



HAL
open science

Climat et Urbanisme: Apports de la dimension cartographique de la climatologie urbaine à la mise en place des plans d'adaptation

Julia Hidalgo

► **To cite this version:**

Julia Hidalgo. Climat et Urbanisme: Apports de la dimension cartographique de la climatologie urbaine à la mise en place des plans d'adaptation. Milieux et Changements globaux. École Normale Supérieure de Paris - ENS Paris, 2022. tel-03867034

HAL Id: tel-03867034

<https://hal.science/tel-03867034v1>

Submitted on 23 Nov 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches

présentée à

L'École Normale Supérieure

par

Julia HIDALGO

Chargée de recherches

Laboratoire LISST – UMR 5193 CNRS – Université Toulouse Jean Jaurès

Climat et Urbanisme : Apports de la dimension cartographique de la climatologie urbaine à la mise en place des plans d'adaptation

TOME II - VOLUME DE TRAVAUX INÉDITS

| | | |
|--------------------|---|------------|
| Bruno BARROCA | Professeur des universités, Lab'Urba | Rapporteur |
| Sidonie CHRISTOPHE | Directrice de Recherche, COGIT-IGN | Rapporteur |
| Matthias ROTH | Professor, National University of Singapore | Rapporteur |
| Sandrine MATHY | Directrice de Recherche, GAEL | Examineur |
| Valéry MASSON | Ingénieur en chef des Ponts, Eaux et Forêts, CNRM-Météo France | Examineur |
| Magali REGHEZZA | Maître de conférences HDR, ENS | Garante |

Sommaire

| | |
|--|-----|
| Introduction..... | 5 |
| Partie I- Climat urbain : agenda et perspectives d'un risque climatique..... | 9 |
| Synthèse de la PARTIE I..... | 25 |
| Partie II – Nouvelles injonctions réglementaires et recherche en climatologie urbaine en France...27 | |
| Synthèse de la PARTIE II..... | 57 |
| Partie III: Une contribution aux recherches à l'interface entre sciences du climat et l'urbanisme via leur dimension cartographique..... | 59 |
| Synthèse de la PARTIE III..... | 115 |
| Discussion finale..... | 117 |
| Annexe 1 :..... | 123 |
| Annexe 2 : Discontinuités spatiales de la vitesse moyenne du vent..... | 131 |
| Annexe 3 : Cartes d'analyse du stress thermique diurne pour les types de temps sensibles 7 et 8.132 | |
| Annexe 4: Cartes d'analyse de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour les types de temps sensibles 7 et 8..... | 134 |
| Bibliographie..... | 137 |
| Tables..... | 147 |

Introduction

La ville et le climat, deux systèmes complexes. La ville contemporaine est une organisation socio-spatiale composée d'entités hétérogènes en interaction : habitants, constructions et zones naturelles, les réseaux de communication, activités, services, etc. Elle est indéniablement un système complexe (Barroca, 2017). Ses entités constitutives dépendent de l'échelle d'observation (individus et bâtiments à l'échelle micro, quartiers et collectifs à l'échelle méso, etc.) ; leurs interactions sont rarement prévisibles ; le pilotage du système urbain, traditionnellement assuré par des acteurs publics, associe désormais de plus en plus habitants, associations, entreprises, etc. participant à ce que l'on nomme désormais la « gouvernance urbaine ».

Le système climatique doit sa complexité aux interactions entre ses composantes (atmosphère, surfaces continentales, hydrosphère, cryosphère, biosphère) auxquelles s'ajoutent des contraintes externes d'origine physique et anthropique. Sa prévisibilité est limitée par la nature chaotique de son comportement : d'infimes changements peuvent générer des effets de grande ampleur. La modélisation du climat futur vise à évaluer l'effet des activités humaines sur son évolution et en retour, l'impact de celle-ci sur le fonctionnement des écosystèmes. Les écosystèmes urbains sont emblématiques de ce type de rétroaction : les villes subissent les impacts locaux du changement climatique, mais contribuent aussi au déséquilibre climatique global de par, entre autres, leurs émissions de GES et l'artificialisation des sols qu'elles génèrent.

L'interaction entre ces deux systèmes complexes est un objet de recherche d'actualité. Un exemple est la nécessaire adaptation des villes aux températures extrêmes. Sous nos latitudes, le changement climatique entraîne une hausse généralisée des températures et une intensification des épisodes caniculaires qui exposent les villes à des risques de températures extrêmes. Nombreux sont les impacts : problèmes de santé publique, de confort des espaces intérieurs et extérieurs, de surconsommation énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre (GES). Les villes sont par ailleurs sujettes à l'îlot de chaleur urbain qui désigne l'élévation locale de la température due à l'accumulation de chaleur dans les matériaux urbains (*Figure 1*). Canicules et îlot de chaleur combinés aggravent les vulnérabilités urbaines.

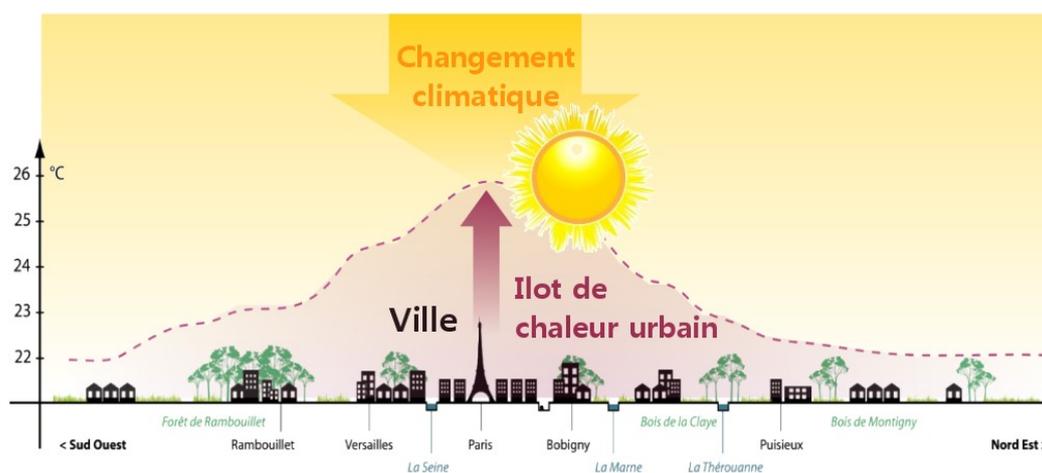


Figure 1. Schéma illustrant, l'îlot de chaleur urbain, défini comme l'élévation relative de la température de l'air dans les zones urbanisées par rapport aux zones moins urbanisées environnantes. Exemple de la région parisienne (Source : Aude Lemonsu, CNRM, Météo France)

L'évaluation des risques liés aux températures extrêmes, l'adaptation du bâti et des espaces publics aux canicules, l'évolution du cadre réglementaire et opérationnel sont autant de sujets de recherche qui doivent être investis

de manière inter- et transdisciplinaire. Les recherches présentées ici portent sur l'étude des interactions entre système urbain et système climatique et ont pour vocation accompagner les acteurs locaux dans l'élaboration de stratégies d'adaptation face à ces nouveaux risques. Elles demandent une forte interdisciplinarité –notamment entre sciences humaines et sociales et sciences de l'atmosphère- et mobilisent la modélisation et la cartographie pour tenter de reproduire et analyser les phénomènes réels, leurs interactions et leur dynamique. Elles recourent également à l'analyse des systèmes d'acteurs, des outils d'urbanisme et du cadre réglementaire.

J'ai une pratique de recherche en climatologie urbaine depuis les sciences de l'atmosphère comme socle disciplinaire mais je la pratique en immersion dans une équipe d'études urbains. J'ai une formation initiale en physique de l'atmosphère et l'environnement obtenue au début des années 2000. Je me suis ensuite spécialisée dans la climatologie urbaine à travers une thèse européenne binationale (France-Espagne) entre le Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France et l'Université de Vigo. Sur ces premières années j'ai exercé un parcours typiquement disciplinaire en sciences de l'atmosphère et de l'environnement. J'ai ainsi acquis une expérience dans l'observation (Campagnes CAPITOU, Bilbao, DESIREX), la modélisation numérique du micro-climat urbain (modèles Mésio-NH et SURFEX-TEB) et le traitement de données (programmation informatique, méthodes d'analyse statistique et spatiale).

Je me suis orientée après ma thèse vers des projets de climatologie urbaine plus en lien avec la sphère opérationnelle. J'ai ainsi participé à des projets qui étaient d'envergure à ce moment là en Espagne - projet EGOKITZEN qui a donné naissance au premier plan climat pour une ville Espagnole - et en France, projets ACCLIMAT et ANR-MUSCADE dont le dialogue interdisciplinaire a été mis au profit d'une plateforme de modélisation climatique et urbanistique.

J'ai intégré en 2014 le Centre Interdisciplinaire d'Études Urbaines du Laboratoire LISST (LISST-CIEU). L'interdisciplinarité y est pratiquée au niveau de l'interface entre la climatologie et les études urbaines, cette dernière tematique étant le domaine d'expertise de l'équipe CIEU depuis une soixantaine d'années. Une autre marque de caractère de l'équipe CIEU est la mise en place d'approches de recherche action ou de co-construction d'objets de recherche avec les acteurs opérationnels ou les usagers de l'espace urbain. J'ai ainsi eu l'occasion de co-porter avec Valéry Masson du CNRM le projet ANR-MAPUCE¹, et de coordonner les volets SHS du projet ADEME-PÆNDORA². Je porte actuellement le projet ADEME-PÆNDORA2 (2022-2024) intitulé « *Pour la gestion du confort estival : Données, Outils et Recherche-Action* ».

J'ai deux chantiers de recherche étroitement liées mais aux approches disciplinaires éloignées. A travers ces projets, j'ai développé deux chantiers étroitement liées mais dont les approches disciplinaires sont très différentes :

- le premier chantier s'appuie sur la mobilisation de données atmosphériques, climatiques, urbaines et d'outils de géo-visualisation afin de construire un certain nombre d'objets intermédiaires (figures, cartes, documents...) nécessaires à la discussion avec les services administratifs en charge des politiques de planification urbaine. Des collaborations étroites avec des climatologues urbains producteurs de données et des géomaticiens nourrissent ce chantier.
- le second chantier s'appuie sur la lecture et l'analyse d'outils d'urbanisme, ainsi que sur des techniques de recherche propres aux SHS typiquement des entretiens semi-dirigés, des enquêtes et de l'observation participative. Des collaborations étroites avec des chercheurs en géographie urbaine et en droit de l'environnement alimentent et surtout pilotent ce chantier où je suis disciplinairement néophyte.

¹ Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie, <https://www.umr-cnrm.fr/ville.climat/spip.php?rubrique120>

² Planification, Adaptation et Énergie : Données territoriales et accompagnement, <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1119>

Mes recherches apportent une contribution à la mise en place de plans d'adaptation aux températures extrêmes en milieu urbain. Le programme de recherches présenté en 2013 au concours du CNRS s'intitulait *Intégration des enjeux climatiques dans la planification et l'aménagement urbains*. Il avait pour objectif très général d'étudier l'articulation possible entre savoirs climatiques et urbanistiques pour améliorer la prise en compte de la gestion du confort estival dans les outils d'urbanisme. Dans ce projet je proposais de mobiliser des outils qui avaient déjà fait leurs preuves dans leurs champs respectifs, y compris sur des projets interdisciplinaires précédents (mesures physiques, modélisation climatique, enquêtes, analyse de documents ou d'acteurs), mais aussi d'explorer le potentiel de techniques cartographiques à l'échelle urbaine et intra-urbaine. Ce dernier domaine était novateur dans le contexte français.

Les recherches développées à partir de ce programme ont essayé de contribuer à la prise en compte des enjeux climatiques dans la planification et l'aménagement urbains depuis plusieurs angles complémentaires. D'une manière naturelle, nous avons travaillé à l'amélioration de la caractérisation de l'Aléa à travers, par exemple, l'amélioration des outils de modélisation (pour mieux prendre en compte les caractéristiques urbaines ou des typologies d'usager comme ce fut le cas dans le projet ANR-MApUCE). Le travail sur la spatialisation des données climatiques à l'échelle urbaine et le croisement avec des données socio-démographiques a pur vocation de caractériser l'exposition et la vulnérabilité territoriale. Les techniques de représentation et visualisation spatiale associées ont été utiles à l'élaboration du Diagnostic d'un document d'urbanisme pour Toulouse et ont permis de proposer une méthodologie et des préconisations en termes de sémiologie graphique pour l'élaboration des cartes climatiques de l'environnement urbain. Finalement, nous avons travaillé à l'identification de l'échelle d'action et d'application de chacun des leviers d'adaptation et gestion du confort estival (végétalisation, occupation des sols, forme urbaine, matériaux, émission de flux de chaleur atrophiques, etc.) au regard des différents documents composant l'outil d'urbanisme.

Chacun de ces chantiers de recherche est, à lui seul, fortement interdisciplinaire. Des collaborations avec des géographes, architectes et sociologues ont été nécessaires pour améliorer le modèle de simulation micro-climatique. Des collaborations avec des géographes urbanistes, cartographes et géomaticiens ont été nécessaires pour investir le sujet de la cartographie climatique. Des collaborations avec des juristes de l'environnement ont permis d'aborder le cadre réglementaire et les outils d'urbanisme, sous différentes dimensions. Finalement, l'implication des acteurs publiques en charge de l'urbanisme dans ces recherches, Fédération National des Agences d'Urbanisme et Toulouse Métropole, a permis de comprendre l'utilité des données et méthodes proposés, leur cadre d'application, leurs limites, et il me semble, de créer des résultats de recherche plus utiles et pertinents que s'il avait été développées dans un cadre purement disciplinaire.

En termes de structure et de contenu, si le TOME I de ce dossier scientifique d'HDR décrit mes activités de recherche et d'enseignement d'une manière synthétique mais globale, ce TOME II a pour objectif de situer mes travaux en lien avec la dimension cartographique de la climatologie urbaine par rapport à un certain contexte international et national. Ce contexte est caractérisé par :

- une mise à l'agenda dans l'opinion publique et les pouvoirs politiques de l'urgence de prendre en compte les enjeux de surchauffe urbaine dans la planification et l'aménagement urbains, à la fois pour des questions de santé publique et environnementale en général mais aussi d'atténuation du changement climatique (Partie I).
- une évolution réglementaire qui a suivi en France la montée en puissance de cette thématique et une certaine maturité des outils et approches méthodologiques d'étude et caractérisation du climat urbain (Partie II).
- des programmes institutionnels qui ont accompagné la création de projets et de profils de recherche de plus en plus interdisciplinaires et appliqués qui ont donné lieu à plusieurs productions à destination de la sphère opérationnelle sous forme de Atlas cartographiques, Guides et documents méthodologiques (Partie III).

Partie I- Climat urbain : agenda et perspectives d'un risque climatique

Introduction. Un sujet de recherche internationalisé et interdisciplinaire

1. Quelle définition pour le climat urbain ?

Les espaces urbanisés perturbent les caractéristiques atmosphériques aux échelles locale et régionale en modifiant les échanges de chaleur, d'humidité, de masse et de quantité de mouvements entre la surface de la Terre et les premières couches d'air. Ces effets sont présents à toutes les échelles spatiales³ et temporelles. Ils dépendent de la structure physique de la ville et des activités anthropiques, notamment celles qui dégagent de la chaleur. Ces caractéristiques climatiques particulières des zones urbaines constituent ce qu'on appelle le climat, ou microclimat, urbain. Le phénomène le plus étudié et le plus médiatisé est l'îlot de chaleur urbain (en anglais *Urban Heat Island*, UHI) (Oke *et al.* 2017). Il décrit les différences de températures de surface et/ou de l'air par rapport à un environnement « naturel ». D'autres phénomènes incluent des changements dans la turbulence et la dynamique générale de l'écoulement de l'air lorsque ce dernier s'adapte à la complexité de la surface urbaine, ce qui influence la dispersion des polluants atmosphériques, la formation des nuages en général et le cycle de l'eau en particulier.

2. Des risques composites définis par le changement climatique et le climat urbain

Vis-à-vis du changement climatique en cours à l'échelle planétaire, les villes ont un double rôle. Un rôle actif d'aggravation car, en accueillant plus de la moitié de la population mondiale et en polarisant l'activité économique, elles concentrent les fortes émissions de gaz à effet de serre (GES). Mais les espaces urbanisés ont aussi un rôle passif. Elles subissent les modifications directes du climat régional qui se présentent à différentes échelles spatiales et temporelles. C'est le cas de la hausse généralisée des températures et du niveau de la mer, de la modification du régime de pluies ou encore de l'intensification des événements extrêmes (vagues de chaleur, tempêtes, cyclones) (IPCC, 2019).

Une telle situation appelle des politiques d'adaptation aux impacts attendus du changement climatique mais aussi des politiques d'atténuation de l'impact des zones urbaines sur l'atmosphère. Ces politiques recourent le champ de l'urbanisme opérationnel et celui de la gestion des risques. Elles agissent autant sur la matérialité physique (artificialisation du sol, structure tridimensionnelle des espaces bâtis) que sur la réduction de la vulnérabilité des populations et des activités économiques au moyen de systèmes d'alerte précoce ou de campagnes d'information (**Tableau 1**). Les villes peuvent ainsi également jouer un rôle important d'atténuation et sont des terrains d'application pour de nombreuses politiques en lien avec la gestion climatique aux échelles locales et globales.

³ Depuis celle de la rue, par exemple pour la turbulence, jusqu'à l'échelle urbaine, voire même régionale, pour certains phénomènes comme le transport de contaminants atmosphériques ou de chaleur.

| Objectifs | Leviers d'action |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Accroître la part de couverts naturels et réduire les surfaces imperméables | <ul style="list-style-type: none"> • Implantation de surfaces en eau, de sols perméables et de végétation |
| <ul style="list-style-type: none"> • Réduire l'impact de l'ensoleillement dans les espaces intérieurs et extérieurs | <ul style="list-style-type: none"> • Maîtrise de l'extension urbaine • Systèmes d'ombrage (brise-vues, arbres de rue) • Matériaux de construction réfléchissants • Isolation thermique des bâtiments |
| <ul style="list-style-type: none"> • Optimiser la ventilation par le vent à différentes échelles spatiales | <ul style="list-style-type: none"> • Couloirs de ventilation naturels à l'échelle de la ville • Orientation des rues et bâtiments à l'échelle du quartier • Systèmes de ventilation des bâtiments (fenêtres) |
| <ul style="list-style-type: none"> • Réduire le flux de chaleur anthropique | <ul style="list-style-type: none"> • Réduction des émissions de chaleur liées aux activités industrielles, aux systèmes de climatisation, au trafic routier |
| <ul style="list-style-type: none"> • Réduire la vulnérabilité des populations, anticiper les situations à risque | <ul style="list-style-type: none"> • Plans d'alerte (Plan Canicule) • Campagne d'information et de sensibilisation • Comportements individuels |

Tableau 1. Exemple de leviers d'action face au risque de températures extrêmes en milieu urbain

La littérature scientifique portant sur la capacité d'adaptation des villes est aujourd'hui pléthorique. Une révision de la production scientifique portant sur les mesures d'adaptation à l'UHI et aux vagues de chaleur permet de dresser un panorama solide à l'issue de trente années de recherche. Ce sont la consommation d'énergie, la pollution de l'air, la température ambiante extérieure et la santé des citoyens en période estivale qui ont concentré la plupart des efforts, quel que soit le continent (Akbari et Kolokotsa 2016). Le deuxième grand axe de recherche a été le développement et l'évaluation de matériaux (toits, murs et trottoirs) pour contrer les effets de l'UHI (Pisello 2017). Les études multileviers, comparant l'effet de plusieurs mesures d'atténuation au phénomène d'UHI, sont moins courantes que les études dédiées à une seule mesure d'atténuation. Ceci peut constituer un frein à la prise de décision car la difficulté de priorisation des actions reste entière (Aleksandrowicz *et al.* 2017). Les mesures d'adaptation thermique recommandées pour les espaces extérieurs ne doivent pas se réduire à des interventions environnementales ou technologiques sur le bâti. Les ajustements comportementaux et l'adaptation psychologique doivent conjointement être considérés (Shooshtarian *et al.* 2018). Enfin, Hintz *et al.* (2018) explorent la transférabilité des solutions proposées dans la littérature pour faire face aux vagues de chaleur urbaines. La plupart des études de cas traitées concernent l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Australie. Les solutions analysées se concentrent principalement sur l'utilisation des infrastructures vertes (végétation) et bleues (eau) ou grises (construites). Les auteurs considèrent l'administration de la ville comme un élément pivot pour la mise en œuvre de solutions. Ils soulignent aussi l'importance des habitants et des autorités locales comme acteurs essentiels de l'adaptation aux vagues de chaleur urbaines.

3. Internationalisation et interdisciplinarité, deux marques de la climatologie urbaine aujourd'hui

Une revue bibliographique laisse entrevoir à quel point la climatologie urbaine est devenue à la fois un champ de recherche profondément internationalisé et interdisciplinaire.

Même si la diffusion des connaissances au sein de la sphère de la recherche prend du temps, on constate qu'un certain degré de cohésion et de maturité est actuellement atteint. Historiquement, la circulation des connaissances a reposé sur des réunions organisées sous les auspices de grands réseaux internationaux tels que l'Organisation météorologique mondiale (OMM), la Confédération internationale du bâtiment (CIB), la Fédération internationale du logement et de l'aménagement (IFHP), la Société internationale de biométéorologie (ISB), l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et, plus récemment, l'Association internationale du climat urbain (IAUC).

Hebbert et Mackillop (2013) ont fidèlement restitué la diffusion de ces connaissances qui débute à la fin des années 1950, à Davos, avec un groupe de travail international sur la climatologie urbaine impliquant l'IFHP, l'ISB et la CIB. Ce groupe continue d'exister, mais c'est l'IAUC qui a pris la main en organisant un cycle de conférences trisannuelles et en structurant les réseaux de recherche à l'échelle internationale. Le succès de cette collaboration internationale de la recherche, de l'échange de connaissances et des réseaux qui en découlent s'explique par le fait que des personnalités clés de la recherche sur le climat urbain ont participé à ces structures internationales à divers titres. Aujourd'hui encore, certains membres de l'IAUC sont fortement impliqués dans l'OMM ou l'ISB.

S'il est courant de se référer au travail de L. Howard sur Londres au début du XIX^e siècle et plus tard au canadien T.R. Oke en tant que pionnier du domaine à partir des années 1970, la recherche décrivant les conditions atmosphériques dans les zones urbaines s'est accélérée au cours des années 2010, tirant parti du développement de nouvelles technologies de modélisation numérique et attirant un nombre croissant de scientifiques de différentes disciplines, partout dans le monde. Les chercheurs en géographie physique et en physique atmosphérique avaient dans un premier temps largement investi la climatologie urbaine en orientant la recherche vers l'environnement extérieur urbain tandis que les architectes se concentraient généralement plus sur l'étude des conditions microclimatiques à l'intérieur des bâtiments. Ces travaux concernaient à la fois l'impact du développement urbain sur l'atmosphère et la réponse des populations au climat urbain produit. Les échelles spatiales couvertes vont de celle du bâtiment ou de la rue jusqu'à celle de la ville.

Un élargissement thématique progressif a eu lieu ces dernières années, enrichissant le domaine de recherche en associant notamment des spécialistes de pollution atmosphérique urbaine, d'hydrologie urbaine, de microclimatologie à l'échelle des bâtiments, de végétation urbaine et d'urbanisme (Oke *et al.* 2017). La notion d'anthropocène est pratiquement inexistante dans cette littérature et se présente comme le contexte, « le décor de fond » des travaux souvent à caractère très technique (comme par exemple en Ching, 2018 dont l'article s'intitule « *World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT), an urban weather, climate and environmental modeling infrastructure for the Anthropocene* »). Plus largement néanmoins on trouve ponctuellement, parmi les études urbaines, des réflexions mobilisant moment anthropocène et phénomènes atmosphériques au travers des ambiances urbaines et de leur registre sensible (Thibaud 2018).

Chapitre 1 : Rendre opérationnel le savoir en climatologie urbaine, un enjeu d'actualité

1. Articuler production de connaissances et besoins opérationnels

1.1 Un intérêt ancien mais ténu, allant croissant

Les chercheurs en climatologie urbaine ont fait des progrès significatifs dans la compréhension des liens entre l'extrême hétérogénéité spatiale de la surface urbaine, et les changements dans l'atmosphère sus-jacente appelée *couche limite urbaine*. Des lacunes importantes subsistent dans la compréhension des processus physiques, mais la communauté reconnaît généralement que le défi majeur du moment consiste à articuler les connaissances acquises et la prise de décision dans le domaine de l'urbanisme.

Des efforts dans ce sens ont commencé très tôt, comme en témoigne le livre de Kassner et Vortrage, *Les bases météorologiques de l'urbanisme*, publié en allemand en 1910. Hebbert et MacKillop incluent par ailleurs une revue complète d'études de climatologie urbaine appliquée au domaine de l'urbanisme dans leur publication de 2013. Mais il existe des initiatives plus récentes au sein de la communauté internationale de chercheurs.

La *Conférence internationale en climatologie urbaine* de 2012 (ICUC8, Dublin, Irlande) a inclus une session plénière sur les études appliquées. En 2015, lors de l'ICUC9 (Toulouse, France), il a été clairement décidé de se concentrer « sur les activités scientifiques récentes sur l'atténuation et l'adaptation au changement climatique en milieu urbain, ainsi que sur le transfert aux acteurs de la planification et l'aménagement urbains ». Cela dit, le succès de sessions telles que le « transfert des connaissances sur le climat urbain aux urbanistes » ou la « conception urbaine avec le climat » est allé de concert avec une conception verticale du transfert de l'information, de la sphère académique vers la sphère opérationnelle. L'ICUC10 tenue en 2018 à New York a consolidé le dynamisme des études appliquées en proposant de nombreuses séances sur l'urbanisme et la gouvernance, le confort et les études d'impact. On relève enfin qu'un plus grand nombre de travaux impliquent les acteurs de terrain, ou sont coconstruits avec eux, attestant d'une certaine tendance à valoriser la recherche-action.

1.2 Quelques obstacles à cette articulation

Il existe quantité de recherches sur le climat urbain. Elles portent sur l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain, la gestion du vent, de la pluie et de la neige ou sur l'utilisation des espaces verts pour améliorer qualité de l'air et le confort. Néanmoins, l'application des connaissances scientifiques à la conception urbaine ne s'est pas faite sans obstacle. Font figure d'exception les pays germanophones, où plusieurs expériences existent (de (Horsfall 1904) et (Kratzer 1937) à (Stock et Beckröge 1985) ; (Stock 1992) et (Baumüller 2005), pour n'en citer que quelques-unes), et dans une moindre mesure Israël (Goldreich 2003) ou le Japon (Kusaka 2008 ; Tanaka *et al.* 2009). Hebbert et Mackillop (2013) ont souligné les obstacles possibles à l'intégration entre connaissances climatiques et échelle opérationnelle. Ils les répartissent en deux catégories. La première se réfère aux tendances dans les pratiques d'urbanisme, la deuxième aux modes de production des connaissances atmosphériques.

Concernant l'urbanisme, deux aspects clés sont mis en avant par les auteurs :

- le modernisme⁴ a constitué le mouvement dominant de la production urbaine au xx^e siècle. Les styles d'architecture et d'aménagement urbain qui lui sont liés, mettent davantage l'accent sur l'échelle du bâtiment. Les espaces extérieurs ne sont considérés que d'un point de vue paysager, négligeant ainsi l'analyse climatique ;
- entre les années 1950 et 1970, le déterminisme environnemental a fait place au constructivisme environnemental, entraînant un déclin de l'intérêt pour l'impact de la conception sur l'environnement physique.

⁴ L'historiographie architecturale date l'émergence d'un « urbanisme moderniste » qui a atteint son apogée dans les années vingt et trente du XX^e siècle. Monclús J., Díez Medina C. (2018) Modern Urban Planning and Modernist Urbanism (1930–1950). In: Díez Medina C., Monclús J. (eds) Urban Visions. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59047-9_4

- Concernant la production de connaissances atmosphériques, c'est la déconnexion entre services météorologiques nationaux – qui produisent les données et les analyses atmosphériques – et les professions de l'aménagement du territoire qui est soulignée :
 - les mesures atmosphériques nécessitent des réseaux d'observation coûteux à construire et à entretenir. Ces réseaux sont dépendants des services météorologiques nationaux, seules structures à disposer de moyens économiques et techniques adéquats. Or les principaux services météorologiques nationaux sont moins tournés vers l'urbain que vers l'aviation, l'agriculture, les prévisions météorologiques et la défense nationale. Pour beaucoup, les données météorologiques ont été historiquement collectées en dehors des zones urbanisées. Dans les zones urbaines, la complexité de l'atmosphère est telle que des observations spécifiques sur site et des réseaux de mesures à haute densité sont nécessaires ;
 - l'essor de la modélisation numérique au cours des dernières décennies renforce le caractère centralisé de la production de connaissances atmosphériques par les services météorologiques nationaux et internationaux.

À tous ces obstacles à la circulation et à l'application de l'information, on peut ajouter la spécificité de résultats de recherche en climatologie urbaine, propres à chaque terrain d'étude, qui rend difficile la montée en généralité. Cette dernière se pose moins en termes d'actions, car celles-ci émergent de contextes très différents, des besoins du terrain et de l'identité des décideurs, qu'en termes de méthodes et d'outils.

La recherche s'efforce désormais de transcender les études de cas et de développer des méthodes de production normalisée de données atmosphériques ou urbaines, de représentation, d'analyse. Des efforts considérables ont été déployés sur les protocoles d'étude de l'impact des villes sur la thermodynamique et la composition atmosphérique (WMO 2017). Une riche littérature existe également autour des mesures atmosphériques dans les zones urbaines et de la modélisation à diverses échelles réalisées sur la base de modélisations numériques, expérimentales et théoriques (Dabberdt *et al.* 2004 ; Kanda 2006 ; Masson 2006 ; Barlow 2014).

L'intégration des connaissances climatiques et des connaissances en planification territoriale à des fins opérationnelles présente deux défis majeurs : comparer les études et les analyses climatiques produites et étendre à différents contextes les outils et méthodes développés jusque-là principalement au Nord. L'utilisation (et la mise à l'épreuve) des outils d'observation, de modélisation et de formalisation – souvent sous forme cartographique – est un défi de taille dans le cadre de la forte urbanisation de pays en voie de développement (Mhedbhi, 2021).

1.3 La mise en agenda du changement climatique, une fenêtre d'opportunité pour lever certains obstacles

La nature laborieuse et coûteuse des études climatiques à l'échelle locale est aujourd'hui réduite grâce au développement progressif de capteurs légers ou de bases de données urbaines ouvertes permettant une cartographie à haute résolution, et grâce aux plateformes SIG, qu'il est possible de relier à des modèles de simulation statistiques multiscalaires ou de modélisation physique. Les données collaboratives pénètrent également fortement la recherche sur le climat urbain, diminuant le manque de mesures atmosphériques évoquées précédemment (Chapman 2015).

Mais la prise en compte de la climatologie urbaine appliquée dans la conception et la planification urbaines doit surtout être reliée à la montée en puissance de la prise de conscience du changement climatique anthropique dans l'opinion publique et politique (Bulkeley et Betsill 2003), notamment au cours de la dernière décennie.

Les deux rapports « Cities and Climate Change » publiés en 2011 par les Nations Unies et le *Urban Climate Change Research Network* (UN 2011 ; UCCRN 2011) mettent en avant le rôle que les villes devraient jouer dans les années à venir pour atténuer le changement climatique et s'y adapter. Ces initiatives ont joué un rôle majeur en plaçant les questions climatiques urbaines dans l'agenda local, national et international. C'est le moment de l'émergence de réseaux de villes engagées dans la lutte contre le changement climatique, aux niveaux international et national. Le C40 fondé en 2010, qui comprend désormais une centaine de villes. L'ICLEI (*Local Governments for Sustainability*) et le *Global Cool Cities Alliance* ont aussi vu le jour.

L'évolution du climat à l'échelle planétaire devient ainsi une fenêtre d'opportunité pour transférer les connaissances climatiques à l'échelle locale, via une forte évolution du cadre réglementaire. Atténuation⁵ comme adaptation⁶ deviennent des objectifs explicites des plans locaux d'urbanisme dans bon nombre de pays occidentaux. En outre, se multiplient des outils dédiés, de type « Plan Climat », qui établissent un diagnostic et des actions au travers des volets atténuation et adaptation au changement climatique (Reckien *et al.* 2019 ; Grafakos *et al.* 2020). À ces outils spécifiques s'ajoute enfin une myriade de chartes et plans à caractère environnemental, qui servent de référence même s'ils ne sont qu'incitatifs (Lambert Habib *et al.* 2013).

2. Des outils pour faciliter la gestion et les applications

2.1 Les grandes lignes d'un horizon de recherche appliquée

Trois chantiers de recherche concentrent actuellement les efforts des climatologues urbains (Hidalgo *et al.* 2019) : la production de données urbaines, les méthodes d'analyse et les indicateurs d'impact, et les méthodes et outils pour faciliter l'articulation entre savoirs climatiques et urbanistiques.

Une description adéquate des villes est nécessaire à toutes les étapes du processus d'étude du climat urbain et d'évaluation des stratégies d'adaptation au changement climatique. Cette description de la surface urbaine tournée vers les études climatiques rencontre des problèmes liés à l'échelle spatiale et à la nature des données. L'émergence d'une classification typologique de la surface urbaine permet une certaine standardisation de cette description. Cette typologie définit des zones climatiques locales (*Local Climate Zones* en anglais) (*Figure 2*, Stewart et Oke 2012) en fonction notamment de l'occupation du sol, de la densité et de la hauteur du bâti ainsi que de leur fonction.

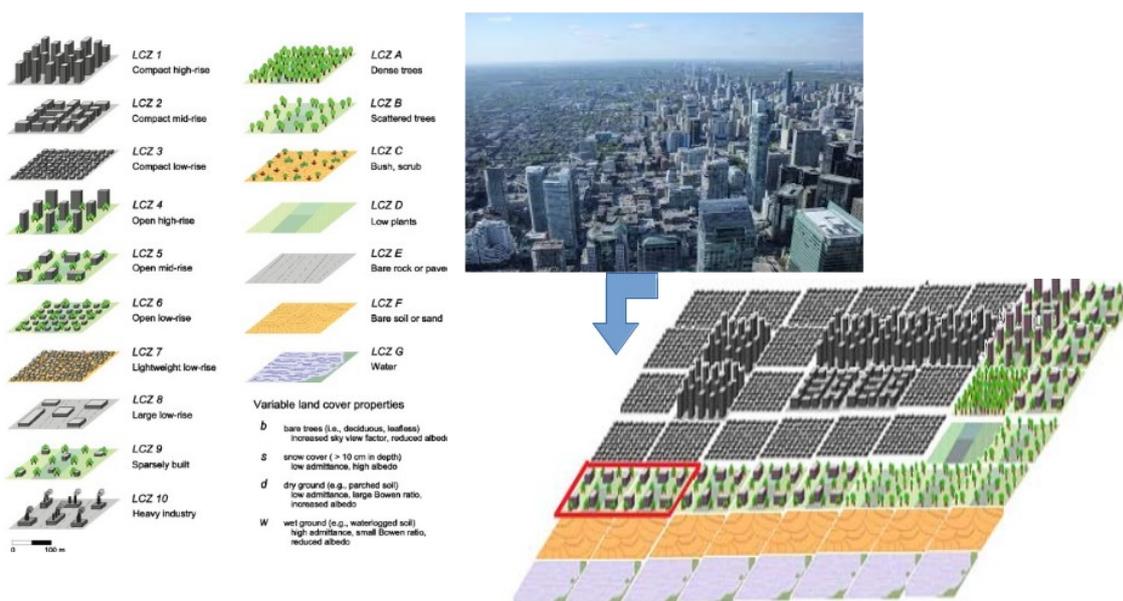


Figure 2. Types de zones climatiques locales définies par Stewart and Oke (2012)

⁵ L'atténuation du changement climatique consiste à réduire, par des processus naturels ou des moyens technologiques, la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

⁶ L'adaptation concerne la réduction des risques et des impacts des effets néfastes du changement climatique (tempêtes, inondations, sécheresse,...).

Une initiative internationale pilotée par l'IAUC, appelée WUDAPT (*World Urban Database and Access Portal Tools*)⁷, vise à produire des cartes de la plupart des grandes villes du monde selon cette norme. Cette approche conceptuelle, en plus de servir à l'analyse microclimatique et aux simulations numériques, s'est avérée efficace pour faire dialoguer climatologues et praticiens de la ville, l'approche typologique étant couramment utilisée dans les études d'urbanisme et d'architecture. Les méthodes d'analyse et de production d'indicateurs d'impact pour planifier et évaluer les stratégies d'adaptation comme d'atténuation manquent encore d'unicité. La difficulté provient de la nature complexe du fonctionnement urbain, et donc des différents aspects qui doivent être pris en compte simultanément, pour fournir des informations systémiques et pertinentes au domaine de l'urbanisme. Cela nécessite des analyses interdisciplinaires et transversales, qui butent toujours sur les spécificités microclimatiques, réglementaires et de gouvernance locale, complexifiant d'autant la construction de pratiques communes. Les chercheurs s'efforcent de définir des indicateurs multicritères (liés au climat urbain, à la consommation d'énergie, au bien-être de la population, aux ressources en eau) qui peuvent ensuite être évalués, par exemple à travers des observations et mesures, ou des modélisations qui permettent d'explorer le moment présent ou de faire de la prospective. Ces approches quantitatives manquent pour l'instant d'un certain recul critique sur leur capacité à fournir une vision systémique des enjeux. Par exemple comment prendre la mesure des aspects intangibles telles que les questions de confort et bien-être ; pour lesquelles les aspects climatiques sont une entrée parmi d'autres ?

Enfin, la base de données bibliographiques de l'IAUC montre que les travaux tournés vers l'articulation entre connaissances du climat local et opérations d'aménagement ou de développement urbain, bien qu'en vogue, restent encore marginaux dans cette communauté. Seule une soixantaine d'articles a été publiée dans des revues internationales entre 2015 et 2019 alors que la production scientifique générale en climatologie urbaine est d'environ 3 000 articles sur cette période.

2.2 Multiplication des efforts d'intégration entre savoirs climatiques et urbanistiques

D'un point de vue rétrospectif, les premiers efforts ont porté sur l'adaptation des méthodes couramment utilisées dans l'étude de la climatologie urbaine (autour des outils de modélisation ou de la cartographie) pour répondre aux besoins des utilisateurs finaux et faciliter la communication vers la prise de décision. Depuis, le panel des ressources mobilisées s'est élargi, en provenance notamment des sciences humaines et sociales, comme avec les enquêtes et les entretiens ou l'analyse de la littérature grise (rapports institutionnels, livres blancs, rapports publiés par des organisations non gouvernementales).

Les enquêtes sont par exemple mobilisées pour qualifier les vulnérabilités existantes et futures à Istanbul (Onur et Tezer 2015). Živojinović et Wolfslehner (2015) ont utilisé des entretiens pour mieux comprendre le rôle de la prise de décision pour le reboisement de Belgrade. Cet article évalue les perceptions que les acteurs de la gestion des forêts urbaines ont à l'égard de l'adaptation au changement climatique. Trois types ont alors émergé : les « sceptiques », qui estiment que les variations climatiques sont normales et qu'il n'y a pas suffisamment de preuves de l'existence du changement climatique ; les « gestionnaires », qui plaident pour plus d'initiatives ascendantes et l'amélioration d'un dialogue entre les parties prenantes ; enfin, les tenants d'une « sensibilisation générale » qui estiment que la question du changement climatique doit être régie par les organisations nationales. Mason et Fragkias (2018) ont utilisé les modèles mentaux sur les membres d'organisations (en anglais *organization members' mental models*) pour étudier le potentiel des membres des organisations de planification métropolitaine à peser sur l'action et les politiques publiques en matière de changement climatique. Les méthodes citées sont un bon exemple de la manière dont l'interdisciplinarité peut aider à comprendre le manque de coordination et de communication entre les parties prenantes, les besoins de données techniques et scientifiques à l'échelle locale, de réglementation et de moyens financiers spécifiques.

Les sciences humaines et sociales ont également contribué au débat sur les questions d'équité, de vulnérabilité sociale et d'influence des facteurs non climatiques sur la vulnérabilité (Archer et Dodman 2015 ; Ryan 2015 ; Alonso et

⁷ www.wudapt.org/ [Consulté le 15 juin 2020]

Renard 2020). Des approches systémiques à partir de la gouvernance ont été explorées. Hatvani-Kovacs *et al.* (2018) recommandent des mesures politiques intégrées visant à accroître la résilience au stress thermique des populations urbaines dans les villes australiennes.

Pour faciliter la transdisciplinarité⁸, et réduire les impacts négatifs des vagues de chaleur sur la santé publique, les infrastructures urbaines et les services, la modélisation des systèmes socio-environnementaux s'est développé. Kraucunas *et al.* (2015) proposent par exemple une plateforme pour la modélisation et l'analyse intégrées régionales (appelée PRIMA). Elle permet de simuler les interactions entre le climat régional, l'hydrologie, l'agriculture et l'usage du sol d'une part, et les systèmes humains, socio-économiques et énergétiques d'autre part, à des échelles pertinentes pour la décision. La plateforme peut être personnalisée en fonction de spécificités liées au contexte (politique, climatique, institutionnel).

En parallèle, on assiste au développement des services climatiques dans toutes leurs dimensions. L'Organisation mondiale de la météorologie a récemment publié les « Conseils pour des services hydrométéorologiques, environnementaux et climatiques urbains intégrés »⁹ (WMO 2019). Il s'agit des résultats préliminaires d'une action qui vise à développer des « Services climatiques » à l'échelle urbaine. Elle complète les quatre actions en cours (agriculture, santé, prévention des catastrophes et eau) du Cadre mondial pour les services climatiques (en anglais *Global Framework for Climate Services*, GFCS), dont l'objectif est de « renforcer la production, la disponibilité, la fourniture et l'application de prévisions et de services climatologiques fondés sur la science ». Le GFCS a été signé par 155 pays lors de la *Conférence mondiale sur le climat-III* en 2009.

Enfin, des outils cartographiques comme les « cartes climatiques pour la planification urbaine » sont utilisés, à la fois pour l'analyse du climat à l'échelle locale (Ng et Ren 2015) et comme objets intermédiaires (Hidalgo *et al.* 2019) qui facilitent la communication et la coproduction de connaissances climatiques et urbanistiques, depuis le diagnostic environnemental jusqu'au projet urbain.

2.3 Un point sur les outils cartographiques

Historiquement, la communauté de recherche germanophone est pionnière dans les études de climatologie urbaine appliquée, études systématisées depuis la première moitié du xx^e siècle. Leurs techniques de cartographie des distributions thermiques, de couloirs de ventilation et de concentration de pollution de l'air, combinant des informations météorologiques et climatiques avec des données d'occupation du sol et de topographie, ont l'avantage de répondre aux besoins des pratiques en urbanisme. La caractérisation et la représentation cartographique de l'environnement urbain constituent désormais une étape incontournable des exercices de planification et d'aménagement. Elle permet de mettre en valeur les aménités environnementales du territoire, ou d'identifier et localiser les nuisances et les risques environnementaux en lien avec des éléments aussi divers que l'eau, le bruit, la végétation, la biodiversité ou la qualité de l'air.

En Allemagne, la cartographie climatique à fine échelle commence dans les années 1970 avec le « Livret sur le climat pour les développements urbains » (1977) à Stuttgart. Elle se poursuit avec le « Klima Atlas » publié en 1992. La méthodologie du « Klima Atlas » de Stuttgart a fait l'objet d'une directive allemande, la norme VDI3787 intitulée « Cartes du climat et de la pollution atmosphérique pour les villes et les régions », publiée en 1993 et mise à jour en 2015. Cette directive a été publiée en allemand et en anglais, ce qui a facilité sa circulation en Europe, en Asie et en Amérique du Sud pour l'essentiel.

Ces dernières années, les cartes climatiques pour la planification urbaine sont devenues un outil de référence pour la traduction des connaissances microclimatiques dans les directives et recommandations de planification. Différents noms sont utilisés selon le pays et l'échelle d'action, mais dans la littérature anglophone, la dénomination

⁸ comprise ici comme la coopération entre communautés scientifiques et non scientifiques pour la production de connaissances nouvelles orientées vers l'action.

⁹ https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9903 [Consulté le 15 juin 2020].

Urban Climatic Maps (UC-Map) domine. Les choix techniques pour la production des cartes dépendent des caractéristiques climatologiques locales, des données disponibles sur la morphologie urbaine et le climat, et du contexte scientifique et culturel des acteurs (chercheurs et parties prenantes) impliqués dans le projet. Les données climatiques peuvent être obtenues par des mesures physiques (réseau météorologique permanent, campagnes de terrain ou par télédétection) ou issues d'une modélisation statistique ou physique à l'aide d'un modèle atmosphérique. La gestion et représentation de ces données se font généralement à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG).

Ce set de cartes représente à la fois un outil de diagnostic microclimatique du territoire urbain et un levier potentiel de traduction réglementaire ultérieure des enjeux identifiés. Cet outil présente deux niveaux d'information :

- le premier est celui du diagnostic microclimatique qui rassemble des informations sur la météorologie, l'occupation des sols, la topographie et la végétation. Les interrelations entre ces éléments et leurs effets sur les vents et le confort thermique sont analysés et évalués spatialement. Ce diagnostic est fondé sur un ensemble de cartes, appelées couramment « cartes d'analyse » (*Figure 3*), et croisé avec des éléments de planification (trame verte et bleue, zonage) ; les cartes d'analyse conduisent à identifier un certain nombre de zones à enjeux d'un point de vue :
 - ✓ thermique (typologies des zones urbaines en fonction de leur densité ou structure urbaine, espaces thermorégulateurs comme les masses d'eau et de végétation, zones commerciales et/ou d'activités souvent très minéralisées et massivement climatisées) ;
 - ✓ aéraulique (les couloirs de vent prédominants, les zones génératrices de brises de pente, les zones de production d'air frais – végétation, eau – ou chaud – très minéralisées ou fortement climatisées – et les zones qui font obstacle au vent) ;
- le deuxième niveau d'information est retranscrit *via* une « carte de recommandations ». Il permet une traduction des orientations stratégiques générales et pratiques en matière d'urbanisme pour améliorer l'environnement thermique et éolien. Il est issu des cartes d'analyse, mais aussi des contraintes urbanistiques et socioculturelles.

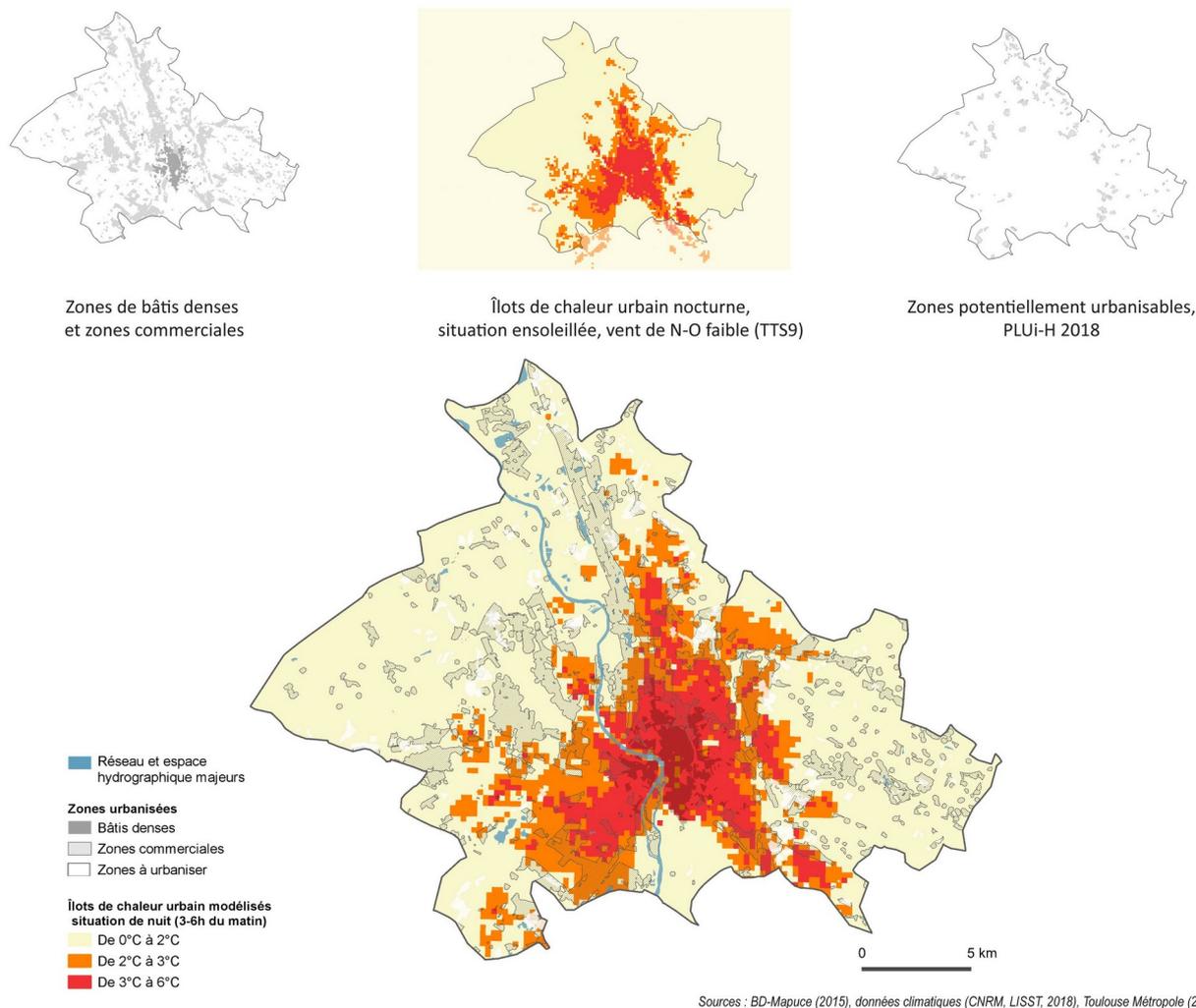


Figure 3. Exemple de carte d'analyse pour l'îlot de chaleur urbain à Toulouse (source : BD-Mapuce (2015), données climatiques (CNRM, LISST, 2018), Toulouse Métropole (2018), conception cartographique : N. Touati, J. Hidalgo, LISST (2020))

À l'échelle mondiale, comparé au nombre de villes, l'utilisation de ces cartographies reste faible (**Figure 4**). On compte encore moins de cas pour lesquels la traduction des recommandations d'urbanisme dérivées du diagnostic climatique s'applique effectivement, au niveau opérationnel, dans le zonage des sols, les codes de conception ou la gestion des espaces verts et la gestion de l'eau.

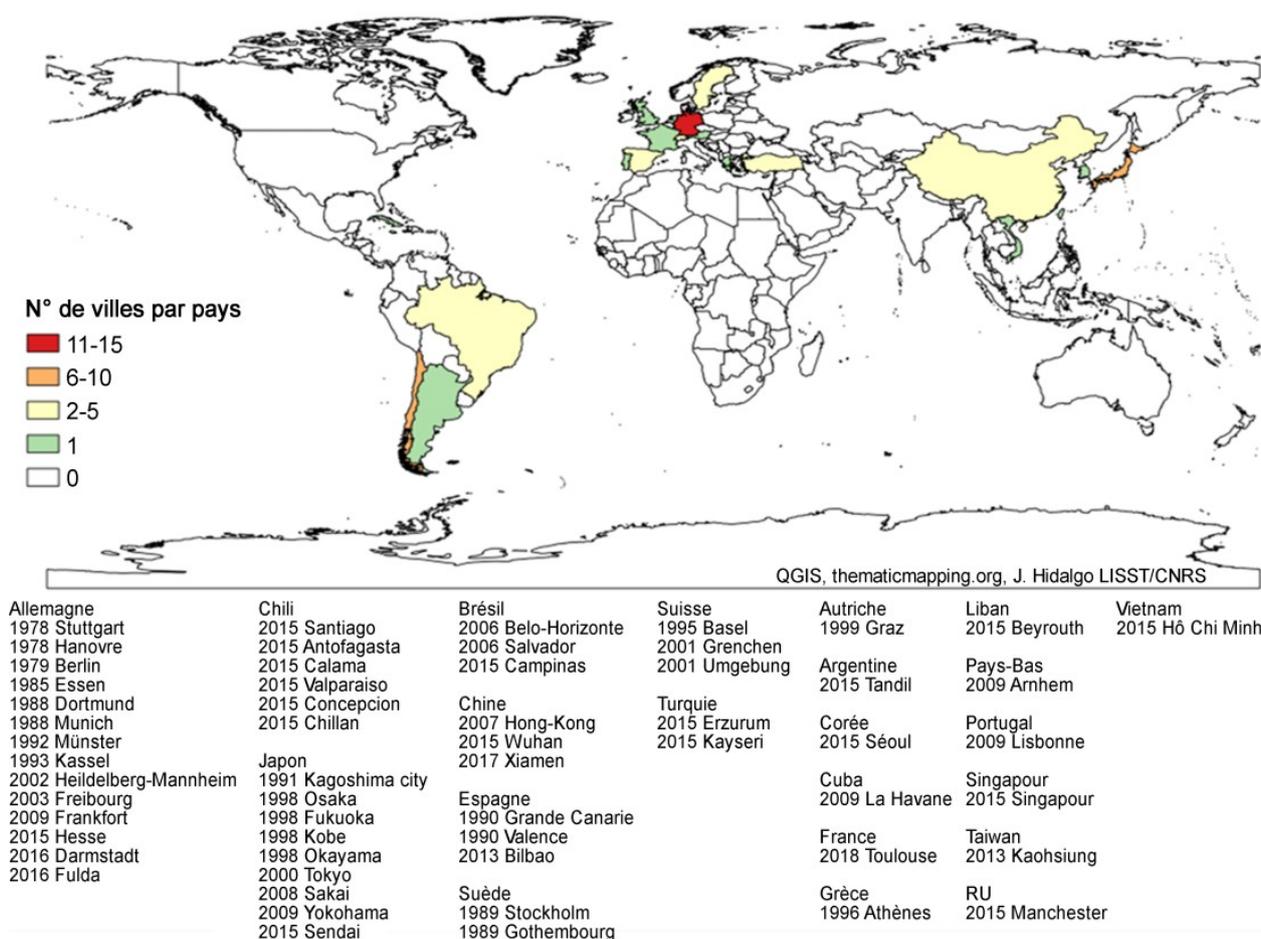


Figure 4. Application de cartes climatiques dans la planification urbaine (d'après (Hidalgo et al. 2019)). Les couleurs indiquent le nombre de villes par pays qui ont mené des études en s'inspirant de cette lignée de travaux cartographiques. Le tableau correspond à la date de la première étude publiée pour chaque ville

3. Les difficultés de l'opérationnalisation du savoir autour du risque climatique urbain

Étant donné que la base scientifique et les outils techniques pour le diagnostic climatique local existent, pourquoi les informations climatiques sont-elles transférées avec succès vers l'action à certains lieux et pas à d'autres ?

3.1 L'échelle d'intervention

À l'échelle urbaine, la gouvernance climatique est multi-niveau. Elle est organisée au travers d'institutions, qui établissent des cadres réglementaires aux échelles municipale, régionale et nationale, mais elle s'opère aussi à travers des interventions conçues et mises en œuvre par des acteurs non étatiques, comme les entreprises, les organisations non gouvernementales et la société civile.

Aylett (2015) a analysé les structures de gouvernance institutionnelle mises en place par les gouvernements locaux pour trois cent cinquante municipalités sur les cinq continents. Pour le volet adaptation, les résultats montrent une intégration plutôt transversale ou indirecte dans des plans de gestion territoriale de long terme et sectoriels car ce volet ne s'intègre pas parfaitement dans les silos institutionnels. De nombreux secteurs municipaux stratégiques (comme ceux responsables de l'eau, des eaux usées, de la santé et de la réglementation urbaine) restent alors en marge des efforts d'adaptation. Le niveau d'exhaustivité dans les politiques liées au climat est souvent corrélé aux liens qui

existent entre chercheurs, ONG (organisations non gouvernementales) et acteurs de la sphère opérationnelle (Lee et Painter 2015). En Australie, Graham et Mitchell (2016) analysent comment les partenariats entre urbanistes et organisations frontalières influencent la planification de l'adaptation. La diffusion de connaissances et l'ouverture du débat à des acteurs et des organisations, qui agissent aux frontières des différents univers sociaux en présence (décideurs, techniciens, habitants), permettent d'étendre le champ d'application des politiques liées au climat.

Sans négliger la coordination avec d'autres échelles nationales ou régionales, la décentralisation peut renforcer les capacités d'adaptation des villes par la redistribution des compétences budgétaires, politiques et administratives des gouvernements centralisés vers les gouvernements locaux. C'est ce que pointent notamment Moloney et Fanfgeld (2015) et Rumbach (2016).

Enfin, l'agenda intitulé « Global Research and Action Agenda on Cities and Climate Change Science » proposé par la communauté académique à l'issue de la conférence IPCC *Cities and Climate Change* d'Edmonton (2018), met l'accent sur trois autres points clés qui illustrent parfaitement la complexité de la prise en compte des enjeux climatiques à l'échelle locale. Il s'agit de l'asymétrie entre la capacité de gouvernance des villes du Sud et celles du Nord, des temporalités différentes entre les actions envisageables et le contexte de leur évaluation, et de l'importance des interactions entre échelles spatiales et temporelles. L'effectivité des actions à l'échelle locale dépend de décisions prises à d'autres échelons territoriaux.

