indique si la station météo est équipée d'un Raspberry. V signifie émission valide et N pour négative. Si la station n'a pas de problèmes (techniques ou autre), alors ses données sont disponibles sur l'open data via la méthode d'URL montrée au dessus ou via l'outil de recherche de l'open data de la métropole.

-Coordonnées et informations géographiques :

-latitude, longitude et geopoint.

Elles permettent, via des logiciels de géomatique ou dotés de modules/librairies de cartographie (R, Wordpress, etc.), de placer les stations sur une carte.

-altitude.

Le point d'altitude au sol de la station, il faut alors rajouter au moins 3m (max 5m) pour avoir l'élévation réelle de la station.

-ville.

La commune contenant la station.

-Description de l'environnement immédiat :

-lcz (Local Climate Zone).

Suivant la classification de Stewart et Oke, chaque station est positionnée sur une LCZ, décrivant la morphologie urbaine entourant la station. Le concept des LCZ est décrit dans le chapitre III.

-végétation et bâti.

Pour chaque station est calculée dans un rayon de 250M la quantité de bâti et de végétation haute en m². Si la couche de bâti se révèle relativement précise, la couche de végétation, construite via des images satellites prises au printemps, peut surévaluer la présence de végétation (voir ci-après). Enfin, la précision est aussi toute relative puisque la couche de végétation utilisée date de 2012 et omet parfois la présence de végétation privée dans des jardins.



Ci-contre : Bâti et végétation haute compris dans un rayon de 250 mètres autour de la station d'En-Jacca et du perget.



Position des stations

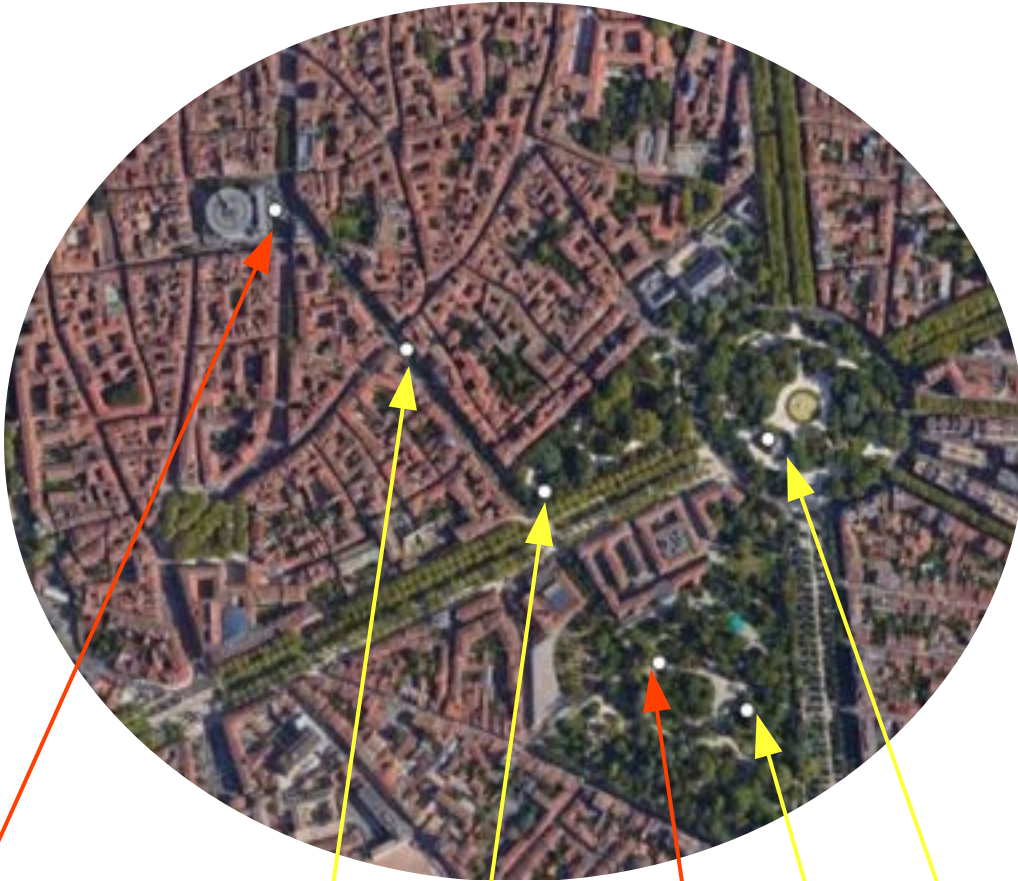


Dans les prochaines pages, les stations sont représentées par des points blancs avec :

- Station active (V dans colonne emission)
- Station inactive (N dans colonne emission)

Carmes / Jardin des Plantes

Situées dans le centre de Toulouse, 6 stations quadrillent le quartier des Carmes et le parc du Jardin des Plantes. Elles sont pensées et structurées pour étudier les variabilités de températures dans les différents parcs mais aussi les effets de rafraîchissements du Jardin des plantes. Une station est située au milieu de la Rue Ozenne à cet effet. La rue, orientée dans l'axe des vents majoritaires Toulousains, offre un cadre idéal pour cette étude.