3.2 Le poids de la segmentation disciplinaire, entre recherche et action

La segmentation disciplinaire est une autre difficulté sur le chemin de l'opérationnalisation des recherches sur le climat urbain. Des études ont pu être commandées par des praticiens, notamment pour des raisons de santé en lien avec la qualité de l'air, mais pour l'essentiel les projets de climatologie urbaine sont promus et financés par les producteurs de connaissances et données climatiques, universitaires ou des services météorologiques nationaux.

Météo-France a par exemple été à l'origine du premier modèle de simulation atmosphérique avec une représentation physique des surfaces urbaines au début des années 2000 (Masson 2000), afin d'améliorer son système de prévision météorologique. Ce développement a permis ensuite d'initier la modélisation en climatologie urbaine. Au départ, la ville était pour les physiciens de l'atmosphère un milieu physique parmi d'autres (forêt, lac, océan). Les modèles de climat urbain ont été initialement conçus pour calculer l'impact de l'environnement bâti sur les variables météorologiques. Au fil du temps et de l'augmentation de la puissance de calcul, ils ont gagné en finesse de représentation, par exemple pour la végétation urbaine en interaction avec les éléments bâtis, pour les échanges d'eau entre l'atmosphère, la surface et le sol, ainsi que pour l'énergétique du bâtiment. Les tendances démographiques, l'expansion urbaine, ou encore l'évolution architecturale peuvent également être prises en compte dans les modélisations, sur la base de collaborations avec des économistes, des géographes, des architectes ou des urbanistes (Masson *et al.* 2014).

L'interdisciplinarité s'opère surtout par l'intégration des méthodes, des modèles et des données provenant de disciplines qui ont historiquement investi ce champ de recherche : les physiciens de l'atmosphère, les géographes spécialistes du climat et les architectes. À la marge, on trouve l'investissement plus récent de chercheurs en géographie sociale et en aménagement, ou en épidémiologie. La pratique de la transdisciplinarité reste très récente du fait du très fort poids de la recherche dans la proposition des projets. Elle apparaît néanmoins comme une tendance claire des dernières années (*Figure 5*).

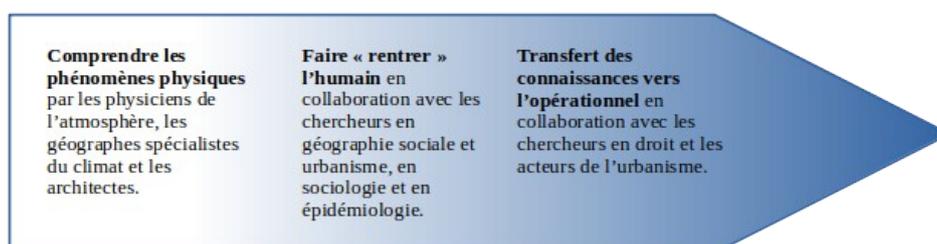


Figure 5. Illustration de l'évolution disciplinaire de l'objet d'étude climat urbain avec une référence non exhaustive aux disciplines impliquées.

Quelques études ont récemment abordé les questions d'interdisciplinarité et transdisciplinarité. Groot *et al.* (2015) soulignent à travers le cas de Rotterdam les défis que la relative nouveauté de l'adaptation urbaine au changement climatique pose pour les scientifiques et les parties prenantes impliquées. Sarzynski (2015) et Fagan-Watson et Burchell (2016) révèlent que le rôle de la participation publique dans de tels efforts d'intégration transdisciplinaire reste mal théorisé et sous-étudié. Dans la première étude, six formes de participation à l'adaptation urbaine sont identifiées à partir de la littérature et les caractéristiques et l'utilisation de chaque type sont examinées. Dans la seconde étude, les auteurs soulignent que les documents de politique régionale et nationale qui prévoient les actions face aux vagues de chaleur au Royaume-Uni ont tendance à se concentrer sur les réponses institutionnelles d'urgence et le développement des infrastructures. Dans ces documents, bien que les communautés soient mentionnées, elles apparaissent comme les bénéficiaires passifs d'une résilience produite dans une démarche *top-down* par les institutions.

3.3 Les vertus des processus ascendants : montée en compétences et diffusion interservices

Les injonctions législatives et réglementaires que subissent les services en charge de la planification territoriale peuvent s'avérer fastidieuses en s'ajoutant aux divers thèmes environnementaux déjà traités (biodiversité, qualité de l'air, bruit). On observe néanmoins que les expériences réussies de gestion du climat urbain comportent deux ingrédients clés (Lopez *et al.* 2015 ; Webb 2017) : une équipe de recherche locale, poussée à l'extrême à Stuttgart avec la présence de climatologues urbains en interne, et un long processus de collaboration et d'acculturation entre chercheurs et praticiens. Les progrès de la recherche en climatologie urbaine semblent effectivement stimulés par les collaborations et les réseaux internationaux ainsi que par la réglementation nationale. Mais la transmission d'informations et la mise en œuvre efficaces se font plutôt de bas en haut. Cela ne signifie pas que les objectifs fixés par le gouvernement national ne sont pas un moyen efficace pour stimuler le développement de codes environnementaux et climatiques au niveau local (Heidrich *et al.* 2013 ; Olazabal *et al.* 2014 ; Reckien *et al.* 2014). Mais on constate plutôt le succès d'un processus ascendant et conjoint (entre chercheurs et praticiens) pour l'application de politiques spécifiques au site (parfois au-delà des seules obligations réglementaires nationales ou régionales), pour leur stabilisation et finalement leur institutionnalisation à terme. Ce fait doit être pris en compte par les services météorologiques nationaux et internationaux qui conçoivent actuellement les futurs services climatologiques à l'échelle urbaine.

En plus d'un partage efficace d'information, d'outils et de méthodes, l'internalisation des compétences et la diffusion interservices à l'échelle des villes sont nécessaires pour garantir leur autonomie dans le domaine et favoriser l'application de politiques et de réglementations spécifiques au site. Des collaborations durables entre chercheurs et praticiens permettent de passer du stade de l'étude (au travers de campagnes de mesures ou de modélisations afin d'établir des diagnostics) à celui de la mise en œuvre en passant par des étapes nécessaires d'expérimentation et formalisation (*via* les sites et opérations témoins, la mise en place d'une réglementation spécifique et/ou d'orientations).

L'expérimentation sert souvent à tester des recommandations ainsi qu'à améliorer et adapter les dispositifs d'accompagnement de la décision. Elle permet aussi la sensibilisation et l'information des services autres que celui en charge de la mise en œuvre des Plans Climat autour de notions en lien avec l'adaptation climatique. L'intelligibilité des informations et des messages qui circulent semble essentielle, tout comme la présence de personnes relais qui articulent différentes compétences et services avec finalement une certaine hybridation des profils : recherche/opérationnel, urbanisme/climatologie (Lopez *et al.* 2015 ; Hidalgo *et al.* 2018a).

4. Discussion : Rétroaction des savoirs du local vers le global

Certes, la mise en agenda du changement climatique constitue une « fenêtre d'opportunité » pour inscrire les questions de climatologie urbaine à l'agenda local. Mais les progrès techniques (évolution des outils de modélisation, de production de bases de données et de puissance de calcul) ainsi que les expériences de coconstruction des savoirs à l'échelle locale ont aussi permis à la communauté de recherche en climatologie urbaine de contribuer à la réflexion et à la production des savoirs climatiques à l'échelle planétaire.

Au titre des nouveaux développements, on peut revenir sur la base de données urbaine WUDAPT qui procure, pour un grand nombre de villes, les données urbaines nécessaires à la modélisation climatique. La modélisation du climat urbain à long terme n'a pas été prise en compte dans les exercices précédents du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) car pratiquement aucun modèle climatique régional n'a de représentation physique de la surface urbaine. Or la nouvelle génération de modèles climatiques régionaux à très haute résolution (kilométrique) couplée à des modèles urbains permettra de relier les communautés de recherche en météorologie urbaine et modélisation du changement climatique.

Il existe néanmoins des études pionnières. Daniel *et al.* (2019) utilisent un modèle régional « urbanisé » et quantifient sur 30 ans le climat urbain en France. En se centrant sur 8 grandes villes, ils montrent qu'elles induisent un réchauffement régional bien au-delà des limites des zones urbaines. Garuma *et al.* (2018) ont recours à des simulations similaires sur l'est du continent nord-américain. Ils constatent que dans les scénarios pessimistes (RCP 8.5), l'intensité de l'îlot de chaleur urbain augmente de 0,5 °C en moyenne. Mais ces simulations climatiques restent trop grossières (25 km de résolution horizontale) pour pouvoir résoudre correctement le phénomène d'îlot de chaleur urbain. D'autres méthodes existent néanmoins qui utilisent des modèles de simulation à haute résolution en lien avec des traitements statistiques, rendant les traitements plus légers d'un point de vue informatique (Kusaka *et al.* 2012 ; Hamdi *et al.* 2014 ; Hamdi *et al.* 2016).

Le GIEC a reconnu le rôle prépondérant des villes dans la réponse au changement climatique et a proposé que le septième cycle d'évaluation comprenne un « Rapport spécial sur le changement climatique et les villes ». Pour stimuler la production et l'échange de connaissances sur ce sujet, le GIEC a organisé à Edmonton en mars 2018 une conférence intitulée *Cities and Climate Change Science Conference - CitiesIPCC*, soutenue par divers réseaux et associations internationales (C40, Cities Alliance, ICLEI-Local Governments for Sustainability, Future Earth, SDSN-Sustainable Development Solutions Network, CGLU-United Cities and Local Governments, ONU-Habitat, ONU-Environnement et le WCRP-World Climate Research Programme). L'évènement a réuni des représentants du monde universitaire, des institutions scientifiques, des experts du GIEC, des représentants des gouvernements nationaux, régionaux et locaux ainsi que des praticiens.

La synthèse des contributions a permis la rédaction d'un « Global Research and Action Agenda on Cities and Climate Change Science »¹⁰. Ce document vise à orienter la recherche à venir afin de la rendre utile à « l'élaboration de politiques efficaces pour l'action climatique dans les villes ».

¹⁰ www.wcrp-climate.org/WCRP-publications/2019/GRAA-Cities-and-Climate-Change-Science-Full.pdf [Consulté le 15 juin 2020].

Menut TOME II - Volume de travaux inédits

Seules quelques sessions ont été organisées à Edmonton par des membres de l'IAUC, et très peu d'études de climatologie urbaine sont citées dans le chapitre qui concerne les zones urbaines au sein du rapport du GIEC à 1,5 °C. La recherche d'une certaine uniformité des méthodes d'analyse explique pour beaucoup une telle parcimonie. Mais cette uniformité va à l'encontre de la richesse des descriptions spatiale et temporelle nécessaires aux études de climatologie urbaine.

Se dessine alors un défi scientifique majeur dans l'avenir proche : faire progresser la production de connaissances à grande échelle qui alimentent les agendas globaux, sans renoncer à la haute résolution spatiale ni aux spécificités qui caractérisent les enjeux climatiques locaux.

Synthèse de la PARTIE I

L'intention de la partie I

Cette première partie avait pour objectif de présenter la mise en agenda politique et surtout scientifique des recherches en climatologie urbaine appliquée à l'urbanisme opérationnel. Ici l'échelle d'analyse était l'échelle internationale et ce texte (légèrement remanié) correspond à la version française d'un chapitre de livre en cours de publication coordonné par Julien Rebotier pour l'éditorial ISTE Sciences intitulé *Les risques et l'anthropocène. Regards alternatifs sur l'urgence environnementale*.

Les moyens mis en oeuvre

Ce travail a nécessité une vision large de l'état de l'art des recherches internationales dans ma discipline d'origine et de ses évolutions historiques. Pour cela j'ai d'abord écrit deux articles généralistes (Masson et al. 2020 et Hidalgo et al., 2019) qui font l'état des recherches en climatologie urbaine actuelles.

Les ressources liées à mon travail pour cette Partie I sont les suivantes :

- ✓ **2022 Hidalgo J.** Urban climate: agenda and perspectives of a climate risk. Chap.3 Risks and the Anthropocene. *Alternative Views on the Environmental Emergency*. J. Rebotier coord. ISTE Sciences
 - ✓ **2020 Masson M., Lemonsu A., Hidalgo J., Voogt J.** Urban Climates and Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*¹¹, Annual Reviews, 2020, 45 (1), pp.411-444. {10.1146/annurev-environ-012320-083623}. (hal-03035343)
 - ✓ **2019 Hidalgo J., A. Lemonsu and V. Masson:** 'Between progress and obstacles in urban climate interdisciplinary studies and knowledge transfer to society', *Annals of the New York Academy of Science*¹², 1436, 5-18, doi : 10.1111/nyas.13986
<https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nyas.13986>
-

¹¹ The *Annual Review of Environment and Resources* is a peer-reviewed academic journal that publishes review articles about environmental science and environmental engineering. It was first published in 1976 under the name the *Annual Review of Energy*. In 2020, it was published open access for the first time. According to the Journal Citation Reports, the journal has a 2020 impact factor of 11.108

¹² The *Annals of the New York Academy of Sciences* is an academic journal published by Wiley-Blackwell on behalf of the New York Academy of Sciences. It is one of the oldest science journals still being published, having been founded in 1823. Each issue is of substantial length and explores a single topic with a multidisciplinary approach. According to the Journal Citation Reports, the journal has a 2019 impact factor of 4.728

Les messages clés

- Le climat urbain est un objet d'étude qui regroupe une communauté de recherche interdisciplinaire et bien organisée à l'échelle internationale depuis les années 1970.
 - L'articulation entre la production de savoirs climatiques et besoins opérationnels en urbanisme n'est pas un sujet de recherche nouveau mais reste à ce jour un défi important pour les chercheurs et les acteurs opérationnels de toutes les villes.
 - Les obstacles à cette articulation sont nombreux, il est possible de citer au moins trois catégories : les tendances dans les pratiques d'urbanisme, les techniques et modes de production des connaissances atmosphérique et la spécificité de résultats de recherche en climatologie urbaine, propres à chaque terrain d'étude, qui rend difficile la montée en généralité.
 - Ces dernières années, les cartes climatiques pour la planification urbaine sont devenues l'outil de référence pour la traduction des connaissances microclimatiques dans les directives et recommandations de planification.
 - La mise en agenda du changement climatique a été une fenêtre d'opportunité pour lever certains des obstacles mentionnés. A son tour, les progrès techniques dans les outils de mesure et de modélisation ainsi que les expériences de co-construction des savoirs à l'échelle locale permettent également aujourd'hui à la communauté de recherche en climatologie urbaine de contribuer à la réflexion et à la production des savoirs climatiques à l'échelle planétaire.
-



Du contexte international... à la Réglementation & Recherches nationales

Nous allons voir dans la partie suivante - Partie II - quel est le contexte réglementaire et de recherche à l'échelle de la France, car c'est ce contexte *in fine*, qui va déterminer la capacité des collectivités à agir et à accéder à des diagnostics microclimatiques adaptés à une mise en place de plans d'adaptation à l'échelle locale.

Partie II - Nouvelles injonctions réglementaires et recherche en climatologie urbaine en France

Chapitre Premier : panorama du cadre réglementaire sous l'angle de l'adaptation à la hausse des températures

En France, la mission d'anticipation des effets du changement climatique repose sur l'ensemble des autorités publiques chargées de l'administration du territoire. L'État est responsable devant les instances internationales des mesures à prendre en matière d'atténuation et d'adaptation et a ainsi pour fonction d'établir au niveau national les objectifs qui guideront les politiques publiques ; au niveau infra-national, les Régions sont « chefs de file » de la transition, et chacune des collectivités (Région, EPCI), est en charge d'élaborer des stratégies et des documents de planification opérationnelle à son échelle.

Le droit de l'urbanisme est de plus en plus irrigué par le droit de l'environnement. Il est intéressant de voir comment ce cadre réglementaire et la recherche en climatologie urbaine ont évolué ces dernières années afin de produire, d'une part un contexte de plus en plus favorable à la prise en compte de l'adaptation à la hausse de températures par le biais des compétences en urbanisme et aménagement, et d'autre part, des connaissances utiles à cette intégration.

Les collectivités ont les compétences, c'est-à-dire la responsabilité, de la **planification** et de l'**animation** sur leur territoire de la lutte contre le changement climatique, de la maîtrise des consommations d'énergie, la promotion des énergies renouvelables et l'amélioration de la qualité de l'air. Mes travaux de recherche ont eu pour vocation d'apporter des données, des méthodes, des outils, dans le champ de la planification et l'aménagement urbains. Ce panorama se circonscrit donc aux outils d'urbanisme et l'information est ici raisonnée car l'objectif de ce premier chapitre est de poser un cadre pertinent pour pouvoir situer les recherches en climatologie urbaine en général (Chapitre 2) et mes recherches sur les outils cartographiques en particulier (Partie III).

En France, l'urbanisme réglementaire s'est progressivement enrichi de documents ou de plans spécifiques ou intégrant les problématiques environnementales. Certains de ces outils sont des réglementations contraignantes qui ont évolué au cours du temps, d'autres ne sont qu'incitatifs et ils invitent les collectivités locales à se saisir de la question du climat urbain et, plus généralement, à prendre en compte les impacts territoriaux et l'adaptation au changement climatique qui lui s'opère à des échelles spatiales plus larges.

1. La planification spatiale réglementaire

Les règles d'urbanisme traditionnelles se déclinent classiquement à l'échelle intercommunale par le Schéma de cohérence territoriale (ScoT) et le Plan local d'urbanisme intercommunal (PLUi), ce dernier remplaçant progressivement le Plan local d'urbanisme communal (PLU). Ces documents ont une visée réglementaire, ce qui veut dire qu'ils créent des obligations ou des interdictions pour les comportements visés.

Le Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) s'appuie sur une structure regroupant plusieurs villes ou villages. Il s'agit d'un document stratégique, mis en place en 2000 par la loi SRU (solidarité et renouvellement urbain). Il permet aux communes du territoire de réfléchir aux enjeux importants d'urbanisme, d'habitat et de développement durable du territoire intercommunal.

La planification plus précise des choix d'aménagement urbains a été mise en place d'abord en 1967, avec la loi d'Orientation Foncière qui créait le plan d'occupation des sols (POS), remplacé en 2000 par la loi SRU par le **Plan**

Local d'Urbanisme (PLU), progressivement élargi à l'échelle intercommunale (PLUi). Le PLU(i) est mis en oeuvre par les services de la ville ou de l'EPCI, avec l'aide de l'Agence locale d'urbanisme si elle existe sur ce territoire. L'échelle d'action est la commune ou l'intercommunalité (notamment dans le cas par exemple des métropoles).

Les échelles spatiales et la portée de ces deux documents sont donc différents (*Table 2*).

| SCOT | PLU(i) |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Définit les orientations générales d'organisation de l'espace et détermine les grands équilibres entre espaces urbanisés, naturels et agricoles. Crée une cohérence entre l'ensemble des politiques sectorielles (urbanisme, habitat, environnement, économie, déplacements, équipements commerciaux...). Définit une vision partagée du territoire à 15-20 ans à l'échelle du <i>bassin de vie</i>¹³. | <ul style="list-style-type: none"> Exprime les objectifs politiques de la collectivité locale en matière de développement économique, social, d'environnement et d'urbanisme à l'horizon de 10 ans. Fixe les règles générales et les servitudes d'utilisation du sol (zones constructibles ou pas ; règles d'implantation des constructions en fonction de la voirie et des maisons voisines...). |

Table 2. Synthèse des objectifs du Schéma de cohérence territoriale (SCOT) et du Plan local d'urbanisme intercommunal (PLU(i))

Bien que le contenu soit très différent, les documents SCOT et PLU(i), ont une structure similaire. Ils étaient historiquement composés d'un rapport de présentation, d'un projet d'aménagement du territoire et de développement durable (PADD), et un document d'orientation et d'objectifs (DOO). Le PLU(i) contient en plus un plan de zonage, des OAP et un règlement associé (*Figure 6*). Une ordonnance récente, du 17 juin 2020, relative à la modernisation du ScoT à fixé que le ScoT se composera désormais dès avril 2021 de deux documents au lieu de trois : le projet d'aménagement stratégique et le document d'orientation et d'objectifs accompagnées d'annexes comprenant les documents graphiques¹⁴.

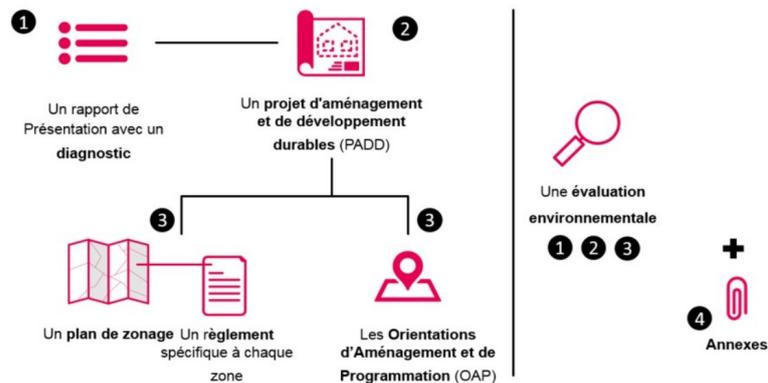


Figure 6. Composition générique d'un Plan Local d'Urbanisme (Source : Luc Moreau, DDT49)

¹³ Le découpage de la France « en bassins de vie » a été réalisé pour faciliter la compréhension de la structuration du territoire en France métropolitaine. Le bassin de vie est le plus petit territoire sur lequel les habitants ont accès aux équipements et services les plus courants. Les services et équipements de la vie courante servant à définir les bassins de vie sont classés en 6 grands domaines: services aux particuliers, commerce, enseignement, santé, sports, loisirs et culture, transports.

¹⁴ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000042007729/>

A l'échelle urbaine le PLU(i) est donc le document central en matière d'urbanisme puisque ses dispositions sont juridiquement contraignantes et guident toutes les demandes concernant l'occupation du sol (permis de construire, permis d'aménagement, etc.). C'est pour cette raison qu'une partie importante de mes recherches ont eu pour objectif l'étude du contexte juridique et technique de ce document.

Je me suis ainsi intéressée :

- en **collaboration avec des juristes**, au **cadre réglementaire**.
- en **collaboration avec des urbanistes**, au **cadre d'élaboration opérationnel (acteurs, gouvernance territoriale, élaboration technique)** et au **lien avec les autres documents d'urbanisme**.
- en **collaboration avec des climatologues et géographes**, à la **production de données urbaines et micro-climatiques**.
- en **collaboration avec des cartographes et géomaticiens**, à la **mise en forme des données** utiles à un diagnostic microclimatique territorialisé.

2. La planification énergétique et climatique :

En France, les programmes de politiques publiques de planification énergétique et climatique ont été mis en place dans la période 2000-2010. Partant d'objectifs globaux, des actions se sont implantées à des échelles de plus en plus locales et ont eu de fortes implications pour le développement régional et l'urbanisme. La Mission interministérielle de l'effet de serre¹⁵ avait élaboré en 2000 un Programme national de lutte contre le changement climatique (PNLCC), suivi en 2004 d'un Plan National Climat. La structuration des politiques énergétiques et climatiques à l'échelle locale est donc un registre émergent que le droit de l'urbanisme a progressivement reconnu et intégré sous l'influence de plusieurs lois récentes (loi POPE en 2005 qui a fixé l'objectif d'une réduction d'un « facteur 4 » des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, les lois « Grenelle » en 2010 qui mettaient l'accent également sur la réduction de GES¹⁶, la loi de Transition énergétique pour la croissance verte, TECV, en 2015 qui a étendu la portée des Plans Climats à toutes les activités, publiques et privées, la Loi Énergie Climat, LEC de 2019 qui a introduit l'objectif de neutralité carbone et du Facteur 6 pour 2050, et enfin la récente loi Climat et Résilience du 22 août 2021 qui a repris quelques-unes des propositions de la Convention Citoyenne sur le Climat. Plusieurs documents ont ainsi vu le jour en fonction de l'échelle spatiale d'application :

- à l'**échelle régionale**, les SRADDET (Schémas Régionaux d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires) mis en place par la loi NOTRe en 2015, ont intégré dans leur sein les anciens SRCAE (Schémas Régionaux Climat Air Énergie) qui avaient été créés en 2010.

¹⁵ La Mission interministérielle de l'effet de serre (MIES) est un organisme interministériel français créé en 1992 pour coordonner les politiques nationales de lutte contre l'effet de serre et la position française dans les négociations internationales, notamment au sein de la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Elle a été absorbée en 2008 par la direction générale de l'Énergie et du Climat et la direction des affaires européennes et internationales, alors nouvellement créées au sein du MEEDDAT (Bardou et al. 2009)

¹⁶ Qui a prévu six grands chantiers autour des **bâtiments et l'urbanisme** (diviser par cinq la consommation d'énergie dans les constructions neuves en 2012 et modifier le code de l'urbanisme afin de favoriser les énergies renouvelables) ; les **transports** (des mesures en faveur du développement des transports collectifs urbains ou favorisant le développement des modes alternatifs à la route pour le transport de marchandises) ; l'**énergie et le climat** (réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre en 2020) ; **préservation de la biodiversité** (dispositions relatives à l'agriculture, à la protection des espèces et des habitats ainsi qu'à l'assainissement et aux réserves en eau) ; la **protection sanitaire et gestion des déchets** (nuisances sonores ou lumineuses et des mesures visant à davantage responsabiliser les producteurs de déchets) ; la **définition d'une "nouvelle gouvernance écologique"** (permettant d'engager la concertation en amont des projets grâce, notamment à la rénovation des enquêtes publiques et à l'intégration d'associations d'éducation à l'environnement dans les instances de consultation). (Source : <https://www.vie-publique.fr/eclairage/268502-environnement-essentiel-de-la-loi-grenelle-2>)

- **à l'échelle des départements et des intercommunalités**, les PCAET (Plan Climat Air Énergie Territorial, *Table 3*) qui ont été mis en place par la loi TECV en 2015 suite à plusieurs évolutions réglementaires précédentes (Plans Climat Énergie Territorial, loi Grenelle 2 de 2010 et Plans climat territoriaux mis en place via le plan climat national de 2004). Un PCAET est un outil réglementaire permettant à la collectivité de définir les objectifs stratégiques et opérationnels afin d'atténuer le changement climatique, le combattre efficacement et s'y adapter, de développer les énergies renouvelables et de maîtriser la consommation d'énergie, en cohérence avec les engagements internationaux de la France et d'intégrer les enjeux de qualité de l'air. C'est une démarche de développement durable territoriale centrée sur la transition énergétique, obligatoire pour les EPCI de plus de 20 000 habitants¹⁷. Comme les SRCAE ont été intégrés dans les SRADDET, les PCAET seront, à l'avenir, intégrés progressivement dans les SCoT¹⁸.

Le PCAET comprend un diagnostic, une stratégie territoriale, un plan d'actions et un dispositif de suivi et d'évaluation :

Le diagnostic doit être réalisé sur le territoire. Il porte sur :

- les émissions territoriales de gaz à effet de serre et les émissions de polluants de l'air ;
- les consommations énergétiques du territoire ;
- les réseaux de distribution d'énergie ;
- les énergies renouvelables sur le territoire ;
- la vulnérabilité du territoire aux effets du changement climatique.

La stratégie identifie les priorités que retient la collectivité et les objectifs qu'elle se donne.

Le plan d'actions porte sur l'ensemble des secteurs d'activité et constitue l'outil opérationnel de coordination de la transition énergétique sur le territoire.

Le dispositif de suivi et d'évaluation porte sur la réalisation d'actions, la gouvernance et le pilotage adopté. Il décrit les indicateurs à suivre au regard des objectifs fixés.

Les objectifs et priorités doivent s'articuler avec le SRADDET ou avec la stratégie nationale bas carbone, et le cas échéant avec le plan de protection de l'atmosphère.

Le PCAET est révisé tous les 6 ans.

Table 3. Contenu réglementaire d'un PCAET (Source : <http://www.occitanie.developpement-durable.gouv.fr/quel-est-son-contenu-r8335.html>)

- **à l'échelle infra-communale**, divers outils d'animation et labels incitatifs existent pour les collectivités locales qui souhaitent développer des politiques environnementales sur leur territoire : les Agenda 21, les Chartes de l'environnement et les labels notamment. Ces outils ne sont généralement pas contraignants mais peuvent être incitatifs et fournir une base de réflexion. *Les Chartes de l'environnement*, élaborées depuis 1992 (circulaire ministérielle du 11 mai 1994), permettent de prendre des engagements entre les élus, les techniciens, mais aussi les acteurs économiques locaux et la population, sous forme de recommandations fondées sur une étude environnementale du territoire et la mise en place, le suivi et l'évaluation de projets de développement.

¹⁷ <http://www.occitanie.developpement-durable.gouv.fr/qu-est-ce-qu-un-plan-climat-air-energie-r5876.html>

¹⁸ Ordonnance n° 2020-744 du 17 juin 2020 relative à la modernisation des schémas de cohérence territoriale

Ils peuvent également servir d'études préparatoires à l'élaboration des documents d'urbanisme, fournissant des objectifs et des recommandations à intégrer dans le document final. Pour aller plus loin, il est possible de les rendre contraignants en les faisant figurer dans les documents contractuels concernant les opérations de développement. Bien que ces engagements restent souvent assez généraux, certaines chartes traitent de sujets plus précis, comme les « chartes de gestion écologiquement adaptées » ou les « chartes de l'arbre ». Ils peuvent être accompagnés de plans dits « plan vert » ou « plan de végétation », qui servent de documents de référence pour les services administratifs responsables du territoire, même s'ils n'ont pas de statut réglementaire. Comme mentionné, divers *labels* existent, ceux-ci pouvant s'appliquer à l'échelle d'un quartier ou d'un programme de construction. Chouillou (2018) analyse trois démarches nationales d'éco-conception qui se veulent complémentaires. La démarche AEU2 (Approche Environnementale de l'Urbanisme) de l'ADEME pour la définition des objectifs environnementaux et la conception ; la démarche HQE aménagement (de l'association Haute Qualité Environnementale) pour le système de management de projets immobiliers, et le label Eco Quartier du Ministère du développement durable pour la reconnaissance et distinction de la qualité des espaces publics et bâtiments du quartier.

Dans le SRADDET et le PCAET, les questions d'énergie sont principalement traitées sous les angles du développement des énergies renouvelables et surtout de l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments. **Pour le changement climatique**, atténuation comme adaptation doivent être pris en compte dans l'action des collectivités publiques en matière d'urbanisme. Il s'observe néanmoins, un décalage de cadrage notamment entre l'objectif d'atténuation, où des méthodes d'évaluation des émissions de GES sont aujourd'hui éprouvées, et l'objectif d'adaptation (Lambert-Habib et al., 2013, Richard et al. 2018). Ce dernier, même si des efforts ont été faits sur quelques grandes villes (Lopez et al. 2015) reste encore émergent et, pour l'aléa température, il est exprimé notamment via la notion de confort estival et la lutte contre l'îlot de chaleur urbain (Richard et al. 2018). **Dans les labels** étudiés par Delphine Chouillou en 2018, le climat urbain et ses enjeux sont effectivement évoqués (*Figure 7*).

« Elle est explicitement citée dans les 3 démarches dans les rubriques telles que « énergie et climat », « préservation des ressources et adaptation au changement climatique », ou encore « urbanisme adapté au changement climatique ». D'autres rubriques, bien que ne mentionnant pas explicitement le climat urbain dans leur libellé, participent dans leur contenu au climat urbain. Le schéma suivant recense en rouge les rubriques relatives au climat urbain. La rubrique « biodiversité » est ainsi indiquée en rouge car elle suppose de développer les espaces de nature qui participent à la limitation de l'îlot de chaleur urbain. De même, la rubrique « mobilités et accessibilité » participe à la diminution des gaz à effet de serre et contribue à l'enjeu d'atténuation du changement climatique. » Chouillou (2018, p242)



Figure 7. Les rubriques relatives au climat urbain dans les démarches labellisées d'éco-conception (Source : Delphine Chouillou, 2018)

3. Les documents méthodologiques d'aide à l'intégration des enjeux climat-énergie dans les documents d'urbanisme

Les chercheurs et les opérateurs publics qui ont un rôle d'expertise en matière d'environnement et ou d'urbanisme (ADEME, CEREMA, ARPE, DREAL et agences d'urbanisme notamment) s'attachent à développer d'une part, des guides qui fournissent des exemples concrets des formes et contenus possibles pour intégrer les enjeux énergétiques et climatiques dans le PLU(i) et le SCOT et d'autre part, des outils techniques aidant l'action locale en matière d'environnement, d'énergie ou de limitation des émissions de gaz à effet de serre¹⁹. Richard et al. (2018) analyse le contenu d'une dizaine d'entre eux et classifie leur apport sous différents fronts :

- **ceux qui apportent des recommandations ou pistes d'actions** : ces recommandations peuvent être en fonction du guide, de nature différente, très techniques²⁰ ou plus générales²¹, coercitives²² ou incitatives²³.
- **ceux basés sur du benchmarking qui apportent des retours d'expériences et exemples de rédaction** pour la prise en compte des enjeux énergétiques et climatiques pour les différentes pièces de PLU ou de SCOT. D'un point de vue de l'adaptation, plusieurs exemples de rédaction pour la gestion de l'imperméabilisation ou la végétalisation dans les articles du PLU sont par exemple référencés dans Richard et al. (2018).
- **des guides méthodologiques présentant des outils pour consolider le diagnostic ou faciliter la mise en œuvre des mesures.** Ces guides présentent des outils méthodologiques (ex : bilan carbone), de production de données (thermographie aérienne, modélisation,...) et techniques (schéma de gestion des eaux pluviales, coefficient de biotope par surface).

¹⁹ bilan carbone®, Analyse de Cycle de Vie (ACV), démarche AEU, référentiel d'aménagement, démarche Cit'ergie

²⁰ « travailler sur les distances séparatives et la desserte du fond de parcelle », « autoriser les isolations par l'extérieur » (Richard et al. (2018), pg 10)

²¹ « prévoir des règles », « prendre en compte le coût des énergies fossiles », « optimiser l'utilisation de réseaux existants » (Richard et al. (2018), pg 10)

²² « fixer un pourcentage de la surface du terrain à maintenir ou aménager en espaces verts de pleine terre », « imposer dans des secteurs délimités une densité minimale de constructions » (Richard et al. (2018), pg 10)

²³ « autoriser un dépassement des règles relatives au gabarit dans la limite de 30 % pour les constructions faisant preuve d'exemplarité énergétique ou environnementale ou qui sont à énergie positive », « favoriser l'usage du bois parmi les matériaux de construction » (Richard et al. (2018), pg 10)

Dans la même étude quelques caractéristiques communes des guides disponibles sont mises en avant (Richard et al. (2018), p. 11) :

- l'objectif général de ces guides est l'inclusion des enjeux énergie-climat dans les documents de planification à travers l'identification des leviers d'actions favorisant l'intégration de ces enjeux « sans attribuer une dimension juridique spécifique aux éléments à faire apparaître dans les documents d'urbanisme. Ce registre volontaire et majoritairement non-réglementaire constitue une caractéristique majeure du champ de l'intégration ».
- aucun guide ne précise le périmètre thématique des enjeux abordés au delà de vocable générique (« énergie climat », « énergie », « changement climatique »...).
- plusieurs guides recommandent de dépasser la phase d'élaboration des documents d'urbanisme et adressent des préconisations pour la prise en compte des enjeux énergie-climat jusque dans la conduite des opérations d'aménagement et d'instruction des permis de construire.

La période d'étude de Richard et al. (2018) était 2016-2017, période à laquelle les productions du projet MAPUCE venait tout juste d'être disponibles. Ces dernières, **Table 4**, viennent ainsi compléter cette batterie de documents d'aide à l'intégration des enjeux climat-énergie dans les documents d'urbanisme avec une focale adaptation et prise en compte des enjeux microclimatiques locaux, thématiques qui ont été faiblement traitées auparavant.

-
- ✓ **2020** Touchard O., Sinda Haouès-Jouve, Julia Hidalgo et Bretagne G. et Kit des données clés de l'adaptation. Diagnostiquer l'adaptation au changement climatique dans les documents d'urbanisme. ADEME. <https://www.ademe.fr/kit-donnees-cles-ladaptation>
 - ✓ **2020** Debrye L., Dumas G., Edouart V., Haouès-Jouve S., Hidalgo J., Touati N, Salvi I, Roques G. Prise en compte du climat dans la construction de la Métropole de demain. Guide de Recommandations. Toulouse Métropole-LISST.
 - ✓ **2019** Lambert ML, Hidalgo J, Masson V, Bretagne G et Haouès-Jouve S, Urbanisme et (micro-) climat. Outils et recommandations générales pour les documents de planification. Guide Méthodologique issu du projet MapUCE
 - ✓ **2017**, Lambert ML, Demazeux C et Gallafrio M. Traduction des objectifs climat/énergie dans le PLU et le SCOT : fiches méthodologiques et retours d'expériences
Fiche exemple: Agen - <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354293v1>
Fiche-outil : Le SCOT: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354275v1>
Fiches-outils: Le PLU(i), Rapport de présentation et PADD : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354282v1>
Règlement du PLU(i) <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354285v1>
OAP <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354288v1>
-

Table 4. Documents d'aide à l'intégration des enjeux climat-énergie dans les documents d'urbanisme avec une focale adaptation et prise en compte des enjeux microclimatiques locaux issus du projet MAPUCE

4 L'intégration progressive des enjeux climatiques dans la planification spatiale réglementaire

Suite aux évolutions législatives récentes, l'intégration des enjeux climatiques et énergétiques s'impose dans les outils de planification spatiale des collectivités territoriales et il y a actuellement deux voies complémentaires pour cela. La première voie prend appui sur le lien normatif de ceux-ci avec les documents de planification énergétique et climatique. La deuxième voie, consiste à prendre en compte ces enjeux directement dans les objectifs légalement définis des documents d'urbanisme (la lutte contre l'étalement urbain, la densification, la performance énergétique des bâtiments, les infrastructures énergétiques, les transports, etc).

4.1 Prise en compte des enjeux climat énergie à travers les relations juridiques avec les documents de planification énergétique et climatique

Les documents de planification urbaine peuvent intégrer les enjeux climatiques et énergétiques à travers le lien normatif, de compatibilité ou de prise en compte (*Figure 8*), qui les lie aux documents de planification énergétique et climatique.

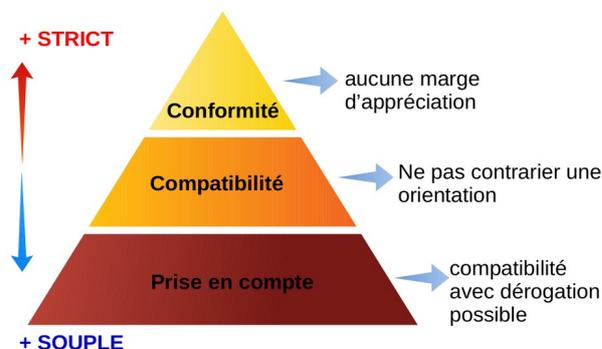


Figure 8. Les trois degrés de la relation juridique en urbanisme (Source : Luc Moreau, DDT49). La conformité impose la retranscription à l'identique de la règle, son respect à la lettre. La compatibilité implique de respecter l'esprit de la règle. La prise en compte induit de ne pas s'écarter de la règle²⁴.

L'articulation entre le Plan Climat-Air-Energie Territorial (PCAET), le SCoT et le Plan Local d'Urbanisme (PLU) ne cesse d'évoluer. Les PCAET ou les futurs SCoT/PCAET ont vocation à définir les objectifs d'adaptation et d'atténuation du territoire qu'il recouvre tout en respectant les engagements de la France à l'échelle internationale et traduits par le SRADDET avec lesquels ils doivent être compatibles. Le PLU(i) devra de son côté prendre en compte les dispositions du PCAET sauf pour les dispositions du plan d'urbanisme relatives aux réseaux d'énergie qui devront, elles, être prises en compte par le PCAET (Lambert et Cobourg-Gozé, 2020).

Nous allons le voir, la limitation de la consommation foncière, des consommations énergétiques des bâtiments neufs et rénovés et des besoins de déplacement, la végétalisation des zones urbaines et les coefficients de biotope ou les orientations d'aménagement et de programmation (OAP) Energie-climat sont autant d'axes pouvant s'inscrire directement dans le PLU(i). Le PCAET a donc un rôle d'organisation, de hiérarchisation des actions en amont mais aussi et surtout d'évaluation et d'animation de cette thématique sur le territoire.

²⁴ Depuis le 1^{er} avril 2021, le lien de compatibilité a été généralisé, et la simple prise en compte ne perdure que pour les objectifs du SRADDET (<https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/hierarchie-des-normes>)

4.2 Prise en compte dans les des documents d'urbanisme des objectifs climat-énergie légalement définis

Le Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales définit les objectifs d'action des collectivités territoriales en urbanisme comme suit²⁵, *Table 5*:

- Assurer l'équilibre entre le développement et le renouvellement urbain, l'aménagement des espaces ruraux, la qualité de vie des habitants et la préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers.
- Soutenir la diversité des fonctions urbaines et la mixité sociale dans l'habitat urbain et rural, en prévoyant des capacités de constructions suffisantes dans les domaines de l'habitat, des activités économiques et commerciales, culturelles et sportives.
- Préserver les milieux naturels, les paysages notamment par le maintien ou la création de continuités écologiques.
- Préserver et développer la qualité urbaine, architecturale et paysagère, notamment des entrées de ville.
- Développer les transports collectifs afin d'offrir des alternatives aux déplacements individuels motorisés afin de préserver l'environnement.
- Lutter contre le réchauffement climatique, limiter les émissions de gaz à effet de serre en assurant le développement des énergies renouvelables.
- Assurer la résilience des territoires notamment par la prévention des risques.

Table 5. Responsabilités des collectivités territoriales en matière d'urbanisme (source : Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales)

D'un point de vue environnemental, les orientations du SCoT et du PLU(i) doivent donc respecter les principes d'équilibre entre le développement urbain et la conservation des terres agricoles et espaces naturels, (en mettant l'accent sur la densification de la construction), l'objectif de Zero artificialisation nette (introduit par la loi Climat et résilience), la protection de la qualité de ces éléments naturels (y compris des continuités écologiques), lutter contre le réchauffement climatique (en particulier à travers la réduction des émissions de GES) et assurer la résilience des territoires. L'adaptation urbaine à la hausse des températures est donc ici exprimée comme reliée à la notion de résilience et gérée sous l'angle de la prévention des risques.

L'adaptation au changement climatique apparaît néanmoins bien comme un des objectifs à part entière du Code de l'Urbanisme²⁶, « 7° La lutte contre le changement climatique et l'adaptation à ce changement, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'économie des ressources fossiles, la maîtrise de l'énergie et la production énergétique à partir de sources renouvelables », et peut être ainsi traitée de front dans les différents documents du SCoT et du PLU(i).

4.2.1 Prise en compte de l'adaptation à la surchauffe urbaine dans les missions du SCoT

Plusieurs informations climatiques et leviers d'action peuvent être traités dans les différents documents du SCoT. Les fiches méthodologiques proposées par le LIEU dans le cadre du projet MApUCE (Lambert et al. 2017) rappellent à la fois les obligations légales et rapportent des exemples de rédaction et de prise en compte par différentes villes et agglomérations françaises. Les pistes d'action en lien avec le sujet de la surchauffe urbaine concernent les obligations légales ou documents suivantes :

- dans l'évaluation environnementale du rapport de présentation, il est possible de situer le territoire par rapport à la zone climatique dans laquelle il se situe et définir ainsi des caractéristiques générales concernant les

²⁵ <https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/documents-durbanisme>

²⁶ Art. L101-2 du Code de l'Urbanisme, « 7° La lutte contre le changement climatique et l'adaptation à ce changement, (...) ; »

problématiques de climat régional et local. Par exemple pour les villes continentales et les villes situées sur l'arc méditerranéen, la problématique de l'îlot de chaleur urbain et la gestion de la surchauffe urbaine en période estivale peut ainsi directement être ciblée.

- peu de SCoT ont pour le moment abordé la question des ICU par le prisme de la forme urbaine à cause sa large échelle spatiale. Le SCoT a une faible prise sur la forme intra-urbaine qui doit plutôt s'apprécier à l'échelle des quartiers, voire des îlots. Par contre, il peut appréhender l'échelle urbaine en termes de densification. Le DOO doit effectivement contenir des objectifs de densification afin de lutter contre l'étalement urbain²⁷. Par contre, Lambert nous rappelle qu'il ne faut pas rester sur des prescriptions purement quantitatives qui ne prendraient pas en compte une description spatiale fine. Il est ainsi important d'accompagner ces règles de densité minimale par des évaluations climatiques, et des réflexions complémentaires sur la forme urbaine, les impacts de la densification en matière d'ombrage, de ventilation des rues l'été, et de place laissée à la végétalisation des espaces libres. Le SCoT peut imposer au PLU(i) de mettre en œuvre un tel travail car le DOO a pour mission de définir « les conditions d'un développement urbain maîtrisé et les principes de restructuration des espaces urbanisés, de revitalisation des centres urbains et ruraux, [...], de valorisation des paysages et de prévention des risques »²⁸. Les notions de développement urbain « maîtrisé », et de « prévention des risques » pourraient intégrer facilement la question des micro-climats urbains. Un travail de cohérence et d'alimentation des Diagnostics du PLU(i) et du SCoT, est ainsi faisable et nécessaire.
- L'intégration de la question climatique peut se faire dans ce document par le biais indirect de la végétalisation et le maintien ou d'amélioration de la biodiversité car le SCoT a plusieurs missions obligatoires ou facultatives en matière de dispositions relatives aux espaces verts, trames vertes ou zones naturelles ou agricoles à protéger, et désormais de protection des sols par le biais de l'objectif Zéro Artificialisation Nette. Notamment dans le PADD et le DOO qui doivent fixer des objectifs fondés sur « les politiques publiques [...] de qualité paysagère, de protection et de mise en valeur des espaces naturels, agricoles et forestiers, de préservation et de mise en valeur des ressources naturelles, [...] de préservation et de remise en bon état des continuités écologiques »²⁹ et le maintien et protection d'« espaces et sites naturels, agricoles, forestiers ou urbains [...], des espaces nécessaires au maintien de la biodiversité et à la préservation ou à la remise en bon état des continuités écologiques » respectivement³⁰.
- Les modalités de préservation des eaux ressortent de la compétence partagée des SCoT, qu'il s'agisse de la considérer comme un élément de l'environnement, une ressource naturelle ou une composante des trames bleues. Ainsi plusieurs exemples sont cités par Lambert et al. (2017) dans les différents documents (Rapport de présentation, PADD et DOO). Trois thématiques sont principalement abordées : l'imperméabilisation des sols et l'infiltration de l'eau ; le maintien de la biodiversité et la gestion des eaux pluviales, désormais renforcés.
- Finalement, sur le sujet de l'albedo et des propriétés des matériaux de construction ou d'aménagement de l'espace urbain, le SCoT ne semble pas à la bonne échelle pour inclure des préconisations précises. Il peut néanmoins inciter les collectivités locales à réfléchir à cette question dans le cadre de leurs PLU(i), en luttant contre la minéralisation excessive des espaces publics ou privés, ou en favorisant le recours aux matériaux et aménagements de couleur claire.

²⁷ art. L141-4 et art. L. 141-7 du Code de l'urbanisme

²⁸ art. L141-5 du Code de l'urbanisme

²⁹ art. L141-4 du Code de l'Urbanisme

³⁰ art. L141-10 du Code de l'urbanisme

Menuit TOME II - Volume de travaux inédits

Plusieurs objectifs en lien avec la gestion du risque de températures extrêmes en milieu urbain peuvent être ainsi explicités et mis œuvre à travers le SCoT. La **Table 6** rapporte une synthèse de ces moyens d’inscription dans les outils d’urbanisme, et propose un lien envers les connaissances utiles à la gestion du risque de surchauffe urbaine :

| SCoT | | |
|---------------------------|--|---|
| Leviers d’action | Moyens d’inscription dans les outils | Études et Objectifs techniques |
| Définir les enjeux | l’ évaluation environnementale du rapport de présentation peut identifier l’îlot de chaleur urbain et la gestion de la surchauffe urbaine en période estivale comme enjeux climatiques d’ordre général pour le territoire. | <ul style="list-style-type: none"> • situer le territoire dans sa zone climatique à échelle régionale • identifier les impacts prévisibles du changement climatique |
| Forme urbaine | le DOO doit contenir des objectifs de densification afin de lutter contre l’étalement urbain. Besoin de cohérence entre le Diagnostic du PLU(i) et du SCoT pour une spatialisation cohérente des objectifs de densification vis à vis des enjeux microclimatiques. | <ul style="list-style-type: none"> • délimiter la tache urbaine afin d’évaluer et suivre son évolution • identifier les couloirs de ventilation naturels à l’échelle de la ville (vents prédominants et brises) afin de les préserver |
| Végétalisation | le PADD et le DOO doivent fixer des objectifs de <ul style="list-style-type: none"> • de qualité paysagère, de protection et de mise en valeur des espaces naturels, agricoles et forestiers, de préservation et de mise en valeur des ressources naturelles, [...] de préservation et de remise en bon état des continuités écologiques • maintien et protection d’« espaces et sites naturels, agricoles, forestiers ou urbains [...], des espaces nécessaires au maintien de la biodiversité et à la préservation ou à la remise en bon état des continuités écologiques » | <ul style="list-style-type: none"> • protéger et caractériser la végétation afin de renforcer la trame verte |
| Eau | Le Rapport de présentation, le PADD et le DOO abordent la gestion des eaux via : <ul style="list-style-type: none"> • l’imperméabilisation des sols et l’infiltration de l’eau • le maintien de la biodiversité • la gestion des eaux pluviales. | <ul style="list-style-type: none"> • étudier le cycle de l’eau du territoire (ruissellement, infiltration, évaporation) afin de le perturber le moins possible voire le rétablir. |
| Matériaux | le SCoT n’est pas à la bonne échelle pour inclure des préconisations mais peut inciter à réfléchir à cette question dans le cadre du PLU(i), en luttant contre la minéralisation excessive des espaces publics ou privés, ou en favorisant le recours aux matériaux et aménagements de couleur claire. | <ul style="list-style-type: none"> • caractériser les matériaux afin de comprendre l’impact de l’ensoleillement dans les espaces intérieurs et extérieurs |

Table 6. *Résumé des moyens et objectifs techniques en lien avec la gestion du risque de températures extrêmes en milieu urbain dans le Schéma de Cohérence territoriale (SCOT).*

4.2.2 Prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans les missions du PLU(i)

Ce document juridique s'imposant aux autorisations d'urbanisme et concernant toutes les parcelles privées ou publiques dont il détermine l'évolution et les droits à construire, le PLU(i) a été le document principal de nos travaux de recherche. Il est composé de plusieurs éléments – Rapport de présentation, Plan d'aménagement de développement durable, les Orientations d'aménagement et de programmation, le Règlement spécifique à chaque zone du plan de zonage – qui sont autant d'opportunités pour inscrire la question microclimatique au cœur même du document.

Un analyse exhaustif a été proposé pour le PLU(i) par l'équipe de Marie Laure Lambert lors du projet MApUCE et il est recueilli dans les fiches citées dans le tableau 4. Pour ce mémoire, j'ai extrait, synthétisé et mis à jour avec l'aide de Marie Laure, les éléments qui me semblent clés dans le cadre de mon travail. Ils sont présentés en Annexe 1 car le contenu reste assez étendu. Voici quelques messages qui me semblent importants pour chaque document :

- Le rapport de présentation reste le garant de la visibilité des objectifs environnementaux à travers le document d'évaluation environnementale qu'il contient³¹ et c'est donc à l'occasion de cette évaluation que devraient être intégrées dans la réflexion sur le PLU(i) des études, cartes climatiques et modélisations indiquant, dans le diagnostic territorial, quels sont les enjeux énergétiques et climatiques, et notamment quelles sont les zones urbaines concernées ou menacées par le phénomène d'îlot de chaleur urbain. La réalisation de cette évaluation est l'occasion d'analyser les paramètres climatiques locaux, de dresser le « profil climatique de long terme du territoire » (séries observées et prédictions futures de températures et précipitations notamment), puis de qualifier les enjeux climatiques du territoire à partir de ces données. Cependant il n'a pas de valeur réglementaire et constitue principalement un document d'information et un élément d'interprétation et de justification du PADD³².
- Le PADD représente le « projet politique » du PLU(i) et peut préconiser la généralisation de l'approche bioclimatique, agir à travers l'aménagement des espaces publics et la requalification de friches et terrains libres dans le PLU(i). Tous les leviers d'action classiques de l'adaptation des villes à la hausse des températures peuvent être ainsi mobilisés (la forme urbaine, la végétalisation, l'eau...).
- Les orientations d'aménagement et de programmation, OAP sont élaborées en cohérence avec le PADD, elles comprennent des dispositions portant sur l'aménagement, l'habitat, les transports et les déplacements³³. Les OAP sont opposables aux permis de construire, mais seulement dans un rapport de compatibilité³⁴. Seul le règlement impose un rapport de conformité, et peut donc interdire de construire ou prescrire des règles d'urbanisme. Il y a donc lieu de compléter, le cas échéant, les OAP par des dispositions du règlement afin de permettre l'opposabilité effective des OAP aux projets d'aménagement. L'enjeu consiste à trouver le bon niveau de formalisation des orientations. « En effet, les OAP doivent permettre aux services instructeurs des permis de construire de vérifier que la construction répondra bien aux objectifs fixés [...]. L'expression des orientations sera le plus souvent qualitative, pour s'attacher aux résultats à atteindre en laissant une marge d'adaptation quant aux formes et aux moyens pour y parvenir. (...) Les orientations doivent être claires et

³¹ art. R151-1, 3° du Code de l'urbanisme

³² 2017, Lambert ML, Demazeux C et Gallafrio M. Fiches-outils: Le PLU(i), Rapport de présentation et PADD : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354282v1>

³³ art. L151-6 du Code de l'Urbanisme

³⁴ art. L152-1 du Code de l'Urbanisme

Menuit TOME II - Volume de travaux inédits

vérifiables, elles peuvent parfois être rédigées de manière quantitative mais ne doivent pas s'apparenter à un règlement »³⁵. Les orientations peuvent porter sur différents thèmes comme la forme urbaine ou l'implantation des espaces naturels - à travers le *coefficient de biotope par surface*³⁶, leur rôle environnemental et leur nature »³⁷ et peuvent également fixer une obligation de résultat sur le confort d'été, qui prohibe le recours à la climatisation qui est un exemple souvent citée de mal-adaptation (*Annexe 1*).

- Le Règlement du PLU(i) fixe, en cohérence avec le PADD, les règles générales et les servitudes d'utilisation des sols. Il est accompagné de documents graphiques sous forme de cartes qui formalisent le champ d'application du règlement par un zonage. Tous les travaux, démolitions, aménagements réalisés [...] devront être conformes à ce règlement et à ses documents graphiques³⁸. De nombreux articles du règlement permettent de mettre en œuvre une politique liée au climat et à l'énergie. Mais il n'est pas aisé d'obliger les collectivités à rédiger des prescriptions dans ce domaine. Le code de l'urbanisme vise plutôt à ne pas entraver ou à ne pas limiter la qualité environnementale des aménagements et la production d'énergies renouvelables. Il peut favoriser une forme urbaine particulière, une prise en compte des vents dominants (conditions d'alignement, recul des constructions), ou encore de l'ensoleillement et des ombres portées (dimensions et hauteur des constructions, marges de recul). Le règlement peut ainsi jouer sur une multiplicité de paramètres en lien avec le micro-climat urbain en lien avec la forme urbaine, la végétalisation, l'albédo ou l'eau (*Annexe 1*).

Le *Tableau 7* présente la synthèse des moyens d'inscription du risque de surchauffe urbaine dans le PLU et les liens envers les connaissances utiles à sa gestion :

| PLU(i) | | |
|--|--|--|
| Leviers d'action | Moyens d'inscription dans les outils | Objectifs techniques |
| Définir les enjeux via un diagnostic microclimatique spatialisé | l' évaluation environnementale du rapport de présentation implique que soient analysés l'état initial de l'environnement et les perspectives de son évolution, les conséquences éventuelles de l'adoption du plan sur la protection des zones importantes pour l'environnement ainsi que les mesures envisagées pour éviter, réduire et si possible compenser s'il y a lieu, les conséquences dommageables de la mise en œuvre du document. | <ul style="list-style-type: none"> • rappeler les enjeux microclimatiques pour le territoire identifiés dans le SCoT et PCAET. • identifier les situations météorologiques récurrentes (Types de temps sensibles) et sélectionner celles en lien avec ces enjeux • identifier les zones (à l'échelle des quartiers) concernées par des phénomènes de surchauffe diurne et/ou nocturne à travers des outils cartographiques. |
| Forme urbaine | Le PADD peut préconiser la généralisation de l'approche bioclimatique, agir à travers l'aménagement des espaces publics et la requalification de friches et terrains libres | <ul style="list-style-type: none"> • estimer le potentiel de ventilation des rues selon leur orientation • calculer l'ensoleillement et l'ombre |

³⁵ Ministère du logement et de l'habitat durable, Fiches techniques : décret sur la modernisation du contenu du PLU, fiche 5 : les OAP. Juillet 2016

³⁶ ce coefficient vient en complément du « coefficient d'occupation des sols » ; il vise non seulement à conserver un certain taux de foncier non imperméabilisé et non artificialisé, mais aussi des services écosystémiques ; (Conreux-Mantziaras L & Faucher H, 2018).