28-station-meteo-toulouse-carmes

28-station-meteo-toulouse-carmes-ozenne

38-station-meteo-toulouse-parc-jardin-des-plantes-guesdes

38-station-meteo-toulouse-parc-jardin-des-plantes

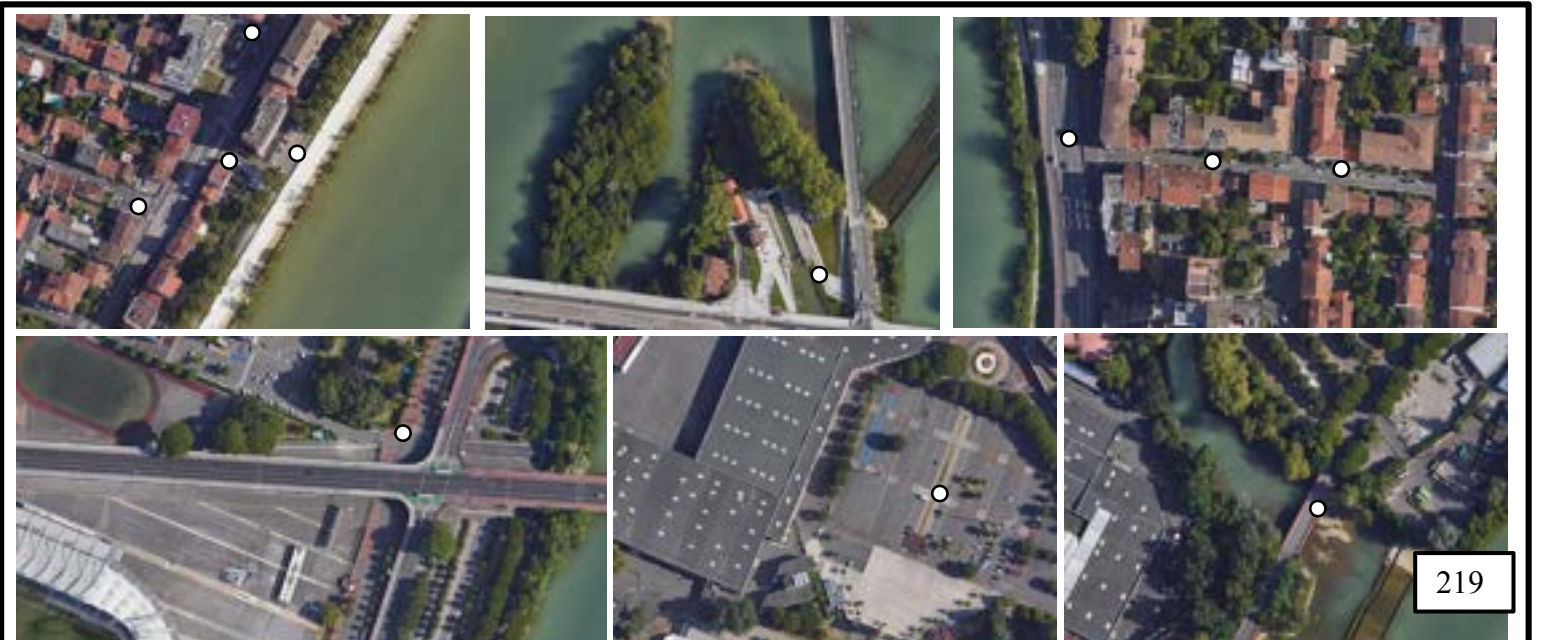
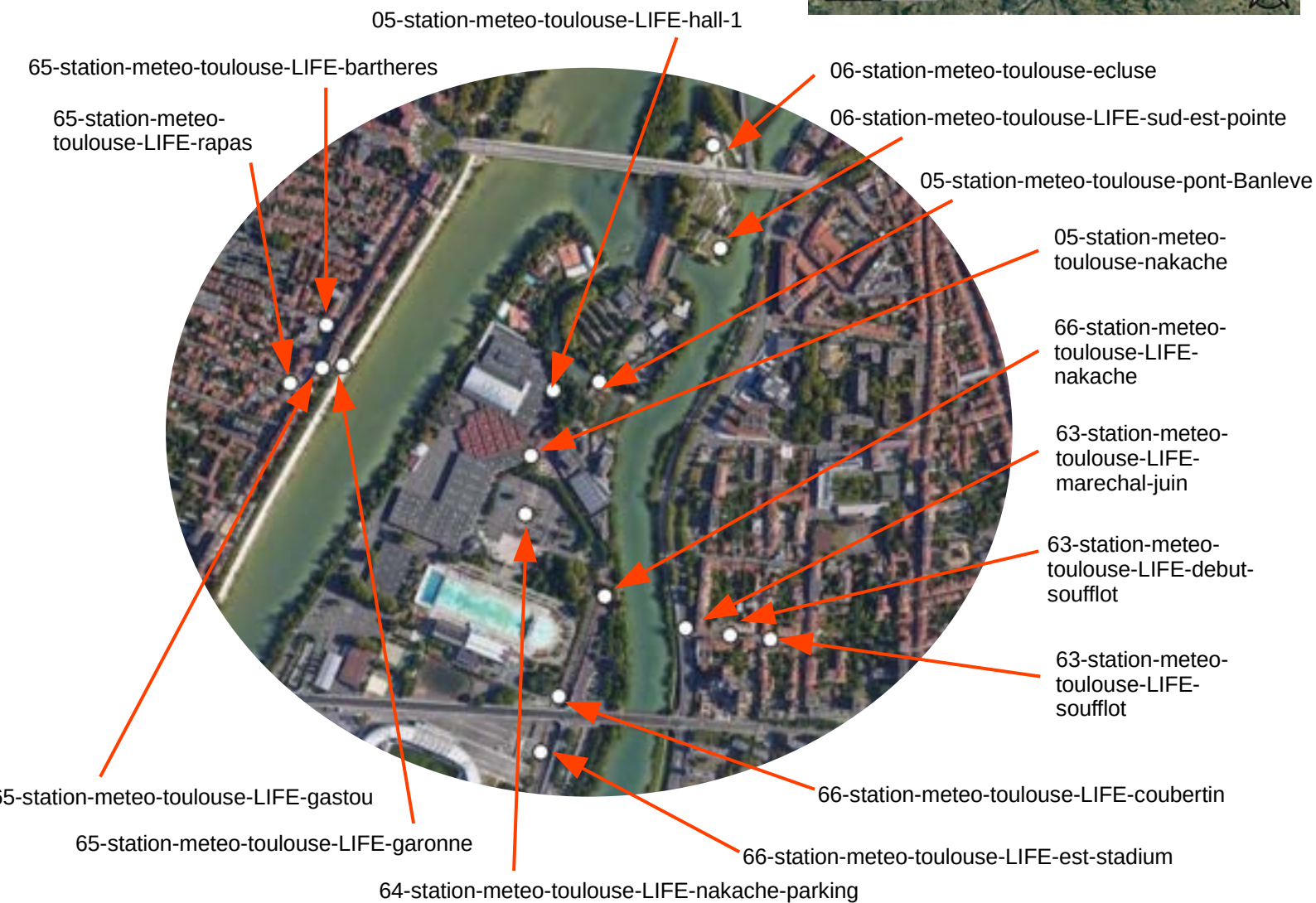
38-station-meteo-toulouse-parc-jardin-des-plantes-point-frais