³⁷ Ministère du logement et de l'habitat durable, Fiches techniques : décret sur la modernisation du contenu du PLU, fiche 5 : les OAP. Juillet 2016

³⁸ art. L152-1 du Code de l'Urbanisme

| | | |
|-----------------------|---|---|
| | <p>dans le PLU.</p> <p>Les OAP peuvent « prendre la forme de schémas d'aménagement et préciser les principales caractéristiques des voies et espaces publics »</p> <p>Le règlement, permet de privilégier une forme urbaine compacte et de créer des coupures d'urbanisation quand c'est pertinent. Il fixe également la hauteur maximale des constructions.</p> | <p>portée des bâtiments</p> <ul style="list-style-type: none"> réfléchir à l'intégration des nouveaux îlots dans leur environnement proche (quels sont les couloirs de ventilation d'air « propre » et d'air pollué ? Sur quelle zone climatique locale (LCZ) se situe l'îlot ? Faut-il préserver ou renforcer la présence de végétation ? ...) |
| Végétalisation | <p>le PADD doit fixer des objectifs de protection des milieux naturels et des paysages, la préservation des espaces verts et des continuités écologiques à travers : « les orientations générales des politiques [...] de paysage, de protection des espaces naturels, agricoles et forestiers, et de préservation ou de remise en bon état des continuités écologiques »</p> <p>Les OAP peuvent « définir les actions et opérations nécessaires pour mettre en valeur l'environnement, notamment les continuités écologiques ». Elles peuvent également définir un Coefficient de biotope par surface.</p> <p>Le règlement localise spatialement les continuités écologiques, trames vertes et espaces boisés classés. Il précise les règles concernant le coefficient de biotope, l'alignement ou un retrait des immeubles par rapport à la voirie, l'aspect extérieur des bâtiments pour accueillir des murs ou toitures végétalisées et peut définir, dans certains secteurs, des objectifs de performance environnementale renforcée.</p> | <ul style="list-style-type: none"> caractériser l'occupation du sol, en particulier, identifier la végétation à l'échelle de l'aménagement/îlot (alignements d'arbres, haies, bandes enherbées, espaces verts publics, éléments remarquables, bandes végétales en pied de façade. renforcer la compacité de la forme urbaine par la densité tout en intégrant et protégeant les îlots verts publics et privés et toute végétation existante. introduire des orientations visant à renforcer la végétalisation des espaces perméables. accompagner la réflexion de la végétalisation d'une réflexion sur la ressource en eau, la qualité de l'air et les vecteurs de maladies en particulier le moustique tigre. |
| Eau | <p>Le PADD aborde la gestion des eaux via :</p> <ul style="list-style-type: none"> l'imperméabilisation des sols et l'infiltration de l'eau | <ul style="list-style-type: none"> intégrer la trame bleue dans l'agglomération pour lui conférer le caractère de trame bleue urbaine ; |

| | | |
|----------------------------|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • le maintien de la biodiversité • la gestion des eaux pluviales. <p>Les OAP peuvent « définir les actions et opérations nécessaires pour mettre en valeur l’environnement, notamment les continuités écologiques »</p> <p>Le règlement imposer les installations nécessaires à la gestion des eaux pluviales et du ruissellement ; Imposer pour les clôtures des caractéristiques permettant de préserver ou remettre en état les continuités écologiques ou de faciliter l’écoulement des eaux .</p> | <ul style="list-style-type: none"> • intégrer des orientations traitant la gestion des eaux afin de préserver le cycle de l’eau naturel et l’effet de régulateur thermique par évapotranspiration: fonction de rafraîchissement en ville, récupérer, recyclage des eaux pour l’arrosage des espaces verts, gestion à la parcelle du ruissellement des eaux pluviales, stockage... • faire un cadastre des points d’eau publiques |
| Matériaux | <p>Les OAP permettent de préciser les principes d’aménagement.</p> <p>Le règlement régule l’aspect extérieur des constructions et peut prescrire une palette de couleurs et limiter l’utilisation de certains matériaux.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Identifier les surfaces au sol imperméables et identifier celles sur lesquelles une optimisation pourrait être effectuée. • Initier une réflexion sur la colorimétrie et les matériaux de construction tant dans l’ancien comme dans le nouveau. Associer le bureau de l’Architecte des Bâtiments de France à cette réflexion. |
| Émission de chaleur | <p>Les OAP peuvent fixer une obligation de résultat sur le confort d’été, qui prohibe le recours à la climatisation</p> | <ul style="list-style-type: none"> • établir un cadastre de climatiseurs et une estimation des émissions de chaleur (pollution thermique) |

Table 7. Résumé des moyens et objectifs techniques en lien avec la gestion du risque de températures extrêmes en milieu urbain dans le Plan Local d’Urbanisme Intercommunal (PLUi).

5. Discussion

Depuis une vingtaine d’années, l’évolution réglementaire a permis la création d’un contexte favorable à la prise en compte des enjeux climatiques et énergétiques à l’échelle locale. Des outils spécifiques comme le PCAET ont été créés. Les outils de planification réglementaire, SCoT et PLU, ont aujourd’hui les fondements juridiques nécessaires pour encadrer cette prise en compte du climat local et les enjeux qui lui sont associés chaque fois qu’ils seront portés politiquement dans ce sens.

Il y a encore évidemment des marges de manœuvre et d’évolution sur tous les aspects de l’articulation entre politiques climatiques et l’exercice de planification.

Les juristes ont sûrement des pistes pour faire évoluer le cadre réglementaire afin, par exemple, de mieux définir le contenu et les méthodologies pour établir des diagnostics climatiques territoriaux qui puissent nourrir le volet adaptation. Exercice qui n’est pas aujourd’hui encadré, à différence du volet atténuation où un bilan carbone est requis.

De même, Lambert et Cobourg-Gozé (2020) proposent de recourir également à des outils opérationnels fondés sur les pouvoirs de police³⁹, ou des dispositifs d'incitation⁴⁰ ou encore d'information et sensibilisation⁴¹ que je n'ai pas abordés dans ce mémoire.

Les urbanistes peuvent continuer à faire percoler les questions environnementales et climatiques à toutes les étapes et échelons des exercices de planification. Des évolutions dans la réalisation technique seront nécessaires. Quelques pistes sont discutées par Touchard et al (2020), comme par exemple l'interconnexion entre les diagnostic socio-économique et l'état initial de l'environnement (EIE)⁴², ou la rétroaction entre les diagnostics du PLU(i) et du SCoT comme discuté précédemment en lien avec le rôle que l'état initial de l'environnement à une échelle fine peut jouer en termes de spatialisation dans la définition d'objectifs pour le SCoT.

Nous les climatologues et cartographes, devons continuer - en collaboration avec les architectes, les informaticiens et les sociologues - à produire des données (urbaines, microclimatiques, sociales) et des outils de visualisation et d'analyse de ces données. Cela permettra de replacer le fragment urbain étudié dans son environnement et étudier sa vulnérabilité par rapport à l'évolution du climat régional à long terme. Autrement dit, relier les différentes échelles spatiales (îlot, quartier, ville) et temporelles (micro-météorologique et climatique).

L'objectif du chapitre suivant est d'esquisser un portrait des recherches actuelles en France dans ce sens. Mais il faut également s'assurer que cet effort sera utile à l'exercice opérationnel. Pour cela il faut évidemment continuer à travailler, via une recherche fondamentale, sur nos méthodes d'observation, de modélisation, de représentation cartographique. Il sera néanmoins crucial à court terme de développer davantage, et parallèlement, une recherche en climatologie urbaine appliquée qui s'intéresse, à travers des collaborations interdisciplinaires plus larges, à la manière dont les connaissances climatiques, quantitatives et qualitatives, sont utilisées à l'heure actuelle dans la planification et la conception à l'échelle des opérations d'aménagement (de la décision de création jusqu'à la réalisation). Par quels acteurs sont utilisées ces données ? pourquoi et à quelles étapes ? Quels sont les leviers d'action mais surtout les freins, techniques, sociaux, politiques, à leur généralisation ? La Partie III de ce mémoire illustre une manière d'approcher ce chantier à travers l'entrée cartographique de la climatologie urbaine.

³⁹ « Plusieurs outils de police de l'urbanisme peuvent être mobilisés en matière d'adaptation. Par exemple à travers les zones d'aménagement concerté (ZAC), l'opposition au permis de construire ou les modalités de reconstructions en zones vulnérables. » (Lambert et Cobourg-Gozé, 2020, p. 141)

⁴⁰ « Les collectivités territoriales peuvent inciter les acteurs privés à adapter leurs stratégies [...]. Il s'agit alors de s'appuyer sur des outils plus pédagogiques, qui pourront être de nature contractuelle, à l'image des baux verts et/ou environnementaux, ou des contrats de milieux, ou de nature non contractuelle, avec le recours à des outils tels que les Agenda 21 ou les labels et chartes de qualité. (ibid, p. 151)

⁴¹ « Le rôle des collectivités locales sera très important en la matière, agissant au plus près des citoyens. Leur action devra permettre : une information la plus large des habitants ; le respect des procédures d'information des nouveaux arrivants en zone de risque (acquéreurs et locataires), une participation effective de tous à des décisions qui engageront l'avenir des territoires à long terme ». (ibid., p. 160)

⁴² Le diagnostic socio-économique et l'EIE sont les deux volets constitutifs du diagnostic territorial. L'articulation entre diagnostic et EIE et l'organisation des thèmes au sein de l'EIE, est laissée au libre choix du rédacteur. Touchard et al. (2020) discutent les deux manières habituelles de faire : faire de l'EIE et du diagnostic socio-économique deux parties distinctes au sein du diagnostic territorial [...] ou fondre l'EIE et le diagnostic socio-économique en une seule et même partie.

Chapitre 2 : Les recherches en climatologie urbaine en France en 2021 : des recherches fondamentales à la climatologie urbaine appliquée

1. Contours et motivation de cet état de l'art

1.1. Motivation :

En ce moment même où nous essayons de plus en plus de concevoir des recherches dont le but est un travail théorique de nature fondamentale mais relié de manière satisfaisante aux besoins sociaux et environnementaux, il est pertinent de s'interroger sur comment la production de connaissances en climatologie urbaine en France, rencontre les besoins en urbanisme qui ont été, nous l'avons vu, fortement modifiés par des évolutions récentes du cadre réglementaire.

1.2. Objectifs :

L'objectif général de cette partie est de dresser un état des lieux des forces et des approches de recherche actuelles dans le domaine de la climatologie urbaine pour le territoire français. Même s'il contient des éléments rétrospectifs, le but n'est pas tant de retracer l'historique de l'évolution de la discipline que de dresser un portrait à un temps donné.

Tel que conseillé par la sociologie des sciences⁴³, je m'intéresse ici à la fois au contenu de la recherche et, même si je le développerai moins, au rôle institutionnel et social d'orientation de l'activité de recherche. Je vais ainsi m'intéresser aux conditions internes et externes d'élaboration des connaissances de cette branche de la climatologie. Ce panorama se veut exhaustif vis à vis de l'identification des groupes de recherche actifs sur le sujet, des connaissances sur le climat des villes françaises, des méthodes et approches appliquées. Je vais par ailleurs m'intéresser au nombre de chercheurs permanents et à leur profil, l'origine du financement des projets et l'intégration de la discipline dans les cursus de formation.

1.3. Délimitation thématique et parti pris :

Dans son article sur la préfiguration d'un observatoire lyonnais du climat, Soto et al. (2015, pg34) rappellent la largeur thématique de cet objet d'étude : « aujourd'hui, son étude (de la climatologie urbaine) n'est plus seulement l'apanage des climatologues ; elle est déclinée dans des champs disciplinaires divers comme l'architecture, l'urbanisme (Desjardins, 2011 ; Colombert et al., 2012), la santé environnementale (INVS, 2010), l'énergétique, l'économie, la psychologie (Van der EchoGéo, Linden, 2015), ou bien la gestion de l'eau en milieu urbain, à l'instar de ce que réalisent déjà certains observatoires comme l'Observatoire de terrain en hydrologie urbaine (Othu) ou bien l'Observatoire nantais des environnements urbains (Onevu). Elle intéresse, non plus seulement la communauté des chercheurs, mais également les techniciens des collectivités territoriales, les consultants (Chemin et Thimonier-Rouzet, 2010), les réseaux associatifs et les dirigeants d'entreprise (EPE et Onerc, 2014). L'actualité récente autour de la 21^{ème} Conférence des Parties (COP21) montre, également, la place occupée par la démocratie participative, qui implique un meilleur accès à l'information environnementale et une participation des citoyens au processus décisionnel. ».

Afin de délimiter le périmètre de cette analyse certains choix et parti pris ont été faits. La climatologie urbaine parce qu'elle est un champ de recherche et de spécialisation interdisciplinaire implique des thématiques et échelles spatiales et temporelles variées. Je vais ici partir des thèmes classiquement traités en climatologie urbaine analytique (observation du climat urbain à travers des mesures de terrain) et climatologie urbaine dynamique (explication des dynamiques climatiques à partir de la compréhension de la circulation atmosphérique) et les sujets émergents utiles dans la perspective de l'intégration des enjeux microclimatiques dans la planification urbaine. Je vais ainsi me concentrer principalement dans les recherches s'intéressant aux sujets suivants (**Figure 9**) :

- **L'impact de la surface urbaine dans son atmosphère proche aux échelles de temps météorologiques et climatiques.** Les conditions atmosphériques extérieures au bâti sont donc ici prioritaires bien que l'interface bâti/rue soit parfois traitée dans les recherches en micro-climatologie. Je ne prends pas en compte par exemple

⁴³

<https://www.erudit.org/fr/revues/po/1989-n15-po2541/040618ar.pdf>

les études de caractère architectural d'optimisation bioclimatique ou pour améliorer l'efficacité d'ensoleillement, énergétique ou de confort intérieur à l'échelle du bâtiment.

- **L'évolution climatique locale en lien avec l'évolution climatique à plus grande échelle**, en particulier en lien avec l'évolution du climat régional dû au changement climatique.
- **Les études à l'interface entre les sciences du climat et les études urbaines (planification urbaine, aménagement, politiques urbaines) ayant pour objectif la maîtrise de l'impact de l'urbanisation sur l'atmosphère.** Ne sont pas prises ici en compte les études sur le changement climatique dans les politiques urbaines, notamment sur son pendant atténuation. La question du lien entre politiques urbaines et climat est ici traitée plutôt à travers l'entrée adaptation du territoire et à travers la compréhension de son microclimat local et les conditions climatiques futures qui s'imposeront à l'échelle régionale.
- **Les études à l'interface entre les sciences du climat et de la santé.** En particulier ceux en lien avec le risque de températures extrêmes en milieu urbain.

Ne sont donc pas ici explorés les thèmes de la qualité de l'air, l'hydrologie urbaine (sauf les études d'initiation de cellules convectives et d'amélioration des modèles de simulation microclimatiques), l'énergétique du bâtiment et le potentiel en énergies renouvelables du territoire.

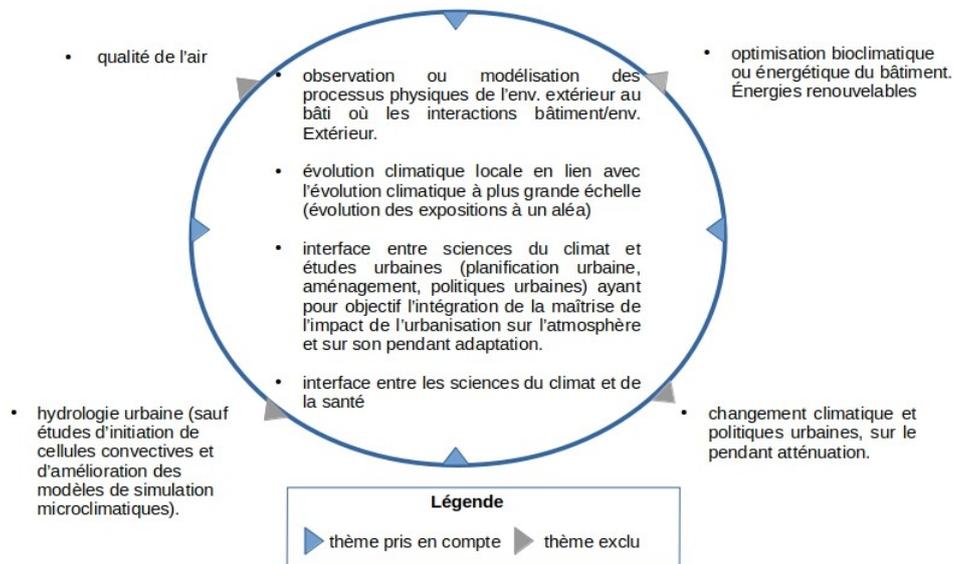


Figure 9. Périmètre thématique du panorama des recherches en climatologie urbaine présenté dans ce chapitre

Afin de délimiter le périmètre des pôles⁴⁴ de recherche, ont été pris en compte uniquement les collectifs et productions scientifiques autour des chercheurs permanents ayant porté des recherches (plus de deux publications en premier auteur) ou ayant encadré au moins une thèse dédiée au sujet. J'ai répertorié les contractuels et doctorants en poste sur ces équipes ; les articles ; projets de recherche ; thèses et HDR ; conférences internationales en cours ou finalisées avant septembre 2021. Cette date permet de prendre en compte par exemple les programmes de formation démarrant sur l'année scolaire 2020-2021.

Je me suis intéressée en priorité aux travaux portant sur le territoire français et également aux travaux ayant une visée opérationnelle. Pour ces derniers j'ai répertorié la littérature grise, par exemple sous forme de guides, afin d'avoir un aperçu des modalités de transfert. Dans un deuxième temps, j'ai étudié les projets et publications portant sur des terrains étrangers dont le portage de l'équipe française semble d'envergure (portage de projet français ou, pour les publications, dont le premier ou deuxième auteur sont de chercheurs dont l'employeur est français). **Les publications en français, anglais, espagnol et portugais ont été prises en compte.**

⁴⁴ Ici fait référence à une équipe de recherche ou à plusieurs équipes de recherche sur un territoire donné.

1. 4. Méthodologie :

Cet état de l'art a été dressé en plusieurs étapes itératives :

- **Une recherche via internet** où j'ai dressé une première ébauche des principaux pôles de recherche, des disciplines impliquées, ainsi que de la production bibliographique et des projets passés et en cours. J'ai également mobilisé ma liste de contacts personnelle et la liste de diffusion des membres participant aux ateliers sur le climat urbain organisés par le LIED à Paris en 2019, 2020 et 2021.
- **Quelques entretiens ciblés.** Je n'ai pas eu la prétention de mettre en place un protocole exhaustif d'entretiens mais je me suis néanmoins inspirée des méthodes mises en place par l'équipe au cours de travaux précédents pour construire une grille d'entretien semi-directif sur laquelle m'appuyer pour l'analyse. J'ai fait le choix d'une campagne d'entretiens ciblée entre mai 2020 et septembre 2021. J'ai privilégié la vision globale des activités de recherche que la personne peut apporter pour un pôle donné à l'exhaustivité de la liste d'interviewés.

J'ai enrichi l'analyse avec des lectures évoquant la construction disciplinaire de la climatologie urbaine sur le territoire français (Colombert et al. 2012, Soto et al. 2016, Bigot 2017). Je me suis également appuyée sur des publications institutionnelles autour de la recherche en climatologie urbaine ou des sujets connexes comme en modélisation ou en adaptation au changement climatique.

1.5 Une restitution raisonnée

Les sections suivantes ne prétendent pas proposer une revue complète des travaux développés par les équipes de recherche français qui ont travaillé sur les divers aspects de l'étude du climat en milieu urbain. L'objectif de ce chapitre est double et vise, d'une part, à exposer succinctement les thématiques et outils utilisés à l'heure actuelle en France afin de les mettre au regard de l'évolution réglementaire présentée précédemment. D'une autre part, l'objectif est de contextualiser mes activités de recherche en cartographie climatique présentées en troisième partie de ce manuscrit. Y est inclus en annexe la liste bibliographique exhaustive établie pendant ce panorama.

2. Une recherche en climatologie urbaine qui s'installe en France dans les années 1990 à 2000

Si à l'international les études en climatologie urbaine se mettent en place petit à petit dans les années 70 à 80, en France, il faut attendre plutôt les années 1990 pour que les laboratoires lancent des activités de recherche spécifiques sur ce sujet.

La première « grande »⁴⁵ campagne de mesures s'effectue à Paris en 1994 (ECLAP, Nov. 1994 à Mars 1995, *Menut et al., 2000*) portée par le Service d'Aéronomie⁴⁶, le LMDC⁴⁷ et EDF. D'autres campagnes d'ampleur similaire ont vu le jour à Marseille (ESCOMPTE, été 2002, *Cros et al., 2004; Mestayer and et al., 2005*) et Toulouse (CAPITOU, fév. 2004 à mars 2005, *Masson et al., 2008*) coordonnées par le CNRM. A la fin des années 2000, de nouveau à Paris et autour du projet européen MEGAPOLI, deux campagnes se sont succédées sur l'été/hiver 2009/2010 (*Baklanov et al. 2013*). Une dernière campagne appelée CAMCATT a eu lieu à Toulouse en juin 2021. L'obtention de ces jeux de données, très coûteux en termes de déploiement expérimental et humain, **Figure 10**, répond souvent à divers objectifs expérimentaux. Historiquement, on couple par exemple les études de qualité de l'air comme la formation et la transformation des aérosols urbains et la dispersion de rejets industriels, et de météorologie urbaine avec l'étude des échanges d'énergie entre la surface urbaine et l'atmosphère et l'impact de la ville sur l'écoulement de l'air au-dessus.

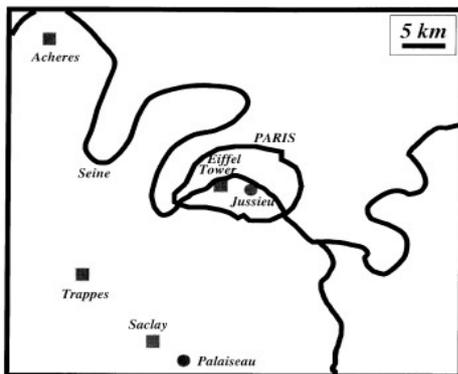


Fig. 1. Map of the surface and altitude measurements performed during the ECLAP experiment. Palaiseau and Jussieu are the two specific sites of measurements of ECLAP. The other sites are Acheres (instrumented mast), Saclay (instrumented mast), Trappes, (radiosoundings), and the Eiffel Tower (temperature measurements).

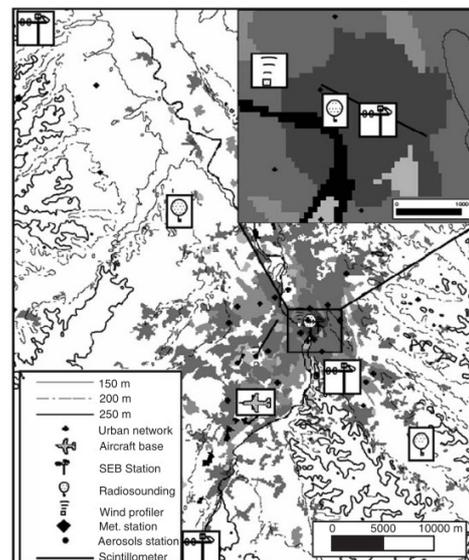


Figure 10. Déploiement expérimental pendant les campagnes ECLAP (haut à gauche), CAPITOU (haut à droite) et MEGAPOLI (en bas). Sources : Dupont et al., 1999, Masson et al. 2008, <http://megapoli.info/>

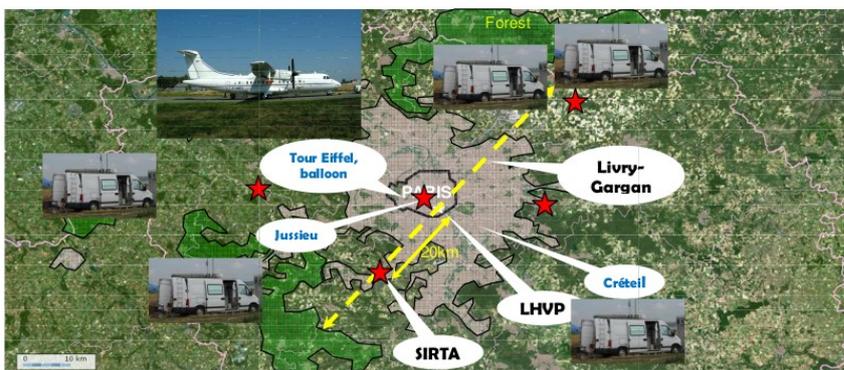


Figure 1: The campaign design included 3 primary (in black) and 3 secondary (in blue) fixed ground measurement sites, an aircraft and 5 mobile platforms. Primary sites are devoted to aerosols and gas phase chemistry, secondary sites to active and passive remote sensing. A specific lidar network was set-up at a central Paris site and at 4 cardinal points during the winter campaign (red stars).

⁴⁵ Ici grande fait référence au déploiement de moyens de mesure coûteux

⁴⁶ Devenu le LATMOS, Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales

⁴⁷ Laboratoire de Meteorologie Dynamique

L'îlot de chaleur urbain a ainsi été monitoré sur diverses villes françaises à partir de ces moyens expérimentaux éphémères. Son amplitude et intensité varient en fonction de la localisation, les caractéristiques de la ville et les conditions météorologiques à plus grande échelle. Par exemple à Marseille il n'excède pas 3°C à cause de l'effet rafraîchissant de la brise marine (Lemonsu *et al.* 2004). Pour des villes continentales, ces valeurs sont plus fortes. Il atteint 6°C à Toulouse, avec une extension verticale de 2200 m (Hidalgo *et al.* 2008a). Il est de 7.5 °C à Strasbourg (Ficher, 2009) ou encore 10°C à Paris sous conditions favorables de ciel clair, mais, de seulement de 2.3°C dans les jours venteux et couverts (Cantat, 2004). Depuis quelques années, des réseaux d'observation à vocation pérenne ont été mis en place, [Figure 11](#). Ils sont maintenus et administrés par des équipes locales de chercheurs à Rennes (depuis 2006) et Dijon (2014) tandis qu'à Toulouse, un partenariat entre Météo-France et Toulouse Métropole a permis la mise en place à partir de 2017 d'un monitoring du climat local en temps réel directement géré par la collectivité.

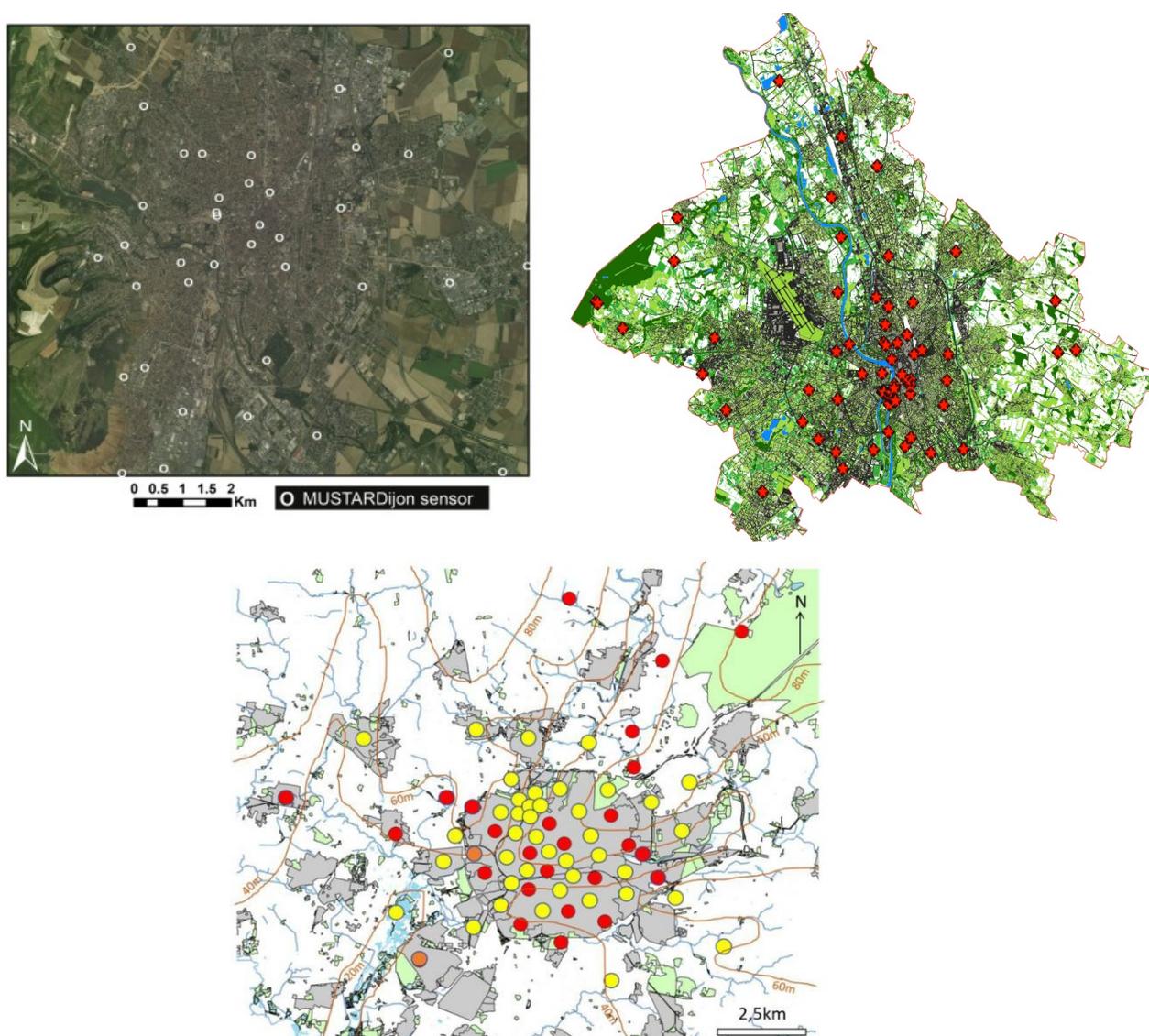


Figure 11. Réseaux pérennes d'observation de Dijon, Toulouse et Rennes respectivement

3. Des études à l'échelle du quartier pour étudier avec précision une multiplicité de sujets en lien avec le microclimat

Des campagnes de mesure sur des périmètres spatiaux plus restreints (du quartier à la rue) ont eu lieu sur différentes villes. Strasbourg par exemple a mis en place en 2002, dans le cadre du projet RECLUS, un échafaudage installé dans une rue qui a permis de réaliser des mesures continues de différents paramètres météorologiques sur quatre niveaux. L'objectif était de documenter les différents processus physiques qui interviennent dans l'élaboration du microclimat à l'intérieur d'un canyon urbain et de valider des méthodes d'agrégation permettant, via la modélisation physique, le passage d'échelles entre le canyon et le quartier (Najjar *et al.*, 2004). L'étude du végétal en milieu urbain a fait l'objet de plusieurs études basées sur des mesures physiques. Tout d'abord ECORURB, avait permis d'étudier de 2003 à 2012, à Rennes et Angers, les effets de l'urbanisation et du climat sur la biodiversité locale et sur l'émergence de risques biologiques. Entre 2012 et 2015, Strasbourg a également fortement investi le sujet de l'évaluation et la modélisation des interactions entre le végétal et le milieu urbain. Les objectifs étaient d'étudier comment les interactions entre un arbre et le milieu urbain modifient le comportement végétal et aussi dans quelle mesure les espaces verts améliorent « l'ambiance climatique » et le confort des populations riveraines. Pour cela la végétation a été suivie sur 2 sites sur trois saisons végétatives complètes. Vingt-trois sites de mesures complémentaires sur Strasbourg et alentours ont complété ce projet.

Sans vouloir être exhaustive sur tous les projets effectués autour du couple climat-végétal en milieu urbain, je finirai par citer le projet ANR-VegDUD (2010-2014) qui a visé à nous doter de moyens (connaissances, outils) d'évaluation des impacts de politiques urbaines de végétalisation des espaces privés et collectifs. Un riche consortium composé de groupes de recherche et de bureaux d'études a permis sur son volet observation (un volet modélisation était aussi présent dans ce projet), de faire un état de l'art et de recenser, via des enquêtes, des pratiques du végétal urbain ; via la télédétection, d'explicitier la place occupée par la végétation en lien avec l'espace bâti et de définir ses caractéristiques et sa représentation spatiale sur Nantes (Figure 12).

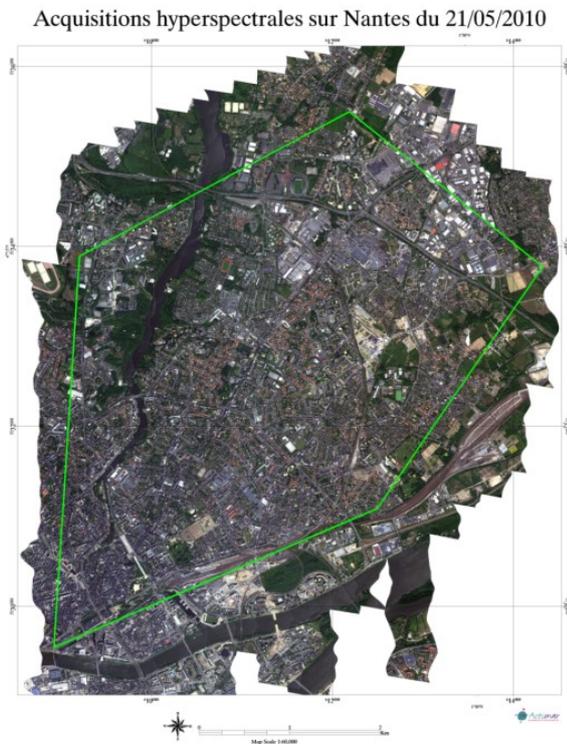


Figure 3 : Image acquise par télédétection hyperspectrale

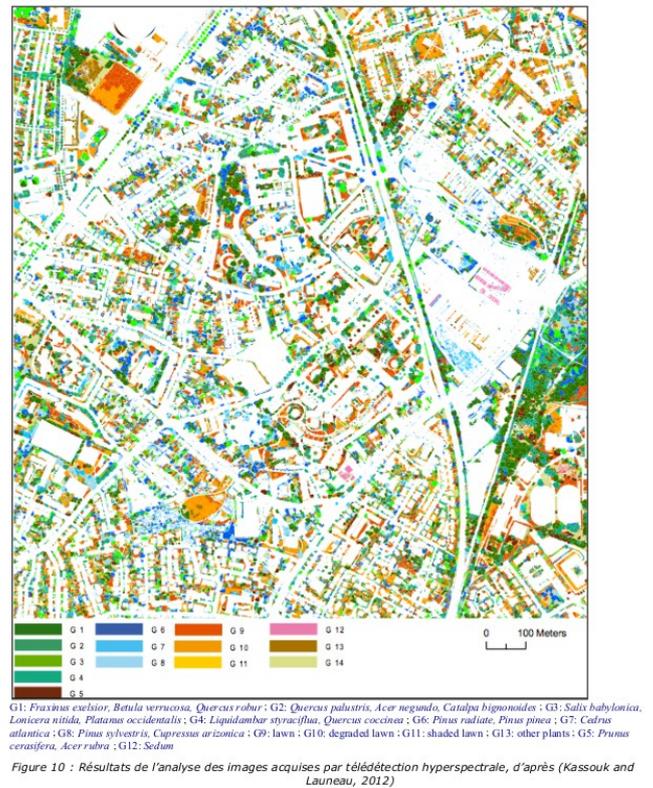


Figure 12. Observation et caractérisation de la végétation urbaine à partir de moyens de télédétection

Dans le cadre du précédent programme de recherche deux campagnes de mesures atmosphériques, FluxSAP 2010 et 2012 ont été programmées. Elles ont eu pour objectif de quantifier l'importance de la végétation dans les flux de chaleur et de vapeur d'eau d'un quartier mixte. Elles ont été réalisées autour du site d'observation hydro-météorologique permanente de l'Institut de recherche en sciences et techniques de la ville (IRSTV) et étaient principalement orientées vers la faisabilité de la mesure au-dessus d'un sol très hétérogène, en mettant en œuvre en parallèle cinq jeux de capteurs permettant potentiellement de mesurer ces flux et en évaluant leur origine. L'objectif était de séparer les contributions des différents modes d'occupation des sols.

Le lien entre microclimat urbain et ressenti humain a fait l'objet de diverses études à Toulouse. Dès 2010 avec le projet PIRVE « Formes urbaines, modes d'habiter et climat urbain dans le périurbain toulousain. Projet exploratoire de recherche interdisciplinaire. », et entre 2012 et 2016 à Paris, Marseille et Toulouse avec le programme ANR-EUREQUA⁴⁸. Dans ces projets, méthodes de mesure physique et enquêtes (Figure 13) ont été déployées simultanément afin d'évaluer la perception et le ressenti d'habitants et usagers des espaces publics en différents lieux du quartier (Lemonsu et al. 2019; Haouès-Jouve et al. 2021).



Figure 13. Description du protocole instrumental pendant le projet EUREQUA. Structure portable pour les mesures de micrométéorologie (à gauche) et enquête itinérante (à droite) (source : Lemonsu et al. 2019)

⁴⁸Haouès-Jouve S, Lemonsu A, Gauvreau B, Amossé A, Can A, Carissimo B, Gaudio N, Hidalgo J, Lopez-Rieux CX, Chouillou D, Richard E, Adolphe L, Berry-Chikhaoui I, Bouyer J, Challéat S, de Munck C, Dorier E, Guillaume G, Hoonart S, Le Bras J, Legain D, Levy J-P, Masson V, Marry S, Nguyen-Luong D, Rojas Arias J-C, Gao Z (2021) EUREQUA project : an interdisciplinary and participative approach to assess urban environmental quality. *Environment and Planning B : Urban Analytics and City Science*, accepted.

4. De l'observation aux outils de modélisation

Les observations physiques proportionnent une information, bien que précise, spatiale et temporellement partielle. Les études basées sur ces observations font ainsi face à la difficulté de décrire la dynamique spatiale et temporelle de phénomènes comme l'îlot de chaleur urbain, *Figure 14*, le dôme urbain, la brise urbaine, le panache urbain, ou encore les effets sur la brise marine, le brouillard ou la précipitation qui ont des caractéristiques spatiales et temporelles particulières. Ces études sont ainsi souvent couplées à des exercices de modélisation numérique, où ces données mesurées servent comme données d'entrée du modèle.

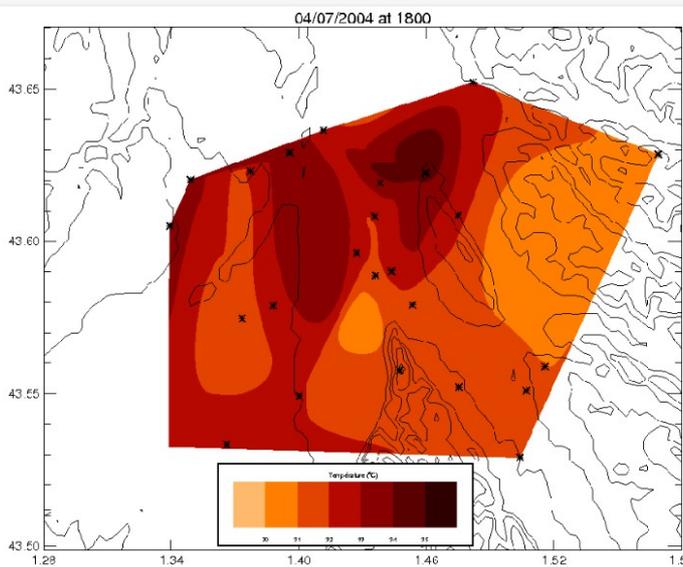
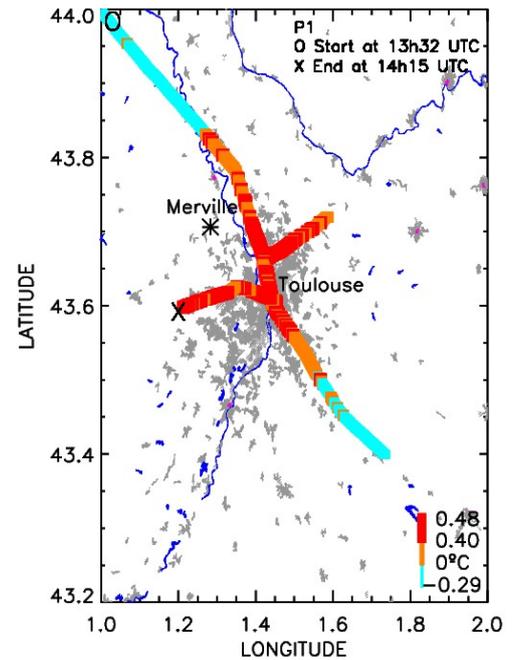
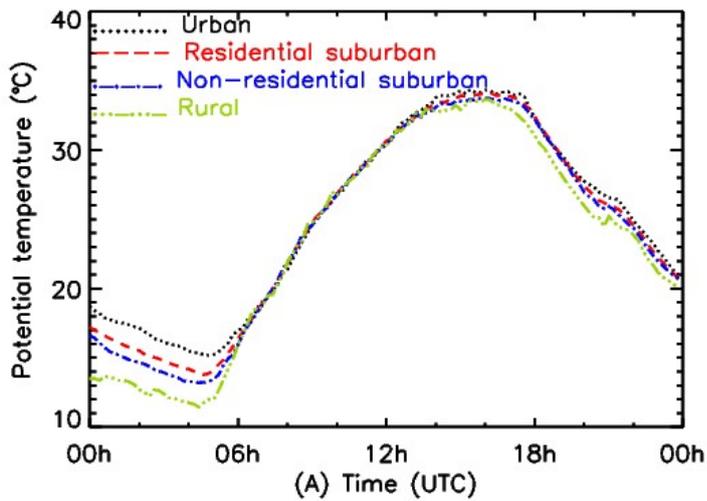


Figure 14. Diverses représentations de la température de l'air pendant la campagne CAPITOU. En haut à gauche, l'évolution journalière de la température de l'air sur différentes zones urbaines à partir de stations météorologiques. En haut à droite, évolution spatiale de la température de l'air à partir de transects d'avion. En bas, spatialisation de la température de l'air à partir de mesures de stations météorologiques (Source : Hidalgo et al. 2008a ; Toutai et al. 2020)

Les outils de simulation numériques ont l'avantage d'offrir une couverture spatiale exhaustive du domaine d'étude et permettent d'obtenir des informations aussi bien verticalement qu'horizontalement. Un autre avantage est qu'ils permettent d'explorer aussi bien des événements passés que des projections et scénarios futurs. Les équipes françaises sont très actives dans le développement de ces outils soutenues d'une part, par le besoin opérationnel d'améliorer la représentation de la surface urbaine dans les modèles de prévision du temps de Météo-France, et d'autre part, par le besoin d'améliorer la représentation de la surface urbaine dans les modèles climatiques portés par les équipes de modélisation du climat global, équipes qui sont très impliquées dans les exercices du GIEC. Masson et al. (2021), Lemonsu (2018) ont proposé des revues de l'état de l'art sur le développement de ces outils de modélisation mais je ne citerai ici que les principaux types de modèles actuellement utilisés et maintenus par les équipes françaises.

4.1 Les outils de modélisation

4.1.1 La modélisation géostatistique

Les techniques de modélisation spatiale permettent d'établir des relations entre les caractéristiques de surface (topographie, occupation du sol) et les variables météorologiques. Ces méthodes permettent de spatialiser les valeurs d'un paramètre mesuré, souvent la température de l'air, sur quelques postes météorologiques irrégulièrement répartis afin d'obtenir une valeur en tout point de l'espace. Avec l'émergence des outils de SIG et l'augmentation des capacités de calcul des ordinateurs, la spatialisation avec les méthodes statistiques multicritères a été utilisée dans de nombreuses études de la climatologie appliquée pour divers sujets, notamment l'agriculture, l'agroforesterie et les études en terrain complexe (Quenol, 2011).

L'application de ces méthodes de spatialisation de variables atmosphériques aux échelles fines nécessite des données fines décrivant les caractéristiques de surface comme les modèles numériques de terrain et les bases de données d'occupation du sol produits par l'IGN, l'Urban Atlas, ou encore récemment la base de données urbaine issue du projet ANR-MApUCE. Plusieurs outils de spatialisation des données atmosphériques issues de moyens de mesure éphémères ou pérennes ont été développés par les équipes de Rennes, Dijon et Toulouse (Touati et al. 2020 ; Joly 2018), *Figure 15*.

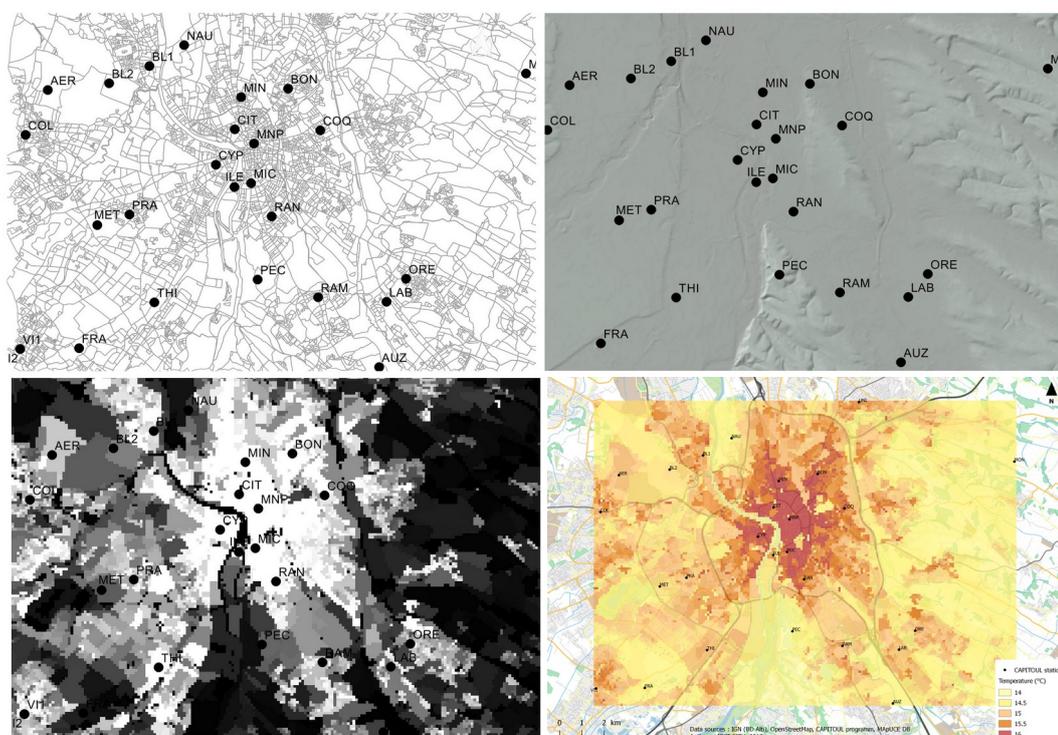


Figure 15. Exemple de données d'entrée (positionnement des données de la température de l'air, topographie, fraction urbaine) et résultat de la spatialisation via le plug-in développé par Touati et al. (2020)

La modélisation géostatistique permet donc de mettre en relation des facteurs géographiques et environnementaux et a le grand avantage de la relative économie de temps et de puissance de calcul par rapport à d'autres méthodes de modélisation plus gourmandes. En effet les outils de modélisation géostatistique ne nécessitent pas de capacités de calcul importantes et un simple PC portable peut aujourd'hui résoudre les calculs en quelques minutes. Les principaux désavantages sont, d'une part, la résolution de lecture des cartes résultantes qui ne peuvent pas être faites à la maille, elle doit rester plus large, par exemple l'échelle du quartier pour la Figure précédente. D'autre part, le manque de prise en considération de la circulation atmosphérique qui peut être un facteur déterminant des conditions microclimatiques à un instant T pour des villes côtières ou proches du relief.

Des modèles physiques de dynamique de fluides permettent de surpasser ces limitations et de produire une représentation de la complexité des transferts entre le sol et l'atmosphère. Ces modèles sont utilisés depuis plusieurs décennies dans la prévision du temps et dans les exercices de projections climatiques. L'augmentation considérable de la puissance de calcul a permis l'amélioration de leur résolution spatiale et leur complexité avec une représentation de la surface de plus en plus adaptée aux études en milieu urbain.

4.2.2 La modélisation dynamique

Il existe plusieurs familles de modèles physiques qui permettent d'aborder les phénomènes météorologiques et climatiques à différentes échelles urbaines, de celle de toute la ville à celle d'un aménagement ou d'une rue. En fonction de l'étendue du domaine d'étude (ville, quartier, rue) la résolution spatiale, le besoin en données de surface et la physique du code numérique varient. Ces modèles ont l'avantage d'accéder à des données atmosphériques sur un continuum 3D, de pouvoir calculer des grandeurs difficilement mesurables (comme les flux turbulents par exemple ou les échanges de chaleur et humidité) et permettent d'évaluer aussi bien des scénarios d'urbanisation que climatiques. Cette stratégie est donc de plus en plus utilisée pour quantifier les effets de certaines stratégies d'adaptation comme l'introduction de végétation, la modification des formes urbaines ou encore l'utilisation de matériaux innovants.

Plusieurs modèles français permettent d'effectuer une modélisation du bilan radiatif à l'échelle de la rue ou d'un aménagement (*Figure 16*) comme le modèle SOLENE (Groleau, 1998) élaboré au CERMA de Nantes ou le modèle DART⁴⁹ développé au CESBIO par exemple.

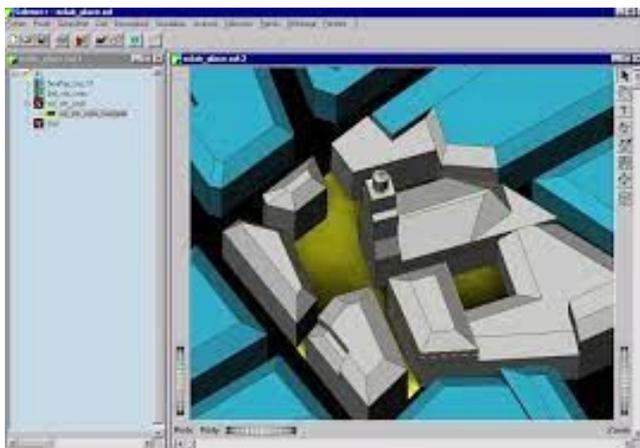


Figure 16. A gauche, exemple d'interface du modèle SOLENE pour le calcul de l'ensoleillement et à droite exemple de simulation d'image de radiométrie en bleu/blanc/rouge à partir du modèle DART (Sources : Groleau, 2000 et site web du modèle DART)

⁴⁹ <https://www.cesbio.cnrs.fr/dart/>

Pour la suite je vais me concentrer sur les modèles numériques qui permettent de produire des diagnostics atmosphériques et de consommation d'énergie à l'échelle urbaine, car ces outils sont les plus à même d'alimenter en données les études associées aux exercices et aux outils de planification urbaine.

Météo-France est à l'origine du modèle Town Energy Balance (TEB, Masson 2000), modèle qui permet d'effectuer des simulations à l'échelle urbaine avec une résolution horizontale kilométrique voire hectométrique. Ce modèle a permis des avancées significatives dans la modélisation des processus de surface, du microclimat dans la rue, de la dynamique temporelle et de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. Ce modèle urbain peut travailler de façon autonome mais il peut être intégré à une plateforme de modélisation appelé SURFEX (Masson et al., 2012) qui permet de représenter la ville dans son environnement naturel. Quand SURFEX est en plus couplé à un modèle atmosphérique à méso-échelle (échelle régionale), il permet de représenter des interactions avec l'atmosphère au-dessous (Figure 17). Ceci est nécessaire par exemple sur des configurations orographiques complexes ou près des zones côtières où des brises générées ailleurs peuvent fortement modifier les conditions microclimatiques locales. En France le modèle Meso-NH (Lac et al., 2018) est souvent utilisé mais d'autres modèles à méso-échelle comme WRF sont également utilisés notamment par les équipes de Dijon et Strasbourg (Kholer et al. 2017 ; Kholer et al. 2016).

Le modèle TEB a été en constante évolution depuis ses origines. Des travaux au CNRM ont permis l'amélioration de la prise en compte des interactions entre surfaces bâties et végétation. Diverses collaborations avec des équipes nationales et étrangères ont également été mises en place afin d'améliorer chacune des composantes du modèle. Par exemple, des collaborations ont été établies avec les chercheurs en hydrologie de l'IFSSTAR (Stavropoulos-Laffaille, 2018) pour tenir compte de la présence d'eau et de neige sur les routes et les toits ; avec des architectes du laboratoire de recherche en architecture de Toulouse (Tornay, 2017) pour tenir compte des matériaux et techniques constructives dans les différentes régions françaises ; ou encore avec des sociologues du LATTs (Schoetter, 2017) pour tenir compte de la typologie d'usager et la consommation d'énergie des ménages dans leur résidence.

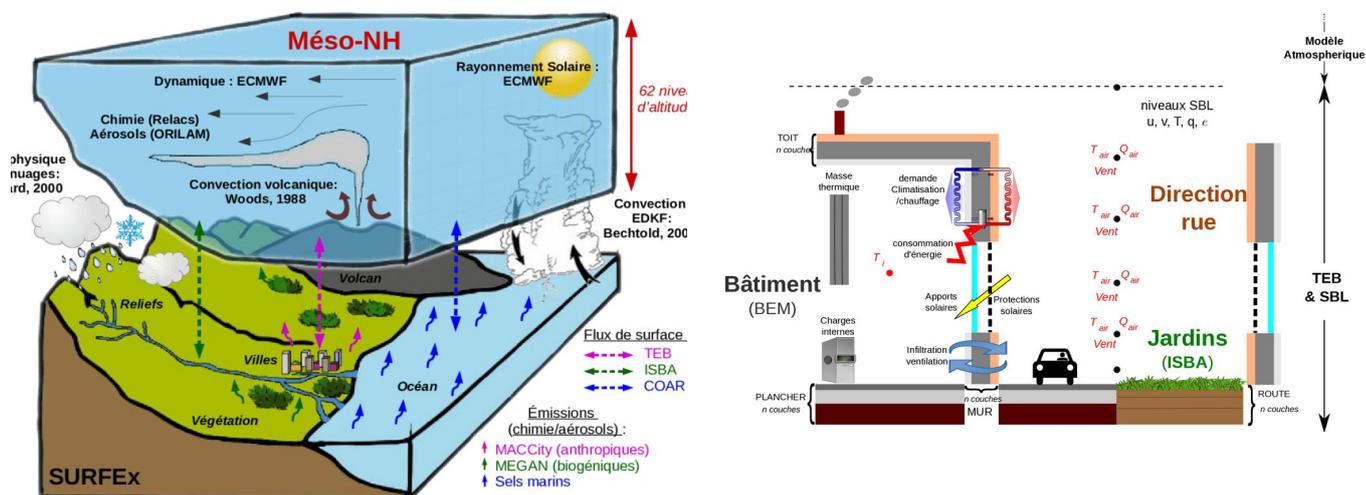


Figure 17. A gauche schéma de présentation du modèle Meso-NH couplé à SURFEX. A droite les différentes paramétrisations physiques prises en compte dans le modèle urbain TEB (Source : Foucart, 2019 ; Météo-France)

En s'appuyant sur ce modèle, plusieurs projets de recherche ont permis de produire des connaissances sur divers phénomènes du climat urbain et même d'arriver à une version opérationnelle au service des collectivités territoriales. Ils ont été ainsi étudiés :

- La caractérisation de l'ICU et de la couche limite urbaine à Strasbourg (Kastendeuch, 2010).
- Les Interactions entre l'ICU et la brise marine (Lemonsu et al., 2006) ou encore la génération de la brise urbaine à Paris (Lemonsu and Masson, 2002) et Toulouse (Hidalgo et al. 2008a and 2008b).
- Cet outil a également été utilisé pour évaluer l'impact des scénarios climatiques et d'aménagement sur le confort d'été avec ou sans évolution dans le temps de la surface urbaine (EPICEA (2008-2010)⁵⁰, CLIM2 (2009-2010)⁵¹, ANR-VURCA (2009-2012)⁵², ANR-MUSCADE (2009-2011)⁵³, RTRA-ACCLIMAT (2010-2012)⁵⁴).
- Le projet RTRA-ACCLIMAT (2010-2012) a permis de proposer une plateforme multi modèles (évolution microclimatique en fonction de l'évolution du climat régional, de la tâche urbaine et de techniques constructives et de rénovation) nommée CLUE. La plateforme *CLUE de Météo France* est passée aujourd'hui en phase opérationnelle aux bureaux d'études de Météo-France qui ont déjà proposé plusieurs projets aux villes de Strasbourg, Marseille et Lille.
- Des simulations microclimatiques ont été produites dans le cadre du projet de recherche ANR-MapUCE (2015-2019) pour une cinquantaine de villes en France (Schoetter et al. 2019, Gardes et al., 2020). Dans ce cadre des informations concernant l'îlot de chaleur urbain pour deux situations météorologiques (types de temps) favorables à son développement et des informations sur la direction et intensité du vent sont disponibles. Plusieurs projets de recherche ont été depuis développés et ont permis d'améliorer certains de ses outils : le projet ADEME-PAENDORA (2017-2019) et (EU-URCLIM 2018-2020)

⁵⁰ <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article271>

⁵¹ <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article370>

⁵² <http://www.cnrm.meteo.fr/ville.climat/spip.php?rubrique45>

⁵³ <http://www.cnrm.meteo.fr/ville.climat/spip.php?rubrique48>

⁵⁴ <http://www.cnrm.meteo.fr/ville.climat/spip.php?rubrique46>

5. Discussion

Le projet ANR-MApUCE fut un moment charnière dans la production de données urbaines et climatiques par la recherche. Les études précédentes citées dans cet état de l'art, avaient permis d'étudier les caractéristiques microclimatiques d'environ une dizaine de villes sur lesquelles il y avait une expertise locale sur le sujet. Ces études avaient également été nécessaires pour mettre au point différentes approches méthodologiques, en particulier le développement des outils de modélisation climatique à l'échelle urbaine comme SURFEX/TEB du CNRM.