38-station-meteo-toulouse-parc-jardin-des-plantes-grand-rond



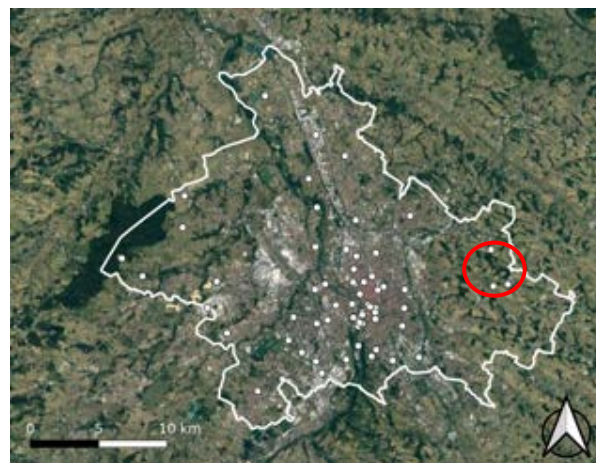
Stations LIFE / Île du Ramier

A quelques centaines de mètres du Jardin des Plantes, sur l'île du Ramier, au coeur de Toulouse, 16 stations sont positionnées. Elles sont placées pour suivre l'évolution des températures suite à la destruction du parc des expositions (visible sur les images au nord de Nakache). Les stations sur les rives est et ouest sont positionnées pour observer les effets du futur parc au-delà de la Garonne.



L'est de la Métropole, coteaux du Lauragais

A l'est de la Métropole se trouvent 3 stations. Placées sur les coteaux et dans les creux de vallées, elles suivent les reliefs pour étudier les variations de températures. Deux stations se situent sur la commune de Mons, une dans le coeur de ville sur le sommet, une autre plus bas dans un espace végétalisé. La troisième station, à côté de la mairie de Mondouzil, est un point de référence, avec Bouconne et St-Jory, pour mesurer l'ICU.



19-station-meteo-mondouzil-mairie

32-station-meteo-mons-ecole

31-station-meteo-mons-station-epuration



Le coeur urbain rive gauche/rive droite

Dans le centre-ville, les deux stations de Valade et St-Cyprien forment, avec Carmes, les points de mesures de référence de l'urbain pour le calcul de l'ICU. Le tissu urbain est dense, peu végétalisé et de hauteur moyenne dans la classification LCZ (entre 10 et 25m).



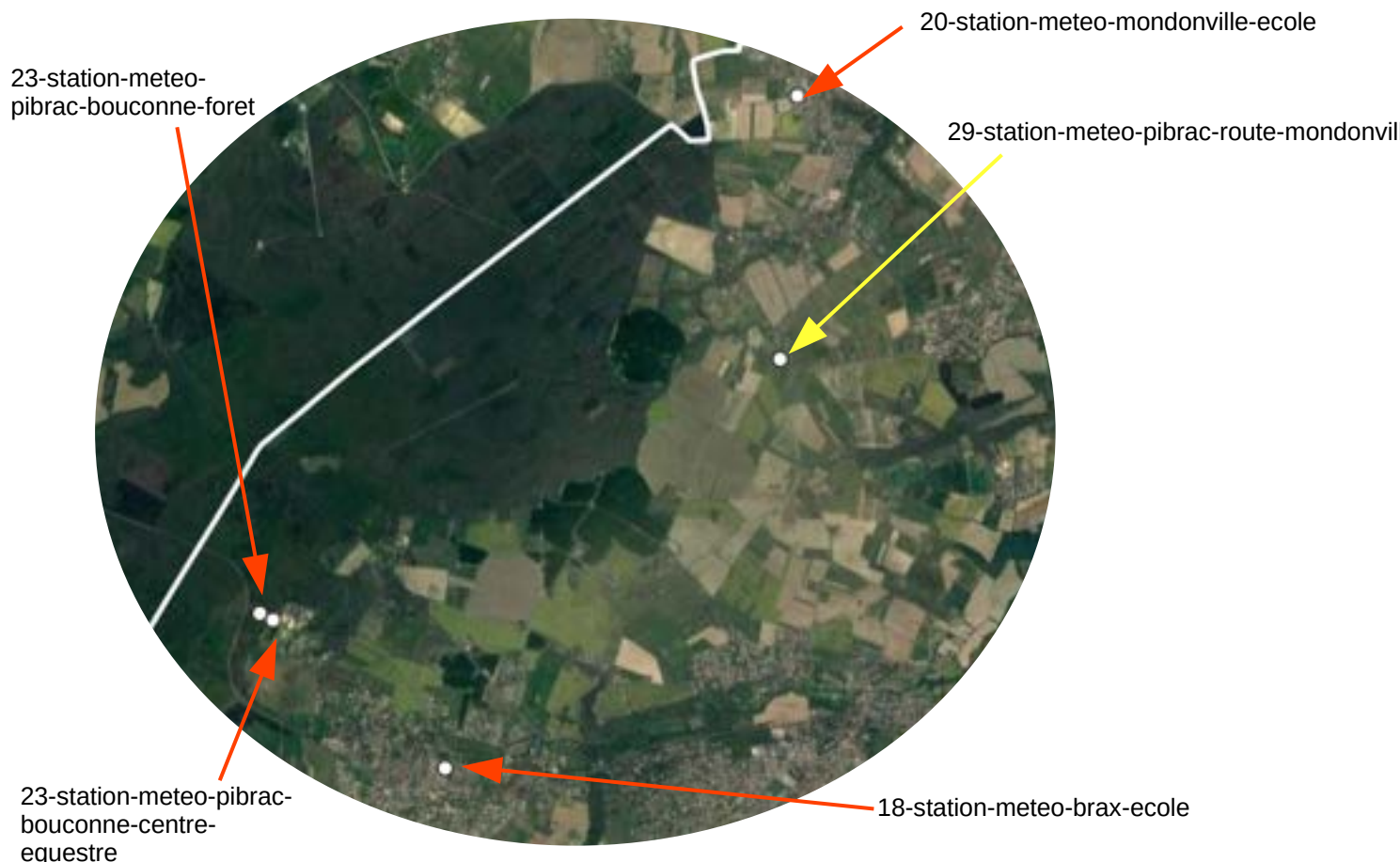
27-station-meteo-toulouse-saint-cyprien

00-station-meteo-toulouse-valade



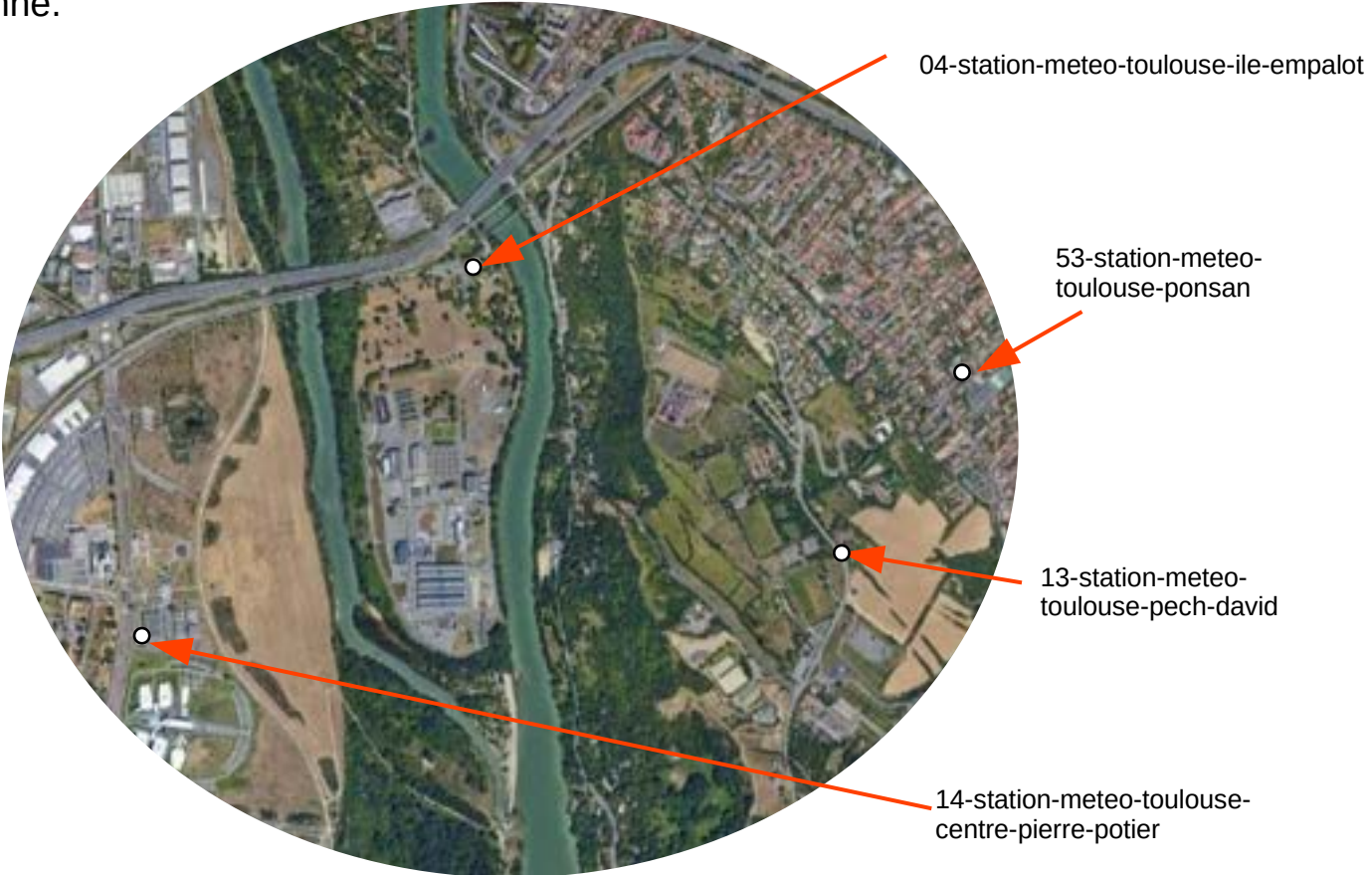
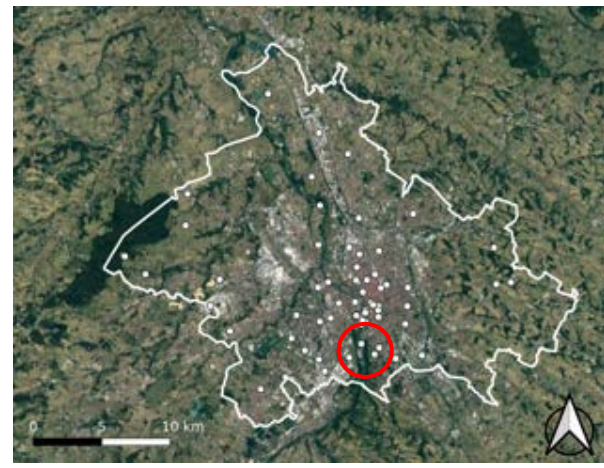
L'ouest de la Métropole et la forêt de Bouconne