Entre 2015 et 2019, le consortium autour du projet ANR-MApUCE met en place de nouvelles méthodes de production de données décrivant la surface urbaine, ce qui permet de produire des simulations microclimatiques pour n'importe quelle ville en France. En effet, la modélisation du climat urbain nécessite des bases de données de plusieurs résolutions et natures (atmosphériques, de terrain, urbaines) en fonction des processus étudiés et du modèle. Certaines de ces données doivent être géospatiales afin de définir les caractéristiques de l'urbanisation (morphologie du bâti notamment) et l'occupation du sol. D'autres données peuvent provenir de bases de données non spatiales à l'origine et la spatialisation se fait directement sur l'étape de modélisation. Ce fut le cas lors des simulations MApUCE avec la base de données architecturale Danube développée par le LRA et le LMDC.

Dans le cadre de la modélisation climatique, il est crucial d'accéder aux informations permettant de caractériser les matériaux urbains et leurs propriétés thermo-radiatives. Cette description n'était pas généralisable avant le projet et la faisabilité a été testée sur le panel de cinquante villes lors du projet MApUCE. Pour cela, il a été nécessaire de développer une méthode de traitement automatique d'indicateurs décrivant le tissu urbain et l'occupation du sol (Bocher et al., 2018) qui est devenu depuis l'outil GeoClimate (Bocher et al. 2021).

La BD-MApUCE issue de ce traitement, contient un ensemble d'indicateurs calculés à trois échelles spatiales correspondant au bâtiment, au bloc de bâtiments et à l'îlot sur la base d'un jeu de données d'entrée de 2014 fourni par les instituts français de statistique (INSEE-Recensement) et de géographie (IGN-BDTopo V2.2, BD Parcellaire). Les îlots sont délimités par le réseau routier, le réseau hydrographique et d'autres éléments qui segmentent l'espace comme les surfaces de végétation. Les indicateurs au niveau des îlots sont disponibles en libre accès sur : <http://data.orbisgis.org/#> ; 64 indicateurs sont disponibles. Ils sont organisés en 5 catégories : les nombre d'éléments (bâtiments, blocs), les caractéristiques de surface (par exemple, densité de surface des bâtiments, végétation et routes), les distances (distance entre les bâtiments, entre les bâtiments et les routes pour chaque bloc, etc.), la forme (volume du bâtiment, compacité du bloc et hauteur moyenne d'immeubles par îlot, etc.) et enfin la catégorie « autres » regroupant les indicateurs pertinents dans le contexte d'études de microclimat urbain et architectural (volume passif, direction principale, intérieur cours, etc.).

A partir de cet ensemble d'indicateurs morphologiques et d'occupation des sols, plusieurs indicateurs ont été dérivés pour produire des classifications du tissu urbain utiles à l'analyse microclimatique. En particulier les indicateurs morphologiques précédemment mentionnés ont été utilisés pour identifier automatiquement 10 archétypes représentatifs de la plupart des bâtiments français (Tornay et al., 2017) et une typologie complémentaire appelée « Local Climate Zones, LCZ » (Hidalgo et al. 2018b) qui prend en compte la disposition des bâtiments au sein des quartiers et leurs impacts microclimatiques potentiels. Cette typologie est couramment utilisée par les climatologues urbains et a commencé à être utilisée au niveau opérationnel par plusieurs villes en France, comme Paris, Nancy ou Toulouse (Dumas, 2017).

Pour ces archétypes, des données décrivant la matérialité et les techniques constructives sont organisées dans la base de données Danube précédemment introduite. Cette base de données a été construite en croisant la typologie de bâtiment, l'usage, la zone géographique et la date de construction, et en associant à ces combinaisons des solutions constructives cohérentes avec l'évolution de l'architecture et des réglementations urbaines successives.

Le développement et le croisement de ces deux jeux de données (BD-MApUCE et BD-Danube) ont été indispensables pour la démocratisation des applications micro-climatiques concernant la caractérisation thermique et aéraulique des milieux urbanisés et ceci non seulement en France mais aussi à l'international. En effet, le projet international WUDAPT⁵⁵ qui a pour objectif de fournir des paramètres et propriétés urbains pertinents pour les modèles de climat global et les modèles à méso-échelle s'est inspiré de la méthodologie mise en place pendant MApUCE⁵⁶.

Ces dernières années, plusieurs programmes institutionnels ont accompagné la création de projets de recherche de plus en plus interdisciplinaires et appliqués, créant un terreau favorable à l'émergence de ce type de projets.

Créé en novembre 2006 par le CNRS en partenariat avec le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable des Transports et du Logement (MEDDTL)⁵⁷, le programme PIRVE (Programme Interdisciplinaire de Recherche Ville et Environnement (2008-2012)) a soutenu des projets se situant à l'interface des sciences humaines et sociales et des autres grands champs disciplinaires concernés par l'étude des milieux urbanisés et l'environnement : sciences de l'environnement, de la vie, de l'ingénieur, de la terre et de l'atmosphère. Dans le contexte Toulousain, ce programme a permis en 2010 une première rencontre entre chercheurs du CNRM et du LISST autour du projet « Formes urbaines, modes d'habiter et climat urbain dans le périurbain toulousain. Projet exploratoire de recherche interdisciplinaire ».

Dans le cadre des collaborations CNRM-LISST autour du duo climat & urbanisme, deux autres appels à projets de recherche ont été importants. L'Agence Nationale de la Recherche (ANR) avait lancé entre 2010 et 2013 plusieurs programmes dédiés aux questions de Ville Durable. Ce programme est devenu ensuite Bâtiments et Villes durables et a financé en 2014 le projet MApUCE.

L'ADEME a été un autre bailleur de fonds important pour nous avec des programmes de recherche appliqués. L'appel MODEVAL-URBA (2014-2019) a financé le projet PAENDORA (2017-2019) qui avait pour objectif de rendre opératifs un certain nombre de résultats du projet MApUCE et tout récemment, l'appel PACTE2 en 2021, a financé le projet PAENDORA2 pour la période 2022-2024.

La production de la donnée climatique spatiale à l'échelle urbaine reste encore à la portée de quelques groupes très peu nombreux de recherche et des bureaux d'étude de Météo-France. Nous avons néanmoins aujourd'hui des outils de modélisation et des données d'occupation du sol et de description de la surface urbaine suffisamment fines pour créer des diagnostics géographiques et microclimatiques spatiaux (de stress thermique, d'îlot de chaleur urbain, de ventilation). Ceci est important pour que n'importe quelle ville puisse, si elle en a la volonté, aborder la question de l'adaptation à la hausse de températures sur son territoire.

⁵⁵ <https://www.wudapt.org/>

⁵⁶ <http://cger.nies.go.jp/gcp/pdf/gcp-wudapt-workshop-program-jun2016/ching.pdf> pg 23

⁵⁷ Deux services de recherche du Ministère (le Plan Urbanisme Construction Architecture / PUCA et la Direction de la Recherche et de l'Innovation / DRI)

Synthèse de la PARTIE II

L'intention de la partie II

Cette deuxième partie avait pour objectif d'illustrer comment les recherches en climatologie urbaine rencontrent les nouvelles injonctions réglementaires en termes de climat à l'échelle urbaine, en particulier pour ce qui relève de la gestion du confort d'été et du risque de températures extrêmes. L'échelle d'analyse était ici nationale et cette partie a donc un rôle de mise en contexte – scientifique et opérationnel- des recherches effectuées sur la cartographie climatique, qui sont présentées en partie III de ce mémoire.

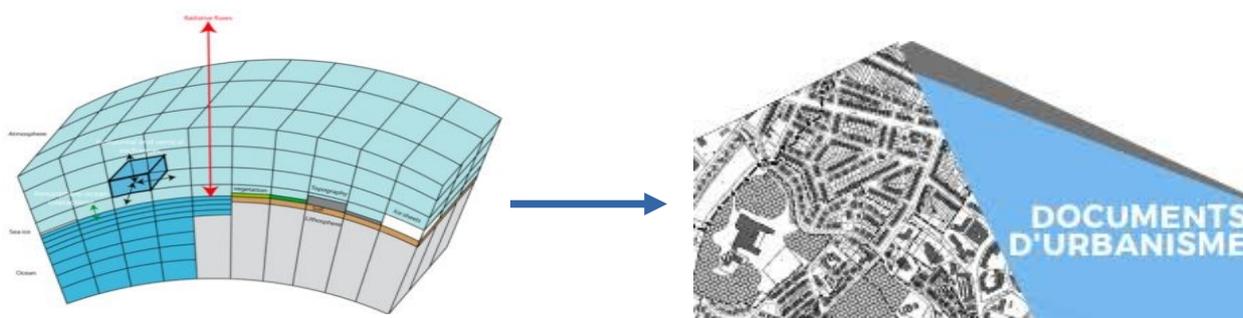
Les moyens mis en œuvre

Cette Partie II prend appui sur des collaborations avec Marie-Laure Lambert, juriste de l'environnement au laboratoire LIEU à Aix en Provence, avec Sinda Houès-Jouve, géographe urbaniste au LISST et les équipes de Toulouse métropole et l'agence d'urbanisme. Il a été ainsi nécessaire de travailler sur l'analyse du cadre réglementaire et du cadre opérationnel d'élaboration des outils d'urbanisme. Il a été également nécessaire de faire un état de l'art des travaux de la communauté de recherche en climatologie urbaine basé sur la lecture bibliographique et des entretiens. Les ressources issues des travaux associés à cette Partie II sont les suivants.

- **2020** Touchard O., Haouès-Jouve S., **Hidalgo J.** et Bretagne G. Kit des données clés de l'adaptation. Diagnostiquer l'adaptation au changement climatique dans les documents d'urbanisme. ADEME.
<https://www.ademe.fr/kit-donneescles-ladaptation>
 - **2019** Lambert ML, **Hidalgo J**, Masson V, Bretagne G et Haouès-Jouve S, Urbanisme et (micro-) climat. Outils et recommandations générales pour les documents de planification. Guide Méthodologique issu du projet MapUCE
 - **2017** Lambert ML, Demazeux C et Gallafrio M. Fiches-outils: Le PLU(i), Règlement du PLU(i)
<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354285v1>
 - **2013** Lambert-Habib M. L., **Hidalgo J.**, Fedele C., Lemonsu A. and Bernard, C. How is climatic adaptation of cities taken into account by legal tools? – Focus on the introduction of water and vegetation in the French town planning documents. Urban Climate (4), 16-34
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095513000102>
-
-

Les messages clés

- Depuis une vingtaine d'années, l'évolution réglementaire a permis la création d'un contexte favorable à la prise en compte des enjeux climatiques et énergétiques à l'échelle locale. Des outils spécifiques comme le PCAET ont été créés et les outils de planification réglementaire, SCoT et PLU, ont aujourd'hui les fondements juridiques nécessaires pour encadrer cette prise en compte du climat local et les enjeux qui lui sont associés chaque fois qu'ils seront portés politiquement dans ce sens.
- A l'échelle urbaine le PLU(i) est le document central en matière d'urbanisme et mes recherches ont eu pour objectif l'étude du contexte juridique et technique de ce document.
- Les recherches en climatologie urbaine en France sont riches et diversifiées. Les sujets étudiés sont principalement, l'impact de la surface urbaine dans son atmosphère proche aux échelles de temps météorologiques et climatiques ; l'évolution climatique locale en lien avec l'évolution climatique à plus grande échelle ; les études à l'interface entre les sciences du climat et les études urbaines (planification urbaine, aménagement, politiques urbaines) ayant pour objectif la maîtrise de l'impact de l'urbanisation sur l'atmosphère et les études à l'interface entre les sciences du climat et de la santé.
- Ces équipes ont pu développer des études de climatologie urbaine de caractère fondamental (étude des phénomènes à partir de la mesure et la modélisation) et appliquées (en collaboration avec les acteurs de l'urbanisme) pour environ une dizaine de villes. Le projet ANR-MApUCE (2015-2019) fut néanmoins un moment charnière dans la production de données urbaines et climatiques par la recherche. Ce consortium a mis en place de nouvelles méthodes de production de données décrivant la surface urbaine, ce qui permet de produire des simulations microclimatiques pour n'importe quelle ville en France.



Des données climatiques... au diagnostic cartographique utile en planification urbaine

La production de connaissances n'est qu'un des aspects nécessaires à la mise en place des plans d'adaptation. La partie III de ce mémoire explore un autre de ces aspects, les techniques d'analyse, visualisation, de mise en forme et traduction des résultats des simulations climatiques pour qu'elles puissent être pris en compte dans un document d'urbanisme. Ce chantier autour de la cartographie climatique était au cœur de mon projet de

Partie III: Une contribution aux recherches à l'interface entre sciences du climat et l'urbanisme via leur dimension cartographique

Chapitre Premier : Vue d'ensemble des travaux portés sur la cartographie climatique

1. La cartographie à visée opérationnelle est un champ mature pour un certain nombre d'enjeux environnementaux mais c'est un champ de recherche émergeant pour le climat

Dans cette Partie III je vais aborder la question de la cartographie climatique à visée opérationnelle. Je m'intéresse à chercher comment les techniques de spatialisation et visualisation de données atmosphériques peuvent venir abonder une pratique cartographique qui a déjà fait ses épreuves pour rendre opératoires dans les pratiques d'urbanisme d'autres enjeux environnementaux.

Je m'intéresse plus particulièrement aux conditions nécessaires à sa production et à la diversité de représentations qui peuvent être explorées pour répondre aux différents objectifs, comme par exemple, représenter graphiquement un phénomène physique, ou encore, produire un support de médiation qui facilite la co-construction en transdisciplinarité d'un diagnostic microclimatique, d'une représentation spatiale des enjeux, voire d'un projet urbain.

D'une manière générale, la cartographie d'aide à la décision en aménagement et urbanisme s'est beaucoup développée au cours des cinquante dernières années. Déjà dans l'année 2000, Steinberg discutait cette évolution du point de vue de la sémiologie graphique des cartes et plans réglementaires, des cartes d'occupation et d'utilisation du sol, des cartes des aptitudes et contraintes des territoires, de l'environnement et des risques naturels et technologiques, etc...

En effet, l'émergence des techniques d'informatique graphique, des systèmes d'informations géographiques (SIG) et de la télédétection, ont permis de produire des données spatiales adaptées aux démarches d'aide à la décision des collectivités locales : cadastres et réseaux intra-urbains, systèmes de transport, données socio-démographiques, données sur le logement, sur les activités économiques, etc. La collecte de données et le développement d'outils de modélisation environnementaux sont venus rajouter une myriade de données de nature et résolutions diverses qui peuvent être combinées ou croisées aux données précédemment citées.

Les travaux de recherche ont toujours permis de nourrir les méthodologies utilisées pour l'élaboration des documents graphiques opérationnels⁵⁸. Dans le cadre de la gestion des enjeux environnementaux, c'est le cas par exemple, des Plans d'Exposition aux Risques (PER), des cartes en lien avec la trame verte ou l'agriculture, la qualité et ressources en eau, la qualité de l'air ou encore les nuisances sonores.

Afin de garantir l'homogénéité et l'interopérabilité des productions de données et cartographies, la Commission interministérielle de validation des données pour une information spatialisée (COVADIS) et le Conseil

⁵⁸ Ministère de l'Équipement, ministère de l'Environnement, *Environnement et aménagement : cartes utiles*

national de l'information géographique (la CNIG) développent des standards qui ont pour but de faciliter les échanges entre les différents acteurs du domaine de l'urbanisme.

Ces standards sont très précis et vont proposer plusieurs types de recommandations : un modèle conceptuel des données (**Figure 18**), un catalogue d'objets et son implémentation ; les règles d'organisation et de codification des données (notamment le format, l'organisation et le nommage des fichiers) ; les règles de topologie (la structuration des données spatiales) ; le système de géoréférencement (l'attribution de coordonnées géographiques).

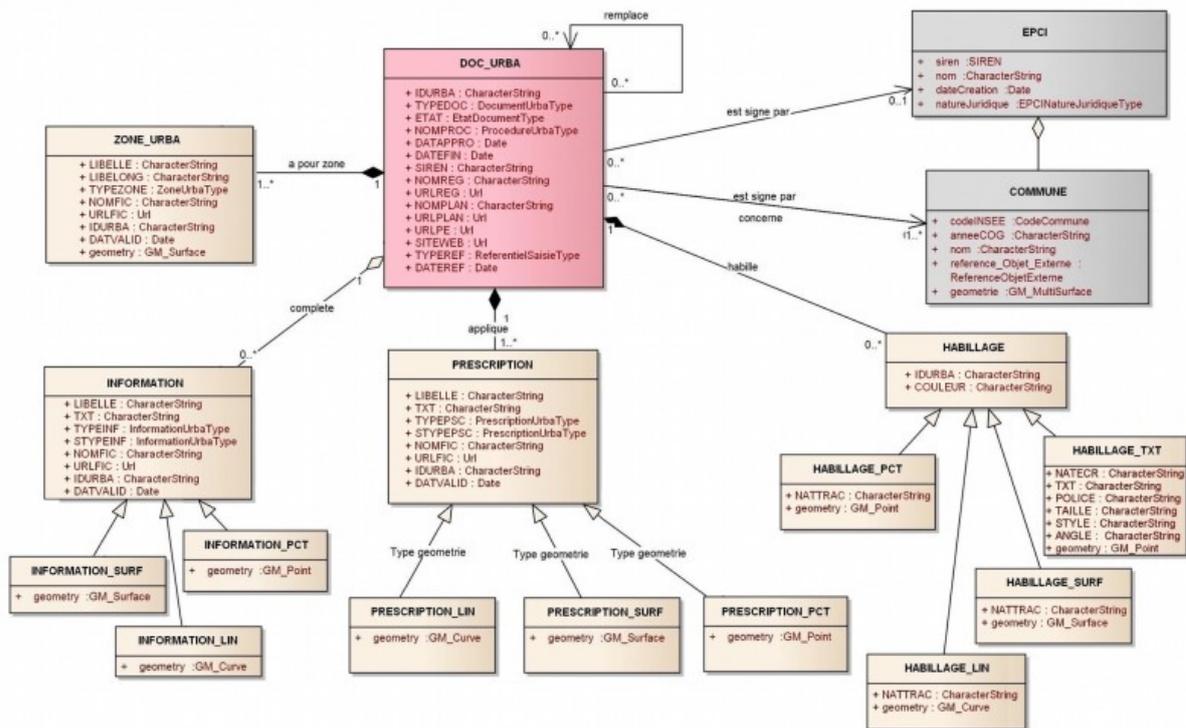


Figure 18. Le modèle conceptuel de données du plan local d'urbanisme est décrit ici à l'aide du formalisme UML⁵⁹

Il existe un standard de 2017 pour le Plan Local d'Urbanisme qui va fixer le modèle conceptuel, le catalogue de données recommandées et la description des types énumérés (**Tableau 8**). Ce travail de description consiste à associer à chaque objet ses définitions sémantiques (sens) et géométriques (forme).

⁵⁹ Langage de Modélisation Unifié, de l'anglais *Unified Modeling Language* (UML), est un langage de modélisation graphique à base de pictogrammes conçu comme une méthode normalisée de visualisation dans les domaines du développement logiciel et en conception orientée objet.

| Code | Sous Code | Libellé | Références législatives du code de l'urbanisme | Références réglementaires du code de l'urbanisme |
|------|-----------|---|--|--|
| 01 | 00 | Espace boisé classé | L113-1 | R151-31 1° |
| 01 | 01 | Espace boisé classé à protéger ou conserver | L113-1 | R151-31 1° |
| 01 | 02 | Espace boisé classé à créer | L113-1 | R151-31 1° |
| 01 | 03 | Espace boisé classé significatif au titre de la loi littoral | L121-27 | |
| 02 | 00 | Limitations de la constructibilité pour des raisons environnementales, de risques, d'intérêt général | | R151-31 2° et R151-34 1° |
| 02 | 01 | Secteur avec interdiction de constructibilité pour des raisons environnementales, de risques, d'intérêt général | | R151-31 2° |
| 02 | 02 | Secteur avec conditions spéciales de constructibilité pour des raisons environnementales, de risques, d'intérêt général | | R151-34 1° |
| 03 | 00 | Secteur avec disposition de reconstruction / démolition ¹ | L151-10 | R151-34 3° |

Tableau 8. Premiers éléments du tableau d'éléments libellés « InformationUrbaType » dans le Standard PLU V2017

Dans le cadre de la production de la cartographie climatique, nous sommes encore loin de cette standardisation et opérationnalisation de données.

Si la cartographie a pour objectif de représenter graphiquement et de visualiser une réalité spatiale géolocalisée, nous l'avons vu dans la Partie II de ce mémoire, l'accès aux données microclimatiques permettant de mettre en lumière cette réalité spatiale est très récente. Nous sommes ainsi encore au stade d'exploration et de recherche dans le champ de la visualisation et de la cartographie climatique, bien qu'il existe déjà quelques propositions méthodologiques claires et établies.

2. Diverses approches cartographiques été proposées et ont fait leurs épreuves avec Toulouse comme terrain d'application

Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, il existe toute une lignée de travaux internationaux initiés par des équipes de recherche allemandes et diffusés à travers le monde. Ce processus de diffusion a été grandement poussé par le dynamisme des équipes de recherche asiatiques, surtout au Japon et ensuite en Chine.

Dans le cadre des projets ANR-MAPUCE (2014-2019) et ADEME-PAENDORA (2017-2019), nous avons testé différentes approches cartographiques. Tout d'abord une approche « par la surface » qui consiste à caractériser la surface urbaine du point de vue microclimatique (inspirée des approches allemande et asiatique) en base à des climatopes⁶⁰. Ensuite, à travers une approche « par l'atmosphère » qui tire parti des compétences fortes que nous avons en France en modélisation microclimatique, et qui permet d'identifier les zones à enjeux en croisant données atmosphériques d'une part et expertise urbanistique de l'autre. Pour finir, nous avons exploré le potentiel des modèles graphiques en base à un langage chorématique pour monter en généralité du point de vue territorial.

⁶⁰ Les climatopes sont des zones présentant des caractéristiques microclimatiques similaires. Ils diffèrent notamment par leur courbe de température journalière, la rugosité verticale (perturbations du champ de vent), la position et l'exposition topographiques et par le type d'occupation du sol.

2.1 Cartes d'analyse climatique en base à des données de surface et recommandations génériques de prise en compte du microclimat urbain dans la planification et aménagement urbains

Le travail de recherche que j'ai porté autour de la cartographie a mobilisé différents collectifs. En tout début de projet, j'ai établi une collaboration avec la School of Architecture of The Chinese University of Hong Kong (CUHK) qui a une équipe de référence sur les questions de cartographie climatique. Cette équipe est reconnue pour avoir produit des cartes climatiques et des recommandations en base à des climatopes pour plusieurs villes chinoises et quelques villes européennes (Ng and Ren, 2015).

Depuis que la norme allemande VDI 3787-Part 1 devint une référence internationale les climatopes sont l'information de référence pour analyser la surface urbaine dans le cadre conceptuel des cartes climatiques. Néanmoins, l'accessibilité et une plus grande objectivité dans la production des cartes de zones climatiques locales, a fait de ces dernières une représentation incontournable de la surface urbanisée dans les études de climatologie urbaine. Les zones climatiques locales permettent une comparaison plus aisée entre villes ce qui facilite une montée en généralité du point de vue des approches méthodologiques. Nous avons alors dans un article conjoint (Yin et al. 202X) exploré pour Toulouse, le potentiel en termes de recommandations, de croiser l'information concernant les climatopes et les zones climatiques locales.

Une carte de climatopes a été produite par l'équipe hongkongaise et, à l'aide de la carte en zones climatiques locales que nous avons déjà produite pour une autre étude (Hidalgo et al. 2018b), un croisement des informations climatopes/LCZ et des données microclimatiques de température de l'air, de température radiante, de stress thermique et de vent a été produit et analysé. L'information détaillée du travail statistique et cartographique est présentée en détail dans l'article Yin et al. (202X) présent dans le TOME III, mais j'introduis ici brièvement les trois cartes principales.

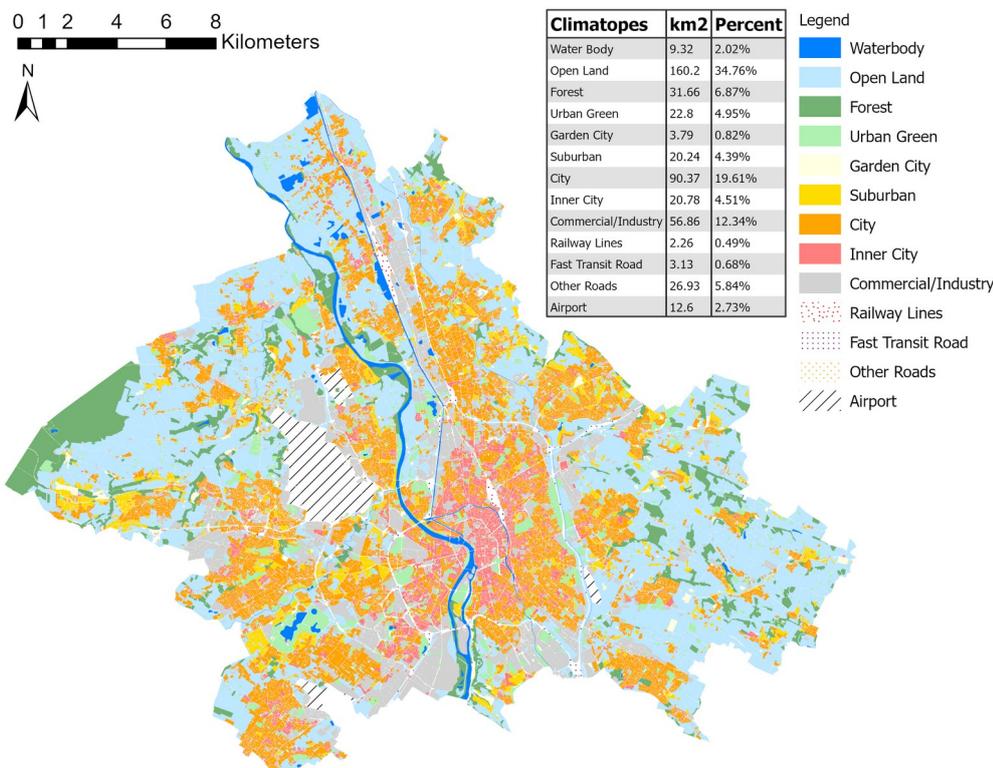


Figure 19. Carte d'analyse climatique urbaine basée sur le VDI 3787-Part 1 montrant les zones correspondantes et les pourcentages de chaque climatope par rapport à la surface totale de Toulouse Métropole

Dans la **Figure 19**, il est possible d'observer que le climatope dominant à Toulouse est le *terrain ouvert* (Open Land caractérisé par grandes prairies et zones agricoles peu arborées), qui couvre 34 % de la Métropole toulousaine et est principalement distribué dans les communes de deuxième et troisième couronne. La majorité des utilisations des terres dans le climatope *terrain ouvert* sont l'agriculture et les pâturages. Le *climatope urbain* (City) est la deuxième classe en importance, constitué d'un tissu urbain dense discontinu (la plupart constitué d'habitat résidentiel) avec un niveau d'imperméabilisation compris entre 50% et 80%. Le *climatope urbain* s'étend le long de la voie ferrée au nord-est et se retrouve également dans les communes périurbaines du sud-ouest. Le modèle spatial du *climatope commercial/industriel* est réparti le long des principales lignes de circulation (en gris sur la carte). Le climatope concernant le *centre ancien* (Inner City) possède un tissu urbain continu avec un taux d'imperméabilisation supérieur à 80%. Ce climatope est concentré sur la commune de Toulouse, dépeignant un noyau urbain très net dans le centre de Toulouse entre le fleuve (La Garonne) et la gare ferroviaire centrale. À l'exception d'une vaste zone de forêts dans le coin ouest de la région, les autres climatopes qui contiennent de la végétation arborée/arbustive (Forest, Urban Green, Garden city) sont constitués de parcelles éparées.

La carte des zones climatiques urbaines apporte une lecture complémentaire du territoire qui est plus axée sur l'occupation du sol, la forme urbaine et la densité du bâti. Comme le montre la **Figure 20**, le résultat de la classification LCZ indique que les bâtiments de faible hauteur (LCZ 6), la végétation basse (LCZ D) et les grands ensembles commerciaux ou industriels de faible hauteur (LCZ 8) sont trois typologies significativement dominantes à Toulouse. La LCZ 6 est principalement composée de terrains avec des logements individuels en zone périurbaine. La LCZ 8 est éparpillée le long des routes principales et des voies ferrées et est couverte de grands blocs commerciaux et industriels. La forêt de Bouconne composée principalement de zones boisées est identifiée à l'ouest, tandis que la LCZ B, caractérisée par des arbres éparés, est éparpillée sur tout le territoire mais faiblement présente sur la métropole toulousaine. Les LCZ les plus imperméabilisées et urbanisées, c'est-à-dire LCZ 1/2/3 et LCZ 4/5, sont regroupées au cœur de la commune de Toulouse.

Ce type de carte permet de voir que, même si la Métropole toulousaine est une agglomération à faible densité, la tendance à l'étalement urbain résultant de la croissance de l'habitat individuel et de l'expansion des zones commerciales et industrielles n'est pas à négliger dans le potentiel impact que l'urbanisation a dans son atmosphère proche en termes de température de l'air, de niveau de stress thermique et de perturbation du régime de vent.

0 1 2 4 6 8
Kilometers



| LCZ | km2 | Percent |
|-----------|--------|---------|
| LCZ 1/2/3 | 10.87 | 2.3% |
| LCZ 4/5 | 24.47 | 5.18% |
| LCZ 6 | 176.9 | 37.41% |
| LCZ 8 | 94.02 | 19.89% |
| LCZ 9 | 10.15 | 2.15% |
| LCZ A | 27.79 | 5.88% |
| LCZ B | 17.62 | 3.73% |
| LCZ D/E | 105.13 | 22.24% |
| LCZ G | 5.85 | 1.24% |

Legend

- Compact Settings (1/2/3)
- Open High/ Mid-rise (4/5)
- Open Low-rise (6)
- Large Low-rise (8)
- Sparsely Low-rise (9)
- Dense Trees (A)
- Scattered Trees (B)
- Low Plants (D/E)
- Water (G)

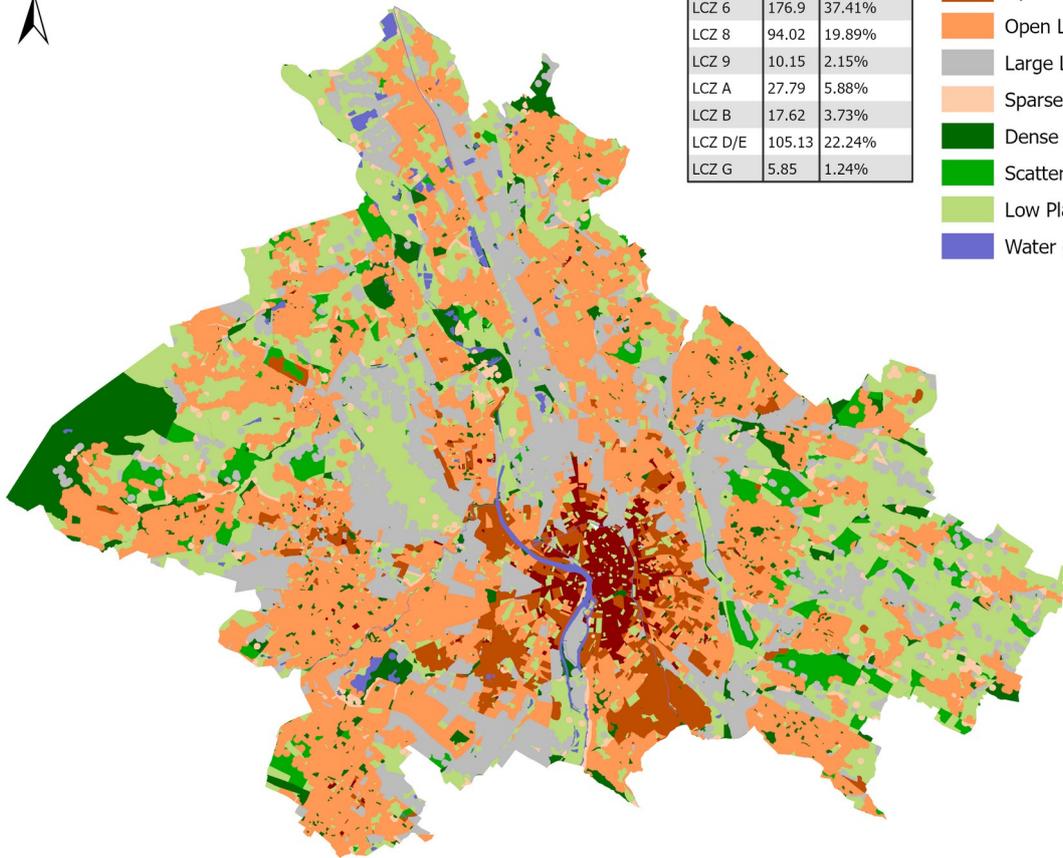
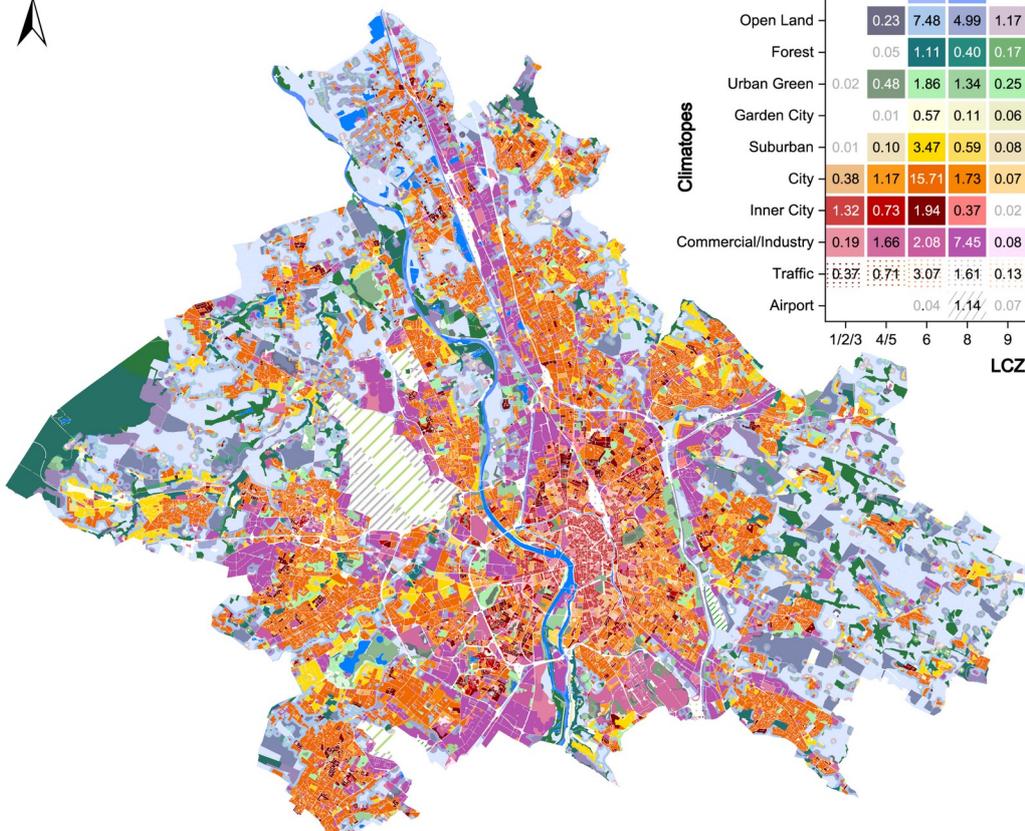


Figure 20. Carte des zones climatiques locales (LCZ) groupées de la Métropole toulousaine et les pourcentages de surface pour chaque groupe de LCZ

La carte qui croise les informations entre les climatopes et les LCZ (**Figure 21**) et la **Figure 22** permet d'apprécier l'hétérogénéité spatiale en termes d'occupation du sol, de hauteur du bâti et de sa densité au sein de chaque climatope. Les LCZ prédominantes dans chaque climatope sont définies comme le pourcentage cumulé de plus de 75 % (indiqué par la ligne pointillée dans le **Figure 22**) trié de la plus grande à la plus petite composante. Les climatopes *périurbain* (Suburban) et *urbain* (City) indiquent une seule LCZ dominante, des structures ouvertes de faible hauteur (LCZ 6). Même si les LCZ 6 et 8 sont les principaux types dans les climatopes Garden City⁶¹ et Commercial/Industrie, la superficie de la LCZ 8 dans le climatope Garden City est trop petite pour des comparaisons significatives, ne représentant que 0,11 % de la superficie de la Métropole toulousaine. Par conséquent, la LCZ dominante dans le climatope Garden City est considérée comme la LCZ 6. Le climatope concernant le *centre ancien* (Inner City) est dominé par tous les types de LCZ construites (1–6). Une telle situation dominée par plusieurs LCZ existe également dans les climatopes de type naturel tels que les climatopes de terrain ouvert, de forêt et les parcs urbains (Urban green), qui se composent principalement des LCZ A, D/E, 6 et 8.

⁶¹ correspondant à ce qu'on entend par cité-jardin avec des bâtiments de un à trois étages et de nombreux espaces verts

0 1 2 4 6 8
Kilometers



Legend and spatial area correlation between climatopes and LCZ (%)

| Climatopes | 1/2/3 | 4/5 | 6 | 8 | 9 | A | B | D/E | G |
|---------------------|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|
| Water Body | 0.01 | 0.03 | 0.09 | 0.16 | 0.05 | 0.08 | 0.01 | 0.44 | 1.10 |
| Open Land | 0.23 | 7.48 | 4.99 | 1.17 | 1.58 | 3.29 | 15.16 | 0.05 | |
| Forest | 0.05 | 1.11 | 0.40 | 0.17 | 2.45 | 0.22 | 2.27 | 0.03 | |
| Urban Green | 0.02 | 0.48 | 1.86 | 1.34 | 0.25 | 0.52 | 0.02 | 0.40 | 0.02 |
| Garden City | 0.01 | 0.57 | 0.11 | 0.06 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | |
| Suburban | 0.01 | 0.10 | 3.47 | 0.59 | 0.08 | 0.13 | | 0.03 | |
| City | 0.38 | 1.17 | 15.71 | 1.73 | 0.07 | 0.69 | | 0.46 | |
| Inner City | 1.32 | 0.73 | 1.94 | 0.37 | 0.02 | 0.04 | | 0.36 | |
| Commercial/Industry | 0.19 | 1.66 | 2.08 | 7.45 | 0.08 | 0.07 | | 0.85 | 0.02 |
| Traffic | 0.37 | 0.71 | 3.07 | 1.61 | 0.13 | 0.29 | 0.05 | 0.93 | 0.01 |
| Airport | | 0.04 | 1.14 | 0.07 | 0.01 | 0.09 | 1.31 | 0.01 | |

Figure 21. Carte synthétique et corrélations spatiales entre les climatopes et les LCZ.

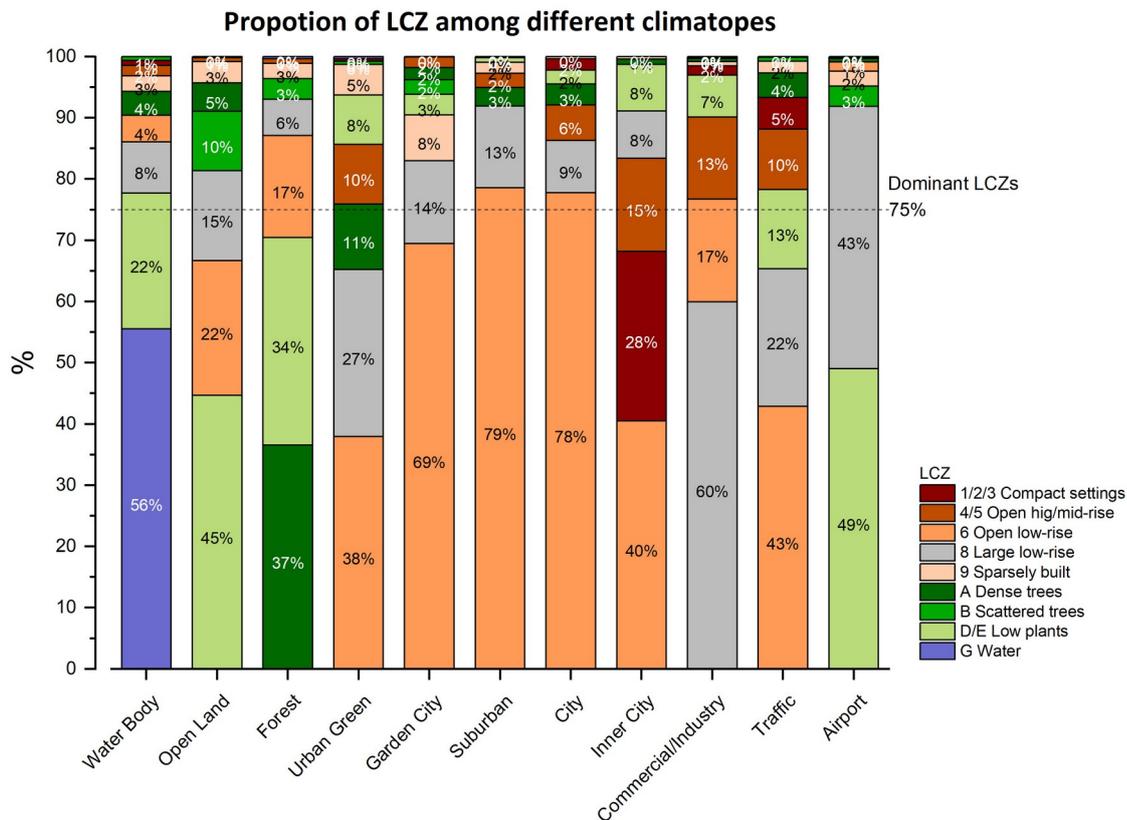


Figure 22. Proportion de LCZs dans les différents climatopes

Un travail statistique qui croise cette analyse de la surface urbaine avec les données des simulations microclimatiques pour Toulouse a permis une première ébauche de recommandations. Ces recommandations très génériques sur l'utilisation des divers leviers d'action classiques face au risque de températures extrêmes en milieu urbain (végétalisation, maîtrise de l'étalement urbain, forme urbaine, matériaux, ...) n'étaient pas spatialisées. Ce qui signifie que pour un même type de climatope ou de LCZ, les recommandations sont les mêmes, peu importe où se situe cette zones sur le territoire.

Cette première étude a été utile à une meilleure compréhension de la structure urbaine et de l'occupation du sol du territoire depuis une focale microclimatique. Les premières recommandations ont également été utiles pour commencer à faire le lien entre la structure de l'urbanisation et les potentielles actions à entreprendre mais ont la limite forte de ne pas être territorialisées. Néanmoins, dans l'article que nous avons écrit nous démontrons bien la variabilité thermique et aéraulique des différents climatopes et LCZ en fonction de leur localisation géographique (Figure 23). Un travail d'identification de zones à enjeux spatialisés qui permette d'imaginer des recommandation territorialisées s'est avéré nécessaire et a été développé d'une manière presque concomitante.

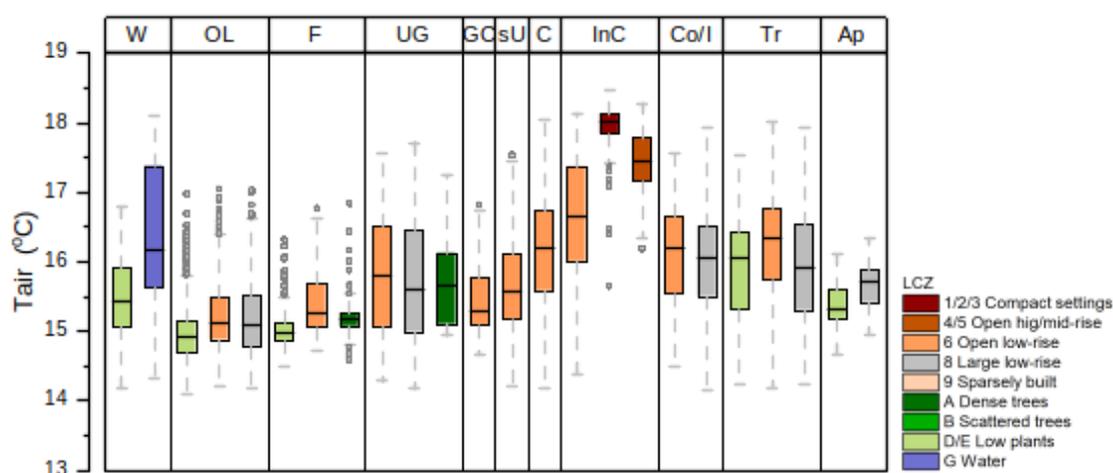


Figure 23. Distribution de la température de l'air modélisée, Tair, à 2 m au-dessus du sol pour différents climatypes au cours de la nuit

2.2 Cartes d'analyse climatiques à partir de données atmosphériques et recommandations territorialisées

Un travail de recherche-action a été réalisé en collaboration avec, au LISST, Najla Touati (ingénieur en géomatique et cartographie), Laurent Jegou (Maître de Conférences en cartographie et géomatique), Sinda Houès-Jouve (Maîtresse de Conférences en urbanisme et aménagement) ; également, Valéry Masson et Robert Schoetter (chercheurs en climatologie urbaine) du CNRM ; et sur trois journées d'études, avec le groupe de cartographes constitué autour des ateliers Geo-Visu. L'agence d'urbanisme de Toulouse et les directions de l'environnement et de la réglementation urbaine de Toulouse Métropole faisaient partie de l'équipe d'acteurs opérationnels impliqués dans le projet.

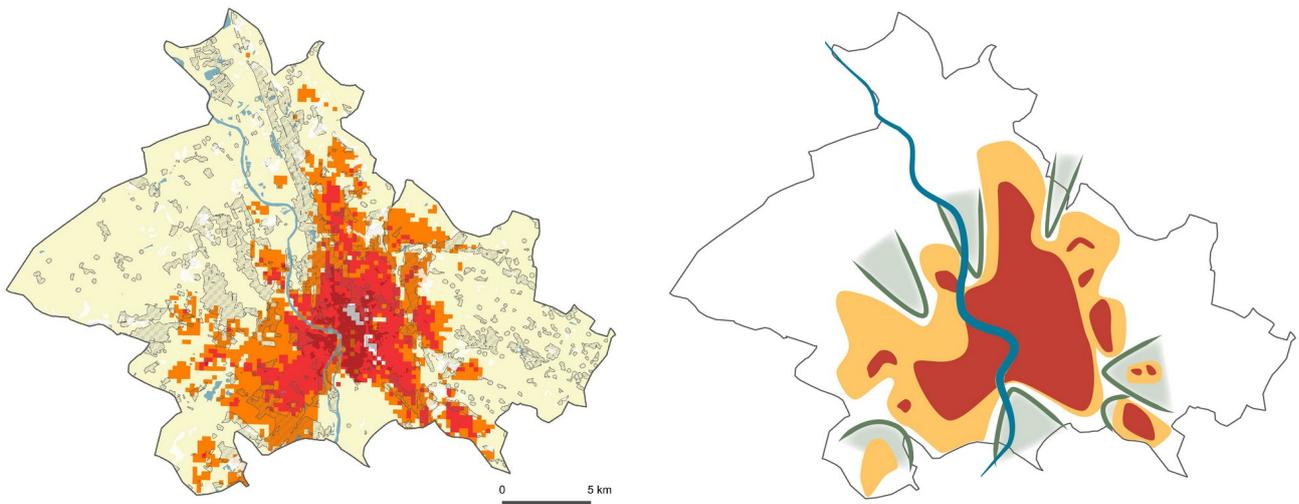
Ce travail cartographique et de territorialisation des recommandations est présenté en profondeur dans le chapitre suivant et il a permis de tester plusieurs types de représentations cartographiques des données climatiques (carte d'analyse pixelisée, carte de zones à enjeux à base de croquis, carte à l'échelle communale à l'îlot). La Figure 24 pour le phénomène d'îlot de chaleur urbain nocturne est ici donnée à titre d'exemple mais ce travail a également été développé pour le niveau de stress thermique diurne et pour les conditions aérauliques.

L'analyse microclimatique basée sur ces jeux de cartes et des ateliers organisés avec les services de Toulouse Métropole ont permis d'identifier quatre types de zones à enjeux pour le territoire toulousain - le centre historique, les faubourgs, les centres-villes des communes de première couronne ; les zones commerciales et d'activité – et ont permis de réfléchir à des recommandations spécifiques en matière d'urbanisme, tant pour ces quatre zones, que par levier d'action (végétation, eau, matériaux, forme urbaine, ...). Ces recommandations ont été regroupées dans un guide de recommandations édité par Toulouse Métropole à destination de ses services et des personnels en charge de la planification et de l'aménagement urbains intitulé « Prise en compte du climat dans la construction de la métropole de demain »⁶². Les cartes à l'échelle communale ont été éditées par l'agence d'urbanisme sous forme d'Atlas⁶³. Ces deux productions sont en libre disposition sur les sites institutionnels de Toulouse Métropole et de l'agence d'urbanisme respectivement.

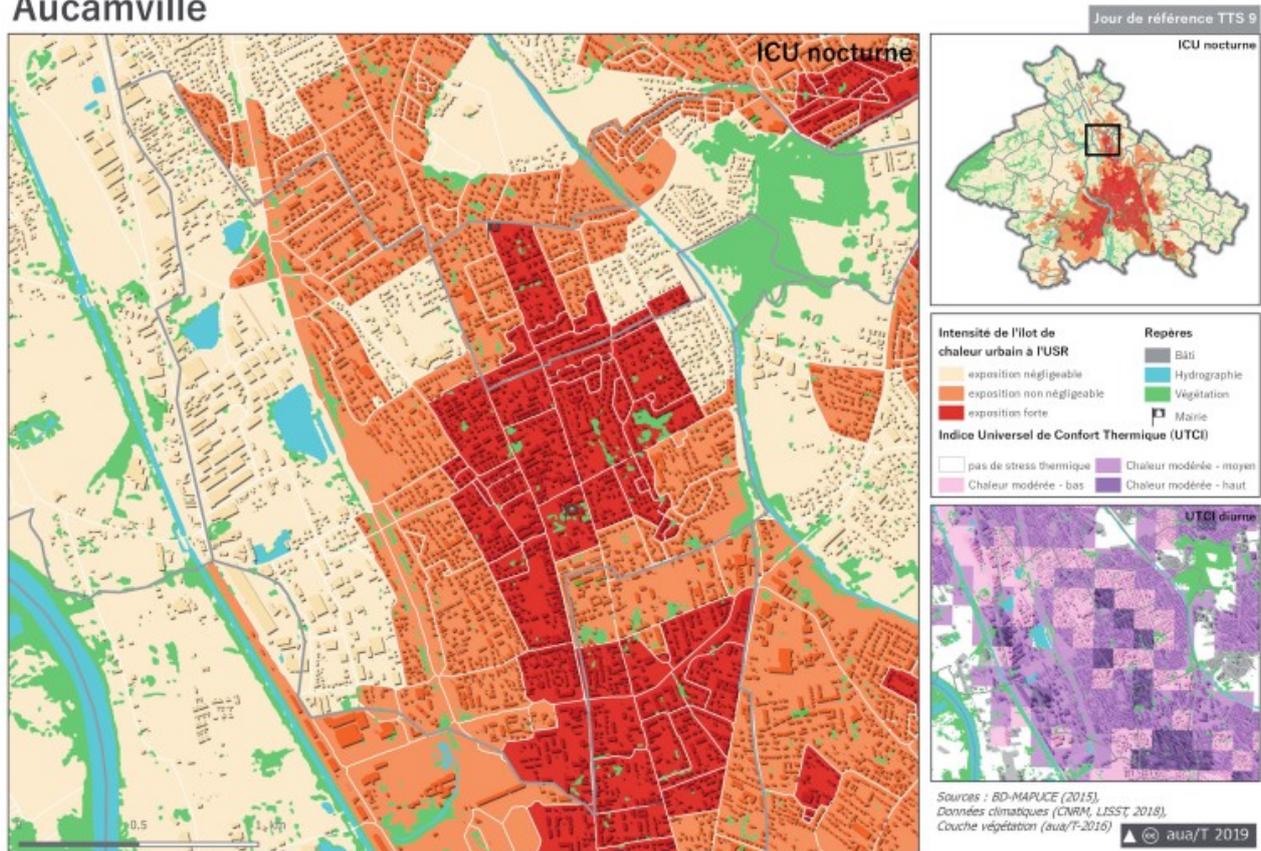
Ce travail a inspiré le volet cartographique de la thèse de Zohra Mhedbi (2016-2021) dont le terrain d'application était Tunis. Ici, le défi était la rareté de données urbaines et météorologiques nécessaires à la modélisation. Cette question du manque de données pour la cartographie climatique est discutée dans l'article Mhedhbi et al (202X) présenté dans le TOME III de ce dossier.

⁶² https://www.toulouse-metropole.fr/documents/10180/26954502/Guide_ICU_priseencompteclimat urbain+2021.pdf/d71ceaa2-8839-4c83-8669-cdc85545b675

⁶³ <https://www.aua-toulouse.org/atlas-climatique/>



Aucamville



22 aua/T Atlas climatique sur le territoire de Toulouse Métropole

Figure 24. Cartes climatiques à partir de données de simulation d'îlot de chaleur urbaine nocturne pour Toulouse Métropole. En haut à gauche, carte d'analyse avec une présentation pixelisée ; en haut à droite carte de zones à enjeux à base de croquis ; en bas carte à l'échelle communale où l'information climatique a été projetée sur l'îlot urbain. (Réalisation cartographique : Najla Touati et moi-même pour les deux premières cartes ; Arnaud Mayis de l'aua/T avec l'appui du LISST pour la dernière)

2.3 Cartes climatiques en base à une représentation chorématique

2.3.1 A la recherche d'une régularité spatiale dans les phénomènes microclimatiques

Lors du projet MApUCE des simulations microclimatiques ont été produites pour une cinquantaine de villes. Le cadre méthodologique de réalisation de cartes climatiques proposé pour Toulouse et présenté en détail dans le chapitre suivant, peut évidemment être appliqué à ce panel. Néanmoins, il est possible que nous n'ayons pas l'expertise locale et/ou les moyens et le temps pour appliquer cette approche.

Un travail d'analyse spatiale de la forme de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour le panel de cinquante villes, a montré une régularité en ce qui concerne : leur forme en termes de leur homogénéité (la pureté de l'Unité Urbaine au regard de sa structure parcellaire/mosaiquée) ; leur complexité (l'irrégularité de la forme basée sur des patchs individuels) ; leur profondeur (la largeur des patchs individuels se référant aux dimensions de la forme du patch) et leur fragmentation & isolation (qui fait référence à l'étendue de la dispersion des patchs entre les classes).

Un travail d'analyse statistique a permis de grouper les villes en quatre grandes classes, Paris étant dans une cinquième classe à part (*Figure 25*). Le premier groupe est caractérisé par un ICU fort (>3°C) et très compact. La forme du masque est interrompue par des fleuves/plans d'eau qui traversent le cœur des villes (*Figure 26*). Le deuxième groupe est caractérisé par un masque hautement dispersé et fragmenté (*Figure 27*). Les deux autres groupes présentent un îlot de chaleur urbain d'intensité et étendue faibles (*Figure 28*) voire inexistant pour les conditions météorologiques simulées (*Figure 29*) dû à la petite taille des villes ou à leur proximité côtière.