Stations de référence pour le calcul de l'ICU pour l'ouest Toulousain, la forêt de Bouconne se situe à la limite du territoire d'étude. Positionné dans un centre équestre à l'orée de la forêt, la station relève les températures d'un espace arboré et fortement végétalisé. Dans l'ouest nous observons également les territoires résidentiels de Mondonville ou le coeur de village de Brax, qui signe le premier relevé urbain sur le transect est-ouest de l'ICU.



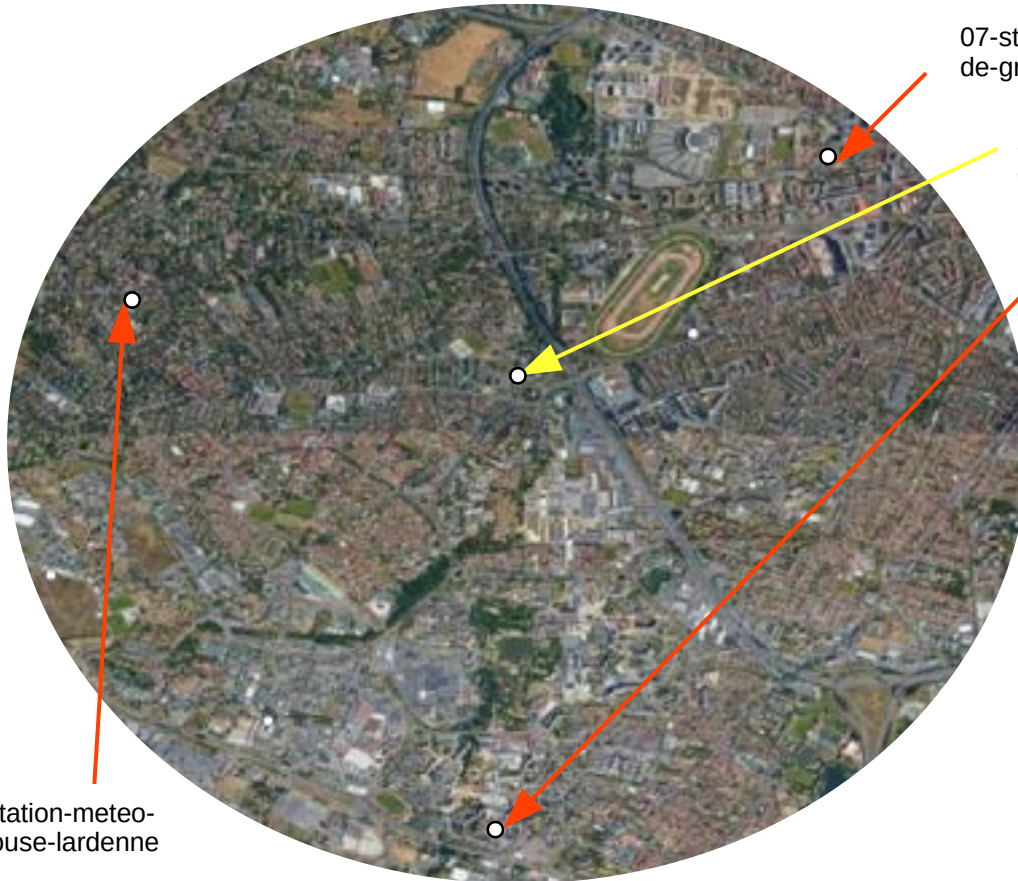
Le relief de Pech David

Au sud de Toulouse se situe le relief de Pech David. La Garonne longe son flanc ouest avec la station Pierre Potier à proximité. En son sommet se situe la station Pech David, non loin de l'hôpital surplombant la station de Ponsan sur le flanc est, qui est aussi un faubourg sud de la ville. Enfin, à la pointe du relief, sur l'extrémité sud de l'île du Ramier se trouve la station de l'île d'Empalot, espace végétalisé à quelques mètres au dessus de la Garonne.



L'ouest Toulousain

L'ouest Toulousain propose des paysages urbains variés différents de l'est. Des jardins de la bourgeoisie du XIXème siècle de Lardenne aux tripodes de la Reynerie, en passant par les bureaux de l'avenue de Grande-Bretagne (au sud du nouveau quartier de la Cartoucherie) ou de la Cépière, les espaces où sont placés les stations sont témoins de disparités morphologiques.