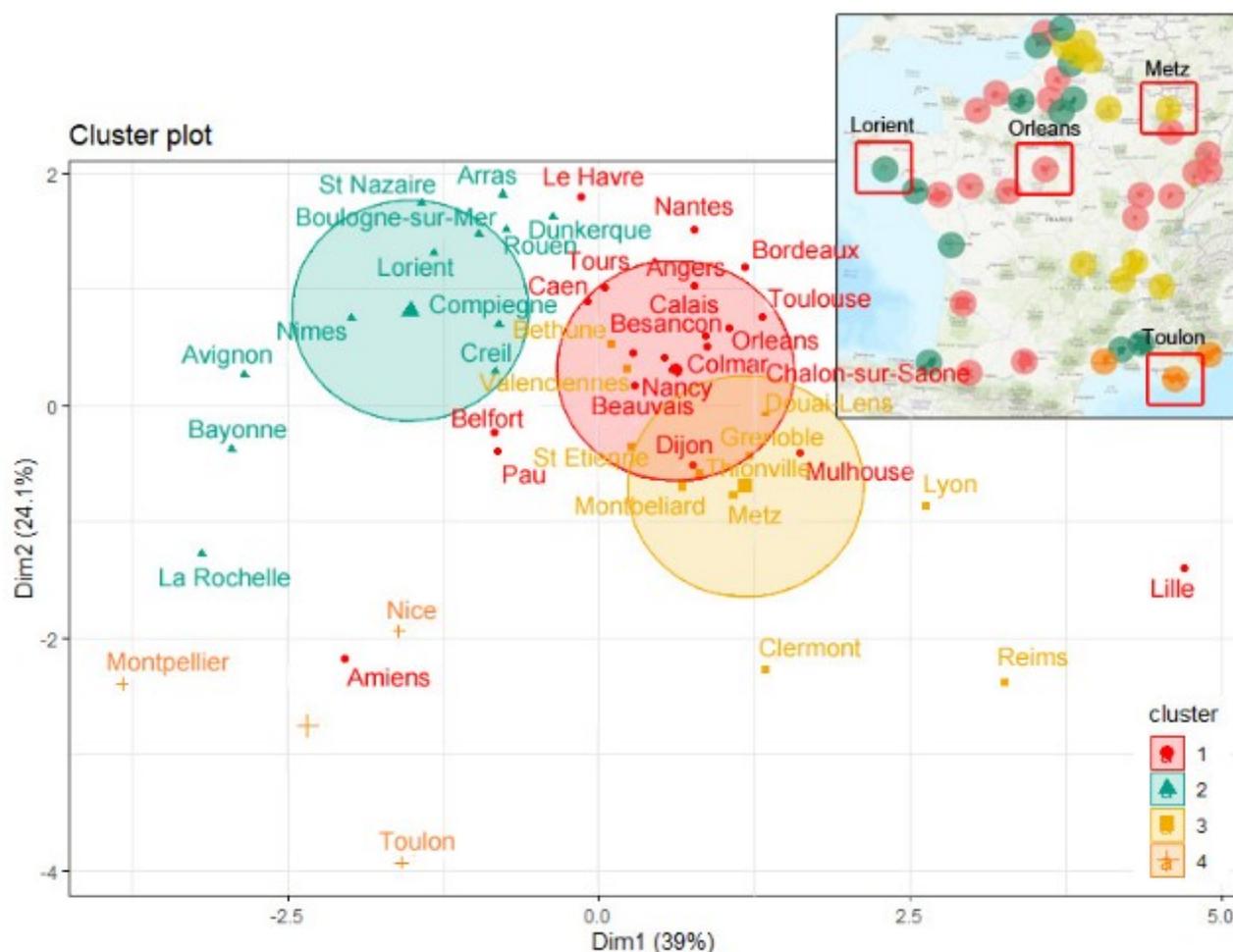


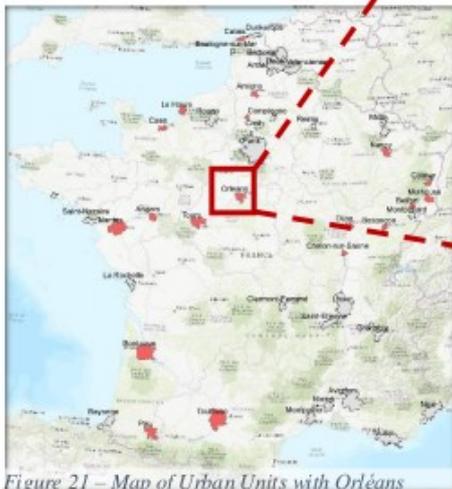
Figure 25. Analyse statistique (clusterisation PAM) de la forme spatiale de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour le panel de villes du projet ANR-MApUCE (Source : Suher, 2021)

4.1.2.1. Cluster 1 – Concentrated High Intensity

General Characteristics of Cluster 1

Strong exposure is concentrated at the urban cores

Strong exposure zones in highly compact forms are interrupted with water bodies passing through the cores of the cities



France, Basemap Source: Esri, DeLorme, HERE, TomTom, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, and the GIS User Community

Medoid city - Orléans

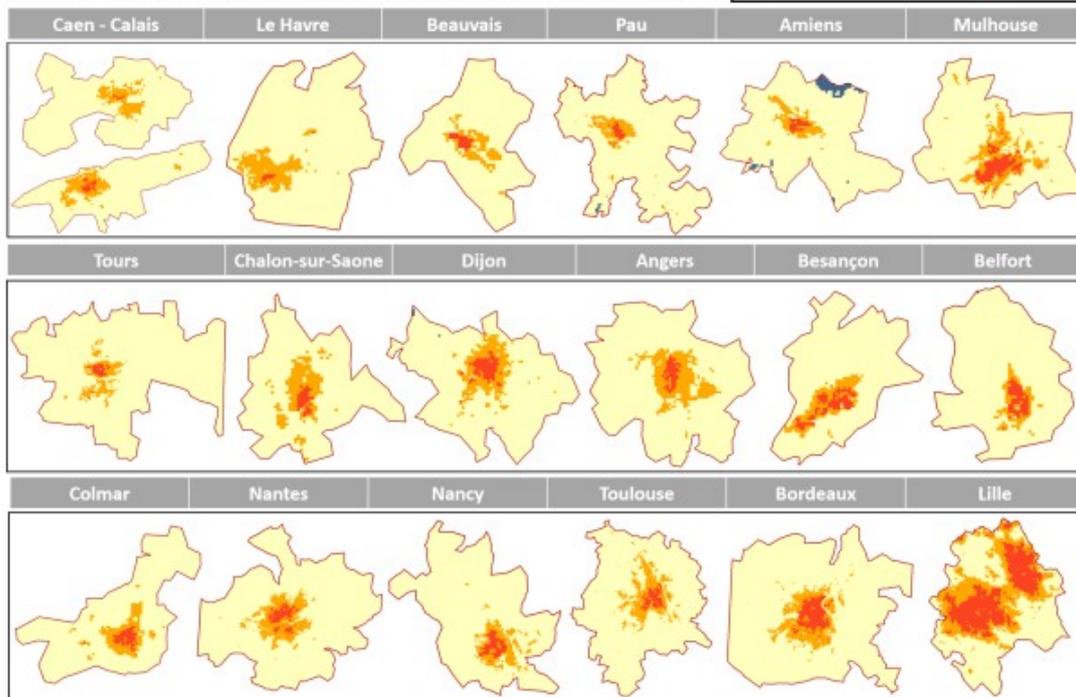
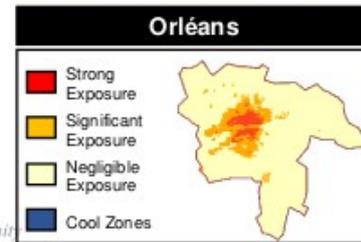
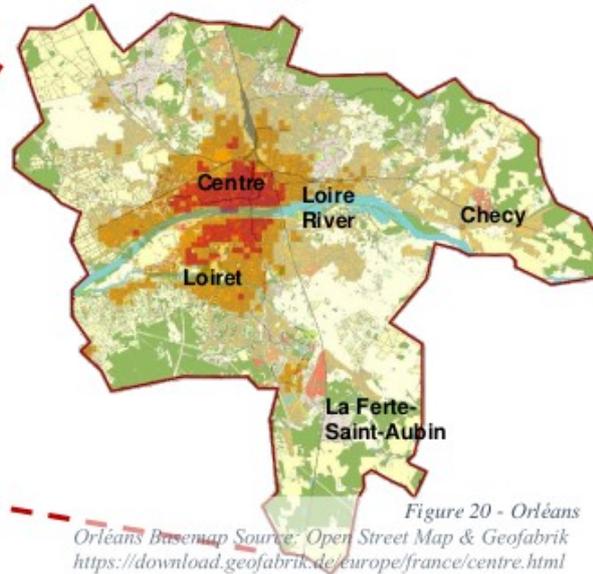


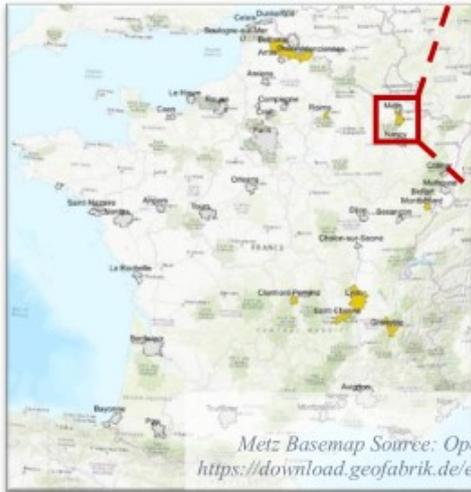
Figure 26. Carte de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour Orleans et pour les autres villes du groupe 1 (Source : Suher, 2021)

4.1.2.3. Cluster 3 - Dispersed High Intensity

General Characteristics of Cluster 3

Strong exposure zones are highly dispersed and fragmented

Strong UHI exposure class is dominant and sprawled within significant exposure class



Metz Basemap Source: Open Street Map & Geofabrik
<https://download.geofabrik.de/europe/france/lorraine.html>

Figure 25 – Map of Urban Units with Metz

France, Basemap Source: Esri, DeLorme, HERE, TomTom, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, and the GIS User Community

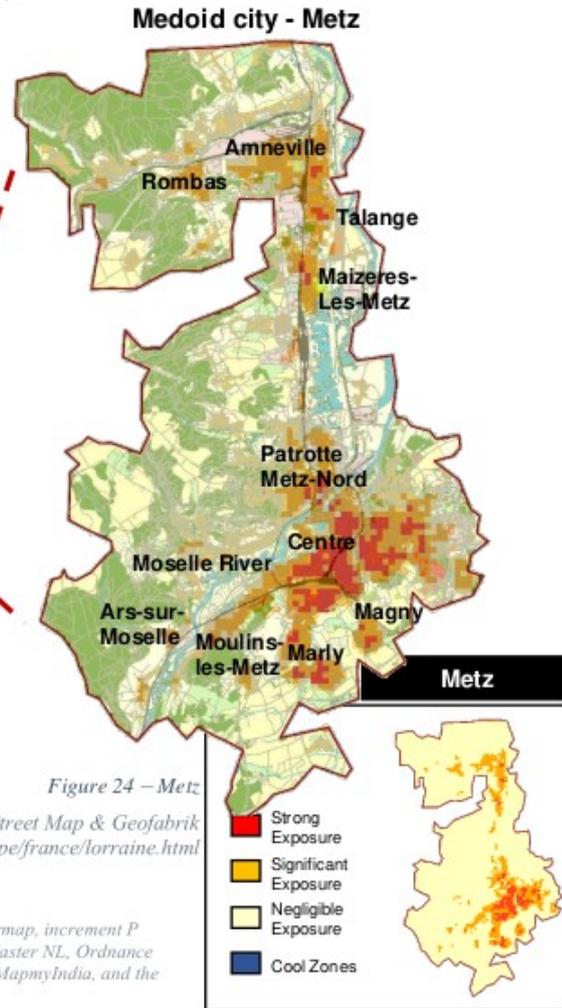


Figure 24 – Metz

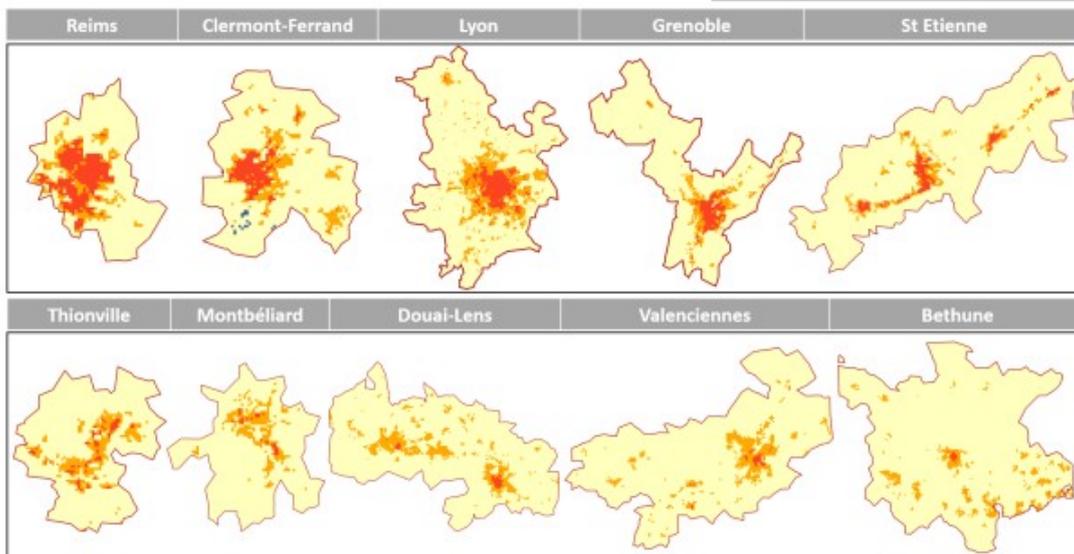


Figure 27. Carte de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour Metz et pour les autres villes du deuxième groupe en intensité et étendue de l'îlot de chaleur urbain (Source : Suher, 2021)

General Characteristics of Cluster 2

Significant exposure shows limited expansion, sometimes they are observed in dispersed forms

Low patchiness in urban units

Medoid city - Lorient

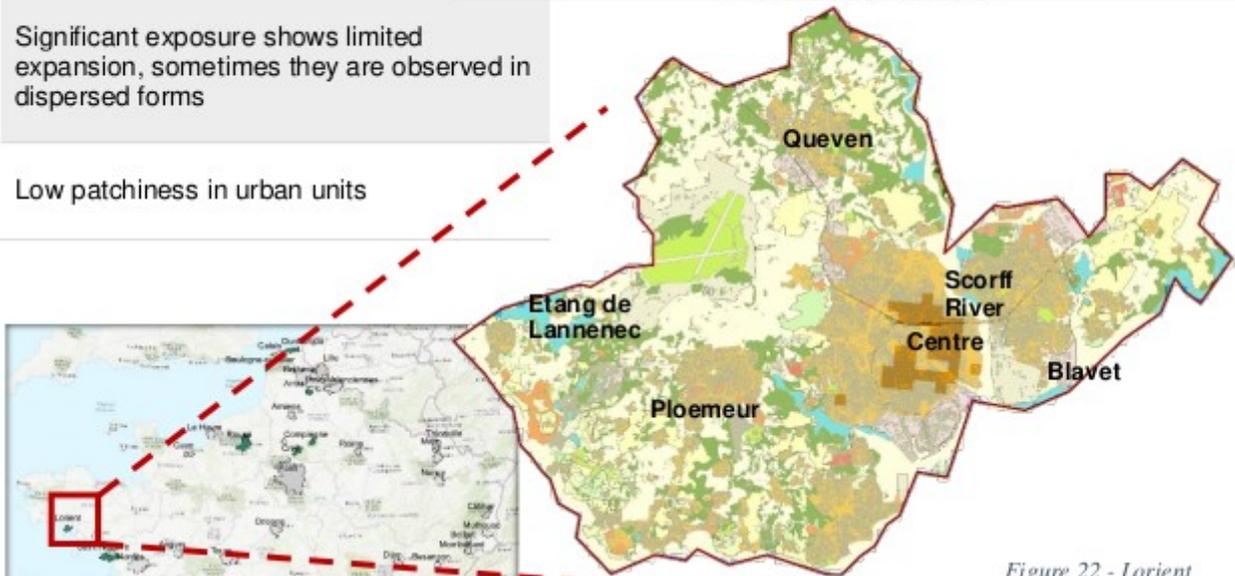


Figure 22 - Lorient

Lorient Basemap Source: Open Street Map & Geofabrik
<https://download.geofabrik.de/europe/france/bretagne.html>

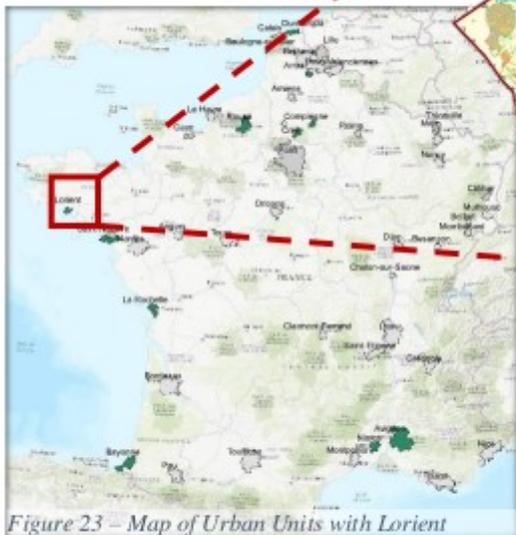


Figure 23 - Map of Urban Units with Lorient

France, Basemap Source: Esri, DeLorme, HERE, TomTom, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, and the GIS User Community

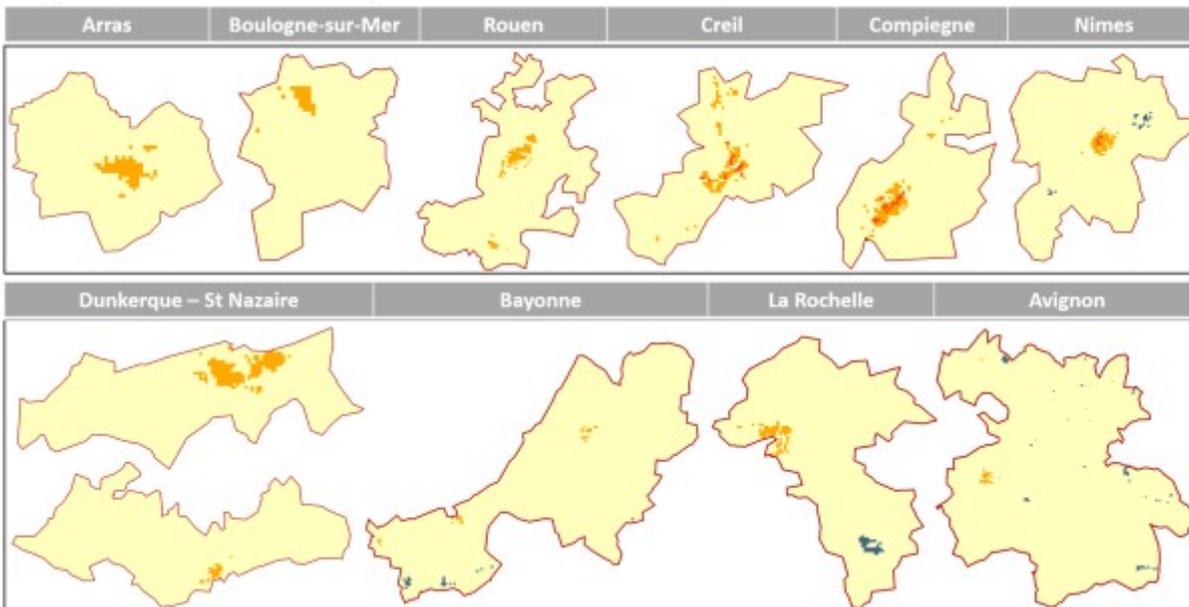
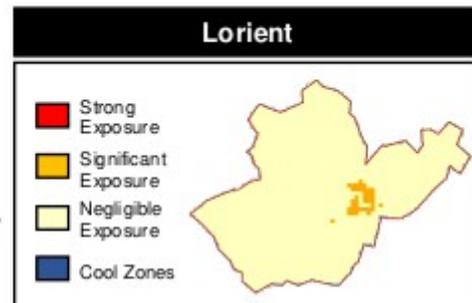


Figure 28. Carte de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour Lorient et pour les autres villes du troisième groupe en intensité et étendue de l'îlot de chaleur urbain (Source : Suher, 2021)

4.1.2.4. Cluster 4 – Dispersed Cool Zones

General Characteristics of Cluster 4

Cool zones' widespread presence causes high patchiness in Urban Units.

All cities are coastal cities in southern France

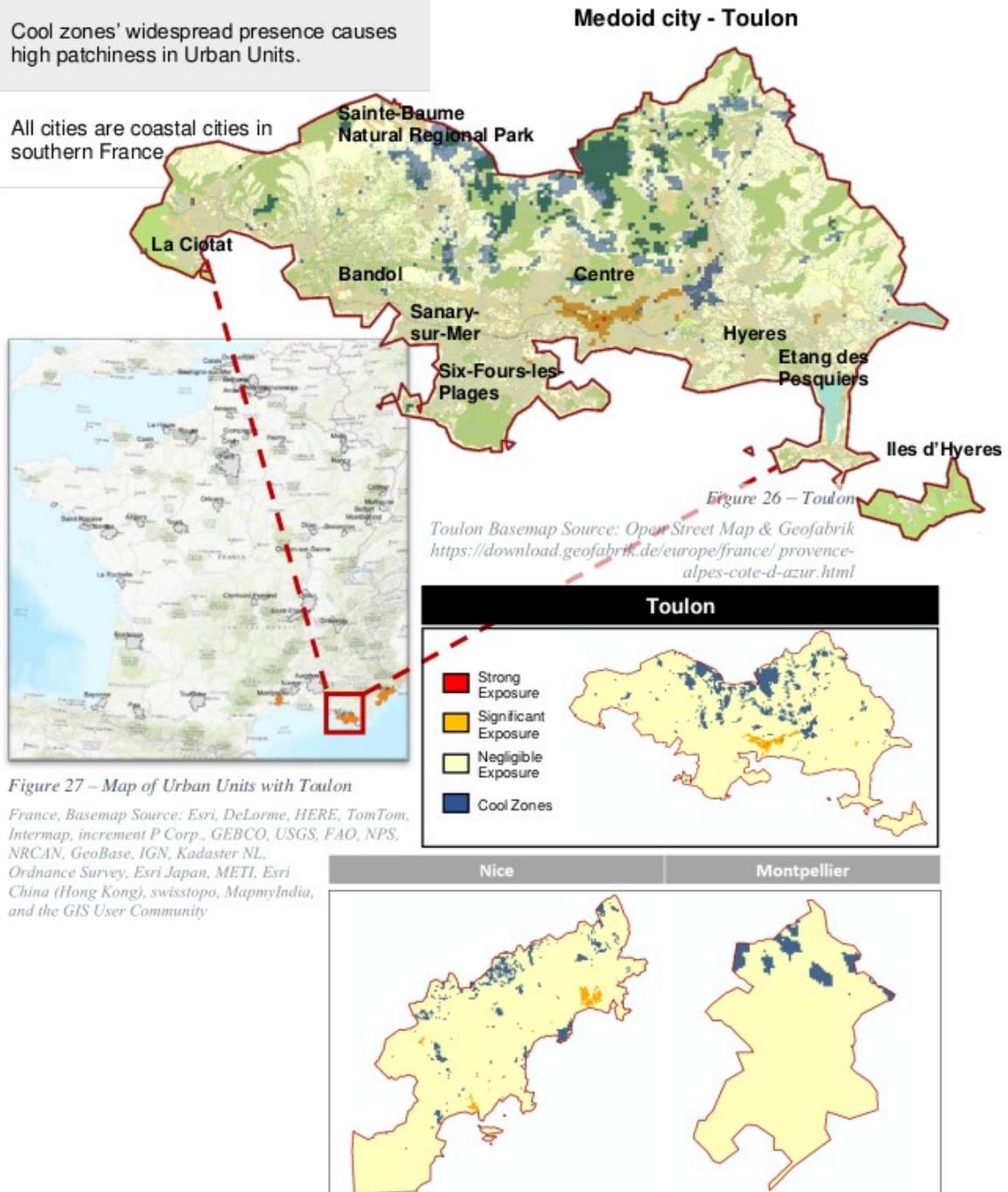


Figure 27 – Map of Urban Units with Toulon

France, Basemap Source: Esri, DeLorme, HERE, TomTom, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, and the GIS User Community

Figure 29. Carte de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour Toulon et pour les autres villes du dernier groupe en termes d'intensité et étendue de l'îlot de chaleur urbain (Source : Suher, 2021)

Cette régularité dans la forme et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain observée lors des différents groupes de villes permet une montée en généralité et une réflexion sur les recommandations et les leviers d'action pour l'adaptation à la hausse des températures. Si bien ces recommandations ne seront pas complètement territorialisées, l'identification des zones à enjeux peut permettre d'identifier, dans un premier temps, les leviers mobilisables pour ensuite les affiner en fonction de la réalité du terrain et des pratiques urbanistiques locales.

2.3.2. Représentation cartographique des phénomènes de stress thermique diurne et d'îlot de chaleur nocturne à l'aide de modèles graphiques

Nous avons travaillé sur une représentation cartographique des phénomènes de stress thermique diurne et d'îlot de chaleur nocturne à l'aide de modèles graphiques, en particulier à partir de chorèmes. Ce travail a fait l'objet d'un article (Jegou et al. 202X) et d'un mémoire de stage Master II qui a produit un article court (Suher, 2021) qui sont présentés dans le TOME III de ce dossier.

La méthode chorématique a marqué un tournant dans la géographie et la représentation cartographique en France au début des années 1980 (*Figure 30*), par ses apports et les controverses et débats qu'elle a suscités (cf. le 76e numéro de la revue *Hérodote*, publié en 1995). Néanmoins, en tant que méthode et processus de réflexion sur les phénomènes spatiaux, son intérêt n'est pas remis en cause et il constitue la base de recherches dans plusieurs domaines (cf. Lardon et Houdart, 2017 ; Casanova Enault et Chatel, 2017 ; Garbolino et Voiron-Canicio, 2020).

La chorématique est une méthode d'analyse spatiale, c'est-à-dire « l'étude formalisée de la configuration et des propriétés de l'espace des sociétés » (extrait du Dictionnaire de la géographie de Lévy et Lussault, 2013). Ces configurations, motifs, structures ou formes spatiales récurrentes peuvent être intégrés à des théories et modèles du fonctionnement et de l'évolution des systèmes (d'après D. Pumain pour le dictionnaire en ligne *Hypergé*, 2004). Développée à l'origine dans le cadre de la géographie régionale et de modélisation, la méthode chorématique s'est étendue à d'autres domaines liés à la géographie, tels que l'urbanisme et l'aménagement du territoire, la prospective territoriale et la géopolitique.

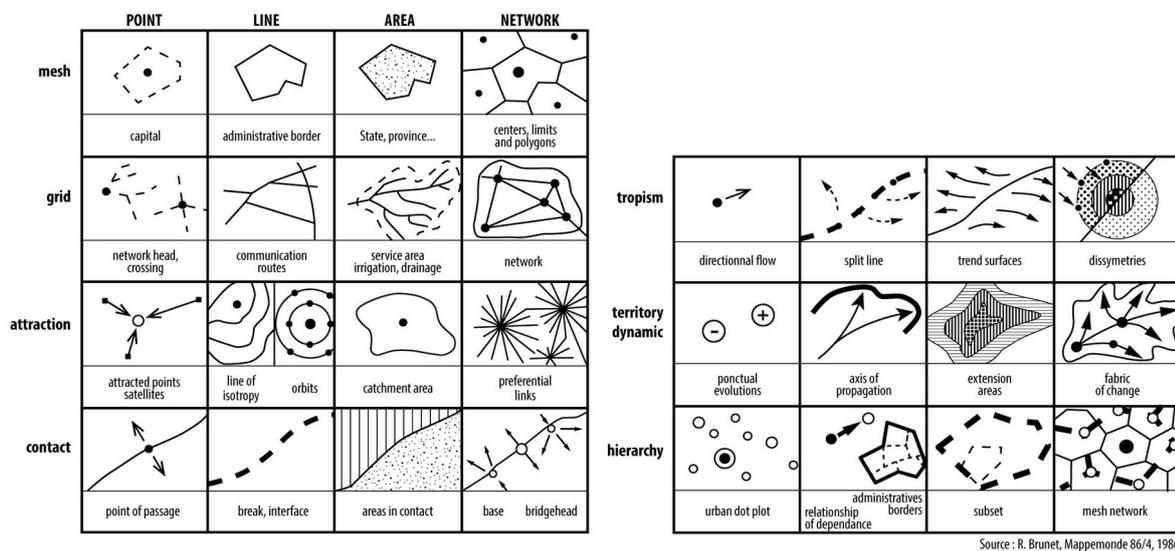


Figure 30. La première table de chorèmes proposée par Brunet (1986)

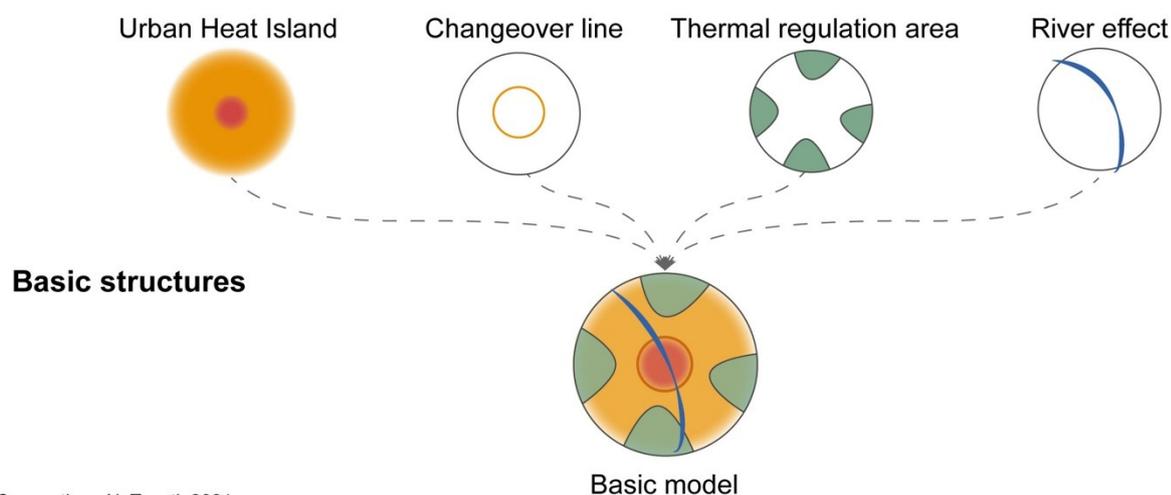
Comment la méthode chorématique peut-elle s'inscrire dans ce processus de production de cartes pour analyser le climat urbain et réfléchir à des recommandations ? Premièrement, les cartes d'analyse sont une synthèse de plusieurs cartes thématiques, combinant différents indicateurs sur les caractéristiques climatiques et la géographie de la ville. Chacune de ces cartes peut potentiellement être modélisée comme une structure de base, qui peut être modélisée graphiquement par un chorème. La combinaison de chorèmes dans un UC-AnMap synthétique peut ensuite suivre la

méthode chorématique de définition et de test d'éléments spécifiques pour obtenir des structures dérivées et un modèle graphique final.

A) Une proposition de modèles graphiques pour le groupe 1 représenté par Orléans

Toulouse fait partie du groupe 1. Nous avons donc commencé par prendre comme base de réflexion les cartes présentées en [Figure 31](#) et les caractéristiques générales de l'îlot de chaleur urbain dans ce premier groupe de villes. L'ICU présente une structure spatiale concentrique classique, avec une partie centrale présentant une forte exposition et une zone périphérique avec un niveau d'exposition non négligeable auxquelles il faut faire attention du point de vue de l'urbanisation. Plusieurs surfaces naturelles ont un rôle thermorégulateur ainsi que la présence d'un fleuve qui traversant le cœur de la ville.

Pour nous climatologues, les enjeux cruciaux sont les étendues spatiales de ces zones, ainsi que leur évolution (ligne de passage), les contraintes, les impacts et leur relation avec le terrain géographique (les zones de régulation thermique et le fleuve). Pour en tenir compte, différents modèles graphiques de base ont été sélectionnés et testés. Ils ont constitué le point de départ de la méthode chorématique et de la légende de l'illustration qui en a résulté.



Conception : N. Touati, 2021

Figure 31. Modèle d'îlot de chaleur urbain (UHI) étape 1 : les structures de base (Source : Jegou et al. 2021)

La deuxième étape a consisté à déterminer les modificateurs des structures de base et à les exprimer graphiquement à l'aide de variantes des chorèmes. La forme de l'ICU se complexifie par la présence d'une urbanisation plus diffuse en banlieue et les zones périurbaines.

La zone de contact entre les différentes zones de niveaux d'exposition, la ligne de basculement, est au centre de la représentation, et cette zone de contact est dynamique.

Les zones de régulation thermique (les zones vertes et bleues) sont déformées par le relief et l'effet de bassin versant. L'effet du fleuve a un impact important sur le centre-ville. Ces modifications ont été modélisées graphiquement, produisant les modèles graphiques de la colonne du milieu de la [Figure 32](#).

Ensuite, ces modificateurs ont été appliqués aux structures de base pour produire des modèles plus pertinents de la situation, des modèles qui représentent plus efficacement l'interprétation des indicateurs : l'ICU avec des zones périphériques, une zone de transition, des modèles de refroidissement dynamiques et un effet de rivière mitigé dans le centre-ville.

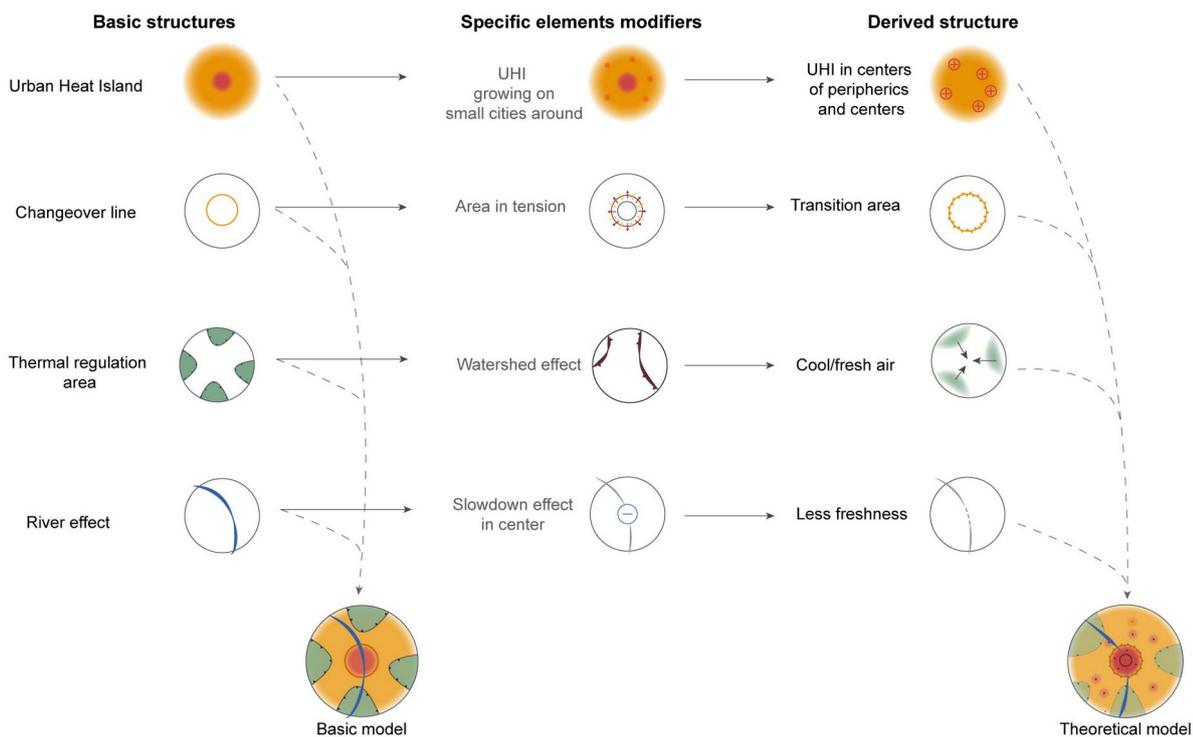


Figure 32. Étapes 2 et 3 du modèle d'îlot de chaleur urbain : modificateurs et structures dérivées (Source : Jegou et al. 2021 ; réalisation, Najla Touati)

Le modèle théorique obtenu à l'issue de cette troisième étape représente plus fidèlement la situation. Sa forme générale reste circulaire et abstraite ; par conséquent, la dernière étape a consisté à l'affiner pour qu'il ressemble davantage à la forme et à la disposition de l'agglomération. Ce modèle exprime, de manière synthétique et spatiale, les principaux enjeux de l'ICU à Toulouse et peut offrir une base de discussion entre chercheurs et acteurs de l'urbanisme équivalente à celle produite à partir d'une modélisation physique et présentée en **Figure 33**.

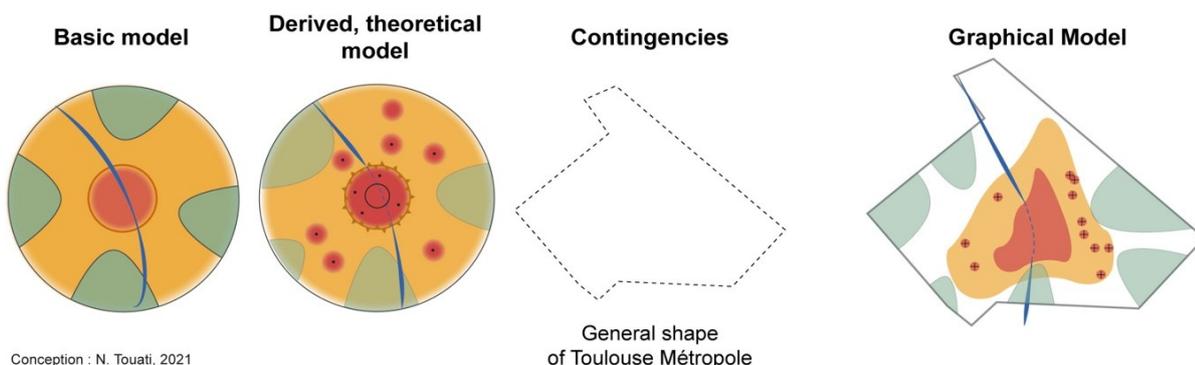


Figure 33. Dernière étape du modèle d'îlot de chaleur urbain : adaptation à la forme générale de l'agglomération toulousaine. (Source : Jegou et al. 2021)

Ce même travail a été développé pour l'information sur le stress thermique diurne. Les chorèmes de base utilisés pour le processus de modélisation étaient approximativement les mêmes que ceux utilisés pour l'ICU ; les structures spatiales impliquées s'articulaient autour des mêmes schémas : centre-périphérie, évolutions ponctuelles, axes de propagation, contacts et bassins versants.

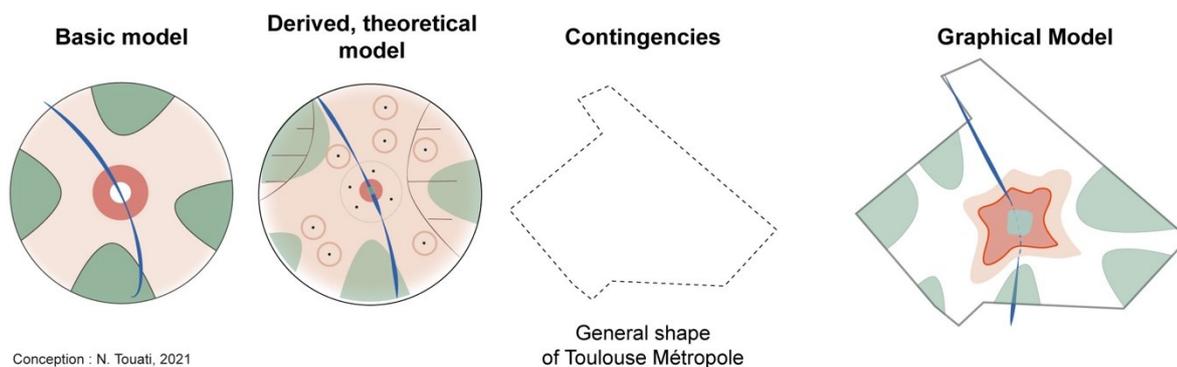


Figure 34. Dernière étape du modèle d'îlot de chaleur urbain : adaptation à la forme générale de l'agglomération toulousaine. (Source : Jegou et al. 2021)

Le modèle graphique final montre que les communes périphériques sont moins impactées que dans l'analyse de l'ICU précédente et que la tension d'inconfort thermique est plus élevée entre l'îlot central frais et la première couronne de banlieue.

Comme évoqué, la méthode chorématique permet également de communiquer des recommandations issues d'analyses des enjeux climatiques urbains précédents. Des cartes de recommandations ont été produites (**Figure 35**), en s'appuyant sur les analyses de l'ICU et du confort thermique. Ces modèles graphiques se complètent pour exprimer des conseils et des moyens d'atténuer les problèmes climatiques survenant de jour (confort thermique) et de nuit (UHI) à l'échelle de l'agglomération.

Ces cartes de recommandations utilisent le même processus de modélisation graphique que les précédentes. Une sorte de résumé exécutif a été conçu en fournissant une seule image avec une légende expansive. Cette conception doit être appuyée d'un texte descriptif ou d'une présentation des chorèmes de base, de leur combinaison et des recommandations qui en découlent. Pour atténuer la différence cognitive entre une carte classique et un modèle de formulaire simplifié, un tableau de comparaison doit également être fourni.

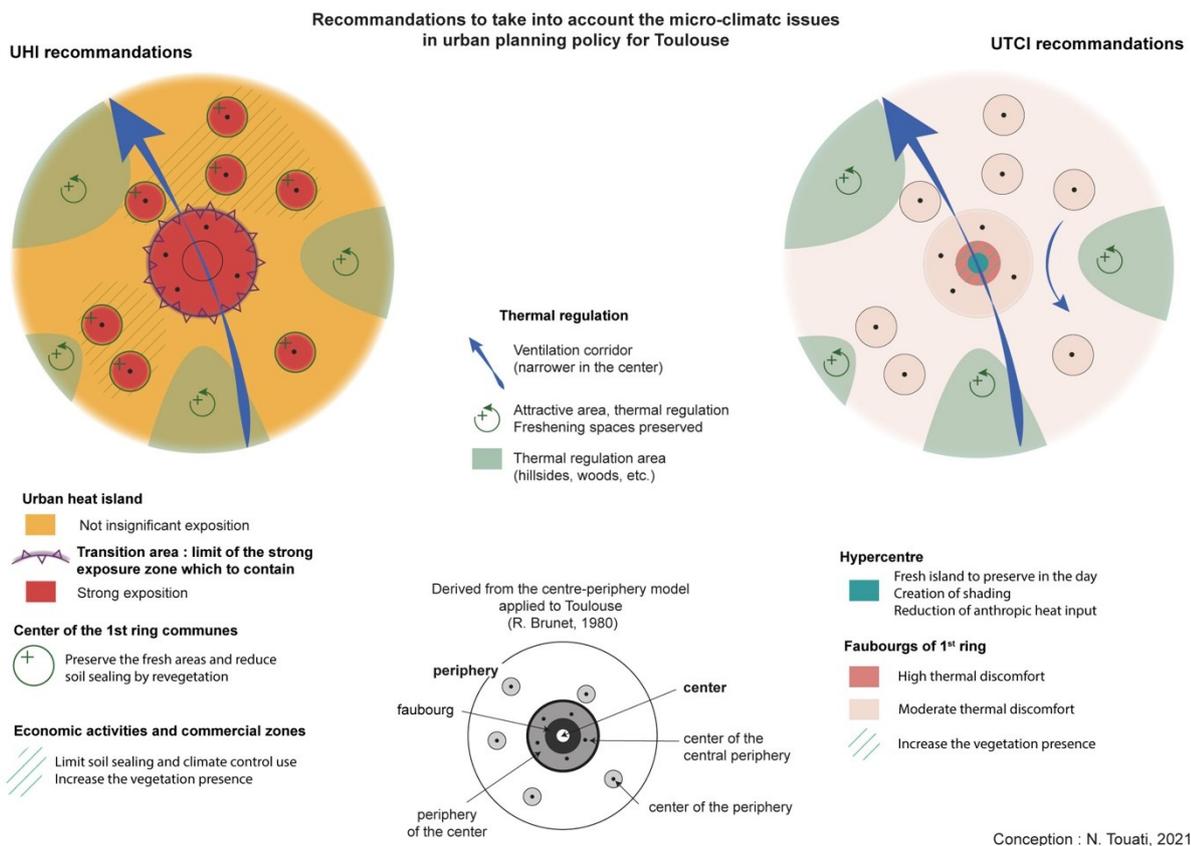


Figure 35. Modèles graphiques de recommandations pour l'îlot de chaleur nocturne (à gauche) et le niveau de stress thermique diurne (à droite). (Source : Jegou et al. 2021)

Un des points forts de ces modèles est leur capacité à représenter non seulement une structure statique mais aussi sa dynamique. Sur la base de ces dynamiques et tendances, des leviers d'action et domaines d'intervention peuvent être détectés plus facilement, ce qui facilite la proposition de recommandations.

Cette proposition est-elle valide pour le reste de villes du groupe 1 ? Pour la représentation de Toulouse, quatre éléments ont été utilisés pour former la structure de base. Ensuite, des éléments modificateurs ont été introduits qui ont eu un effet de transformation en tant que processus dynamique. Ainsi, les centres-villes environnants ont émergé comme des nœuds d'attraction ICU dans les périphéries. Les zones en tension, en tant que zones de contact d'intensités ICU différentes, formaient les zones de transition. L'effet de bassin ajouté sur les zones de régulation thermique a constitué les zones fraîches. Avec l'influence de la topographie et du centre-ville, l'effet fleuve connaît un ralentissement. Au final, les structures dérivées combinées ont formé le modèle théorique de Toulouse (Jégou et al., 2021).

Orléans, qui est la ville « représentative » du cluster 1, vérifie effectivement les caractéristiques spécifiques mises en avant par le modèle de Toulouse : une forte intensité UHI concentrée au cœur et une structure hiérarchique centre-périphérie ; l'effet fleuve formé par un plan d'eau traversant la ville ; etc.

B) Une proposition de modèles graphiques pour le groupe 2 représenté par Metz

Ce travail est présenté dans l'article court Suher (2021), présent dans la le TOME III de ce dossier qui présente une réflexion sur la proposition de modèles graphiques pour le deuxième groupe de villes qui vont subir un îlot de chaleur important mais caractérisé par un masque plus dispersé et fragmenté à cause de contraintes topographiques et le réseau routier. Un modèle graphique a été ainsi réalisé pour la ville de Metz, comme cas représentatif du groupe (*Figure 36*).

Ce groupe présente un niveau de complexité spatiale plus élevé et donc des chorèmes supplémentaires ont été suggérés en complément de ceux utilisés pour le groupe 1. Ceci a été fait en combinant les chorèmes de Brunet (1986), Casanova-Enault&Chatel (2017), Cheylan (2007).

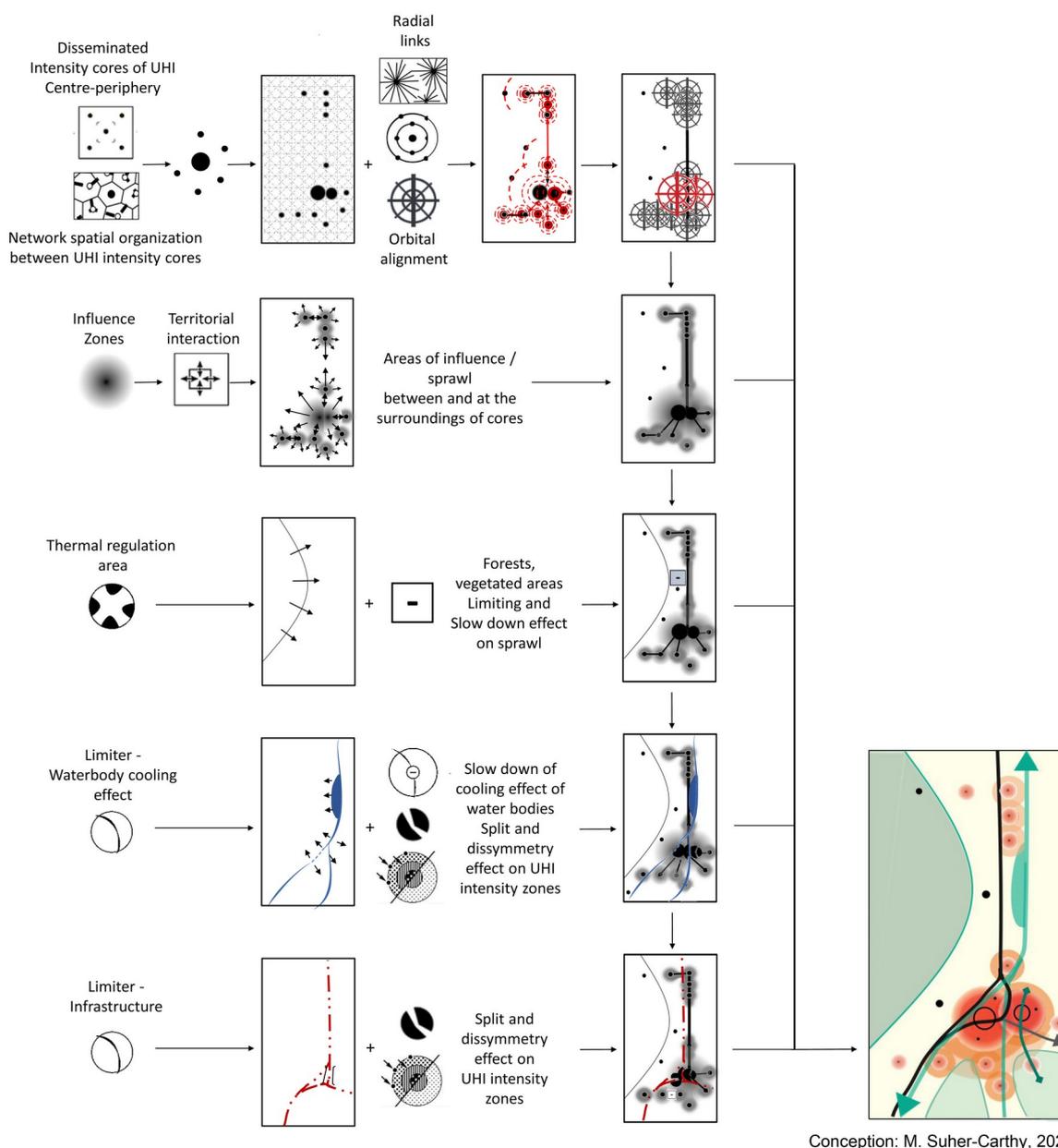


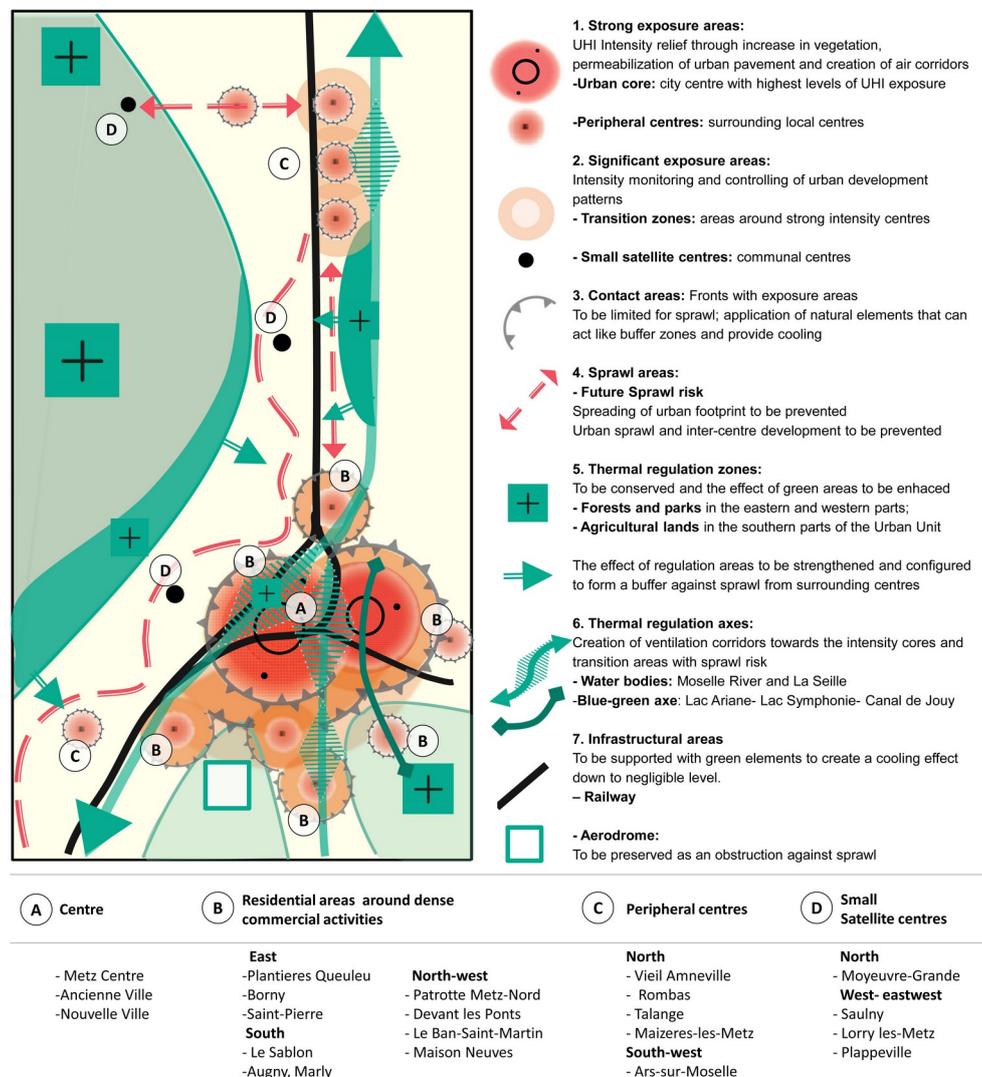
Figure 36. Représentation chorématique de l'analyse de l'ICU de Metz

La configuration spatiale des hautes intensités est représentée par des interactions territoriales sous forme de connexions radiales et d'alignements orbitaux (premier niveau dans la *Figure 36*). Suite à l'interaction entre les nœuds, la tendance à s'étendre et à s'unir autour des noyaux d'intensité a été représentée à travers les zones d'influence (deuxième niveau).

Les zones de régulation thermique, ont été illustrées avec leur impact limitant sur l'étalement de l'intensité dans les parties ouest et est de l'Unité Urbaine. Cela s'est également traduit par un ralentissement de la connexion des zones d'influence entre le cœur et les centres satellites du Nord.

Enfin, tout en perturbant l'intensité de l'ICU dans les noyaux, l'effet de refroidissement des plans d'eau s'est ralenti avec la densité d'activités et de développement dans le noyau urbain. Grâce à la combinaison de ces effets transformateurs avec le modèle de base, le modèle théorique de Metz a été obtenu.

Ce modèle théorique a permis d'imaginer une carte de recommandations et quelques propositions pour la gestion de l'effet ICU pour la ville de Metz. Des recommandations ont été proposées dans le schéma d'un modèle graphique avec l'utilisation d'éléments chorématiques précédemment employés (*Figure 37*).



Conception: M. Suher-Carthy, 2021

Figure 37. Représentation chorématique des recommandations pour la gestion de l'ICU de Metz

3. Conclusion

Ce travail sur la cartographie a été initié en 2015 et a nécessité plusieurs collaborations nationales et internationales qui ont permis de tester des approches complémentaires. Cette exploration des différents univers cartographiques a ainsi été progressive :

- Elle commence tout d'abord par explorer des représentations de l'information urbaine classiquement utilisées en climatologie urbaine en base à des climatopes et des zones climatiques locales qui ont permis une première lecture du territoire en fonction de l'occupation du sol, la densité du bâti, la forme urbaine et sa fonction ainsi qu'un premier niveau de recommandations génériques.
- Cette exploration exploite ensuite le potentiel des données de modélisation atmosphérique à l'échelle urbaine pour produire des cartes d'analyse utiles à l'identification de phénomènes microclimatiques (l'îlot de chaleur urbain, les zones de fraîcheur tant le jour comme la nuit et les caractéristiques aérauliques). Une représentation en forme de croquis, plus proche des modes de représentation cartographique dans le monde opérationnel, a permis d'identifier des zones à enjeux et de réfléchir avec les services de la collectivité à des recommandations territorialisées sur le périmètre de Toulouse Métropole.
- Pour finir, nous avons cherché à identifier des régularités spatiales dans les phénomènes microclimatiques sur le panel de villes dont on dispose de données de modélisation. Quatre typologies d'îlot de chaleur urbain ont été identifiées pour les villes françaises. Des modèles théoriques d'analyse et de recommandations en base à une représentation chorématique ont été proposés pour les deux groupes présentant un îlot de chaleur bien développé.

Afin de donner un aperçu très concret du travail technique et de recherche-action développé, je présente en profondeur dans le chapitre suivant, le travail réalisé pour aboutir aux cartes des zones à enjeux et aux recommandations territorialisées pour Toulouse. Ce travail, comme tout le travail cartographique ici présenté, découle d'une recherche collective et interdisciplinaire. Je fais le choix de présenter en priorité cet article car je suis première auteure, à différence des deux autres blocs de travail (climatopes et chorèmes) où ce sont mes collègues qui portent les articles scientifiques associés. Voici pour rappel le titre et auteurs de ce travail :

- ✓ **2021a** Melis S. Translation of Urban Climate Information Using Chorematic Representation: Case of French Cities. Master Erasmus Mundi MURCS short paper.
- ✓ **2021b** Melis S. Translation of Urban Climate Information Using Chorematic Representation: Case of French Cities. Master Erasmus Mundi MURCS manuscript.
- ✓ **202X Hidalgo J.**, Najla Touati, Sinda Haouès-Jouve, Laurent Jegou, Genevieve Bretagne, Erwan Bocher, Valéry Masson, Arnaud Mayis, Renaud Jougla, Gwendall Petit, Robert Schoetter, collectif GEO-VISU. Mapping the urban climate for summer comfort management in urban planning: climate analysis and semiology of graphics. Cybergeog, Open Edition, submitted
- ✓ **202X Jégou, L.**, Najla Touati, Julia **Hidalgo**. Proposals for the use of graphical models in urban climatic maps. Cybergeog, Open Edition, submitted
- ✓ **202X Mhedhbi Z.**, Julia **Hidalgo**, Cécile Demunck, Sinda Haouès-Jouve, Najla Touati, Valéry Masson. Tool adjustments to support climate adaptation in urban planning for southern cities: The case of Greater Tunis, Tunisia Cybergeog, Open Edition, submitted
- ✓ **202X Shi Yin**, Chao Ren, Xuyi Zhang, Julia **Hidalgo**, Robert Schoetter, Yu Ting Kwok, Kevin Ka-Lun Lau. Potential of Synthetizing Climatopes and Local Climate Zones for Urban Climatic Planning Recommendations: A Case Study in Toulouse, France. Cybergeog, Open Edition, submitted

Deuxième chapitre : **Cartographier le climat urbain pour la gestion du confort d'été en urbanisme : de l'analyse climatique et la sémiologie graphique aux recommandations**

1. Introduction

En Europe, les années 1990 ont vu à la fois l'émergence d'un urbanisme qualifié de durable et la généralisation des systèmes d'information géographique au sein des collectivités territoriales. Ainsi, les services techniques des villes s'emploient à collecter, stocker, traiter, analyser et représenter différents types de données spatiales et géographiques portant sur des éléments et des enjeux aussi divers que l'eau, le bruit, la végétation, la biodiversité ou la qualité de l'air. L'objectif général est de mettre en valeur les aménités environnementales des territoires et d'identifier et de localiser les nuisances et les risques environnementaux. La caractérisation des conditions climatiques locales, qui fut pourtant un sujet important de l'urbanisme moderne au XIX^{ème} siècle, est restée jusqu'à une date récente à l'écart de cette dynamique. Avec la prise de conscience du changement climatique et l'obligation faite aux villes d'engager des stratégies d'atténuation, mais aussi d'adaptation aux nouveaux risques urbains associés, le climat est en passe de retrouver une place de choix dans l'urbanisme. Dans ce contexte, un certain nombre de collectivités à travers le monde tentent de se saisir des données et de l'expertise climatiques, que ce soit pour les produire, les adapter ou les visualiser, de manière à mieux les intégrer dans les différents exercices de planification et d'aménagement urbains (Ng et Ren, 2015, Hidalgo et al., 2019).

En France, bien que relativement en retard par rapport aux pays pionniers comme l'Allemagne, Israël ou le Japon, depuis les dernières évolutions réglementaires, la lutte contre le changement climatique et l'adaptation à celui-ci deviennent des objectifs explicites des Plans Locaux d'Urbanisme (PLU)⁶⁴. L'élément majeur a été l'apparition des Plans Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET). Ces plans ont instauré l'obligation (pour les villes de plus de 50 000 habitants en 2012 et pour celles de plus de 20 000 habitants en 2018) d'établir des diagnostics environnementaux et des actions aussi bien d'atténuation que d'adaptation au changement climatique, en plus d'intégrer la problématique de la qualité de l'air. De plus, la loi de 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte a renforcé l'articulation entre les PCAET et les PLU. Désormais, le PLU doit être directement compatible avec le PCAET⁶⁵ associé au moment de son élaboration ou dans un délai de trois ans lorsque le PCAET est approuvé après l'approbation du PLU. Par conséquent, le contenu des rapports environnementaux inclus dans ces documents est en train d'évoluer afin de mieux prendre en compte le double objectif de mise en place de politiques d'atténuation et d'adaptation climatique à l'échelle locale (Lambert et al., 2019).

Le manque de connaissances fines à l'échelle territoriale, à la fois sur les effets locaux de l'évolution du climat régional et mondial à long terme et sur les modifications microclimatiques engendrées par l'urbanisation, rend difficile la prise en compte de tous les aspects pertinents du sujet lors de l'étape de diagnostic. Ainsi, ces aspects sont souvent abordés indirectement (soit comme thématique transversale au même titre que la santé ou le cadre de vie, soit comme une composante de l'environnement regroupée parfois avec la qualité de l'air et le bruit sous la rubrique « santé environnementale »⁶⁶).

Comme nous l'avons vu dans la PARTIE II de ce manuscrit, en France, le développement de méthodes et de techniques permettant un traitement rigoureux des questions microclimatiques dans le cadre d'un exercice d'urbanisme est très récent. L'engagement sur la question climatique dépend fortement aussi bien des partenariats établis à l'échelle locale entre urbanistes et chercheurs en urbanisme, voire bureaux d'études, que des compétences techniques acquises au sein des collectivités territoriales ou des équipes spécialisées qui les accompagnent. Un tel engagement fait généralement suite à l'élaboration d'un document d'urbanisme et/ou d'un PCAET, dont la section sur l'adaptation offre l'occasion de décrire et d'expliquer l'évolution observée et attendue du climat régional et local grâce à une analyse de la

⁶⁴ En premier lieu, la loi Grenelle II portant engagement national sur l'environnement du 12 juillet 2010, puis la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte n° 2015-992 du 17 août 2015

⁶⁵ Modification de l'article L 123-1-9

⁶⁶ CGDD, L'évaluation environnementale des documents d'urbanisme – Le guide, 2011

vulnérabilité. Cependant, le contenu relatif au microclimat urbain reste peu fourni. Bien que l'on cite souvent les problèmes liés à la hausse générale des températures, à l'augmentation ou à la baisse de l'intensité des précipitations et à la récurrence du phénomène de l'îlot de chaleur urbain, aucune approche quantitative et/ou spatialisée n'a été systématiquement définie.

Nous l'avons vu, différentes sources de données climatiques sont actuellement disponibles pour les villes françaises. Certaines données sont issues de campagnes de mesures atmosphériques ponctuelles ou pérennes, d'autres sont obtenues par télédétection, et d'autres enfin sont générées par la modélisation numérique. En ce qui concerne les mesures atmosphériques, l'accès aux données atmosphériques à haute résolution spatiale issues des réseaux d'observation à l'échelle urbaine reste limité dans les villes françaises. Quelques campagnes de mesure ponctuelles plus ou moins longues ont vu le jour à Paris (ECLAP, nov. 1994 à mars 1995 et MEGAPOLI, été/hiver 2009/2010), Marseille (ESCOMPTE, été 2002), Toulouse (CAPITOU, fév. 2004 à mars 2005) et Nancy (DIACLIMAP, 2013 à 2016). Depuis quelques années, des réseaux d'observation plus pérennes ont été mis en place. Ils sont entretenus et administrés par des équipes locales de chercheurs à Rennes (depuis 2006) et Dijon (depuis 2014) tandis qu'à Toulouse, un partenariat entre Météo-France et Toulouse Métropole a permis la mise en place depuis 2017 d'un monitoring du climat local en temps réel directement géré par la collectivité (Dumas et al., 2021). Les données de télédétection ou aéroportées ont le grand avantage de fournir une couverture spatiale très riche, mais l'accès uniquement à des variables caractérisant les surfaces urbaines (toitures et chaussées) représente une vraie limite pour la production d'indicateurs d'impact sur la santé ou la caractérisation spatiale et temporelle de phénomènes microclimatiques, comme l'îlot de chaleur urbain, qui sont caractéristiques de l'atmosphère à l'intérieur de la rue. Pourtant, la grande disponibilité de données satellitaires en France a fait que plusieurs collectivités se sont basées sur ce type de données pour leurs premières études de vulnérabilité microclimatique. C'est le cas par exemple de Paris⁶⁷, Lyon⁶⁸ ou Bordeaux⁶⁹. Enfin, l'accès à la modélisation climatique à l'échelle urbaine avec des résolutions horizontales intéressantes pour des applications en planification urbaine (entre 1 km et 250 m) est une réalité depuis une dizaine d'années pour des applications de recherche (Paris, Lemonsu et Masson 2002 ; Marseille, Pigeon et al. 2006 ; Toulouse, Hidalgo et al. 2008 ; Dijon, Vairet 2020) et ce type de modélisation commence à être disponible pour des projets de climatologie urbaine appliquée plus opérationnels⁷⁰.

Actuellement en France, il y a un impératif de production de diagnostics microclimatiques possédant une couverture et une résolution spatiales adaptées à l'échelle de la planification urbaine et au cadre réglementaire national et territorial. Cependant, bon nombre de sources d'information climatique vont fortement dépendre du contexte scientifique et culturel des acteurs (chercheurs et parties prenantes) impliqués dans le projet. En observant ce qui se passe dans des pays ayant déjà mené des études de climatologie urbaine appliquée, il est possible d'identifier un point commun : l'utilisation systématique des approches cartographiques permettant de spatialiser l'information climatique à l'échelle du territoire concerné.

En effet, depuis près de trois décennies, des chercheurs en climatologie urbaine se sont lancés (souvent en partenariat avec les acteurs de l'urbanisme) dans l'élaboration de cartographies climatiques permettant d'enrichir le volet environnemental du diagnostic territorial et de guider, avec d'autres éléments, le processus de planification. Bien qu'apparues sous différentes appellations en fonction des pays et des échelles mobilisées, ces initiatives tendent aujourd'hui à converger autour de la dénomination générique de cartes climatiques urbaines (*Urban Climatic Map (UC-Map)*) (Ng and Ren, 2015). Le travail présenté ici s'inspire de cette série de travaux internationaux et poursuit deux objectifs principaux : adapter ce cadre méthodologique aux contextes juridique, scientifique et praxéologique français et explorer de nouvelles méthodes de représentation des données climatiques à des fins opérationnelles.

⁶⁷ <http://www.iau-idf.fr/environnement/changement-climatique/chaleur-sur-la-ville.html>

⁶⁸ <https://studylibfr.com/doc/2074584/grand-lyon>

⁶⁹ <https://www.aurba.org/productions/adapter-les-tissus-urbains-au-rechauffement-climatique/>

⁷⁰ http://www.meteofrance.fr/documents/10192/22603710/DP_servicesclim.pdf

2. Cadre théorique et méthodologique

Les cartes climatiques représentent à la fois un outil de diagnostic microclimatique du territoire urbain et un outil de traduction réglementaire des enjeux identifiés. Le Japon peut être cité comme l'un des pays les plus avancés dans ce domaine, avec des cartes climatiques des environnements urbains (Tanaka et al., 2009) élaborées dans certaines villes (Kobe, Osaka, Yokohama et Sakai). Ces dernières années, la Chine est également très active sur ce sujet. Même si les méthodologies sont spécifiques à chaque contexte local, il existe deux niveaux de cartes climatiques des environnements urbains : les « cartes d'analyse climatique » (CAM) et les « cartes de recommandations » (RM), correspondant à deux échelles de planification, celle de la ville (1 / 10 000) et celle du quartier (1 / 2 500).

En Europe, c'est l'Allemagne qui arrive en tête des expérimentations dans ce domaine, grâce notamment à un contexte réglementaire très favorable à la prise en compte de l'environnement dans l'urbanisme. Plusieurs villes de la Rhur, mais aussi Berlin ou Stuttgart, se sont dotées de cartes climatiques selon des modèles différenciés (cartes d'analyse climatique, cartes de fonctions synthétiques ou atlas environnementaux numériques) afin d'orienter leur planification urbaine. Plus récemment, les expériences du Japon et de l'Allemagne se sont diffusées à l'international, notamment à Hong Kong (*Urban Climatic Map and Standards for Wind Environment - Feasibility Study*, 2006), aux Pays-Bas (Arnhem, Burghardt et al. 2010), en Espagne (Bilbao, Acero, 2012) et dans de nombreux autres contextes géographiques (Iran, Suède, Suisse, Norvège, Grèce, Pologne, Brésil, Thaïlande, etc.).

Comme mentionné précédemment, l'appellation tend à converger vers la dénomination générique de carte climatique urbaine, avec deux niveaux d'information : la carte d'analyse climatique de l'environnement urbain (*UC-AnMap*) et la carte de recommandations pour l'aménagement urbain (*UC-ReMap*). Les grandes lignes du contenu de ces cartes ont tendance elles aussi à se normaliser en dépit d'un nécessaire ajustement aux contextes climatique, culturel, économique et urbain locaux. Les directives VDI 3787, publiées pour la première fois en 1997 par l'Association des ingénieurs allemands (VDI), sont devenues une référence internationale en la matière⁷¹. Enfin, une publication récente intitulée « *The Urban Climatic Map, A Methodology for Sustainable Urban Planning* » (Ng et Ren, 2015) contribue à la diffusion internationale de ces outils cartographiques, en formulant les bases scientifiques et techniques de ces outils et en explicitant des méthodes permettant de relier informations météorologiques, données de planification, d'occupation du sol, de topographie et de végétation.

2.1 Description générale de l'approche cartographique

Les cartes climatiques sont composées de deux niveaux d'information.

- **Le premier niveau est celui du diagnostic microclimatique.** Ce niveau rassemble des informations sur la météorologie, l'occupation du sol, la topographie et la végétation, en fonction desquelles leurs relations et leurs effets sur les vents et le confort thermique sont analysés et évalués spatialement. Ce diagnostic est donc basé sur un jeu de cartes, appelées couramment « cartes d'analyse » (la dénomination « cartes d'analyse thématiques » est actuellement à l'étude pour le français), et croisé avec des éléments de la planification (TVB, zonage, etc.). Les cartes d'analyse doivent permettre d'identifier un certain nombre de zones à enjeux d'un point de vue climatique. Du point de vue thermique, les zones à enjeux doivent être représentées suivant leur niveau de stress thermique quotidien et/ou d'intensité des îlots de chaleur urbains nocturnes. Ceci est corrélé

⁷¹ « Ces directives décrivent comment présenter et évaluer sous forme de cartes des faits pertinents d'un point de vue climatologique pour les villes. De plus, elles expliquent comment utiliser les cartes de recommandations ainsi obtenues. Que ce soit au niveau territorial ou régional, ces cartes sont principalement destinées aux plans de zonage et plans locaux d'urbanisme. Dans un contexte de changement climatique et de justice environnementale, ces cartes recouvrent une importance grandissante. Le périmètre d'application de ces directives s'étend désormais à l'aménagement régional et n'est plus cantonné au seul niveau urbain. Elles encadrent l'utilisateur qui évalue la situation thermique et la qualité de l'air, ainsi que les effets des mesures de planification et d'aménagement. » https://www.vdi.eu/nc/guidelines/vdi_3787_blat_1-umweltmeteorologie_klima_und_lufthygienekarten_fuer_staedte_und_regionen_/

avec les typologies des zones urbaines, selon leur densité ou leur structure urbanistique, les espaces régulateurs de température, tels que les plans d'eau et la végétation, et les zones commerciales et/ou d'activité qui se caractérisent par une forte imperméabilisation du sol et une utilisation intensive de la climatisation. Du point de vue aéralique, il est nécessaire d'identifier les couloirs de vent prédominants, les zones génératrices de brises de pente, les zones de production d'air frais (par exemple, présence de végétation et d'eau) ou d'air chaud (par exemple, les zones très minéralisées ou ayant recours à la climatisation) et les zones qui font obstacle au vent.

- **Le deuxième niveau permet une traduction réglementaire** qui apporte des orientations générales stratégiques et pratiques en matière d'urbanisme pour améliorer l'environnement thermique et aéralique sur la base du diagnostic microclimatique et des contraintes de praticabilité. Cette traduction repose sur une « carte des recommandations » (« carte des zones à enjeux » est ici proposée pour le français) qui doit contenir des informations sur les zones à améliorer ou à préserver en termes de climat urbain et les mesures proposées.

Différentes approches existent pour la production d'un diagnostic microclimatique.

- **D'un point de vue thématique**, certaines approches sont davantage axées sur le « stress thermique », comme celle développée à Tokyo (Ashie et al., 2015), tandis que d'autres sont axées sur la « ventilation et la qualité de l'air », mettant l'accent sur le potentiel dynamique et l'information aéralique. C'est souvent le cas dans les villes allemandes, où les problèmes de pollution atmosphérique sont plus importants et plus fréquents que les problèmes de stress thermique élevé. À Hong Kong, les diagnostics microclimatiques se concentrent sur le confort d'été et les deux aspects du stress thermique et de la ventilation sont explorés en raison de la topographie prononcée et de la proximité de la mer (*Urban Climatic Map and Standards for Wind Environment - Feasibility Study*, 2006⁷²).

- **En ce qui concerne les données mobilisées**, les villes des pays où cet outil a été couramment développé sont instrumentées d'un point de vue atmosphérique ou ont bénéficié de campagnes de mesures dans le cadre de programmes de recherche dédiés. Ces approches cherchent à établir des liens statistiques entre les conditions microclimatiques, l'occupation du sol et la morphologie urbaine. La caractérisation des surfaces urbanisées et topographiques prend donc une importance prédominante dans ce type d'analyse. En Allemagne, par exemple, l'occupation du sol est généralement la seule donnée utilisée pour obtenir une classification de l'espace physique dans différents « climatopes » représentant des zones avec des climats locaux supposés distincts (directives VDI 3787). Ensuite, les données de température ou de stress thermique sont utilisées pour les caractériser. Les données de vent sont utilisées pour définir les couloirs de ventilation, les zones de production d'air frais et les zones de blocage au vent. En revanche, pour Hong Kong, en raison de la morphologie urbaine complexe en termes de densité et de hauteur du bâti, d'autres paramètres comme la volumétrie des bâtiments doivent entrer en jeu (*Urban Climatic Map and Standards for Wind Environment - Feasibility Study*, 2006).

Ainsi, les choix techniques vont dépendre des enjeux climatiques locaux, des données disponibles sur la description de la ville et le climat urbain et du contexte scientifique et culturel des acteurs (chercheurs et parties prenantes) impliqués dans le projet.

72

https://www.researchgate.net/publication/283806656_Final_Report_of_Hong_Kong_Urban_Climatic_Map_and_Standards_for_Wind_Environment_-_Feasibility_Study

2.2 Adaptation aux spécificités françaises

L'objectif de cette étude a été de proposer des méthodes de représentation de l'information climatique qui, selon notre expérience, semblent adaptées aux enjeux climatiques et au cadre réglementaire des villes françaises.

Plusieurs choix méthodologiques ont donc été effectués.

- **Le premier choix consistait à se concentrer sur l'enjeu du stress thermique.** Il existe une grande variabilité climatique sur le territoire français qui se décline en fonction de la situation géographique et de la topographie. Plusieurs régimes climatiques peuvent être identifiés, notamment les climats océanique, méditerranéen, semi-continentale et montagneux, ainsi que les régimes mixtes de ces climats (Joly et al., 2010). Les villes du Sud de la France présentent ainsi un climat plus doux qui peut entraîner un stress thermique tant le jour que la nuit. Ces situations avec un fort stress thermique sont également observées pour les villes continentales situées à l'est et au nord. Du point de vue de l'évolution du climat à long terme, une hausse des températures minimales et maximales est plus que probable, tout comme l'augmentation de la fréquence, la durée et l'intensité des épisodes de vague de chaleur sur toute la France et en particulier sur le bassin méditerranéen⁷³. L'évolution à moyen et long terme des autres paramètres atmosphériques comme la pluviométrie ou le vent est plus incertaine. Dans une logique de transfert rigoureux des connaissances scientifiques vers l'opérationnel, il semble pertinent de commencer par intégrer les connaissances des aléas climatiques les plus fiables, ce qui positionne l'enjeu du stress thermique comme un choix naturel pour cette première expérience. Ce choix est encore renforcé par la prise de conscience de cette problématique par le grand public suite à la vague de chaleur de 2003 et à celles qui se sont succédé de façon très rapprochée ces dernières années. Depuis 2015, de fortes vagues de chaleur se produisent presque chaque année en France⁷⁴.

- **Le deuxième choix consistait à proposer des outils pour améliorer la mise en œuvre de politiques locales de gestion du climat urbain dans une démarche méthodologique générique applicable à l'échelle nationale.** Les programmes et mesures de gestion et d'adaptation climatiques qui seront à mettre en place dans les années à venir doivent être évidemment adaptés à la réalité de chaque terrain et élaborés en collaboration avec les acteurs locaux. Une certaine généricité est ici recherchée principalement à travers les aspects techniques concernant les méthodes cartographiques et les outils de traduction et de visualisation des données climatiques de la sphère des producteurs de données (chercheurs et bureaux d'études) vers la sphère opérationnelle.

L'accès à des données atmosphériques à haute résolution spatiale étant rare dans les villes françaises, le projet MApUCE (qui a créé une base de données regroupant une cinquantaine de villes) représente un vrai saut quantitatif du point de vue de la disponibilité des données sur la description de la ville et du climat urbain.

- **Les données de modélisation produites permettent un accès large et homogène aux données de température de l'air, de stress thermique, de vent, etc.** Ces informations s'appliquent à un large éventail de situations météorologiques et utilisent une représentation physique de la dynamique atmosphérique, ce qui n'est pas possible avec les approches statistiques utilisées, par exemple, en Allemagne ou à Hong Kong, qui supposent que les conditions microclimatiques en milieu urbain dépendent essentiellement de la surface. Ceci est vrai pour des situations atmosphériques très calmes et sans vent mais présente ses limites pour des situations de vent fort ou de transition ainsi que pour les villes soumises à des brises de montagne ou côtières.

⁷³ <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-et-precipitations>

⁷⁴ <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/impacts-du-changement-climatique-sur-les-phenomenes-hydrometeorologiques/changement-climatique-et-canicules>

En ce sens, les données de modélisation constituent un outil puissant qui permet des diagnostics microclimatiques systémiques (surface-atmosphère).

• **La base de données urbaine produite dans le cadre du projet facilite les simulations numériques, ainsi que l'interprétation et la compréhension des impacts de la surface sur son atmosphère proche.**

L'occupation du sol permet de comprendre les caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain. La hauteur et la contiguïté des éléments bâtis permettent par exemple d'identifier des barrières au vent ou au contraire de potentielles voies d'accélération.

Ceci permet de proposer des méthodologies génériques pour l'obtention de cartes climatiques qui serviront à alimenter l'étape de diagnostic d'un PLU ou PCAET. Dans le cadre de cette étude, les cartes d'analyse s'appuient sur des données de modélisation numérique du climat présentées dans la section suivante mais d'autres types de données, comme celles provenant des réseaux de mesures urbains, peuvent également être mobilisées si elles sont disponibles.

2.3 Co-construction méthodologique dans le cadre de l'élaboration du PLUi-H de Toulouse Métropole

Le programme de recherche MApUCE, « Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie » a été financé sur la période 2014-2019 par l'Agence Nationale de la Recherche. Ce projet interdisciplinaire a mobilisé des chercheurs en climatologie (CNRM), des experts en bases de données urbaines (LABSTTIC et LIENSs), des architectes (LRA), des sociologues (LATTs), des juristes de l'environnement (LIEU) et des chercheurs en géographie urbaine (LISST). Ce riche partenariat de recherche intégrait également un associé institutionnel important : la Fédération Nationale d'Agences d'Urbanisme (FNAU), regroupant les 52 agences d'urbanisme françaises.

L'objectif général du projet était de produire des données et d'identifier des méthodes pour améliorer les démarches d'intégration des enjeux climatiques dans les politiques urbaines en France. Un premier grand volet s'est attaché à produire une base de données urbaine et, à partir de simulations numériques, des données quantitatives de microclimat urbain, climat et consommation d'énergie par habitat. Ces données ont été générées pour une cinquantaine de villes en France et ce jusqu'à l'échelle des quartiers. Un deuxième grand volet a permis d'explorer différentes méthodologies afin d'inscrire cette information dans les documents juridiques et les politiques urbaines les plus pertinentes au regard du cadre réglementaire français (Lambert-Habib et al., 2019) et des besoins exprimés par les agences d'urbanisme⁷⁵. Le travail présenté dans cet article fait partie de ce deuxième volet, en particulier pour ce qui relève des méthodologies cartographiques de transmission et de communication de l'information urbaine et climatique.

La méthodologie de collaboration avec les collectivités territoriales s'est articulé comme suit. Une première phase de trois ans (2015-2018) s'est composée d'un suivi des réunions de travail du groupe Climat-Énergie lors de l'élaboration du PLU de Toulouse, d'une analyse scientifique de l'information climatique et de la production des éléments cartographiques. Ces ateliers ont réuni une vingtaine d'agents représentant chacun environ dix services (par exemple, le Plan Climat, le Service Planification Urbaine, la Direction du Logement et des Opérations, le DEE, le Département de l'Aménagement du Territoire - SPU, le Département de l'Aménagement du Territoire - SAE, le Service des espaces verts, la Prospective urbaine, la Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations, la Direction Gestion Mobilités Réseaux et le projet Toulouse Aerospace).

En outre, au cours de la période 2018-2019, trois ateliers sur la visualisation géographique ont été organisés avec le groupe de travail GEO-VISU, un groupe de cartographes français. Ces ateliers visaient à surmonter les obstacles à la représentation des données en cartographie/géomatique et à contribuer à la sémiologie, notamment en termes de collecte, de traitement, d'analyse et de représentation des données localisées urbaines et climatiques.

⁷⁵ https://www.iau-idf.fr/fileadmin/DataStorage/Recherche/passeurrecherche/MApUCE_FNAU_livrable_tache43_150422_v26__2_.pdf

3. Représentation du terrain et des données

La métropole toulousaine se trouve dans le sud-ouest de la France, compte une population de plus de 750 000 habitants et se compose de 37 communes (*Figure 38*) pour une surface de 118 km² (environ 16 km du nord au sud et 12 km d'ouest en est). La densité de population est d'environ 1 600 habitants/km², faisant de la métropole toulousaine l'une des plus étendues de France. Toulouse est considérée comme l'une des métropoles les plus agréables et attractives de France. Cependant, la population de la métropole a augmenté de façon significative, avec plus de 8 000 nouveaux habitants par an au cours des vingt dernières années. La topographie de cette zone est relativement douce, allant de 102 m à 273 m au-dessus du niveau de la mer et elle est principalement influencée par les vallées tributaires de la Garonne. Du fait de sa situation éloignée de l'océan et de son terrain plat, le rafraîchissement apporté par les brises marines et des vallées est très limité. Toulouse bénéficie d'un climat océanique dégradé, ce qui signifie qu'il présente un contraste saisonnier marqué. En été, il y a habituellement de grandes variations de température quotidiennes accompagnées de vents chauds orientés nord-ouest ou sud-ouest. Même si la température quotidienne varie généralement entre 15 °C le matin et 30 °C l'après-midi, des périodes de canicule avec des températures atteignant 40 °C se produisent fréquemment.

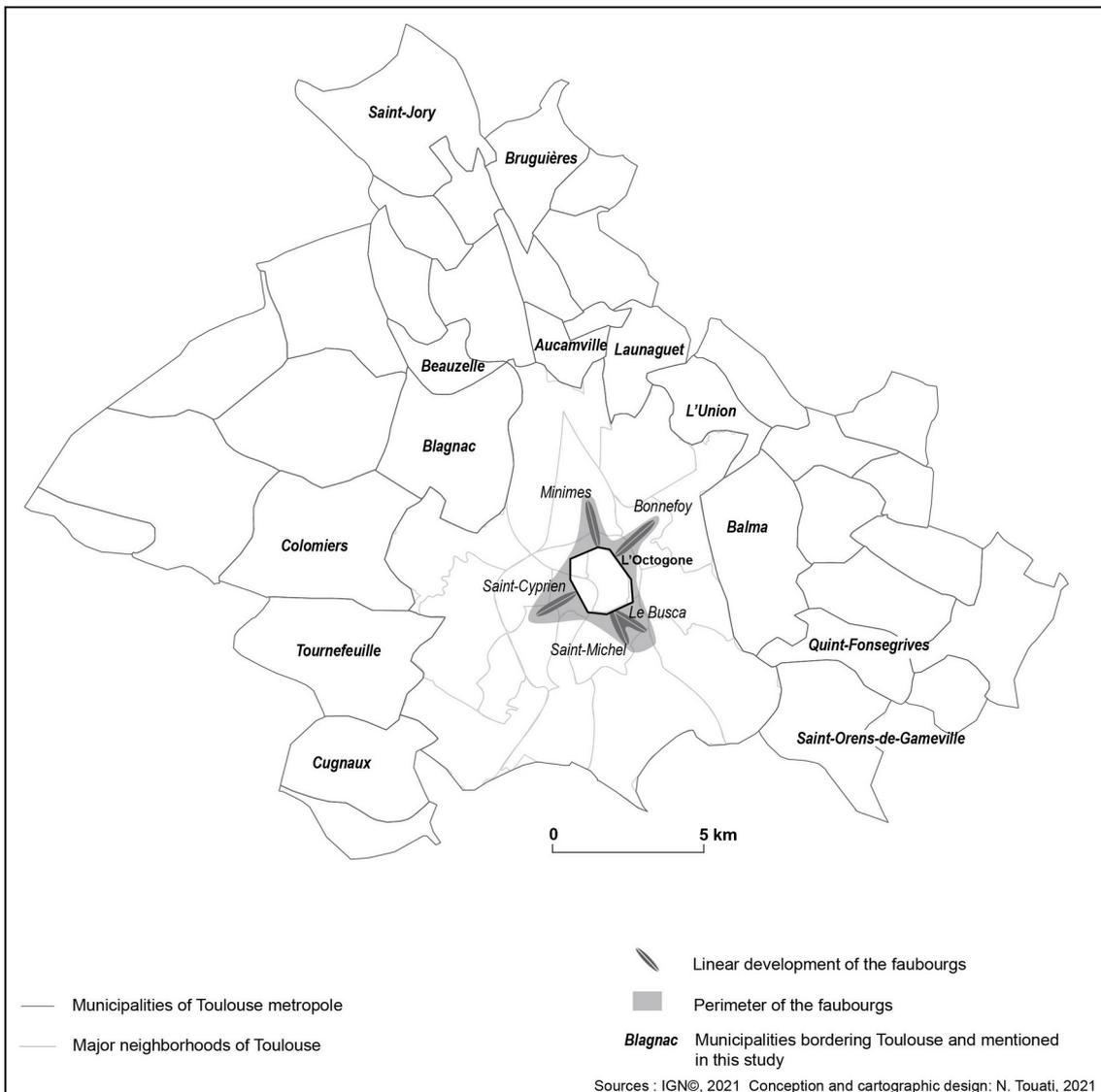


Figure 38. Emplacements des principaux toponymes cités dans la présente étude

3.1 Données urbaines

Les données décrivant la surface urbaine proviennent de la base de données MApUCE alimentée grâce à l'automatisation des indicateurs décrivant le tissu urbain et l'occupation du sol (Bocher et al., 2018). Ils ne sont ici décrits que deux caractéristiques majeures de cette riche base de données urbaine, ainsi que les indicateurs utilisés dans le cadre de cette étude.

- **Échelles spatiales** : trois échelles spatiales sont disponibles. La base de données urbaine contient un ensemble d'indicateurs calculés à trois échelles spatiales correspondant au bâtiment, au bloc de bâtiments et à l'îlot (*Figure 39*) sur la base d'un jeu de données d'entrée de 2015 fourni par les instituts français de la statistique (Recensement INSEE) et de géographie (IGN-BDTopo, BD Parcellaire)⁷⁶. Les îlots sont délimités par le réseau routier, le réseau hydrographique et d'autres éléments segmentant l'espace. Les indicateurs à l'échelle de l'îlot sont disponibles sur un site Web en accès libre⁷⁷.
- **Indicateurs** : 64 indicateurs sont disponibles. Ils sont organisés en cinq catégories : le nombre d'éléments (bâtiments, blocs), les caractéristiques de surface (densité surfacique des bâtiments, végétation, routes, etc.), les distances (distance entre les bâtiments, entre les bâtiments et les routes pour chaque îlot, etc.), la forme (volume du bâtiment, compacité du bloc et hauteur moyenne du bâti par îlot, etc.) et finalement la catégorie « autres » rassemblant des indicateurs pertinents dans le cadre des études associant microclimat urbain et architecture (volume passif, direction principale, cours intérieures, etc.).



Figure 39. Échelles spatiales utilisées dans le projet MApUCE : a) bâtiment, b) bloc et c) îlot, également appelé unité spatiale de référence (source : Hidalgo et al., 2018b)

À partir de ce jeu d'indicateurs morphologiques et d'occupation du sol, plusieurs indicateurs dérivés ont été produits. Leur utilisation dans notre étude permet de faciliter la compréhension du tissu urbain à partir des sources suivantes.

- **Une analyse architecturale des bâtiments français** a été réalisée à partir des indicateurs morphologiques susmentionnés, de l'âge des bâtiments et de la zone géographique. Tornay et al. (2017) ont défini dix archétypes architecturaux représentatifs de la plupart des bâtiments français et attribuent une classe de typologie urbaine à chaque bâtiment de la base de données MApUCE. Le pourcentage de chaque archétype est ainsi disponible à l'échelle de l'îlot (*Figure 40a*). Cette information permet de spécifier les zones

⁷⁶ Parcelles cadastrales en format vectoriel (<http://professionnels.ign.fr/bdparcellaire>)

⁷⁷ <http://mapuce.orbisgis.org/#>

particulièrement exposées à des niveaux élevés de stress thermique pendant la journée ou aux effets de l'îlot de chaleur urbain pendant la nuit car ces typologies sont couramment utilisées par les architectes et les urbanistes.

• Une typologie complémentaire appelée « Zones climatiques locales » (Stewart et Oke, 2012) a également été produite par Hidalgo et al. (2018b) prenant en compte l'agencement des bâtiments dans les quartiers et leurs impacts microclimatiques potentiels. Cette typologie (*Figure 40b*) est couramment utilisée par la communauté de chercheurs en climatologie urbaine et commence également à l'être au niveau opérationnel par plusieurs villes en France comme Paris, Nancy ou Toulouse (Dumas, 2017).

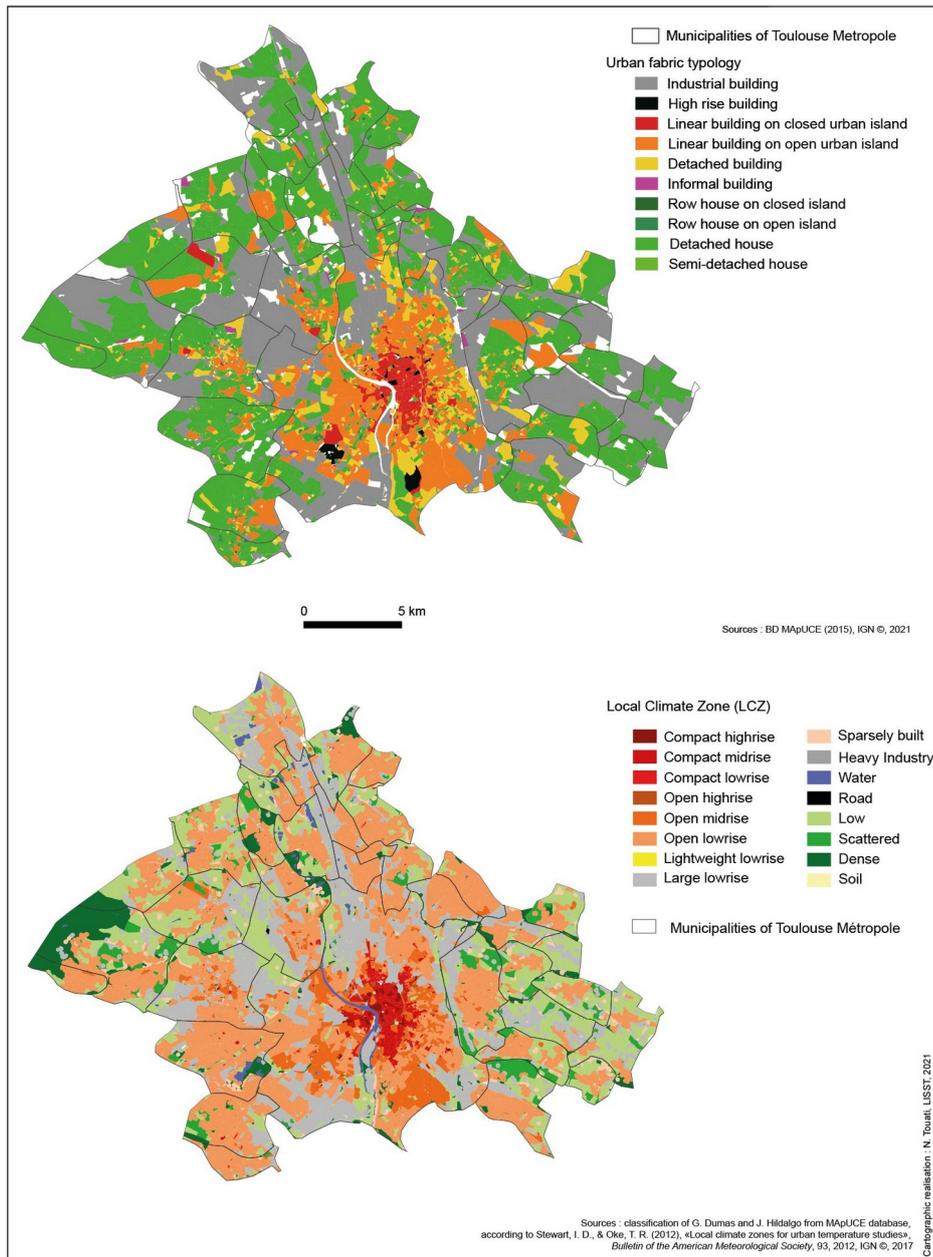


Figure 40. Typologies de bâtiment et zones climatiques locales de la métropole toulousaine. Sources : BDMApUCE en 2015, une classification proposée par Dumas et Hidalgo s'appuyant sur la base de données MApUCE en 2017, Stewart et Oke (2012), et IGN ©, 2017

Plusieurs types de données socio-économiques sont également disponibles dans la base de données MApUCE. Issues du recensement de la population et des données carroyées (résolution 200 m) de l'INSEE, elles sont disponibles à l'échelle de l'îlot. Cela concerne principalement des informations démographiques et socio-économiques sur les habitants (âge, sexe, situation familiale, catégorie socioprofessionnelle) et des informations sur les caractéristiques et l'équipement des logements (taille du logement, type et combustible du système de chauffage) : le nombre de personnes, le total de foyers et le type et la catégorie du logement, ainsi que les surfaces cumulées des résidences principales et celles correspondant aux logements collectifs. Néanmoins, pour cette étude, des bases de données plus précises issues du catalogue de données de l'agence d'urbanisme de Toulouse (Aua/T) ont été utilisées pour croiser données climatiques, données urbanistiques et données socio-économiques afin de produire des cartes d'exposition. Il s'agissait notamment de données nationales telles que la grille 2015 de l'INSEE et la base Sirene 2016, ainsi que des données locales sur les équipements, la végétation et l'occupation du sol de la métropole toulousaine.

3.2 Données climatiques

Deux catégories d'information climatique ont été mobilisées pour décrire le climat de l'agglomération toulousaine. La première catégorie fait référence à la caractérisation des situations météorologiques (amplitude thermique journalière, vent prédominant, précipitation, etc.) auxquelles sont confrontés les Toulousains. La deuxième catégorie fait référence aux données spatialisées de microclimat issues de simulations numériques.

3.2.1 Types de temps sensibles

La climatologie observée sur la métropole toulousaine peut être expliquée par la succession de onze situations météorologiques appelées types de temps sensibles (TTS ; Hidalgo et Jougla, 2018c). Certaines situations météorologiques types sont caractéristiques d'une saison particulière en ce sens qu'elles sont observées plus fréquemment au cours de la saison en question. Sur les onze situations identifiées, quatre situations de ciel clair sont très présentes dans la région et sont caractérisées par des jours de forte stabilité atmosphérique (faible vent) et de forte insolation (**Tableau 9**, TTS 5, 7, 8 et 9). Deux situations correspondent à des flux de vent de sud-est (**Tableau 9**, TTS 1 et 2). Les précipitations les plus intenses sont concentrées sur deux types de situations et restent relativement peu fréquentes (**Tableau 9**, TTS 4 et 10). Enfin, trois situations météorologiques avec vent d'ouest ou nord-ouest fort ou faible et avec ou sans précipitations correspondent à des situations de transition entre d'autres types de situations météorologiques (**Tableau 9**, TTS 0, 3 et 6). Afin de traiter la problématique de stress thermique estival, l'analyse s'est focalisée sur trois situations météorologiques (**Figure 41**) qui sont soit propices à de fortes températures journalières (TTS 7), soit au développement d'un îlot de chaleur nocturne conséquent (TTS 8), soit aux deux (TTS 9).

| TTS | Fréquence (%) | Printemps (%) | Été (%) | Automne (%) | Hiver (%) | Amplitude thermique journalière (°C) | Humidité spécifique ($g\ kg^{-1}$) | Vitesse du vent ($m\ s^{-1}$) | Direction du vent | Précipitations ($mm\ h^{-1}$) |
|-----|---------------|---------------|---------|-------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| 9 | 17 | 32 | 36 | 22 | 10 | 12,49 | 7,03 | 1,8 | O-NO | 0,059 |
| 5 | 15 | 25 | 3 | 24 | 48 | 9,75 | 5,67 | 2,37 | S-SE | 0,012 |
| 8 | 15 | 12 | 68 | 20 | 0 | 7,23 | 10,82 | 2,38 | O-NO | 0,089 |
| 3 | 14 | 33 | 5 | 22 | 40 | 3,43 | 5,07 | 4,27 | NO | 0,065 |
| 7 | 12 | 12 | 51 | 37 | 0 | 11,08 | 10,45 | 2,62 | SE | 0,014 |
| 2 | 10 | 35 | 9 | 28 | 28 | 6,19 | 7,09 | 6,25 | S-SE | 0,016 |
| 0 | 8 | 17 | 0 | 25 | 58 | 5,60 | 5,07 | 1,43 | O-NO | 0,071 |
| 6 | 4 | 34 | 11 | 26 | 29 | 5,05 | 7,21 | 4,56 | NO | 0,436 |
| 1 | 3 | 47 | 9 | 35 | 9 | 7,31 | 8,42 | 2,59 | S-SE | 0,297 |
| 4 | 1 | 29 | 36 | 25 | 10 | 6,44 | 9,42 | 3,13 | NO-O | 1,003 |
| 10 | 0,2 | 12 | 25 | 50 | 13 | 4,15 | 9,03 | 5,01 | NO | 1,938 |

Table 9. Caractéristiques de la journée la plus représentative de chaque type de temps sensible (TTS). Les fréquences sont fournies en base annuelle et par saison et les types de temps sensibles sont répertoriés par ordre de fréquence. Les caractéristiques des principales variables météorologiques (température et humidité de l'air, vent et précipitations) sont également présentées. Pour les directions du vent, les abréviations suivantes sont utilisées : ouest (O), nord-ouest (NO), nord-est (NE) et sud-est (SE).

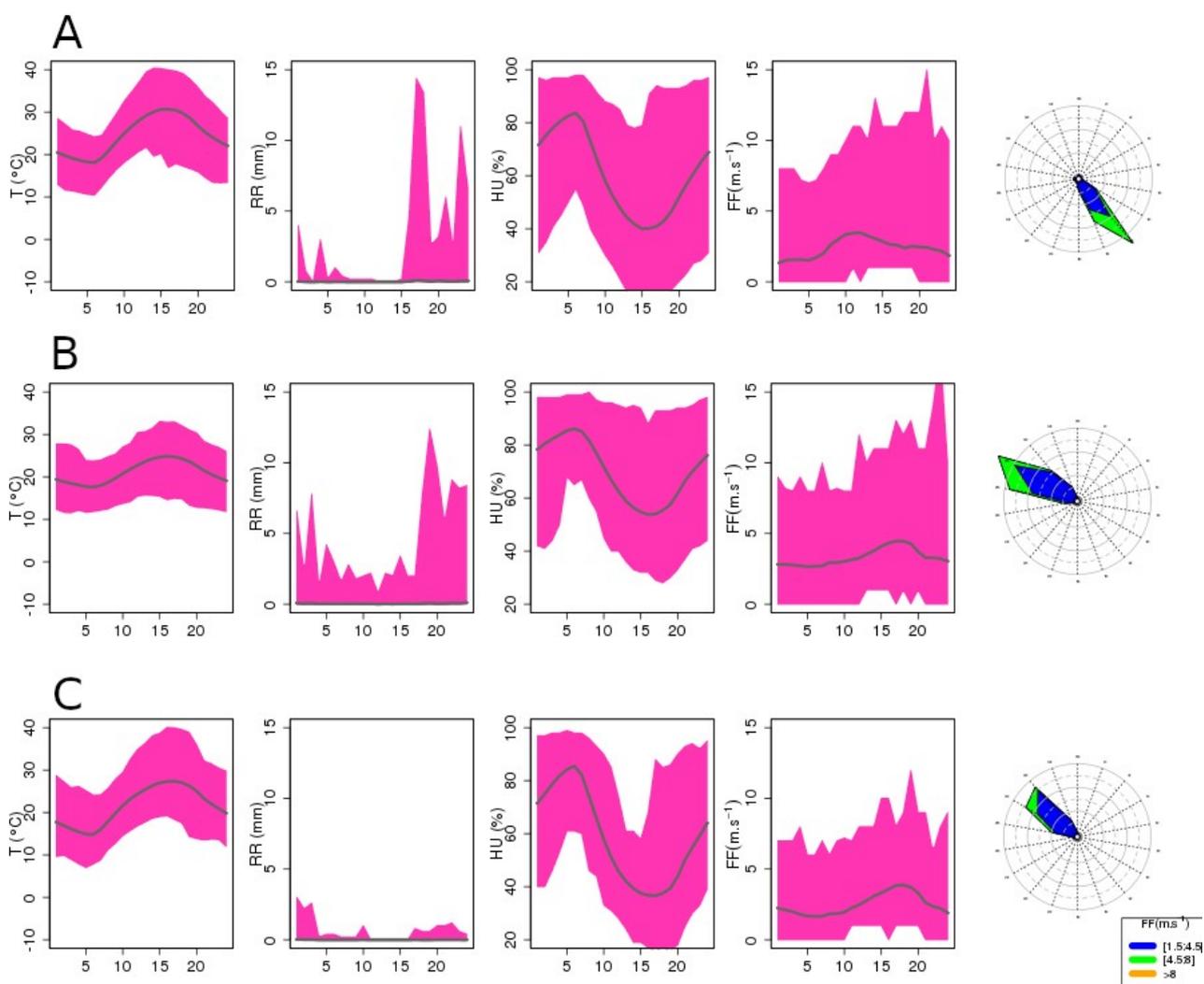


Figure 41. (A) Type de temps sensible 7 : jour typique d'été bien ensoleillé avec vent de sud-est. La température peut atteindre les 40 °C. Il est caractérisé par une grande amplitude thermique entre le jour et la nuit et un vent de sud-est persistant mais faible (2 m s^{-1} le matin, $3,5 \text{ m s}^{-1}$ dans l'après-midi et $2,5 \text{ m s}^{-1}$ le soir). (B) Type de temps sensible 8 : jour typique d'été bien ensoleillé avec vent de nord-ouest. Bien que présent aussi pendant les autres saisons, il s'agit du type de temps sensible le plus fréquent en été. La température reste relativement élevée en été, la température maximale est de 30 °C, mais elle est plus douce que dans le TTS 7. Le vent de nord-ouest peut être relativement fort et humide, avec des pics de 4 m s^{-1} dans l'après-midi. (C) TTS 9 : jour ensoleillé, très chaud en été, avec un vent de nord-ouest. Ce type de temps est très courant. En été, la température peut grimper jusqu'à 40 °C. Le vent souffle d'ouest le matin à nord-ouest l'après-midi, puis sud-ouest dans la soirée. La vitesse du vent varie elle aussi entre 2 m s^{-1} le matin, 4 m s^{-1} en milieu de journée et 2 m s^{-1} à nouveau en fin de journée. Ce type de situation météorologique est très favorable à la formation d'un îlot de chaleur nocturne intense. (T fait référence à la température de l'air, RR aux précipitations, HU à l'humidité relative et FF à la vitesse du vent).

3.2.2. Simulations atmosphériques

Les données climatiques spatialisées sont issues d'une modélisation mobilisant les modèles atmosphériques de méso-échelle Méso-NH (Lac et al., 2018) et de surface SURFEX (Masson et al., 2013) pendant une année type à Toulouse (*Figure 42*). Les données météorologiques de cette année type correspondent aux mois de mars 2004 à février 2005, période concomitante à la campagne de terrain CAPITOUL (Masson et al., 2008), ce qui permet d'avoir suffisamment de mesures d'observation pour évaluer la qualité de ces simulations (Kwok et al., 2019). Les données atmosphériques couvrent la totalité du territoire de la métropole toulousaine. Les résolutions horizontales (250 m) et temporelles (une carte par heure) permettent de détecter les variations spatiales et temporelles des variables climatiques sur le territoire.

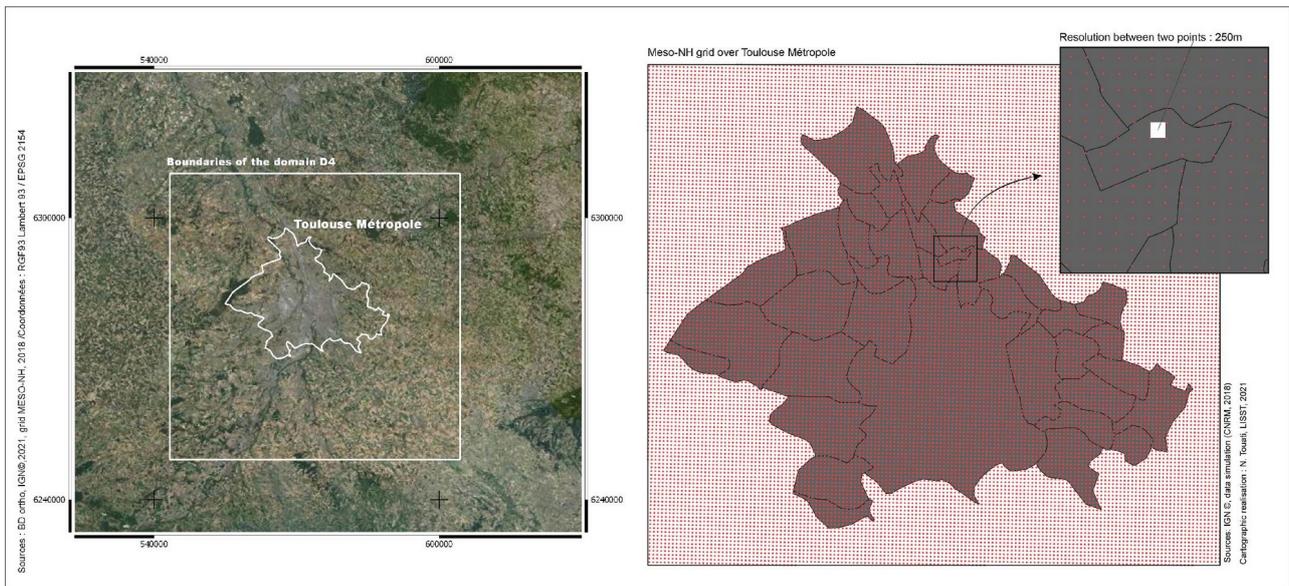


Figure 42. Domaines de simulation (gauche) et zoom sur le domaine à plus haute résolution (D4, 250 m, droite)

Le modèle SURFEX est capable de modéliser quatre types de couverture de surface qu'on appelle tuiles : zones urbaines, zones rurales, mers et océans, lacs et rivières. Les données caractérisant la structure et le tissu urbains de Toulouse (y compris la morphologie urbaine, les matériaux de construction et leurs propriétés physiques) proviennent de la base de données MApUCE. Les paramètres liés à l'utilisation des bâtiments et au comportement humain sont initialisés selon la méthode décrite dans Schoetter et al. (2017). La végétation urbaine a été identifiée par traitement d'images satellitaires (Crombette et al., 2014). Pour l'initialisation des paramètres d'occupation du sol des zones rurales autour de Toulouse (forêts, terres agricoles) hors du périmètre de la base de données MApUCE, la base de données ECOCLIMAP-I (Champeaux et al., 2005) est adoptée avec une résolution horizontale de 1 km.

L'information atmosphérique accessible à travers les simulations numériques est très riche en termes de quantité de variables, disponibilité de pas de temps et niveaux verticaux. C'est au cours de réunions d'équipe qu'ont été choisis les champs pour créer les cartes d'analyse.

- **Informations atmosphériques (trois types) :**

- Le niveau de stress thermique diurne, caractérisé selon l'indicateur *Universal Thermal Climate Index (UTCI)*⁷⁸ car il affecte fortement le confort des citoyens et rend incontournable le recours à la climatisation dans de nombreux secteurs d'activité.
- L'influence de la ville sur la température de l'air nocturne, caractérisée par l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU). Elle affecte la capacité des bâtiments à se refroidir pendant les heures de repos nocturne et donc la santé des habitants.
- Les conditions aérauliques, direction et intensité du vent, permettent d'identifier les zones favorables à la ventilation naturelle et celles qui présentent un déficit de ventilation.

- **Niveaux verticaux (deux types) :**

Pour l'analyse thermique (stress thermique diurne et température de l'air nocturne), la moyenne pondérée des variables météorologiques à 2 m au-dessus du sol a été utilisée sur l'ensemble des tuiles SURFEX. Pour l'analyse aéraulique, sont utilisées les données issues du premier niveau du modèle atmosphérique MESO-NH situé à 10 m au-dessus du bâti.

- **Situations météorologiques (trois types) :**

En été (juin-juillet-août), les jours appartenant à l'une des trois situations météorologiques retenues et décrites précédemment (TTS 7, 8 et 9) et le jour J+1 sont isolés. Les paramètres thermiques et climatiques pour la nuit sont issus des résultats du modèle allant du jour J au jour J+1 car il est admis que ces paramètres sont principalement définis par les conditions météorologiques du jour en question.

3.3 Post-traitement des données

Les simulations numériques ont permis de produire une carte pour chaque variable météorologique au pas de temps horaire, c'est-à-dire qu'un total de 8 670 cartes ont été générées. C'est lors d'échanges avec les collectivités territoriales qu'il a été décidé de concentrer les efforts sur l'été car la gestion du confort thermique est l'une des priorités identifiées par le groupe de travail Climat-Énergie en charge de l'élaboration du PLU.

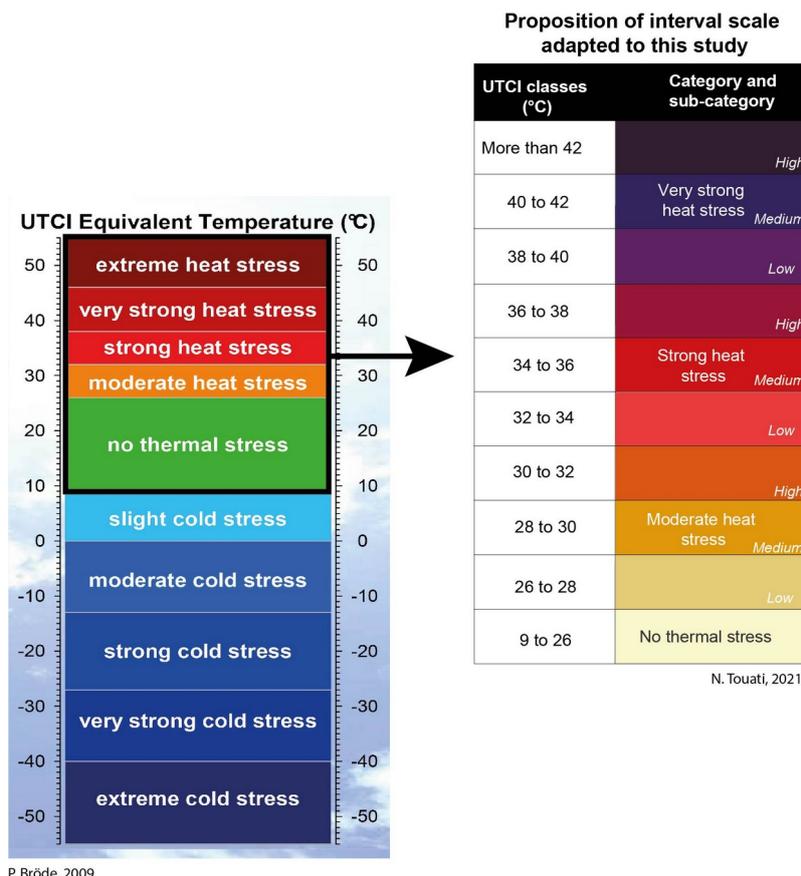
Le choix de trois types de temps sensibles (TTS 7, 8 et 9) a permis de réduire le volume de données à traiter et présenter. Les TTS 7, 8 et 9 représentent pour l'année type simulée 85 % des jours d'été avec une fréquence d'occurrence respectivement de 24 jours (26 %), 37 jours (40 %) et 18 jours (20 %). Même si les dynamiques diurnes ont été analysées, deux tranches horaires de quatre heures ont finalement été retenues : la fin d'après-midi (17h-20h heure locale) et la nuit (3h-6h heure locale).

Plusieurs traitements statistiques sont alors envisageables afin de faire ressortir les zones de la ville qui présentent un comportement microclimatique différencié. Le choix a été fait de calculer, pour un type de temps donné et une tranche horaire, le niveau le plus fréquent par pixel afin d'identifier les zones particulièrement sensibles aux aléas climatiques. Ici, on s'intéresse aux effets thermiques et aérauliques. Ces zones sont ici appelées *zones de persistance*.

⁷⁸ <http://www.utci.org/>

Niveaux de classification utilisés pour chaque information atmosphérique :

- L'UTCI est une norme internationale établie dans le cadre de l'Action COST 730⁷⁹ qui propose une classification des valeurs entre des niveaux de stress thermique considérés comme « froid extrême » et ceux considérés comme « chaleur extrême » (**Figure 43**, gauche). Comme les intervalles de cette norme sont très larges, afin de conserver une certaine variabilité spatiale, il a été proposé, dans cette étude, de subdiviser les niveaux correspondant à des stress thermiques de « modéré » à « très fort » en trois sous-catégories : faible, moyen et élevé (**Figure 43**, droite).
- Pour l'intensité des ICU, des catégories d'intervalles à un degré ont été créées.
- Pour le vent, trois analyses ont été effectuées. À l'instar des indicateurs précédents, des catégories ont été considérées pour la combinaison direction/vitesse du vent dès le premier niveau du modèle atmosphérique MESO-NH situé 10 m au-dessus du bâti. Ces catégories peuvent varier chaque 30 degrés pour la direction du vent (par exemple, N, NE, E et SE) et s'appuient sur les catégories de l'échelle de Beaufort pour la vitesse du vent (par exemple, 1,5, 3,3, 5,4, 10,7, 13,8, 17,1 et 24,4 m s⁻¹). En utilisant les mêmes données source, le calcul des discontinuités spatiales de la vitesse moyenne du vent par pixel (Annexe 1) a



permis d'identifier les zones où la vitesse du vent varie rapidement. Enfin, le ratio de vitesse (vitesse du vent à 2 m au-dessus du sol/vitesse du vent à 10 m au-dessus du bâti) a également été analysé pour décrire les zones présentant des potentiels de ventilation faibles et élevés.

⁷⁹ <http://www.utci.org/cost.php>

Figure 43. Échelle d'intervalles pour l'UTCI (Universal Thermal Climate Index) en termes de stress thermique. Échelle d'intervalles proposée par l'Action COST 730 (droite ; UTCI, 2003). Proposition d'échelle d'intervalles utilisée dans cette étude (gauche).