51-station-meteo-toulouse-lardenne

07-station-meteo-toulouse-avenue-de-grande-bretagne

52-station-meteo-toulouse-cepiere

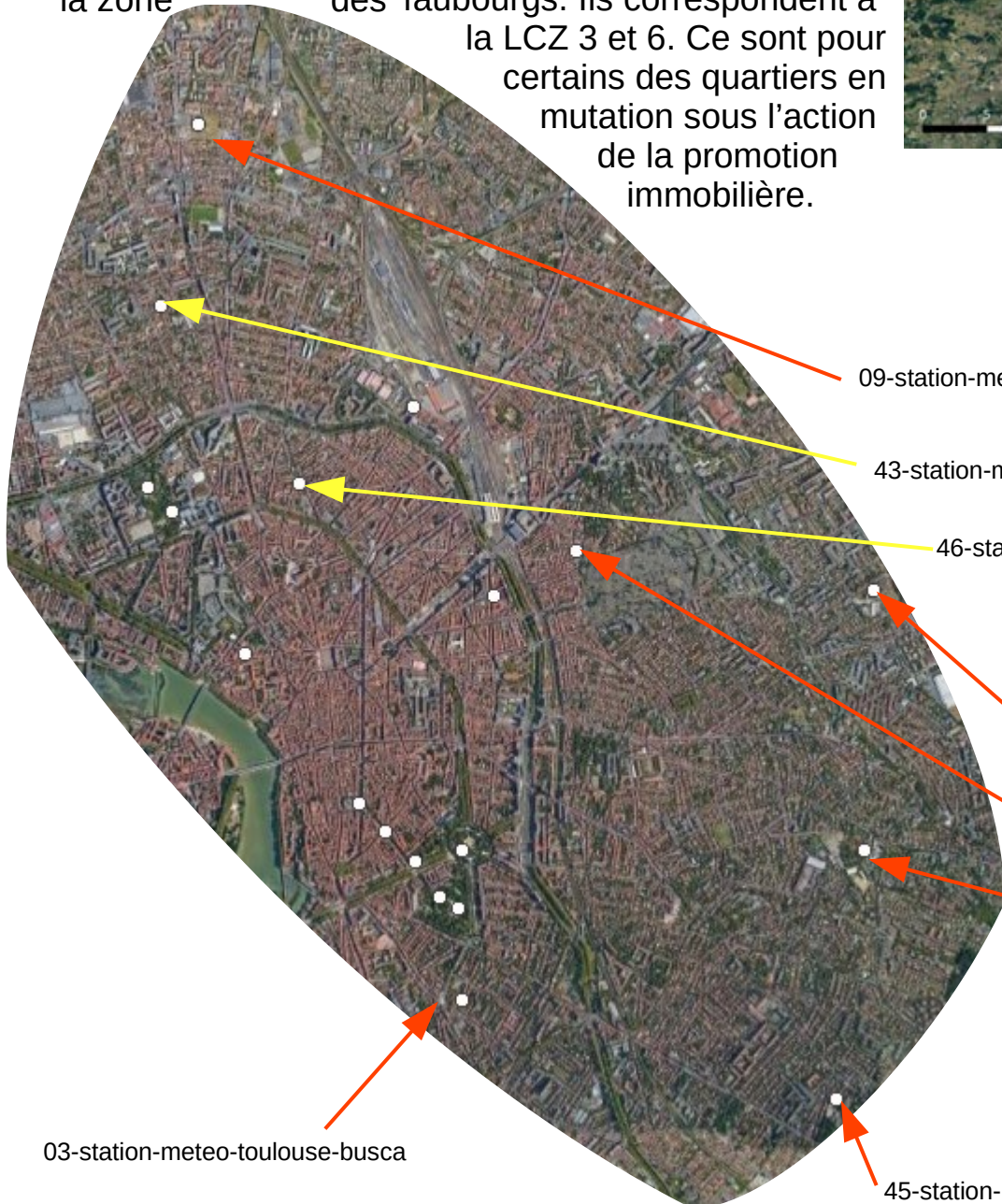
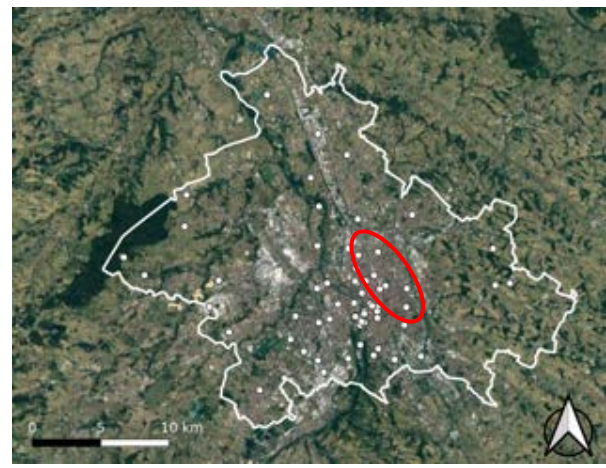
26-station-meteo-toulouse-reynerie



Les faubourgs

Autour du centre-ville de la commune de Toulouse se trouve d'anciens quartiers populaires. Dotés d'un bâti de faible hauteur mais plus ou moins dense avec de petits jardins particuliers, ils forment la zone

des faubourgs. Ils correspondent à la LCZ 3 et 6. Ce sont pour certains des quartiers en mutation sous l'action de la promotion immobilière.



09-station-meteo-toulouse-la-salade

43-station-meteo-toulouse-minimes

46-station-meteo-toulouse-chalets

11-station-meteo-toulouse-soupetard

02-station-meteo-toulouse-marengo

49-station-meteo-toulouse-cote-pavee

03-station-meteo-toulouse-busca

45-station-meteo-toulouse-st-exupery



Stations en zones d'activités et de bureaux (LCZ 8)

Les stations des zones d'activités, disséminées sur tout le territoire, permettent de relever les températures de tissus diverses tels que l'hôpital proche du centre ville, les zones de BTP, de fret routier/interurbain ou encore des bureaux de la ZAC Montaudran.

36-station-meteo-toulouse-purpan



58-station-meteo-toulouse-fondevy



22-station-meteo-colomiers-za-perget



16-station-meteo-saint-alban-leon-jouhaux



24-station-meteo-colomiers-zi-enjacca



12-station-meteo-toulouse-montaudran



08-station-meteo-toulouse-basso-cambo



40-station-meteo-toulouse-zi-thibaud

Stations du péri-urbain

Les stations du péri-urbain se situent dans diverses communes tout autour de Toulouse. Nous en trouvons dans des centres anciens (Blagnac, Fenouillet) ou à leurs proximités (Cugnaux), sur des écoles (Castelginest, l'Union) ou dans des quartiers résidentiels (Tournefeuille).

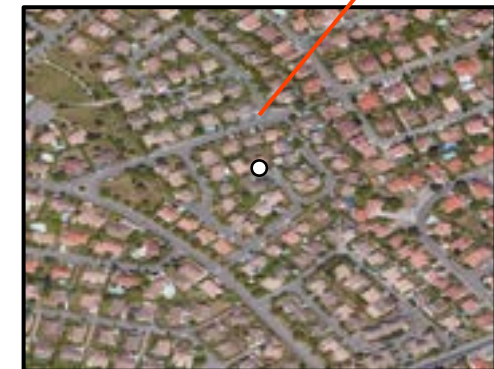
61-station-meteo-blagnac-mairie



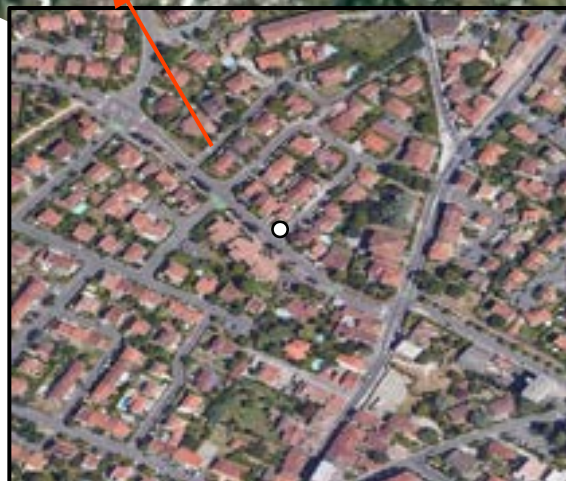
17-station-meteo-fenouillet-foyer



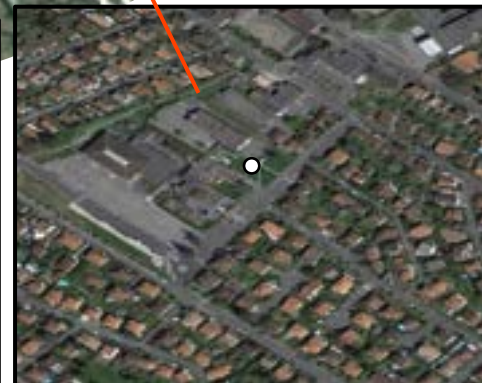
10-station-meteo-castelginest-ecole



25-station-meteo-tournefeuille-residentiel



21-station-meteo-cugnaux-general-de-gaulle



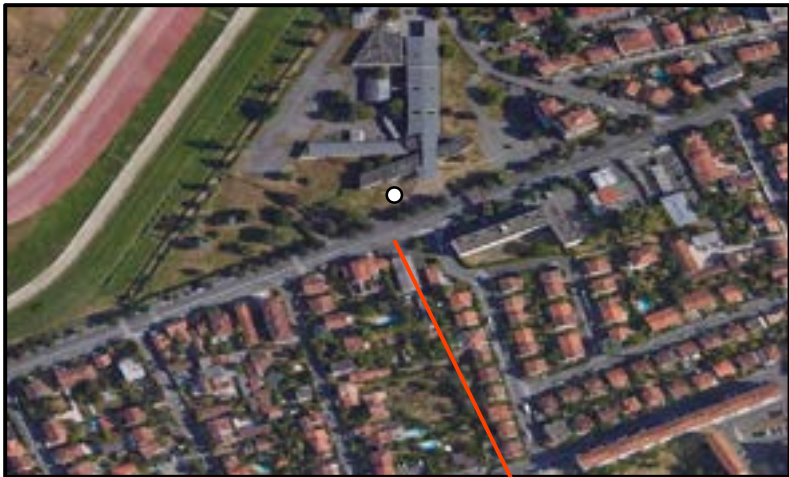
15-station-meteo-l-union-ecole

Stations sur sites partenaires

Des stations sont posées sur des sites de partenaires du réseau. La station Météopole, sur le site de Météo-France, la station de l'université Paul Sabatier, la station du collège George Sand ou encore la station de l'Agence Régionale de la Santé. Les partenaires ont permis d'accéder à des sites d'observations difficiles d'accès, comme l'Institut de recherche en informatique à l'université ou le collège George Sand à proximité de l'hippodrome.

30-station-meteo-toulouse-george-sand

34-station-meteo-toulouse-TESO



01-station-meteo-toulouse-meteopole

37-station-meteo-toulouse-universite-paul-sabatier

Garonne et espaces verts

Les stations positionnées à proximité d la Garonne ou dans les parcs et espaces verts permettent d'observer les effets de la végétation sur les températures. Ainsi, les parc de la Maourine, de Compans Cafarelli ou de la maison de retraite Garonne sont équipés de stations.