D'un point de vue méthodologique, l'approche fréquentiel présente l'avantage d'être facile à communiquer aux parties prenantes et au public. En effet, il est plus facile de comprendre que c'est la fréquence qui détermine l'importance d'une situation, c'est-à-dire un phénomène qui survient souvent dans les zones ciblées, plutôt qu'une information basée sur des données moyennes qui ne peuvent pas être vécues. Cette approche permet également de maintenir plus d'hétérogénéité spatiale qu'une approche de moyenne, qui lisse spatialement les données. Cette stratégie, qui s'appuie sur l'approche des TTS et l'identification des zones de persistance, a été essentielle pour communiquer le diagnostic climatique de façon intelligible à nos collaborateurs.

4. Cartes climatiques pour Toulouse

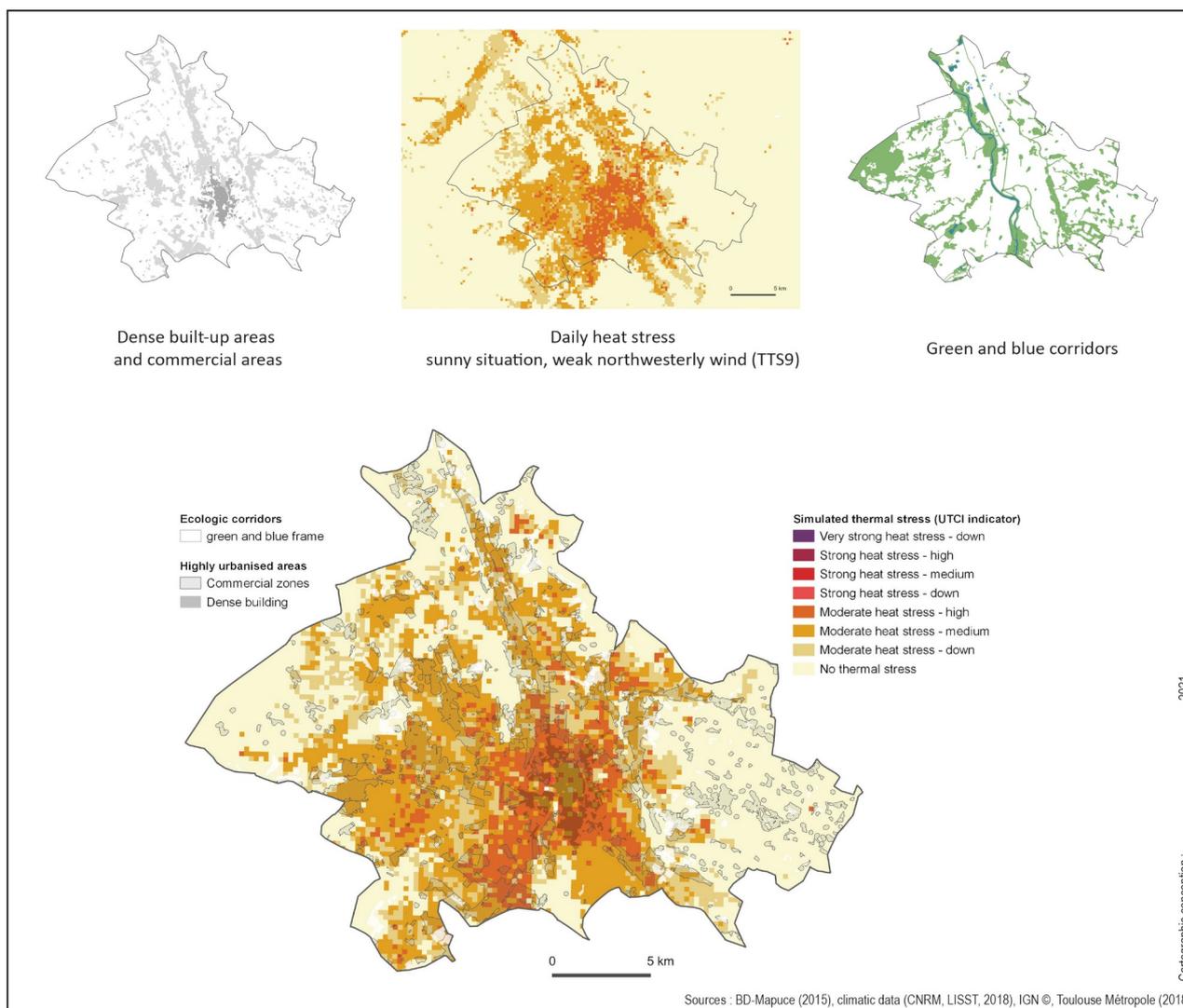
Le premier niveau du diagnostic microclimatique repose sur un jeu de cartes d'analyse thématique qui croise les informations thermiques et aérauliques avec des éléments de la planification (par exemple, trame verte et bleue, zonage) ou des informations socio-démographiques. Un deuxième jeu de cartes a été créé pour identifier les secteurs à enjeux présentant un comportement microclimatique dont il faut tenir compte pour l'aménagement urbain. Dans les publications portant sur les cartes climatiques urbaines, ce deuxième niveau d'information est souvent appelé « cartes de recommandations » mais nous proposons la dénomination « cartes des zones à enjeux » car le format cartographique lui-même n'est pas adapté pour communiquer des recommandations. Les recommandations sont souvent rassemblées dans un guide qui vient compléter le jeu de cartes précédent et qui présente clairement les mesures proposées.

4.1 Cartes d'analyse thématique en journée

4.1.1 Analyse thermique

Lorsque le corps humain est soumis à des conditions météorologiques extrêmes, telles qu'une canicule, il existe un risque d'incidence sur la santé. Suivant des facteurs tels que l'âge, le sexe et la durée de l'exposition, le corps sera plus ou moins en capacité de supporter une situation donnée. Un indicateur de confort thermique est souvent utilisé pour caractériser les niveaux de stress thermique auxquels un corps peut être exposé : modéré, élevé ou très élevé. À chaque gradation correspondent des précautions spécifiques, notamment s'hydrater, éviter les efforts ou rester au frais.

L'indicateur UTCI permet de caractériser l'environnement thermique de Toulouse en journée. Les cartes d'analyse thématique de cet indicateur (*Figure 44 et Annexe 2*) ont permis de confirmer des résultats précédemment observés lors d'une analyse de la température de l'air de la campagne CAPITOUL (Hidalgo et al., 2008a ; Pigeon et al., 2008). En effet, les zones présentant les niveaux d'UTCI les plus élevés en journée ne sont pas situées dans le cœur historique dense mais plutôt dans les quartiers limitrophes appelés faubourgs (Saint-Michel, Saint-Cyprien, Minimes et Bonnefoy, *Figure 38*). Le centre historique médiéval, appelé octogone, connaît un niveau de stress thermique inférieur d'un à deux niveaux par rapport aux faubourgs immédiats. Cet effet d'îlot de fraîcheur relatif est particulièrement remarquable pour le TTS 8. L'analyse des zones commerciales et d'activité est nouvelle par rapport aux études précédentes. Ces zones présentent également un stress thermique élevé en journée. Mais cet effet dépend aussi de la localisation des zones : par exemple, celles situées dans la vallée de la Garonne au nord de la métropole présentent des niveaux de stress thermique particulièrement élevés. Cet effet est particulièrement visible sur la carte TTS 7 (*Annexe 2*).



Cartographic conception : 2021

Figure 44. Carte d'analyse de l'indicateur de stress thermique (UTCI) en journée à partir de simulations numériques pour la situation météorologique type (TTS 9) la plus favorable à la formation d'un îlot de chaleur urbain (ICU) fort en été

Même si l'octogone semble davantage préservé d'un point de vue stress thermique par rapport à d'autres zones, l'analyse des informations climatiques met en lumière la surexposition de la population. Le choix a été fait d'analyser les niveaux d'intensité de l'UTCI et les zones d'emploi privé qui correspondent aux lieux accueillant un large segment de la population en journée (**Figure 45**). Cette approche a permis de cibler les zones d'activité présentant à la fois une forte exposition et une présence humaine. Dans cette perspective, le centre-ville de Toulouse reste une zone stratégique, tout comme les principaux centres d'activité (notamment, Blagnac et Colomiers à l'est où se situent les sites industriels d'Airbus, Basso Cambo au sud-est et Le Palays au sud-ouest) et les zones bordant les principaux axes routiers où se concentrent de nombreux commerces et entreprises, particulièrement sur la Route d'Espagne et la D820 qui longent la vallée de la Garonne respectivement au sud-est et au nord.

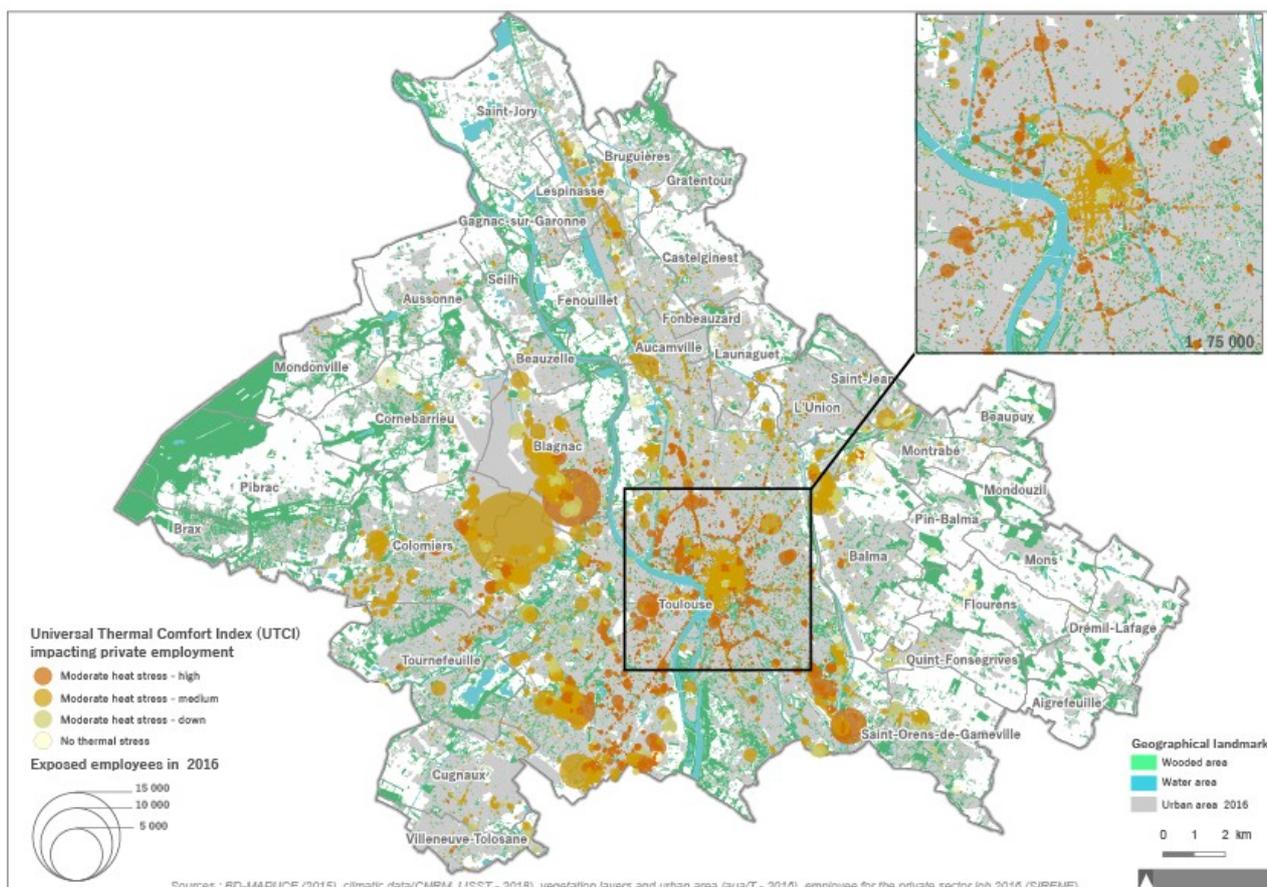


Figure 45. Carte d'exposition aux niveaux de stress thermique diurne des emplois privés

4.1.2 Analyse aéralique

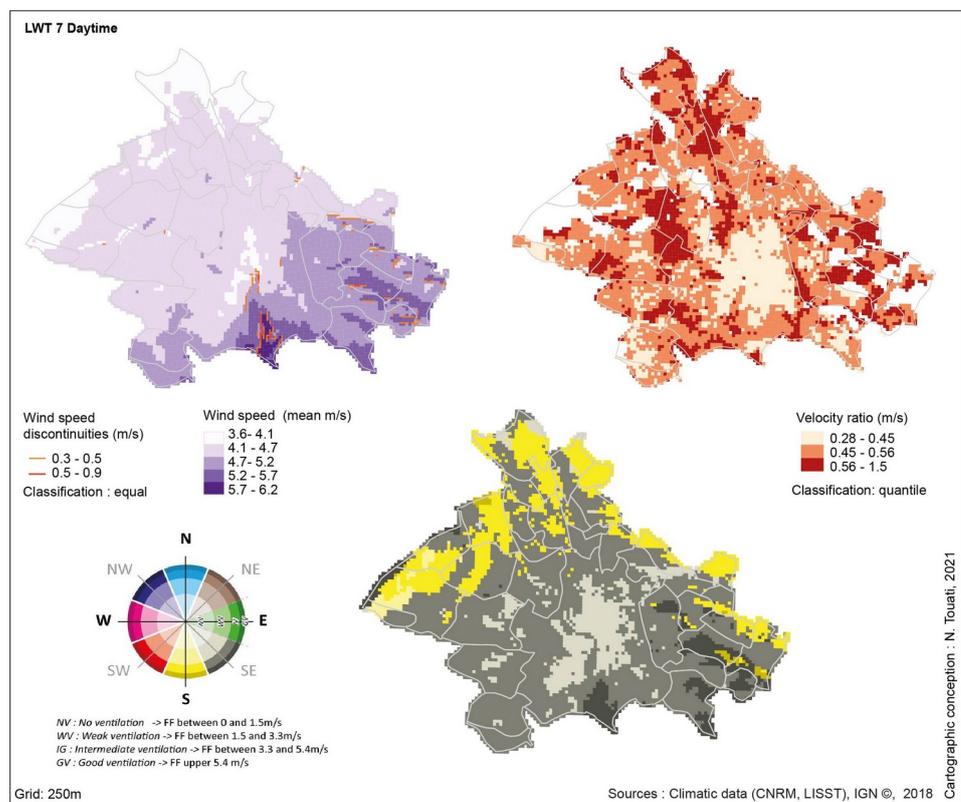
Dans cette région, les vents prédominants proviennent du sud-est et du nord-ouest. La Garonne et sa vallée, avec une orientation très similaire, canalisent le vent en situation de vent fort. À l'inverse, en situation de faible vent, le vent stagne surtout sur le centre-ville (en raison de la rugosité des bâtiments) et en aval dans les zones de la vallée. L'objectif ici est de mieux comprendre la variabilité spatiale du vent en tenant compte de la topographie et de la présence de végétation, de bâtiments ou d'infrastructures. Les trois TTS analysés coïncident en termes de conditions thermiques diurnes mais avec des caractéristiques de vent différentes (Figure 46). Pour chaque panneau de la Figure 9, les discontinuités spatiales de la vitesse moyenne du vent sont présentées à gauche, le ratio de vitesse est présenté dans la partie supérieure droite et l'analyse de la fréquence de la combinaison direction/vitesse du vent est présentée dans la partie inférieure droite.

- Le TTS 7 correspond à une situation avec un vent de sud-est prédominant qui tourne au sud dans la partie nord de la métropole. La carte des discontinuités spatiales superposée à la vitesse moyenne du vent à 10 m indique que la vitesse décroît de 50 % entre l'extérieur et le centre-ville (Figure 9a gauche, niveau de vitesse moyenne du vent entre $3,6 \text{ m s}^{-1}$ et $4,1 \text{ m s}^{-1}$). Il en est de même pour la forêt de Bouconne située à l'ouest et les communes de Saint-Jory et Bruguières au nord. La vitesse moyenne du vent varie entre $6,3 \text{ m s}^{-1}$ à la campagne (Pech David au sud et les côteaux à l'est) et $3,5 \text{ m s}^{-1}$ dans le centre-ville. À l'est, des vents plus forts sont observés sur les crêtes avec des discontinuités spatiales plus prononcées à la limite crête/vallée. L'analyse de la fréquence (Figure 9a, partie inférieure droite) montre une zone de faible vent qui est plus étendue en centre-ville présentant une variabilité spatiale plus forte que celle déterminée par une approche

moyenne et confirme les valeurs inférieures de la vitesse du vent en forêt de Bouconne et dans les communes du nord, Saint-Jory et Bruguères, et dans la partie extérieure de la métropole à l'est. Le ratio de vitesse (Figure 9, partie supérieure droite) montre clairement le centre-ville (octogone et faubourgs) présentant une réduction de 60 % à 80 % du vent entre le premier niveau de canopée (en zones urbaines entre 30 et 40 m de hauteur) et 2 m. Des zones avec un bon potentiel de ventilation sont identifiables à l'ouest du centre-ville dans les communes de Blagnac et Colomiers coïncidant avec la zone industrielle d'Airbus, au sud-est correspondant aux crêtes et au sud-ouest avec la première terrasse de la Garonne.

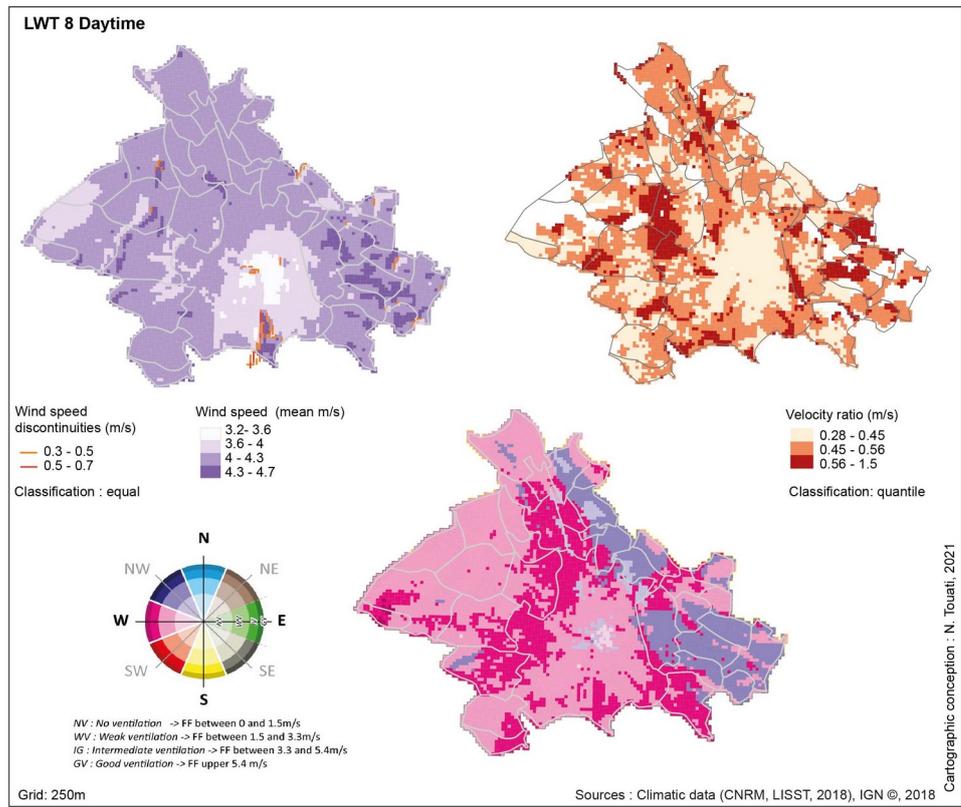
Figure 46. Les cartes d'analyse thématique du vent en journée pour les TTS 7, TTS 8 et TTS 9 : les discontinuités spatiales de la vitesse moyenne du vent (gauche), le ratio de vitesse (partie supérieure droite) et l'analyse de la fréquence de la combinaison direction/vitesse du vent (partie inférieure droite)

(a)

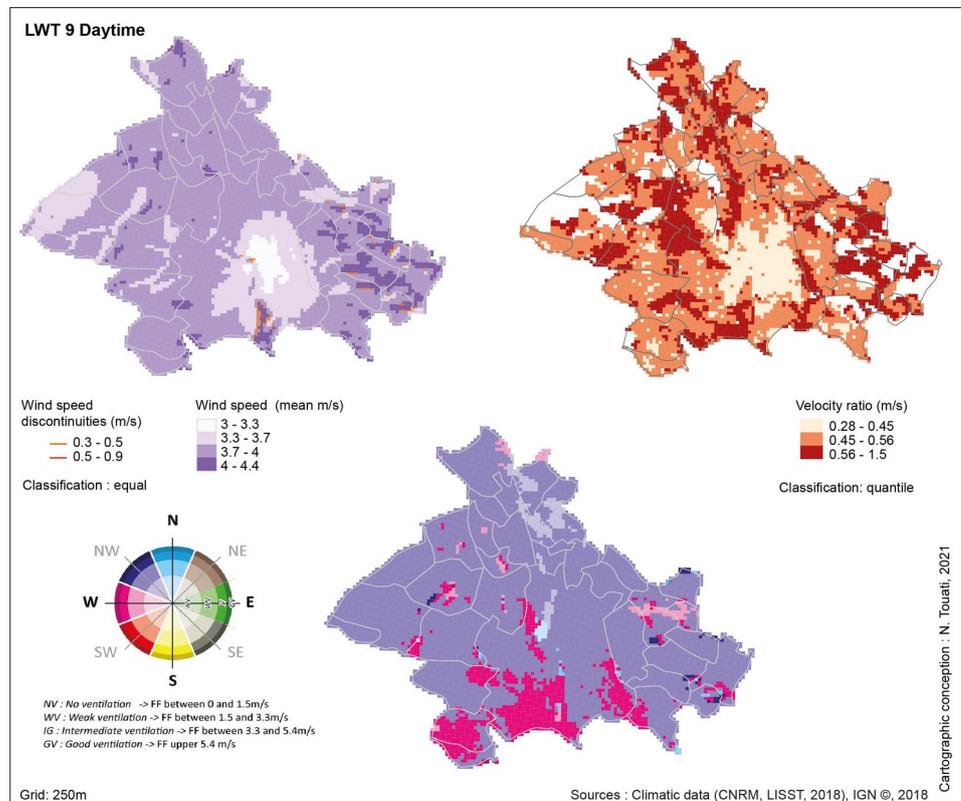


Menut TOME II - Volume de travaux inédits

(b)



(c)



- Les TTS 8 et 9 correspondent à des situations où le vent prédominant est orienté nord-ouest, voire ouest dans certaines zones. Toutefois, le TTS 8 présente généralement des intensités supérieures ($FF_{\max} \sim 4,7 \text{ m s}^{-1}$ et $FF_{\min} \sim 3,2 \text{ m s}^{-1}$) à celles du TTS 9 ($FF_{\max} \sim 4,4 \text{ m s}^{-1}$ et $FF_{\min} \sim 3 \text{ m s}^{-1}$). La zone à faible vent est très concentrique avec deux zones différenciées (en blanc et mauve clair) correspondant à peu près à l'octogone et aux faubourgs. Avec de telles conditions météorologiques, les côteaux situés au sud-est sont en aval du flux prédominant. Les crêtes et vallées continuent à représenter des couloirs de ventilation privilégiés pour le territoire en aval mais l'intensité du vent est amoindrie car le flux traverse d'abord les zones urbanisées. Ceci est particulièrement marqué dans les vallées (en mauve clair sur la carte de la vitesse moyenne du vent).

Actuellement, les données disponibles ne permettent pas d'identifier les brises de pente (air frais et propre qui descend des collines) ou les brises rurales (également appelées brises urbaines), même si des études sur le second phénomène ont déjà établi la possibilité de formation d'une brise diurne avec le TTS 9 (Hidalgo et al., 2008a, 2008b).

La résolution spatiale des données urbaines et climatiques mobilisées ici ne permet pas non plus l'étude de l'impact des éléments d'infrastructure, comme les grandes voies de circulation ou les digues de la Garonne, sur le vent. Même si nous ne sommes pas en mesure de caractériser ces éléments de façon quantitative, nous savons qu'ils peuvent constituer des couloirs de ventilation (la rocade et l'autoroute canalisent principalement l'air chaud et chimiquement pollué aux heures de forte circulation) et qu'ils peuvent bloquer les masses d'air (par exemple, la barrière antibruit de la rocade au pied de Pech David).

4.2 Cartes d'analyse thématique la nuit

4.2.1 Analyse thermique

Dans la situation météorologique la plus favorable à la formation d'un îlot de chaleur urbain (TTS 9), l'impact de l'urbanisation sur la température de l'air nocturne dans le centre-ville de Toulouse dépasse 3 °C pour une bonne partie de cette zone (octogone et faubourgs) (*Figure 47*).

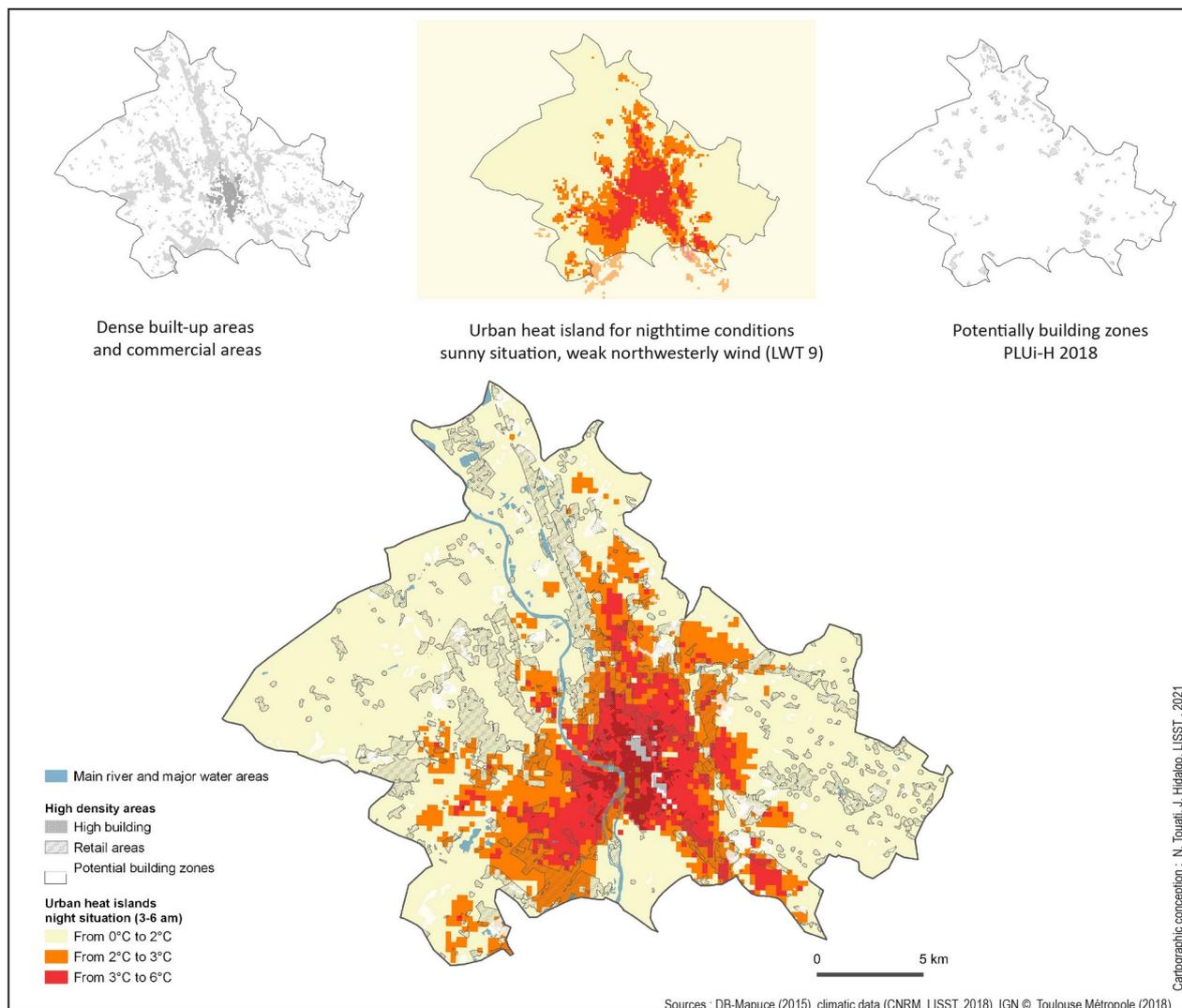


Figure 47. Carte d'analyse de l'indicateur ICU à l'aide de simulations numériques du type de temps sensible le plus favorable à la formation de ce phénomène en été (TTS 9)

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain peut atteindre +6°C dans les zones à l'ouest de l'octogone (entre le boulevard Antoine Carnot et le boulevard de la Gare), principalement en raison de l'advection par le vent prédominant d'air chaud de l'octogone vers l'ouest. Cet effet est plus difficile à comprendre pour le grand public lorsque la carte n'est pas accompagnée de l'explication d'un expert en climatologie. Il a donc été décidé de créer une seule classe d'exposition allant de +3°C jusqu'à l'intensité maximale d'un ICU. L'intensité varie en fonction non seulement de la situation météorologique mais également de la couverture spatiale (*Annexe 3*). Les zones exposées à un ICU nocturne

supérieur à +3°C varient de ~30 km² avec un TTS 9 à ~10 km² et ~0 km² avec respectivement les TTS 8 et 7. L'exposition des communes de première couronne de Toulouse (Launaget, L'Union, Balma et Saint-Orens à l'est et Blagnac, Colomiers, Tournefeuille et Cugnaux à l'ouest) à des niveaux de température élevés est moins importante que dans la commune de Toulouse en termes de couverture spatiale. Cependant, l'impact de l'urbanisation sur la température de l'air n'est pas négligeable dans les zones étendues (en orange sur la Figure 9). Ces sont des zones qui peuvent rapidement basculer vers des niveaux d'exposition élevés. Dans cette étude, nous les appelons les *zones à basculement*, auxquelles une attention particulière doit être portée en matière d'urbanisme, notamment depuis qu'un grand nombre de nouvelles zones ont été ouvertes à l'urbanisation au nord, à l'est et au sud-est de la métropole. La **Figure 48** indique que la densité de population et l'intensité des ICU sont hautement corrélées. Outre les centres-villes des communes de la petite couronne de Toulouse où se concentre la majorité de la population de chaque ville, la zone située à l'intérieur de la rocade est la plus peuplée et la plus exposée au phénomène d'ICU nocturne. Les raisons de cette forte exposition aux ICU dans ces territoires sont multiples : leurs surfaces présentent la plus forte imperméabilisation de la métropole, les formes urbaines sont les plus favorables aux ICU et ce sont les activités ou logements de ces zones qui produisent le plus de chaleur (via notamment la climatisation).

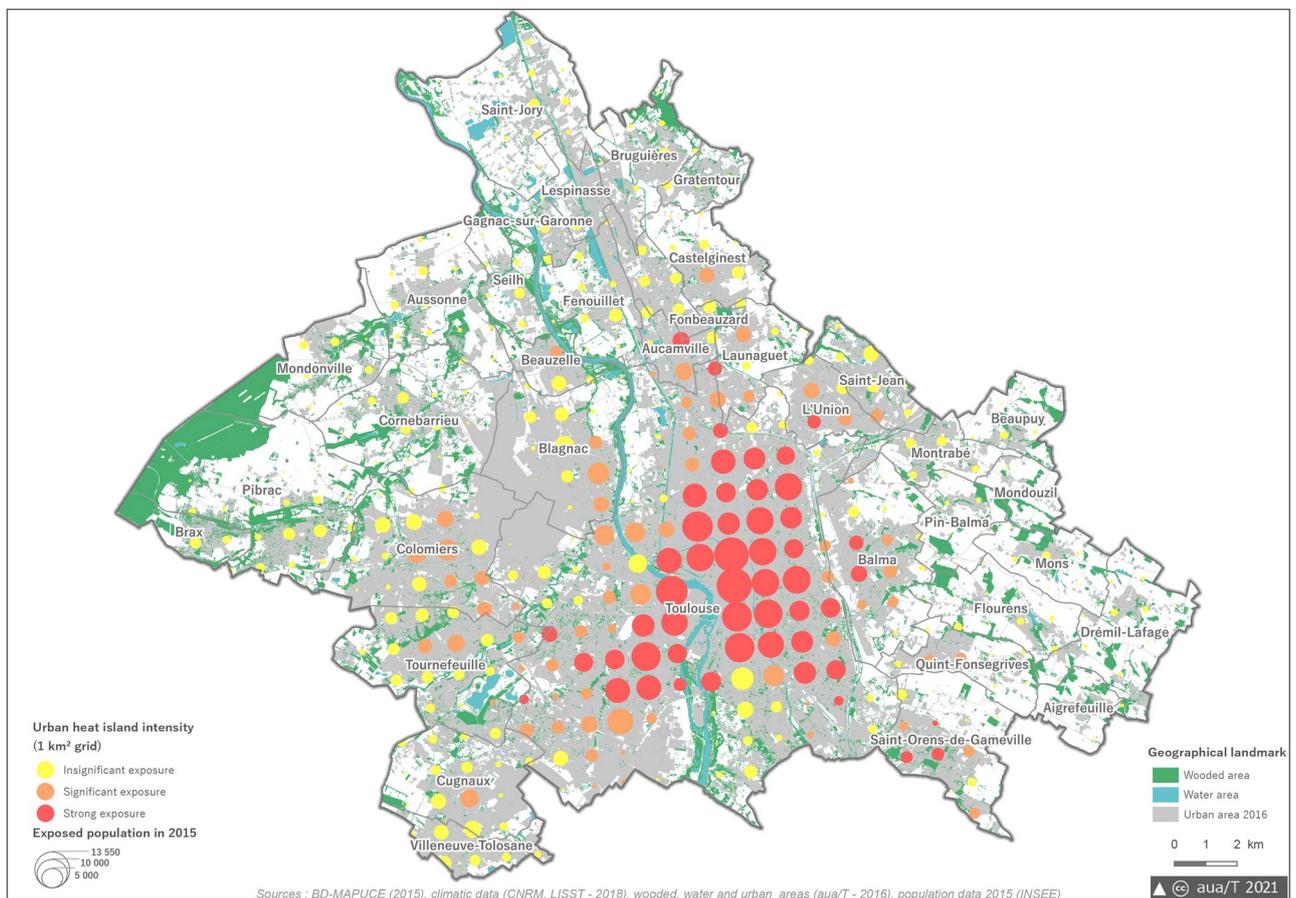


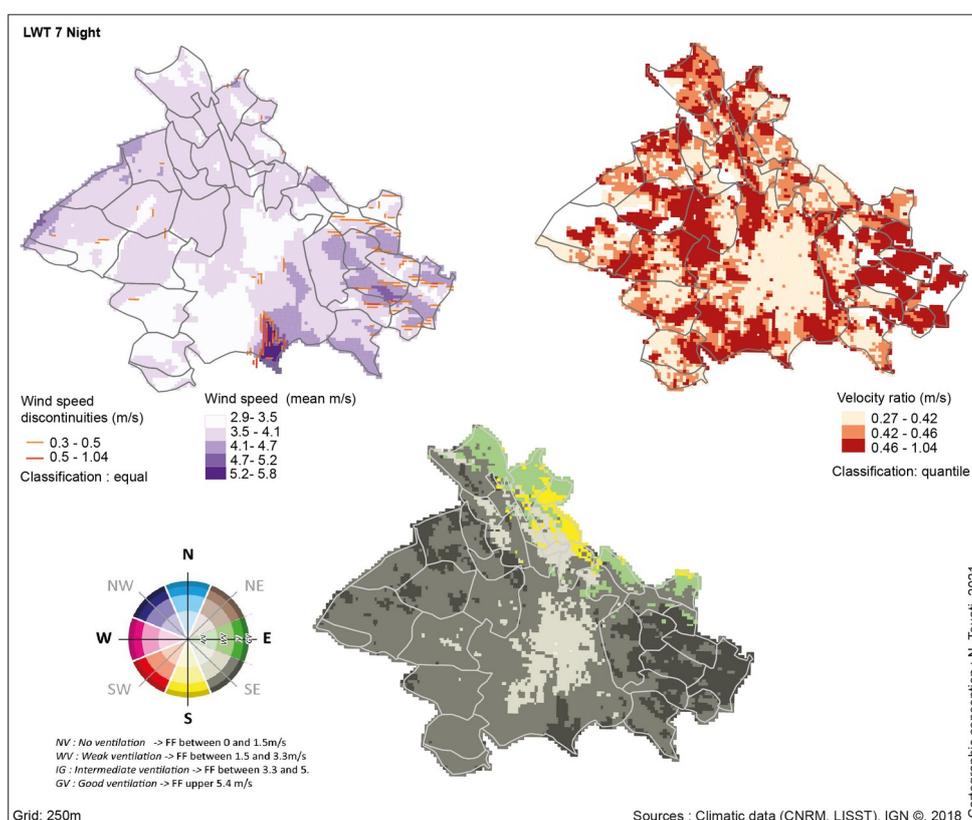
Figure 48. Carte indiquant la densité de population et les niveaux d'exposition aux ICU du TTS 9, qui correspond à un temps d'été ensoleillé avec un vent faible orienté ouest-nord-ouest

Le territoire toulousain comprend également des éléments thermorégulateurs naturels. Les espaces arborés, peu présents en centre-ville, jouent un rôle important dans la régulation thermique à l'échelle micro-locale (quelques dizaines de mètres) grâce aux effets d'ombrage et d'évapotranspiration. De précédentes études (Kwok et al., 2019) ont constaté que la nuit ces zones arborées présentaient un différentiel de -2°C par rapport aux zones bâties alentour. Dans les communes précédemment citées de première couronne, ce différentiel est seulement d'environ $-0,5^{\circ}\text{C}$ malgré la présence plus importante de végétation. Concernant les grandes masses d'eau, la Garonne et les canaux jouent à la fois un rôle de régulateur thermique et de couloirs de ventilation d'air propre. La nuit en été, la température de l'eau peut être proche de celle de l'air et ne contribue donc pas au rafraîchissement. Le rôle de régulateur thermique s'explique davantage par la présence d'arbres et de végétation que par l'évaporation. L'évaporation diminue de façon très localisée la température mais l'humidité élevée de l'air peut augmenter la sensation de stress thermique. La proximité de grandes masses d'eau est, par conséquent, à double tranchant la nuit.

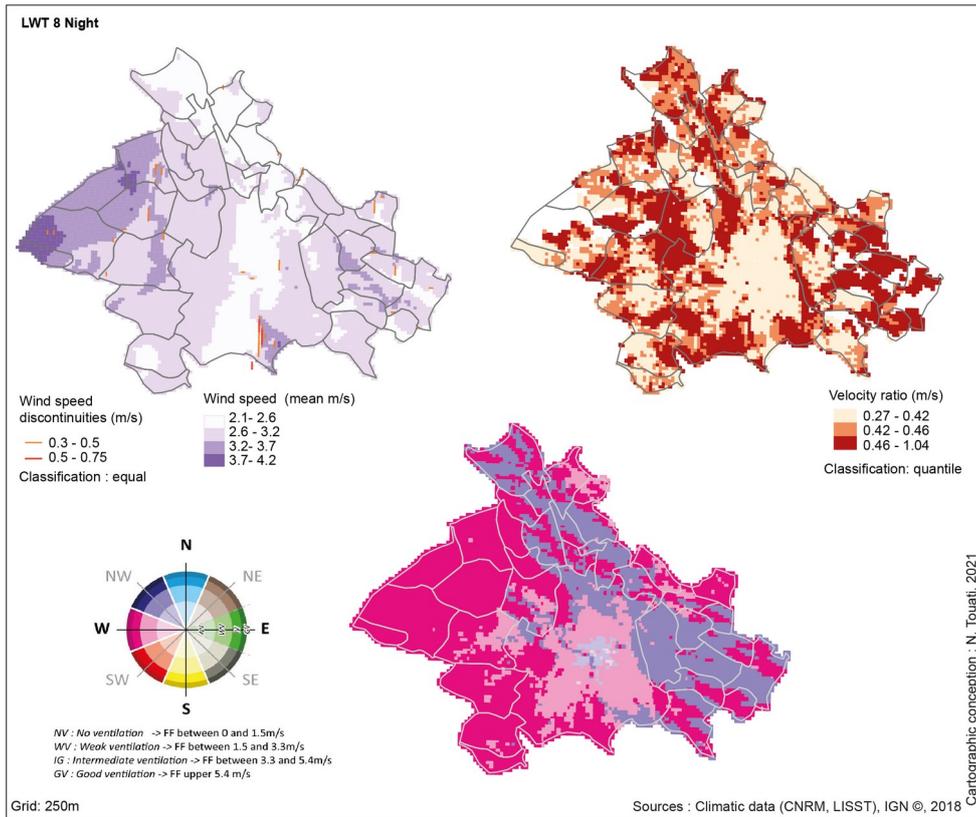
4.2.2 Analyse aéraulique

La **Figure 49** montre que, pour le TTS 7 (**Figure 49a**), la direction du vent s'oriente légèrement à l'est dans la partie nord et, pour le TTS 9 (**Figure 49c**), au nord-ouest dans la partie sud, tandis que pour le TTS 8 (**Figure 49b**), la direction du vent reste stable. En général, l'intensité du vent décroît la nuit par rapport à la journée. Le TTS 9 présente les intensités les plus faibles avec $1,5\text{ m s}^{-1}$ dans les zones les moins exposées du centre-ville et $4,2\text{ m s}^{-1}$ dans les zones rurales les plus ventilées. L'analyse de la fréquence montre que la Garonne reste un couloir de ventilation par rapport au centre-ville (vent entre $3,3\text{ m s}^{-1}$ et $5,4\text{ m s}^{-1}$, même si ces valeurs sont inférieures à celles des zones plus ventilées du nord-ouest et du sud-est. Dans la journée, la zone à faible vent est très concentrique et sa couverture spatiale correspond à l'octogone et aux faubourgs. Pendant la nuit, elle s'étend sur toute la vallée de la Garonne en prenant la forme d'une banane verticale. Le vent est également ralenti à l'ouest sur les communes de Colomiers et Tournefeuille, probablement dû à la rugosité de la surface urbanisée.

(a)



(b)



(c)

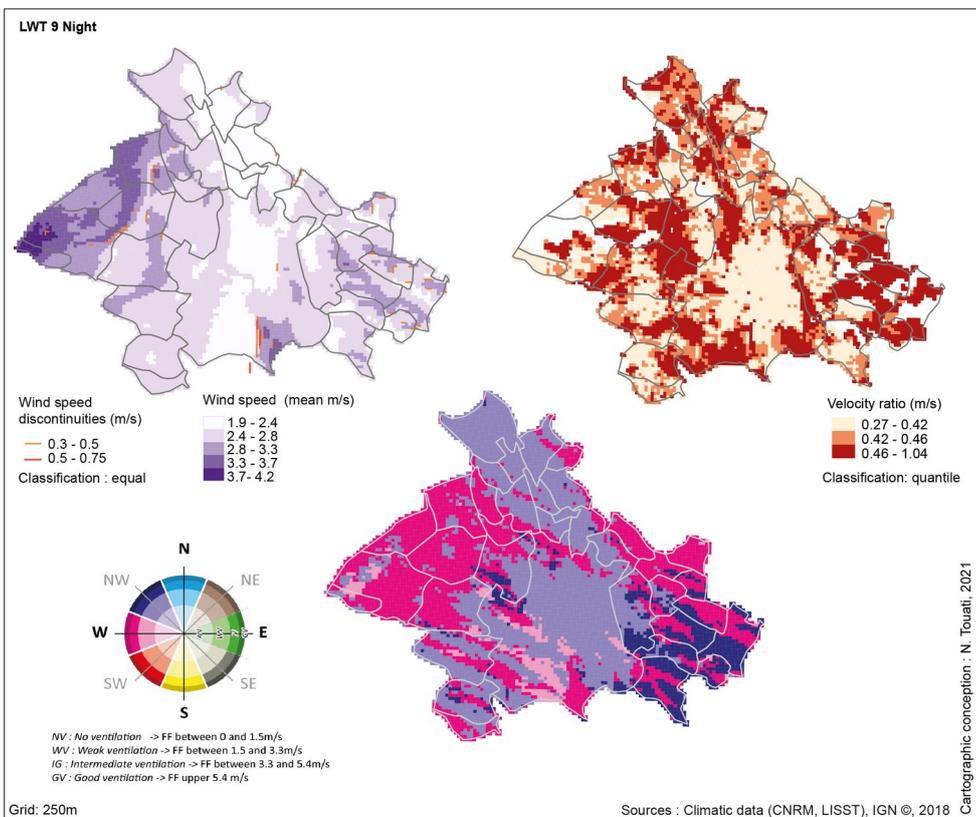
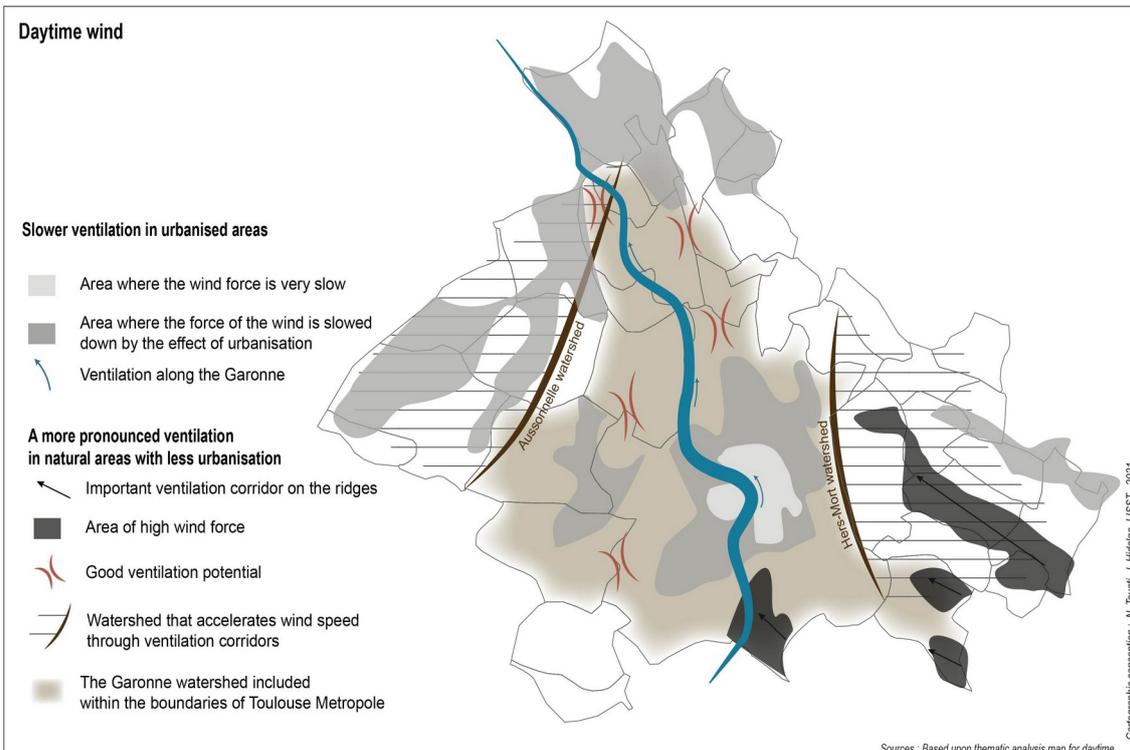
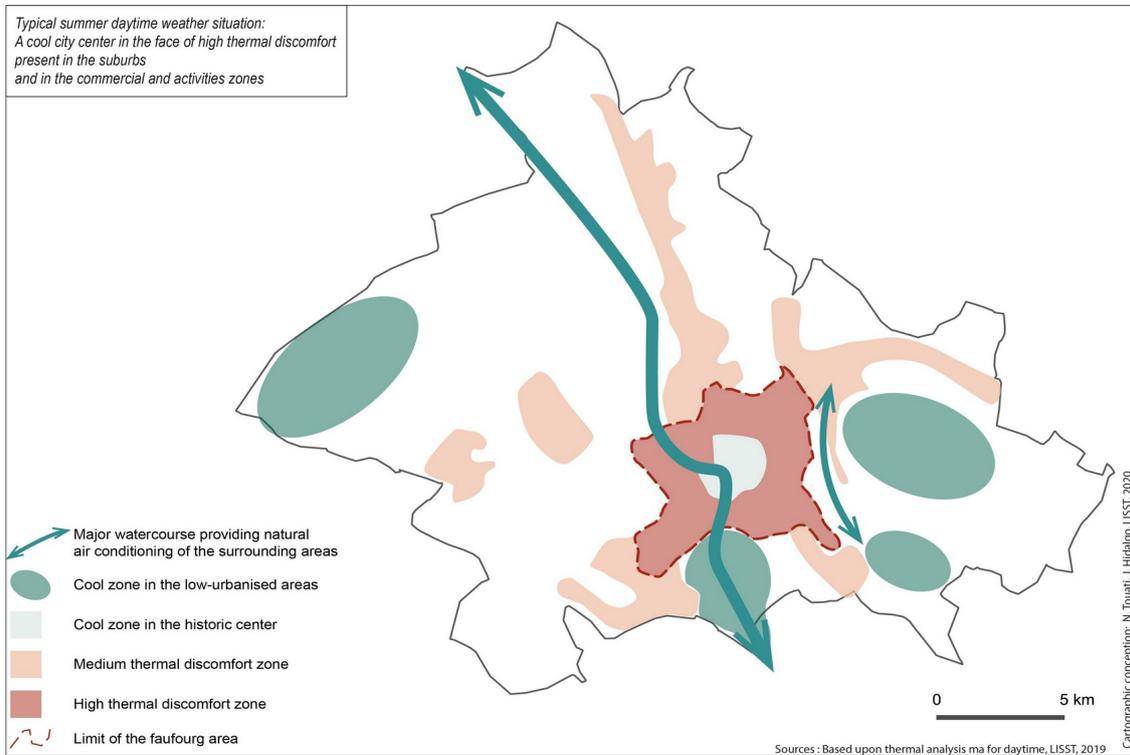


Figure 49. Les cartes d'analyse thématique du vent la nuit pour (a) le TTS 7, (b) le TTS 8 et (c) le TTS 9 représentent les discontinuités spatiales de la vitesse moyenne du vent (gauche), le ratio de vitesse (partie supérieure droite) et l'analyse de la fréquence de la combinaison direction/vitesse du vent (partie inférieure droite)

4.3 Cartes des zones à enjeux

Grâce à cet ensemble de cartes d'analyse thématiques, il est possible de différencier les secteurs à enjeux en fonction de leur comportement microclimatique qui nécessiteront une attention particulière en matière d'urbanisme (Figure 50). Le choix a été fait de les représenter sous forme de croquis comme suit :



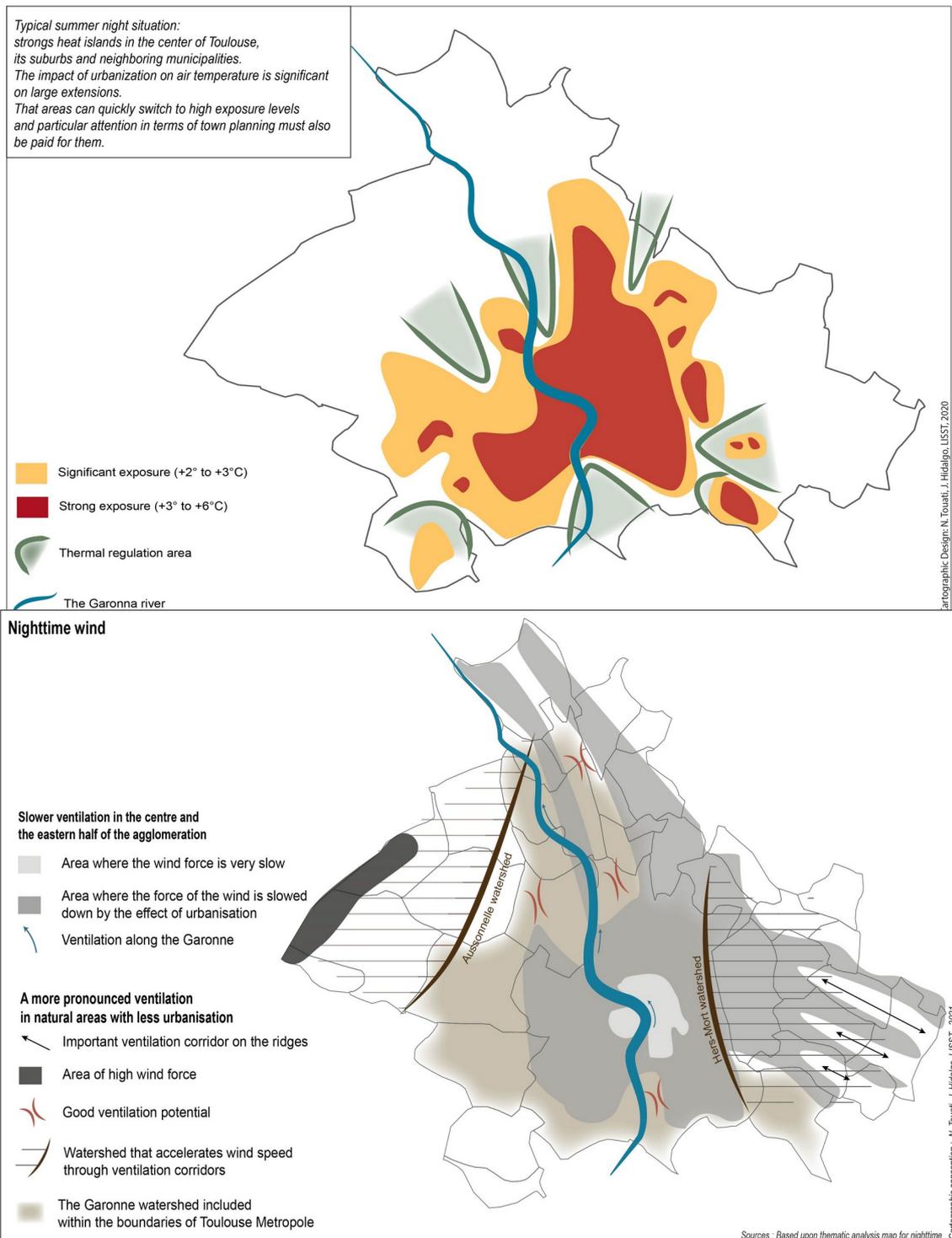


Figure 50. Cartes des zones à enjeux en fonction du niveau de stress thermique diurne et du vent et de l'ICU nocturne et du vent

Le travail en atelier avec les services de Toulouse Métropole a permis d'identifier quatre types de zones à enjeux pour le territoire toulousain :

- **Le centre historique** (octogone) : cette zone centrale se comporte comme un îlot de fraîcheur pendant la journée car ses rues étroites produisent de l'ombrage le matin et empêchent la surchauffe de la rue et des matériaux de façade et au sol en fin d'après-midi. En revanche la nuit, cette configuration empêche un rafraîchissement satisfaisant et favorise un îlot de chaleur nocturne intense. Les places très minéralisées et exposées au soleil (Capitole et Esquirol) font exception en journée, avec des niveaux de stress thermique plus élevés que dans les rues adjacentes plus ombragées. Du point de vue de l'aménagement urbain, il serait intéressant de préserver cet effet d'îlot de fraîcheur naturel le jour, de minimiser le réchauffement des espaces publics qui présentent un fort niveau de stress thermique et de favoriser l'accès à la ventilation naturelle de ces zones centrales.
- **Les faubourgs** : les quartiers du centre-ville appelés faubourgs (Saint-Cyprien, Saint-Michel, Minimes et Bonnefoy) présentent durant la journée les niveaux de stress thermique les plus élevés du centre-ville, en raison d'une configuration des rues plus ouverte qui favorise le réchauffement de la chaussée et des murs exposés. La nuit, ces zones vont connaître un rafraîchissement plus rapide que celui de l'hypercentre. Cependant, leur position centrale au sein d'une agglomération étendue fait que ces faubourgs restent exposés à un fort îlot de chaleur urbain. Du point de vue de l'aménagement urbain, il serait intéressant de favoriser le plus possible le confort du piéton, de minimiser l'apport solaire à l'intérieur des bâtiments afin de garantir un bon confort nocturne, de minimiser le réchauffement des espaces publics présentant un haut niveau de stress thermique et de favoriser la ventilation naturelle des espaces extérieurs.
- **Les centres-villes des communes de première couronne** : contrairement à ce que l'on pourrait penser, les centres-villes de ces communes contribuent également d'une manière importante (au-delà de +3°C) à l'îlot de chaleur urbain de l'agglomération. Nous souhaitons porter une attention particulière aux *zones à basculement* qui entourent ces centres-villes et qui présentent d'ores et déjà un ICU compris entre +2°C et +3°C. Du point de vue de l'aménagement urbain, il serait nécessaire de réduire l'intensité de l'ICU des centres-villes afin de limiter l'extension de ces zones à basculement et de renforcer la trame verte et bleue et les couloirs de ventilation.
- **Les zones commerciales et d'activité** : ces zones présentent des niveaux de stress thermique importants pendant la journée en raison de l'absence d'ombrage, de la forte imperméabilisation du sol et du recours intensif à la climatisation. La nuit, les zones d'activité qui présentent une forte activité anthropique nocturne (production, logistique, etc.) et/ou qui sont situées dans la vallée de la Garonne (notamment celles situées au sud-ouest et au nord du centre-ville) sont fortement exposées à l'ICU. Ici, les objectifs seraient de réduire, d'une part, le recours aux systèmes de climatisation active et, d'autre part, la surface des zones imperméabilisées.