41-station-meteo-toulouse-avenue-de-casselardit



33-station-meteo-saint-jory-chapelle-beldou



50-station-meteo-blagnac-quinze-sols



42-station-meteo-toulouse-parc-compans-cafarelli



62-station-meteo-toulouse-parc-maourine

Résumé

Cette thèse fournit une description du développement des services climatiques au sein de Toulouse Métropole, en France. Ces services sont articulés autour d'un réseau de stations météorologiques pour les études de micro-climatologie, en particulier l'analyse de la température de l'air et de l'îlot de chaleur urbain. L'introduction revient sur le concept de services climatiques et leurs évolutions au cours des dernières décennies. Un bref rappel des différentes typologies d'îlots de chaleur est effectué avant d'évoquer l'enracinement de cette thèse dans un historique de partenariat de recherches sur le climat à Toulouse, entre acteurs institutionnels et scientifiques. Le travail s'assemble ensuite autour de trois axes.

Le premier s'emploie à décomposer les services climatiques à base de réseaux d'observations en objets distincts rattachés à des champs disciplinaires séparés mais en interaction. La démarche s'appuie sur une classification de la bibliographie et des travaux de l'Organisation Mondiale de Météorologie sur les services climatiques. Dans cette partie sont également expliqués le parti pris et la mise en place d'une dynamique de travail qui font appel aux méthodes relatives à la participation, et en particulier à la co-construction. Enfin, cette partie présente la gouvernance opérationnelle des services climatiques déployés pendant la période de thèse (2017-2020).

Si l'axe premier présente un cadre théorique, méthodologique et organisationnel du travail de recherche-action, le second axe se veut être la mise en pratique. A savoir la transformation des différentes composantes d'un service climatique à base de réseau de mesures en une solution technique déployée et opérationnelle selon des normes et standards internationaux. Un focus est apporté sur le choix des sites de mesures à l'aide de cartographies thématiques et d'une campagne de mesures véhiculée. Enfin, l'acheminement de la donnée et le matériel utilisé sont expliqués sous l'angle des objets connectés. Cette partie sert également à montrer l'ancrage des différentes composantes du réseau (observation, acheminement et stockage des données, livraison) dans les multiples directions métiers de la Métropole Toulousaine, illustrant ainsi les résultats des méthodes de co-construction.

Le troisième axe, enfin, propose une analyse de l'îlot de chaleur du territoire Toulousain à partir des données mesurées par le réseau mis en place. Dans un premier temps l'îlot de chaleur est abordé sous l'angle classique de la dichotomie urbain/rural et selon des conditions météo optimales à sa formation. Dans un second temps est mobilisée l'approche des types de temps pour approfondir les analyses selon divers types de conditions météorologiques. Enfin une analyse spatiale plus fine est réalisée en mobilisant les Local Climate Zones (LCZ). Pour conclure les analyses, un regard

particulier est porté sur le comportement thermique des zones d'activités (LCZ 8) sur l'été 2020. Elle est, avec la LCZ bâti résidentiel type pavillonnaire, une LCZ particulièrement présente sur le territoire de la Métropole et un tissu urbain sur lequel sont portées de nombreuses considérations urbanistiques.

Cette thèse propose ainsi une approche transversale et inter-disciplinaire de mise en œuvre d'un service climatique urbain, complétée d'une analyse territorialisée du climat urbain. Elle vise à mobiliser les méthodes et techniques mises en place par la recherche en climatologie urbaine au service de l'urbanisme opérationnel tout en ayant comme objectif de participer au débat scientifique autour du développement des services climatiques urbains.

Abstract

This thesis provides a description of the development of climate services within Toulouse Métropole, France. These services are articulated around an automated weather station network for micro-climatology studies, in particular the analysis of air temperature of the urban canopy heat island.

The introduction reviews the concept of climate services and their evolution over the last decades. A brief reminder of the different typologies of heat islands is given before evoking the rooting of this thesis in a history of partnership in climate research in Toulouse between institutional and scientific actors. The work is then built around three axes.

The first one decomposes the climate services based on observation networks into distinct objects attached to separate and interacting disciplinary fields. The approach is based on a classification of the bibliography and the work of the World Meteorological Organization on climate services. This part also explains the volonte to mobilize methods relating to participation and in particular co-construction with the purpose to bring work flow and dynamic. Finally, this part presents the governance of climate services deployed during the thesis period (2017-2020).

While the first axis presents a theoretical, methodological and organizational framework for action-research work, the second axis is intended to be its practical application. In other words the transformation of the different components of a climate service based on a measurement network into a technical solution deployed and operational according to international norms and standards. A focus is brought on the choice of measurement sites with the help of thematic maps and a mobile measurement campaign. Finally, the routing of the data and the equipment used are explained from the perspective of the connected objects. This part also serves to show the anchoring of the different components of the network (observation, data routing and storage, delivery and sharing) in the multiple departements of Toulouse's local authority, which illustrating the results of co-construction methods.

The third axis, finally, proposes an analysis of the heat island of the Toulouse territory from the data measured by the network. First, the heat island is approached from the classic angle of the urban/rural dichotomy and according to optimal weather conditions at its formation. In a second step, the approach of weather types is mobilized to deepen the analyses according to various types of weather conditions. Finally, a finer spatial analysis is carried out using Local Climate Zones (LCZ). To conclude the analyses, a particular look is taken at the thermal behaviour of the activity zones (LCZ 8) over the summer of 2020. Likethe LCZ built residential pavilion-type buildings, it is

an LCZ particularly well represented on the territory of the Metropole and a being under many urban planning considerations.

This thesis proposes a transversal and inter-disciplinary approach to the implementation of an urban climate service, complemented by a territorialized analysis of the urban climate. It aims to mobilize the methods provided by urban climatology research in the service of operational urban planning, while at the same time participating in the scientific debate on the development of urban climate services.