Les espaces régulateurs sont ceux qui permettent de favoriser la préservation du confort climatique à travers l'ombrage, l'évapotranspiration ou la ventilation. À l'échelle du grand territoire, cela correspond à la trame verte et bleue et ses grands parcs (Forêt de Bouconne, Pech David, Île du Ramier, etc.), aux espaces ouverts non urbanisés et aux reliefs de tout type, en particulier les plus prononcés qui sont potentiellement générateurs de phénomènes de brise (côteaux, promontoire de Pech David) ou capables de canaliser le vent prédominant (vallées des affluents de la Garonne, de l'Ariège au sud et de l'Hers au nord-est, et les collines de Montaudran et de Jolimont).

Des cartes et des recommandations spécifiques en matière d'urbanisme ont été regroupées dans un guide de recommandations édité par Toulouse Métropole à destination de ses services et des personnels en charge de la planification et de l'aménagement urbains intitulé « Prise en compte du climat dans la construction de la métropole de demain » (*Figure 51*). Ce guide comprend cinq sections. Dans les deux premières sections, sont présentées plusieurs clés pour une compréhension théorique des problématiques climatiques aux niveaux local et mondial, ainsi qu'un diagnostic microclimatique du territoire. Dans la troisième section, des recommandations détaillées sont organisées par leviers d'actions (par exemple, végétalisation, ombrage, matériaux et surfaces urbains, gestion de l'eau) et suivant les

secteurs géographiques présentés précédemment (centre historique, faubourgs, centres-villes des communes de première couronne de Toulouse, zones commerciales et d'activité et actions à l'échelle de la métropole). Les deux dernières sections présentent les outils de suivi-monitoring permettant d'étudier le climat urbain de Toulouse, notamment le réseau atmosphérique urbain (Dumas et al., 2021), et une liste de quatorze questions en lien avec le microclimat urbain et préalables à tout projet d'aménagement ou de planification urbaine.



Figure 51. Couverture et première de couverture du Guide de recommandations édité par Toulouse Métropole à destination de ses services et des personnels en charge de la planification et de l'aménagement urbains intitulé « Prise en compte du climat dans la construction de la métropole de demain »

5. Discussion sur la sémiologie graphique des cartes climatiques

Les représentations cartographiques dépendent principalement du domaine d'expertise des chercheurs chargés de l'analyse des données et de la production cartographique. En Allemagne, les climatologues urbains travaillent sur ce sujet depuis les années 1970 et ils contribuent activement à la diffusion internationale des méthodologies et des normes. Ainsi, les directives VDI 3787 publiées par l'Association des ingénieurs allemands (VDI) en 1997, puis actualisées en 2015, sont devenues une référence internationale dans le domaine des cartes climatiques de l'environnement urbain. Ces directives ont inspiré un grand nombre de villes et de chercheurs dans le monde entier (Ng and Ren, 2015). Si, pour étudier un exemple européen, nous prenons la carte climatique de Berlin (*Figure 52*), nous pouvons classer les informations en deux grands ensembles : représentations de la morphologie urbaine par typologie (centre-ville, ville et zones commerciales) et représentations de la température et des échanges d'air.

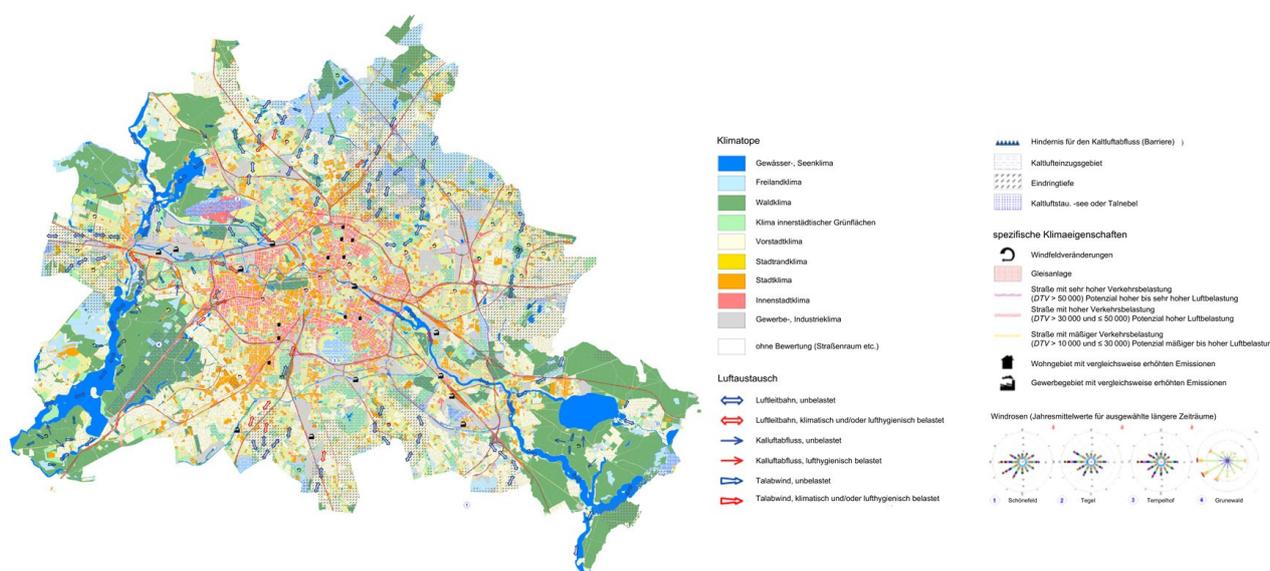


Figure 52. Analyse climatique de Berlin (vue générale, échelle 1/265 000 ; source : Senate Department for Urban Development and the Environment, Environmental Atlas)

Les mêmes couleurs sont utilisées pour mettre en valeur les zones présentant de fortes intensités thermiques et les zones urbaines relativement denses ou très minéralisées. Les couleurs orange/rouge/gris identifient des ICU qui correspondent au centre-ville (rouge), aux autres zones urbaines (orange) et aux zones commerciales et industrielles (gris). La vitesse et la direction du vent sont représentées par des flèches, des pointillés et des roses des vents. Comme de nombreuses cartes issues de la planification urbaine, la couverture et la résolution spatiales de l'information climatique et urbaine sont adaptées à l'échelle de l'exercice en urbanisme. De la région à la ville, l'échelle des cartes varie de 1 / 100 000 à 1 / 5 000. Toute la difficulté est d'ajuster les données aux résolutions et couvertures spatiales adéquates. La représentation graphique très dense et la superposition des variables visuelles pour qualifier les zones à enjeux d'un point de vue microclimatique ne correspondent pas aux normes cartographiques françaises de l'urbanisme opérationnel. Il a donc été décidé de consacrer une partie importante du projet MApUCE à la sémiologie graphique des représentations spatiales du climat urbain.

5.1 Choix de visualisation des cartes climatiques d'analyse thématique de Toulouse

La phase de conception des cartes climatiques s'est tenue après plusieurs sessions de travail avec les climatologues urbains, les géographes urbains et les cartographes des partenaires institutionnels du projet (Service de l'environnement de Toulouse Métropole, Service de régulation urbaine, Agence d'urbanisme et d'aménagement de Toulouse (Aua/T)) et du collectif de recherche GEO-VISU.

L'élaboration de ce type de cartes multithématiques est assez complexe, ce qui est souvent le cas lors du processus de production des cartes qui accompagne les collectivités dans la gestion de leur territoire. Différents travaux (Fairbairn, 2006 ; Jegou, 2012) ont montré que la complexité d'une carte se mesure dans l'articulation de deux formes de complexité. Tout d'abord, le lecteur est confronté à une complexité visuelle et fonctionnelle de la carte. Il en fait une lecture attentive, en observant les formes, les textures et les couleurs. Puis, par l'interprétation des signes et en les comparant à ses connaissances et ses objectifs, le lecteur passera à une complexité intellectuelle et fonctionnelle de la carte. Lors de la visualisation d'une carte thématique, ces deux formes de complexité ne suivent pas une progression linéaire mais sont imbriquées entre elles pour aboutir à une carte dont la fonction principale est de communiquer correctement et facilement l'information. Il est alors important, lorsque les informations à représenter sont denses, d'accompagner le lecteur dans la construction et la perception visuelle qu'il aura de ces informations géographiques ou climatiques.

Pour Toulouse, nous avons proposé une organisation visuelle utilisée par l'agence d'urbanisme qui a fait ses preuves pour une bonne lecture de l'information géographique. La composition des cartes d'analyse de l'UTCI et des ICU (respectivement *Figures 44 et 47*) utilise trois vignettes présentant les données utilisées pour la carte finale. Cela permet de voir plus précisément la forme globale de l'information spatiale, peu lisible avec la superposition de différents types de données. Pour la *Figure 44*, les vignettes montrent trois types de données : la zone de bâti dense, les niveaux de stress thermique diurne et la trame verte et bleue. En dessous, la carte d'assemblage superpose ces trois types de données dont la sémiologie graphique a changé par rapport à leurs représentations en vignette individuelle. La trame verte, généralement visualisée en vert, passe en blanc avec un effet de transparence pour être plus lisible par superposition. Les zones très urbanisées sont découpées en deux classes : les zones commerciales en gris clair et le bâti dense en gris foncé. Les zones urbaines moins denses ne sont pas représentées ici car elles ne constituent pas un enjeu stratégique en termes de surface artificielle. Toutefois, les zones peu construites qui contribuent à la régulation thermique sont visibles dans la représentation de la trame verte et bleue. Enfin, le stress thermique est divisé en trois grandes classes (pas de stress thermique, chaleur modérée et forte chaleur), dont une classe (chaleur modérée) comprend des sous-classes d'intensité (faible, moyenne et élevée).

Trois couleurs proches du même spectre colorimétrique sont utilisées pour le stress thermique : un gradient de beige en l'absence de stress thermique, un gradient de rouge pour une chaleur modérée et un gradient de violet pour une forte chaleur. La carte d'analyse thématique des ICU (*Figure 47*) repose essentiellement sur les mêmes organisation et sémiologie. Les trois vignettes utilisées pour la carte finale sont représentées individuellement : on retrouve les zones de bâti dense et de zones commerciales, les données d'ICU nocturne et les zones potentiellement urbanisables identifiées dans le plan directeur. Un gradient de couleur (rouge à jaune-ocre) indique les intensités d'ICU regroupées en trois classes pour une situation de nuit (de 3h à 6h du matin) : de 0 à 2°C (jaune-ocre), de 2 à 3°C (orange) et de 3 à 6°C (rouge). Le jaune vif n'a pas été utilisé car cette couleur prend le dessus au niveau de notre perception colorimétrique.

L'originalité des cartes climatiques de la métropole toulousaine porte sur la réutilisation d'une organisation en vignettes, un mode de représentation assez fréquent dans les plans d'urbanisme. Ces cartes amènent progressivement le lecteur à comprendre la carte d'assemblage qui regroupe toutes les données nécessaires à sa réalisation. Ces vignettes ont alors un impact visuel plus fort qu'une légende complexe. La carte d'assemblage ne reprend pas toujours les couleurs des vignettes mais le lecteur associe rapidement les formes vues sur les cartes précédentes et les informations qu'elles renvoient.

5.3 Choix de visualisation des cartes des zones à enjeux

Les cartes proposées (*Figure 50*) sont à l'interface entre la carte, représentation descriptive de l'information géographique, et le croquis, représentation explicative et pédagogique de l'information géographique. L'objectif de ce type de représentation est de présenter une carte offrant une synthèse spatiale efficace des zones d'intérêt afin de montrer l'importance des phénomènes de stress thermique, d'îlot de chaleur urbain ou de vent.

Pour l'ICU, la représentation s'articule autour de deux informations : les niveaux d'exposition à l'îlot de chaleur urbain en degré Celsius et les zones de régulation thermique (relief, végétation et effet de la Garonne). Cette carte s'accompagne d'un encart explicatif qui complète l'information graphique.

Quant à la carte du stress thermique, elle reprend quatre informations importantes de la carte thématique : l'effet de la Garonne et de l'Hers-Mort qui assure une climatisation naturelle des espaces environnants, les zones de fraîcheur dans les espaces peu urbanisés (forêt de Bouconne, Pech David, etc), les zones d'inconfort et de fraîcheur dans l'espace urbain dont l'étendue de la zone de fort inconfort correspond à la limite de la zone des faubourgs.

Ce type de représentation repose sur l'expertise du chercheur et fait suite, dans ce sens, au contenu des cartes d'analyse thématique tout en intégrant les entités urbaines locales comme l'octogone, les faubourgs ou les centres des villes de première couronne. Par souci d'efficacité et d'accompagnement à la mise en place d'un guide de recommandations, elle ne peut être présentée seule. Sa construction s'appuie sur trois éléments importants : la taille de la composition doit être suffisamment grande pour montrer les zones à enjeux ; la légende, qui est l'élément le plus important de la composition, accompagne le lecteur dans une organisation claire des éléments majeurs à retenir ; enfin, les figures qui doivent respecter les règles de la sémiologie graphique (Bertin, 1963).

6. Conclusion

Grâce à la disponibilité des données climatiques et les expérimentations de pays comme l'Allemagne ou le Japon, nous sommes en mesure de proposer un protocole méthodologique pour la production de cartes climatiques testées à et pour Toulouse, ainsi qu'une réflexion sur la sémiologie graphique adoptée à cette occasion. Ces cartes représentent à la fois un outil de diagnostic microclimatique du territoire urbain (une carte d'analyse) et une méthodologie potentielle de traduction réglementaire des enjeux identifiés (une carte de zones à enjeux) pouvant pallier l'absence ou l'insuffisance des approches quantitatives et/ou spatialisées du microclimat urbain dans les exercices de planification et d'aménagement urbains des villes françaises. Il est néanmoins légitime de questionner les conditions et limites de la répliquabilité de ce protocole dans d'autres villes françaises.

Les enquêtes menées avec le réseau des agences d'urbanisme de la FNAU⁸⁰ en 2015 dans le cadre du projet MApUCE, puis en 2020 dans le cadre du projet PAENDORA, révèlent que l'intégration des problématiques climatiques et énergétiques dans l'urbanisme reste épineuse pour la plupart des professionnels de l'aménagement urbain. Malgré la disponibilité au niveau national de données urbaines, climatiques et énergétiques à la fois plus génériques et précises (résultant d'un accès récemment rendu plus simple grâce aux données ouvertes (*open data*)), ces professionnels rencontrent toujours des difficultés pour traiter et intégrer ces données dans les projets qu'ils dirigent ou auxquels ils participent. Les principaux griefs portent sur le manque de données immédiatement exploitables et l'absence d'outils simples et de méthodes accessibles, qui se traduisent concrètement par des problèmes tels que la rareté des données géoréférencées, l'inadéquation de la résolution, l'hétérogénéité des données, les restrictions d'accès et les mises à jour irrégulières. L'absence ou l'insuffisance de compétences en interne combinée à un manque de formation sur les outils disponibles (notamment la base de données urbaine MApUCE dont la visibilité reste limitée) rend difficile l'intégration d'études et méthodes scientifiques qui ne sont pas encore suffisamment connues et encore moins systématisées.

⁸⁰ La Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme (FNAU) est une association qui anime et joue un rôle de moteur au sein d'un réseau d'une cinquantaine d'agences en France.

Dans les enquêtes susmentionnées, le manque d'accès aux données et l'insuffisance des compétences pour les exploiter ont d'abord été pointés du doigt par les grandes agences d'urbanisme opérant dans des territoires complexes, agences qui néanmoins possèdent des compétences techniques solides pour aborder les problématiques territoriales et urbaines survenant dans leurs exercices quotidiens. L'accroissement des compétences thématiques, notamment celles liées au climat, est clairement l'une des principales demandes des organisations qui souhaitent optimiser leurs ressources techniques et leur autonomie dans le traitement de l'information. Il constitue également une réponse au besoin de comprendre, de façon globale et partagée, les territoires dont les grands périmètres permettent difficilement d'obtenir une information détaillée et cohérente.

Dans les agences d'urbanisme plus petites, moins dotées en compétences techniques spécialisées et/ou opérant dans des zones plus limitées, il s'agit plutôt d'une question d'expertise au bon moment et à la bonne échelle si l'objectif est d'intégrer les problématiques climatiques, les caractéristiques et le fonctionnement du microclimat urbain et leur traduction, même qualitativement, en procédures d'urbanisme et l'identification des leviers d'actions adéquats.

L'une des principales contributions du projet MApUCE porte sur la production et la fourniture de données urbaines et climatiques à l'échelle du quartier pour au moins 50 villes françaises, notamment via le portail MApUCE Orbisgis créé spécialement en *open source* dans le cadre du projet de recherche. Cependant, malgré la diffusion de l'information au sein du réseau professionnel des agences d'urbanisme, une enquête menée en 2020 a mis en lumière la faible visibilité et, par conséquent, l'utilisation limitée de ces ressources innovantes. Ainsi, les acteurs de l'urbain ne cherchent pas systématiquement à consulter et s'approprier des données qui correspondent pourtant à leurs besoins.

Cette observation soulève deux interrogations sur le transfert de connaissances. La première concerne l'accès, la collecte et l'intégration des données dans les bases de données des utilisateurs et, en particulier, des collectivités, pour faciliter l'implémentation de ces données dans les exercices locaux. La seconde porte davantage sur l'analyse de ces données et leur utilisation dans l'élaboration d'un discours sur la problématique climatique et les leviers d'actions à mettre en place. Cette seconde interrogation questionne directement la possibilité de mobiliser une expertise locale adéquate et sa place dans la procédure d'urbanisme.

Les territoires conscients de l'impact des risques climatiques n'ont pas tous la possibilité de collaborer avec des chercheurs climatologues ni accès au même niveau d'expertise climatique en interne, même si la tendance est clairement à un accroissement des compétences climatiques des acteurs urbains. L'expérimentation menée à Toulouse est unique en ce sens qu'elle repose sur un partenariat pérenne de plusieurs années entre la collectivité et une équipe de chercheurs pluridisciplinaire. Même si ces conditions ne sont pas systématiquement reproductibles, les groupes de recherche actuels ou futurs pourraient intégrer les résultats de cette étude et proposer une expertise similaire dans le cadre de leur relation avec les collectivités locales.

Toutefois, ce ne sera peut-être pas suffisant. Le processus de co-construction souligne l'importance d'un interlocuteur, un « lien » entre les chercheurs et les équipes techniques, qui peut alimenter le sujet en permanence, au sein de la collectivité ou d'une structure partenaire (ici une agence d'urbanisme). Cela supposerait de créer de nouveaux profils professionnels ou d'étendre les missions et compétences actuelles des professionnels du climat dans les (grandes) collectivités territoriales ou les agences d'urbanisme. La puissance de diffusion de ces dernières, combinée à leur expertise technique avancée et reconnue, leur capacité d'agir de leur propre initiative et leur indépendance vis-à-vis des décisionnaires politiques constituent de véritables atouts de ce point de vue.

Synthèse de la PARTIE III

L'intention de cette partie

Cette dernière partie a présenté les travaux que j'ai pu mener en lien avec la dimension cartographique et la représentation spatiale de données climatiques. Dans ce travail la carte est considérée à la fois comme outil de transfert mais aussi de médiation. La carte climatique n'est donc pas une fin en soi mais est traitée ici comme un processus permettant l'établissement du dialogue nécessaire pour comprendre les besoins des collectivités en termes d'information climatique et pour co-construire un diagnostic territorial partagé par les chercheurs et les praticiens.

Les moyens mis en oeuvre

Le contenu de la Partie III correspond à une série de travaux de recherche autour de la visualisation et la cartographie climatique sur les sites de Toulouse et Tunis. Pour leur réalisation, plusieurs collaborations ont été nécessaires, notamment avec Najla Touati et Laurent Jegou du LISST, une équipe de référence des cartes climatiques de Hong-Kong⁸¹ et un réseau de géomaticiens et cartographes français appelé Geo-Visu⁸².

Les articles présentant ces travaux sont en cours de publication dans un numéro thématique que j'ai promu en collaboration avec le Pr. Lutz Katzchner de l'Université de Kassel (Allemagne) pour la revue *Cybergeo*. Ce numéro est intitulé « *Applied urban climate research for territorial planning purposes* », inclut treize articles produits par des équipes de recherche provenant d'Allemagne, Brésil, Cambodge, Canada, Chili, Colombie, France, Hong-Kong, Singapour et Tunis.

Les ressources liées à mon travail direct pour cette Partie III sont les suivantes :

- ✓ **2021a** Melis S. Translation of Urban Climate Information Using Chorematic Representation: Case of French Cities. Master Erasmus Mundi MURCS short paper.
 - ✓ **2021b** Melis S. Translation of Urban Climate Information Using Chorematic Representation: Case of French Cities. Master Erasmus Mundi MURCS manuscript.
 - ✓ **202X Hidalgo J.**, Najla Touati, Sinda Haouès-Jouve, Laurent Jegou, Genevieve Bretagne, Erwan Bocher, Valéry Masson, Arnaud Mayis, Renaud Jouglu, Gwendall Petit, Robert Schoetter, collectif GEO-VISU. Mapping the urban climate for summer comfort management in urban planning: climate analysis and semiology of graphics. *Cybergeo*, Open Edition, submitted
 - ✓ **202X Jégou, L.**, Najla Touati, Julia **Hidalgo**. Proposals for the use of graphical models in urban climatic maps. *Cybergeo*, Open Edition, submitted
 - ✓ **202X Mhedhbi Z.**, Julia **Hidalgo**, Cécile Demunck, Sinda Haouès-Jouve, Najla Touati, Valéry Masson.
-

⁸¹ <http://www.arch.cuhk.edu.hk/person/ng-yan-yung-edward/>

⁸² Laurent Jegou et Najla Touati (LISST, Toulouse), Françoise Bahoken (IFSTTAR AME, Nantes, France), Anne-Christine Bronner (SAGE, Université de Strassbourg), Gregoire Lecampion, Julie Pierson et Olivier Pissoat (PASSAGES, CNRS/Université de Bordeaux, Bordeaux, France)

Tool adjustments to support climate adaptation in urban planning for southern cities: The case of Greater Tunis, Tunisia Cyberge, Open Edition, submitted

- ✓ **202X** Shi Yin, Chao Ren, Xuyi Zhang, Julia **Hidalgo**, Robert Schoetter, Yu Ting Kwok, Kevin Ka-Lun Lau. Potential of Synthetizing Climatopes and Local Climate Zones for Urban Climatic Planning Recommendations: A Case Study in Toulouse, France. Cyberge, Open Edition, submitted
-

Les messages clés

- **La cartographie à visée opérationnelle est un champ mature pour un certain nombre d'enjeux environnementaux mais c'est un champ de recherche émergent pour les enjeux climatiques.** Il existe en effet un standard de 2017 pour le Plan Local d'Urbanisme qui va fixer le modèle conceptuel, le catalogue de données recommandées et la description des types énumérés pour un certain nombre de thèmes environnementaux. Dans le cadre de la production de la cartographie climatique, rien n'existe pour le moment.
 - **Dans le cadre des projets ANR-MApUCE (2014-2019) et ADEME-PAENDORA (2017-2019), nous avons testé différentes approches cartographiques.** Tout d'abord un approche « par la surface » qui consiste à caractériser la surface urbaine du point de vue microclimatique (inspirée des approches allemand et asiatique) en base à des climatopes⁸³ qui a permis la proposition de recommandation génériques. Ensuite, à travers un approche « par l'atmosphère » qui tire parti des compétences fortes que nous avons en France en modélisation microclimatique, et qui permet e territorialiser les recommandations à partir de l'identification des zones à enjeux en croissant données atmosphériques d'une part et expertise urbanistique de l'autre. Pour finir, nous avons exploré le potentiel des modèles graphiques en base à un langage chorématique pour monter en généralité du point de vue territorial. Les modèles graphiques sont capables d'exprimer, de manière synthétique et spatiale, les principaux enjeux microclimatiques et peuvent offrir une base de discussion entre chercheurs et acteurs de l'urbanisme équivalente à celle produite à partir d'une modélisation physique.
 - Plusieurs points peuvent être mis en avant quand on s'interroge sur les conditions et limites de la répliquabilité des protocoles cartographiques mis en place lors des projets MApUCE et PAENDORA sur d'autres villes françaises :
 - Les deux enquêtes effectuées auprès des agences d'urbanisme ont montré que l'absence ou l'insuffisance de compétences en interne combinée à un manque de formation sur les outils disponibles (notamment la base de données urbaine MApUCE dont la visibilité reste limitée), rend difficile l'intégration de ces études et méthodes scientifiques qui ne sont pas encore suffisamment connues et encore moins systématisées du point de vue opérationnel.
 - Le processus de co-construction mis en œuvre à Toulouse souligne l'importance d'un interlocuteur, un « lien » entre les chercheurs et les équipes techniques, qui peut alimenter le sujet en permanence, au sein de la collectivité ou d'une structure partenaire (ici une agence d'urbanisme). Il est également nécessaire de créer de nouveaux profils professionnels ou d'étendre les missions et compétences actuelles des professionnels du climat dans les (grandes) collectivités territoriales ou les agences d'urbanisme.
-

⁸³ Les climatopes sont des zones présentant des caractéristiques microclimatiques similaires. Ils diffèrent notamment par leur courbe de température journalière, la rugosité verticale (perturbations du champ de vent), la position et l'exposition topographiques et par le type d'occupation du sol.

Discussion finale

Les recherches présentées dans ce TOME II, s'inscrivent dans la thématique générale de l'adaptation des villes à la hausse des températures. Nous l'avons vu en introduction, sous nos latitudes, le changement climatique entraîne une hausse généralisée des températures et une intensification des épisodes caniculaires. Le dernier rapport du GIEC publié cet été vient confirmer une fois de plus ce fait déjà observé dans les séries d'observations climatiques (IPCC, 2021). L'îlot de chaleur urbain créé par l'artificialisation du sol et les activités anthropiques, vient exacerber localement les risques de températures extrêmes qui créent des impacts très divers. Trois de ces impacts retiennent grande attention actuellement et sont interconnectés : les impacts sur la santé publique, les impacts sur l'attractivité des territoires et les impacts sur la surconsommation énergétique.

La communauté de recherche internationale a abordé cette problématique depuis plusieurs décennies. La production de connaissances s'est faite sous l'impulsion de grands réseaux internationaux tels que l'Organisation météorologique mondiale (OMM), la Confédération internationale du bâtiment (CIB), la Fédération internationale du logement et de l'aménagement (IFHP), la Société internationale de biométéorologie (ISB), l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et, plus récemment, l'Association internationale du climat urbain (IAUC). Cette dernière anime et met en relation la communauté de recherche internationale à travers sa conférence tri-annuelle, son site web et sa Lettre électronique trimestrielle.

La recherche en climatologie urbaine a fait d'importants progrès dans la mise en relation entre les propriétés de la surface urbaine et les changements dans l'atmosphère sus-jacente. Des protocoles de mesure et d'observation spécifiques aux milieux urbanisés ont été développés et standardisés (WMO, 2018). D'importantes avancées ont été effectuées dans le domaine de la modélisation numérique à toutes les échelles spatiales (de l'agglomération à la rue en passant par le quartier, Masson et al, 2020b). Pour des besoins de compréhension des phénomènes et de modélisation, d'importantes avancées ont été produites dans la description des surfaces urbanisées (Masson et al. 2020a). Ces trois domaines de recherche sont toujours très actifs et de nouveaux verrous scientifiques sont explorés. Pour ne citer que quelques-uns : comment tirer profit des mesures atmosphériques légères connectées⁸⁴ ? Comment mieux représenter le cycle de l'eau ou les comportements humains dans nos modèles ? Comment associer forme urbaine et matérialité pour les bases de données urbaines ? La recherche appliquée en climatologie urbaine attire également de plus en plus l'attention. L'articulation entre la production de savoirs climatiques et besoins opérationnels en urbanisme reste à ce jour un défi de taille pour les chercheurs et les acteurs opérationnels de toutes les villes.

La communauté de recherche en climatologie urbaine en France a activement participé à cette avancée des connaissances depuis une trentaine d'années. Comme montré dans la Partie II de ce mémoire, plusieurs pôles de recherche sont présents entre Dijon et Besançon, à Grenoble, à La Rochelle, à Lyon, à Nancy, à Nantes, à Paris, à Rennes, à Strasbourg et à Toulouse. Ces équipes ont pu investir une riche diversité de sujets de recherche et développer des outils de modélisation pointus qui ont permis d'étudier les caractéristiques microclimatiques sur ces villes. Ainsi l'îlot de chaleur urbain, l'effet des brises, l'évolution climatique locale en lien avec l'évolution climatique à plus grande échelle, sont des sujets qui ont été étudiés à partir de grandes campagnes de mesures et/ou d'exercices de modélisation souvent interdisciplinaires.

⁸⁴ Des moyens embarqués sur des voitures ou provenant de la gestion de la température sur les bâtiments par exemple

La montée en puissance de la prise de conscience du changement climatique anthropique dans l'opinion publique et politique, notamment au cours de la dernière décennie, a joué un rôle majeur en plaçant les questions climatiques à l'échelle urbaine dans l'agenda local, national et international.

Ceci a été traduit de plusieurs manières :

- L'apparition de rapports dédiés. Par exemple les deux rapports intitulés « Cities and Climate Change » publiés en 2011 par les Nations Unies et le *Urban Climate Change Research Network* (UN 2011 ; UCCRN 2011). Ces rapports avaient pour objectif de mettre en avant le rôle que les villes devraient jouer dans les années à venir pour atténuer le changement climatique et s'y adapter.
- L'émergence des réseaux de villes engagées dans la lutte contre le changement climatique aux niveaux international et national. Des réseaux tels que le C40 fondé en 2010 et qui comprend désormais une centaine de villes, d'ICLEI (*Local Governments for Sustainability*) et le *Global Cool Cities Alliance* ont vu le jour.
- L'évolution forte du cadre réglementaire. Atténuation⁸⁵ comme adaptation⁸⁶ deviennent des objectifs explicites des plans locaux d'urbanisme dans bon nombre de pays occidentaux. En outre se multiplient des outils dédiés de type « Plan Climat » qui établissent un diagnostic et des actions au travers des volets atténuation et adaptation au changement climatique. À ces outils spécifiques s'ajoute une myriade de chartes et plans à caractère environnemental qui servent de référence même s'ils ne sont qu'incitatifs.

Le cadre réglementaire en France suit cette évolution et met en place une territorialisation progressive des politiques climatiques et énergétiques. Depuis une vingtaine d'années, l'évolution réglementaire a permis la création d'un contexte favorable à la prise en compte des enjeux climatiques et énergétiques à l'échelle locale. Partant d'objectifs globaux, des actions se sont implantées à des échelles de plus en plus locales et ont eu de fortes implications sur le développement régional et l'urbanisme. De la Mission interministérielle de l'effet de serre⁸⁷ qui avait élaboré en 2000 le premier Programme national de lutte contre le changement climatique (PNLCC) à nos jours, une succession de Plans et de lois ont permis de structurer les politiques énergétiques et climatiques à l'échelle locale.

Ainsi, suite aux évolutions législatives récentes, l'intégration des enjeux climatiques et énergétiques s'impose directement dans les outils de planification spatiale des collectivités territoriales (le Schéma de Cohérence Territoriale, SCOT, et le Plan Local d'Urbanisme, PLU) ou à travers des liens de compatibilité avec des outils dédiés comme le Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET).

Dans ces documents, lors de l'Évaluation environnementale, les volets atténuation et adaptation n'ont pas le même cadrage méthodologique. Des bilans carbone sont par exemple requis par secteur d'activité afin d'identifier les actions de réduction des émissions de Gaz à effet de Serre tandis que rien n'est imposé concernant le volet adaptation.

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 2 de la Partie II, sur l'enjeu d'adaptation au risque de températures extrêmes en milieu urbain, cela semble cohérent avec le rythme de développement des méthodes de production de connaissances spatiales à ces échelles fines. Le processus d'intégration des enjeux de confort d'été dans la planification et l'aménagement urbains a plutôt consisté, ces dernières années, dans l'appropriation par les acteurs d'une série de documents institutionnels publiés par l'ADEME, Météo-France, les agences d'urbanisme et quelques grandes collectivités. Ces documents de sensibilisation expliquaient les bases du phénomène de chaleur urbaine et les enjeux liés

⁸⁵ L'atténuation du changement climatique consiste à réduire, par des processus naturels ou des moyens technologiques, la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

⁸⁶ L'adaptation concerne la réduction des risques et des impacts des effets néfastes du changement climatique (tempêtes, inondations, sécheresse ...).

⁸⁷ La Mission interministérielle de l'effet de serre (MIES) est un organisme interministériel français créé en 1992 pour coordonner les politiques nationales de lutte contre l'effet de serre et la position française dans les négociations internationales, notamment au sein de la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Elle a été absorbée en 2008 par la direction générale de l'Énergie et du Climat et la direction des affaires européennes et internationales, alors nouvellement créées au sein du MEEDDAT (Bardou et al. 2009)

au confort d'été, les impacts sur l'environnement et la santé ainsi que les leviers d'actions possibles (végétalisation, forme urbaine, matériaux, contention de l'utilisation de la climatisation ...).

Dans le contexte précédemment introduit, les projets de recherche ANR-MApUCE (2015-2019) et ADEME-PAENDORA (2017-2020) avaient pour objectif de répondre à un certain nombre de verrous scientifiques d'actualité dans le cadre des villes françaises. **Les questions générales de recherche pourraient être énoncées comme suit :**

Etant donné que le cadre réglementaire impose aux collectivités la prise en compte des enjeux de confort d'été dans la planification et l'aménagement urbain et que des outils de mesure et de modélisation de l'atmosphère urbaine sont disponibles à des résolutions spatiales suffisantes pour caractériser l'îlot de chaleur urbain à l'échelle des quartiers :

- *Est-il possible de pourvoir ces diagnostics microclimatiques spatiaux partout sur le territoire ?*
- *Quelle est la mise en forme nécessaire pour que ce diagnostic puisse être intégré à un document d'urbanisme ?*
- *Quelles informations climatiques faut-il mettre en avant et, dans quelles étapes du document d'urbanisme, afin que cet enjeu soit approprié par les services techniques, les élus et plus largement les acteurs de l'urbanisme ?*

Ce travail collaboratif a nécessité l'implication d'une équipe pluridisciplinaire et nombreuse. Des chercheurs et chercheuses statutaires : Marie Laure-Lambert du LIEU dans le domaine des études juridiques ; Marion Bonhomme, Nathalie Tornay et Serge Farault dans le domaine de l'architecture pour le LRA et le LMDC ; des Sociologues comme Jean-Pierre Levy du LATTIS ; des Géomaticiens comme Erwan Bocher du Lab-STICC et Najla Touati du LISST ; des chercheurs en Géographie urbaine comme Nathalie Long ou Didier Vye du LIENSs et Sinda Houès-Jouve du LISST ; des chercheurs en climatologie urbaine comme Valéry Masson du CNRM et moi-même.

Un nombre important de chercheurs non statutaires ont également effectué leur CDD, leur stage, thèse ou post-doc dans le cadre de ces deux projets. Leur rôle a été central en prenant en charge des développements clés comme la rédaction des fiches outils sur le cadre réglementaire (Coralie Demazeux et Emile Goze) ; le développement des typologies d'usager à l'échelle du bâtiment pour la modélisation climatique (Alexis Bourgeois et Margot Pellegrino) ; le développement des typologies pour les bâtiments français (Alexandre Ammosé) ; les simulations microclimatiques (Robert Schoetter) ; les types de temps sensibles (Renaud Jougla) ; la mise en place de la BD-MApUCE (Gwendal Petit et Christine Plumejeaud) ; l'analyse des cas exemplaires en France et à l'international (Claudia Ximena) ; le Kit des données clés de l'adaptation publié par l'ADEME (Ophélie Touchard), etc.

Mais ce travail n'aurait pas pu être effectué sans l'implication de la Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme et de nos trois terrains d'application, Aix en Provence-Marseille, La Rochelle et Toulouse. En effet, un groupe de travail constitué de praticiens des agences d'urbanisme de Toulouse (Geneviève Bretagne), Paris (Erwan Cordier, Laurence Nolorgues), Strasbourg (Valentine Ruff), Saint Omer (Sophie-Caillerez) et l'agence d'urbanisme d'Atlantique et Pyrénées (Cecile Gallato) ont participé sur toute la durée du projet. Ce groupe de travail a été moteur tant dans la mise en place de l'enquête sur les pratiques professionnelles des agences vis à vis des enjeux climatiques que sur le regard critique de nos productions depuis le point de vue opérationnel. Les trois collectivités ont permis que l'équipe projet local les accompagne sur un exercice opérationnel. Le travail effectué en collaboration avec les Directions de l'Environnement (Valérie Edouart, et avant elle, Claire Marie Genestar) et avec la Direction de la réglementation urbaine (Lise Debrye) de Toulouse Métropole dans le cadre de l'élaboration du PLUi-H a été largement présenté dans le TOME I et la partie III de ce TOME II, et il a été clé dans le développement du travail cartographique.

Chacun de ceux qui ont participé à ces projets pourra sûrement mettre en récit l'apport des projets MApUCE et PAENDORA et ses résultats originaux au regard de son propre chantier de recherche ou de travail. Pour ma part, les questions de recherche précédemment énoncées ont été étudiées sous l'angle de la cartographie climatique. Ce chantier a nécessité en effet, le développement préalable de méthodes de production de données urbaines et microclimatiques spatiales en base à la modélisation ; l'exploration de diverses techniques cartographiques ; et en parallèle l'analyse du cadre réglementaire. Ce chantier a donc mobilisé l'ensemble des développements des projets. Je me suis intéressée :

- en **collaboration avec des juristes**, au **cadre réglementaire**. J'ai ainsi participé au volet sur l'analyse du cadre réglementaire porté par Marie-Laure Lambert du LIEU dans lequel j'ai apporté un éclairage concernant les leviers d'action en matière d'adaptation à la hausse de températures en milieu urbain. Nous avons également travaillé ensemble dans l'élaboration du « *Guide de recommandations générales pour les documents de planification issus du projet MApUCE* »⁸⁸ qui a été une étape importante d'intégration et transversalité des résultats et développements du projet.
- en **collaboration avec des urbanistes**, au **cadre d'élaboration opérationnel (acteurs, gouvernance territoriale, élaboration technique)** et au **lien avec les autres documents d'urbanisme**.
 - J'ai ainsi co-encadré avec Sinda Haouès-Jouve du LISST le travail de post-doc de Claudia Ximena dont l'objectif était d'identifier des expériences en France et à l'étranger afin de constituer un panel de projets considérés comme des « bonnes pratiques ». Il s'agissait d'identifier les leviers permettant à ces projets de voir le jour et d'aboutir, et de réaliser un retour d'expérience afin de capitaliser leurs acquis et d'éclairer leurs points de fragilité.
 - La collaboration avec les services de Toulouse Métropole et l'agence d'urbanisme m'a aidé à m'acculturer au cadre d'élaboration opérationnel du PLUi, à identifier des données pertinentes dans ce cadre opérationnel, à tester les méthodes cartographiques et à travailler en collaboration avec Sinda Haouès-Jouve du LISST à l'élaboration de plusieurs documents à destination des acteurs : *Un Guide de recommandations pour la prise en compte du climat dans la construction de la Métropole de demain*⁸⁹ édité avec Toulouse Métropole; un *Atlas climatique sur le périmètre de Toulouse Métropole* édité avec l'Agence d'urbanisme et un *Kit des données clés de l'adaptation. Diagnostiquer l'adaptation au changement climatique dans les documents d'urbanisme*⁹⁰ édité avec l'ADEME.
- en **collaboration avec des climatologues et géographes**, je me suis intéressée à la **production de données urbaines et micro-climatiques à partir de méthodes généralisables à l'ensemble de la France**. Comme discuté en Partie II de ce mémoire, ce volet scientifique a été de grande importance car il a constitué la démocratisation de l'accès aux données climatiques sur toute une agglomération urbaine aux résolutions suffisamment fines pour être intégrées à un document d'urbanisme. Mon apport personnel a consisté, en collaboration avec Guillaume Dumas (stages MI et MII, LISST), à proposer une méthode pour identifier les Zones Climatiques locales à partir de la BD-urbaine MApUCE qui a ensuite été implémenté dans la chaîne de calcul de la BD-MApUCE. En collaboration avec Najla Touati et Pauline Crombette (IE et CDD, LISST), nous avons obtenu des cartes de végétation à haute résolution pour une quinzaine de villes à partir de données de télédétection SPOT6 qui ont servi à évaluer la qualité des données de végétation issues de la *BD TOPO*[®] de

⁸⁸ 2019 Lambert ML, Hidalgo J, Masson V, Bretagne G et Haouès-Jouve S, Urbanisme et (micro-) climat. Outils et recommandations générales pour les documents de planification. Guide Méthodologique issu du projet MapUCE

⁸⁹ 2020 Debrye L., Dumas G., Edouart V., Haouès-Jouve S., Hidalgo J., Touati N, Salvi I, Roques G. Prise en compte du climat dans la construction de la Métropole de demain. Guide de Recommandations. Toulouse Métropole-LISST.

⁹⁰ 2020 Touchard O., Sinda Haouès-Jouve, Julia Hidalgo et Bretagne G. et Kit des données clés de l'adaptation. Diagnostiquer l'adaptation au changement climatique dans les documents d'urbanisme. ADEME. <https://www.ademe.fr/kit-donnees-cles-ladaptation>

L'IGN. Une grande partie de mon travail de recherche a consisté à analyser les données issues des simulations microclimatiques afin d'isoler les phénomènes physiques à retenir lors de l'élaboration cartographique. J'ai par ailleurs travaillé en collaboration avec Renaud Jougla (CDD, LISST) à l'identification des situations météorologiques récurrentes pour le panel des cinquante villes du projet.

- en **collaboration avec des cartographes et géomaticiens**, je me suis finalement intéressée à **comment visualiser et mettre en forme ces données urbaines et microclimatiques afin de fournir un diagnostic microclimatique territorialisé**. La partie III de ce mémoire présente les différentes approches qui ont été développées et les moyens mis en œuvre pour y arriver.

Ces travaux de recherche viennent apporter des méthodologies et des données pour mieux prendre en compte la gestion des températures extrêmes en milieu urbain à travers les documents d'urbanisme. Il reste néanmoins du chemin à parcourir pour relier les politiques climatiques sur ce sujet aux politiques de gestion de risques d'une manière plus générale. Ces dernières reposent sur différents principes⁹¹ et la connaissance des phénomènes, les cartes d'exposition et leur prise en compte dans l'aménagement et l'urbanisme n'est qu'une partie.

Mais, comment mettre en pratique une véritable ingénierie de risque sur cette thématique ?

Classiquement dans la gestion des risques cela consiste à mettre en place une professionnalisation des pratiques qui permette aux acteurs du territoire d'identifier et anticiper les situations qui peuvent "endommager" ou affecter le territoire dans son fonctionnement ; d'assurer un fonctionnement en mode dégradé du territoire pendant une crise dont les effets peuvent être prolongés ; finalement, permettre aux acteurs du territoire d'accompagner un retour à la normale⁹².

Concernant la gestion des périodes caniculaires, pour l'instant ils ont été déployés le Plan national canicule (PNC) et le Système d'alerte canicule et santé (Sacs) qui se sont mis en place après la canicule exceptionnelle de 2003. Nous sommes néanmoins face à une évolution de long terme de ces événements caniculaires. Il est espéré en France une évolution vers des événements caniculaires plus fréquents, plus intenses et plus longs, les températures extrêmes en milieu urbain vont rentrer de moins en moins dans la catégorie des risques majeurs caractérisés eux par une faible fréquence et une énorme gravité⁹³. Il y a même un enjeu fort à considérer l'élévation de la température locale comme un risque car ses impacts, bien que visibles dans les statistiques épidémiologiques et de surmortalité⁹⁴, sont plus silencieux du point de vue des dommages structurelles et de la sinistralité causés que d'autres aléas naturels comme les inondations ou les glissements de terrains. Le statut même de l'élément air est à interroger dans ce contexte car, à différence de l'hydrosphère et de la lithosphère, l'atmosphère n'a pas de frontières et sa matérialité et donc sa pollution thermique (et non seulement chimique) par les activités atrophiques et l'urbanisation est un danger plus difficile à saisir par le grand public en général.

⁹¹ la connaissance des phénomènes, de l'aléa et du risque (cartes d'aléas) ; l'information préventive et l'éducation des populations ; la prise en compte des risques dans l'aménagement et l'urbanisme (élaboration des PPR naturels, technologiques et miniers, prise en compte dans la planification territoriale) ; la réduction de la vulnérabilité (qui peut aller jusqu'à l'expropriation) ; l'anticipation de la crise, la surveillance et le retour d'expérience (dans le domaine de l'hydrologie par exemple, la prévision des crues). La prise en compte des risques dans les documents d'urbanisme. DDT43. http://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/la_prise_en_compte_des_risques_par_les_documents_d_urbanisme_cle7129ff.pdf

⁹² 30 fiches pour mieux intégrer les risques dans l'aménagement. Les rapports d'étude du CERTU. Mars 2009

⁹³ La prise en compte des risques dans les documents d'urbanisme. DDT43. <http://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/pg.4>

⁹⁴ <https://www.santepubliquefrance.fr/les-actualites/2019/canicules-effets-sur-la-mortalite-en-france-metropolitaine-de-1970-a-2013-et-focus-sur-les-etes-2006-et-2015>

De la même manière que nous avons besoin de construire de nouvelles recherches hybrides à la frontière entre les sciences du climat et les études urbains, des nouveaux métiers et profils professionnels associés à la gestion des enjeux climatiques dans l'urbanisme sont en train d'émerger. Quelques thèses ont été réalisées ces dernières années en collaboration avec des collectivités et quelques de ces doctorants ont ensuite intégré la collectivité avec un contact plus ou moins proche avec la recherche. C'est par exemple le cas de Guillaume Dumas, géographe urbaniste de formation et qui a réalisé sa thèse en climatologie urbaine entre Toulouse Métropole et le CNRM (co-dirigé par Valéry Masson au CNRM et moi même au LISST).

A l'instar des géographes urbanistes, des architectes urbanistes, des sociologues urbanistes ou encore des psychologues urbanistes, nous assistons en France à l'émergence de la première génération de climatologues urbanistes... C'est très encourageant !

Annexe 1 :

Rapport de présentation : il doit expliquer l'articulation entre les documents internes du PLU(i)⁹⁵ (le projet d'aménagement et de développement durables, les orientations d'aménagement et de programmation, le règlement) ainsi que justifier les mesures permettant une plus grande flexibilité du règlement du PLU(i)⁹⁶, les possibilités par exemple de définir des secteurs où s'appliquent uniquement des orientations d'aménagement et de programmation (OAP), sans règlement. Le rapport de présentation reste le garant de la visibilité des objectifs environnementaux à travers le document d'évaluation environnementale qu'il contient⁹⁷.

- **L'évaluation environnementale** doit analyser l'état initial de l'environnement⁹⁸ et les perspectives de son évolution, les conséquences éventuelles de l'adoption du plan sur les éléments importants de l'environnement, y compris le climat⁹⁹ ainsi que les mesures envisagées pour éviter, réduire et compenser s'il y a lieu, les conséquences dommageables de la mise en œuvre du document¹⁰⁰. Elle définit enfin les critères et indicateurs permettant de suivre les effets du plan sur l'environnement¹⁰¹.
- **C'est donc à l'occasion de cette évaluation que devraient être intégrées dans la réflexion sur le PLU(i) des études, cartes climatiques et modélisations indiquant, dans le diagnostic territorial, quels sont les enjeux énergétiques et climatiques, et notamment quelles sont les zones urbaines concernées ou menacées par le phénomène d'îlot de chaleur urbain.** La réalisation de cette évaluation est l'occasion d'analyser les paramètres climatiques locaux, de dresser le « profil climatique de long terme du territoire » (séries observées et prédictions futures de températures et précipitations notamment), puis de qualifier les enjeux climatiques du territoire à partir de ces données.
- A partir de ces données, l'impact des choix d'urbanisme effectués par le PLU(i) seront analysés et devront être justifiés dans le rapport de présentation, dans la mesure où il réduit ou aggrave l'imperméabilisation des sols, modifie les formes urbaines, maintient, augmente ou diminue la végétation et la présence de l'eau en ville. Seules des données spatiales sur le microclimat urbain et des réflexions à long terme pourront assurer la cohérence des choix d'aménagement tenant compte de paramètres nombreux et parfois contradictoires (équilibre entre construction et préservation des zones agricoles et naturelles, densification et maîtrise de l'ICU, rénovation thermique des bâtiments, intégration des énergies renouvelables et préservation du patrimoine ancien et des paysages). **Cependant, si le rapport de présentation présente une opportunité de prise en compte du réchauffement urbain, il n'a pas de valeur réglementaire et constitue principalement un document d'information et un élément d'interprétation et de justification du PADD¹⁰².**

⁹⁵ art. L151-4 du Code de l'urbanisme

⁹⁶ L'évolution récente vers un urbanisme de projet, reposant sur un « droit souple », une « simplification des normes », un règlement du PLU(i) plus « flexible et moins standardisé [...], favorisant la création architecturale et la diversité des formes urbaines », a conduit à renforcer les exigences en matière de justification des règles édictées. (source: Ministère du logement et de l'habitat durable, DHUP/QV3, Fiches techniques : décret sur la modernisation du contenu du PLU Juillet 2016 <http://www.logement.gouv.fr/plan-local-d-urbanisme-intercommunal-plui-et-plan-local-d-urbanisme>

⁹⁷ art. R151-1, 3° du Code de l'urbanisme

⁹⁸ art. R151-3,2° Code de l'Urbanisme

⁹⁹ art. R151-3,3° Code de l'Urbanisme

¹⁰⁰ art. R151-3,5° Code de l'Urbanisme

¹⁰¹ art. R151-3,6° Code de l'Urbanisme

¹⁰² 2017, Lambert ML, Demazeux C et Gallafrio M. Fiches-outils: Le PLU(i), Rapport de présentation et PADD : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354282v1>

PADD : Le PADD énonce des objectifs stratégiques dans les domaines de l'urbanisme, mais aussi de l'énergie et du climat en application de l'article L101-2 du code de l'urbanisme. Il apparaît comme le cadre de référence et de cohérence des différentes actions d'aménagement engagées par la commune. **Il représente le « projet politique » du PLU(i), mais n'est pas opposable aux tiers, c'est-à-dire qu'il ne s'impose pas à d'autres documents en dehors du PLU(i). En revanche, il est opposable au règlement du PLU(i), dans un rapport de cohérence. Ainsi, les dispositions réglementaires ne doivent pas aller à l'encontre des objectifs fixés par le PADD.**

- Le PADD, pour favoriser la lutte contre le changement climatique et atténuer le phénomène d'îlot de chaleur urbain, peut préconiser la généralisation de l'approche bioclimatique, agir à travers l'aménagement des espaces publics et la requalification de friches et terrains libres dans le PLU(i). Plusieurs leviers d'action peuvent être ainsi visés :
 - **la forme urbaine** (ventilation des rues et ombre portée des bâtiments) : Le PADD peut développer une réflexion sur la climatisation passive des quartiers urbains ou des espaces publics, en optimisant les phénomènes d'ombrage et de ventilation naturelle des rues et des pieds de bâtiments.
 - **la végétalisation** (évapotranspiration, ombrage, trame verte urbaine) : la protection des milieux naturels et des paysages, la préservation des espaces verts et des continuités écologiques sont des objectifs qui doivent trouver une traduction au sein du PADD¹⁰³. Ce dernier doit donc définir « les orientations générales des politiques [...] de paysage, de protection des espaces naturels, agricoles et forestiers, et de préservation ou de remise en bon état des continuités écologiques »¹⁰⁴. Il y a ici plusieurs enjeux : renforcer la compacité de la forme urbaine par la densité tout en intégrant et protégeant les îlots verts publics et privés et introduire des orientations visant à renforcer la végétalisation des espaces.
 - **l'eau** (trame bleue urbaine, noues, fontaines, arrosage des espaces verts et chaussées) : La présence de l'eau, sa circulation dans les espaces urbains a un effet positif en termes de diminution de la température de l'air. Toutes les techniques qui permettent de maintenir cette présence, de ralentir les écoulements pluviaux dans les réseaux de collecte présentent donc un double intérêt : rafraîchir la zone en limitant les îlots de chaleur urbains, et éviter l'engorgement des réseaux de collecte et des stations d'épuration en période de fortes précipitations. Il y a ainsi plusieurs enjeux : prévoir une action d'intégration de la trame bleue dans l'agglomération pour lui conférer le caractère de trame bleue urbaine ; intégrer des orientations traitant de la gestion des eaux : fonction de rafraîchissement en ville, récupérer, recyclage des eaux pour l'arrosage des espaces verts, gestion à la parcelle du ruissellement des eaux pluviales, stockage...

¹⁰³ art. L101-2 6° du Code de l'urbanisme

¹⁰⁴ art. L151-5 Code de l'urbanisme

Les orientations d'aménagement et de programmation, OAP : les OAP sont élaborées en cohérence avec le PADD, elles comprennent des dispositions portant sur l'aménagement, l'habitat, les transports et les déplacements¹⁰⁵. Elles peuvent être définies graphiquement, ou de façon écrite. Les orientations d'aménagement ont pour objet de préciser et compléter le contenu du PADD, elles peuvent être de trois types :

- **OAP sectorielles (par secteur ou quartier)**, « les orientations d'aménagement et de programmation par quartier ou secteur définissent les conditions d'aménagement garantissant la prise en compte des qualités architecturales, urbaines et paysagères des espaces dans la continuité desquels s'inscrit la zone, notamment en entrée de ville »¹⁰⁶.
- **OAP sectorielles d'aménagement (sans dispositions réglementaires)**, « les OAP dont les conditions d'aménagement et d'équipement ne sont pas définies par des dispositions réglementaires garantissent la cohérence des projets d'aménagement et de construction avec le PADD. Elles portent au moins sur : 1 ° La qualité de l'insertion architecturale, urbaine et paysagère ; 2 ° La mixité fonctionnelle et sociale ; 3 ° La qualité environnementale et la prévention des risques ; 4 ° Les besoins en matière de stationnement ; 5 ° La desserte par les transports en commun ; 6 ° La desserte des terrains par les voies et réseaux. Ces orientations d'aménagement et de programmation comportent un schéma d'aménagement qui précise les principales caractéristiques d'organisation spatiale du secteur »¹⁰⁷.
- **OAP patrimoniales**: « Les OAP peuvent comprendre des dispositions portant sur la conservation, la mise en valeur ou la requalification des éléments de paysage, quartiers, îlots, immeubles, espaces publics, monuments, sites et secteurs qu'elles ont identifiés et localisés pour des motifs d'ordre culturel, historique, architectural ou écologique, notamment dans les zones urbaines réglementées en application de l'article R. 151-19 »¹⁰⁸.

Les OAP sont opposables aux permis de construire, mais seulement dans un rapport de compatibilité¹⁰⁹. Seul le règlement impose un rapport de conformité, et peut donc interdire de construire ou prescrire des règles d'urbanisme. Il y a donc lieu de compléter, le cas échéant, les OAP par des dispositions du règlement afin de permettre l'opposabilité effective des OAP aux projets d'aménagement. L'enjeu consiste à trouver le bon niveau de formalisation des orientations. « En effet, les OAP doivent permettre aux services instructeurs des permis de construire de vérifier que la construction répondra bien aux objectifs fixés [...]. L'expression des orientations sera le plus souvent qualitative, pour s'attacher aux résultats à atteindre en laissant une marge d'adaptation quant aux formes et aux moyens pour y parvenir. (...) Les orientations doivent être claires et vérifiables, elles peuvent parfois être rédigées de manière quantitative mais ne doivent pas s'apparenter à un règlement »¹¹⁰.

Dans le respect des missions de l'article L101-2, 7° du Code de l'Urbanisme (lutte contre le changement climatique et adaptation à ce changement), **ces objectifs permettent d'intégrer des réflexions et objectifs sur la rénovation ou l'aménagement énergétique et climatique des quartiers, la gestion de la végétalisation urbaine et des espaces publics dans un but de lutte contre l'ICU**. Plus précisément, l'article R151-7 prévoit que les OAP peuvent « comprendre des dispositions portant sur la conservation, la mise en valeur ou la requalification des éléments de paysage, quartiers, îlots, immeubles, espaces publics, [...] sites et secteurs qu'elles ont identifiés et localisés pour des motifs d'ordre [...] écologique ». Lambert considère que si l'on entend ce motif d'ordre « écologique » au sens large d'écologie urbaine, on peut donc y intégrer les objectifs d'adaptation au changement climatique et toutes les manières de lutter contre les ICU. L'article

¹⁰⁵ art. L151-6 du Code de l'Urbanisme

¹⁰⁶ art. R. 151-6 du Code de l'Urbanisme

¹⁰⁸ art. R. 151-7 du Code de l'Urbanisme

¹⁰⁹ art. L152-1 du Code de l'Urbanisme

¹¹⁰ Ministère du logement et de l'habitat durable, Fiches techniques : décret sur la modernisation du contenu du PLU, fiche 5 : les OAP. Juillet 2016

R151-8 indique également que les OAP des zones urbaines ou à urbaniser portent « au moins sur 1° La qualité de l'insertion architecturale, urbaine et paysagère ; [...] 3° La qualité environnementale... ».

- Le ministère considère que ces thèmes peuvent se décliner en orientations portant par exemple sur :
- « Les hauteurs moyennes du bâti, et les principes d'implantation des constructions le long des voies et emprises publiques ;
- La densité attendue par la représentation de volumes constructibles précisant les orientations programmatiques définies sur la zone. En l'occurrence, le recours à des représentations en trois dimensions peut s'avérer extrêmement utile ;
- L'implantation des espaces libres, leur rôle environnemental et leur nature ; »¹¹¹.

Par rapport aux leviers d'action ceci se traduit en :

- **la forme urbaine** (ventilation des rues et ombre portée des bâtiments) : Les OAP peuvent « prendre la forme de schémas d'aménagement et préciser les principales caractéristiques des voies et espaces publics »¹¹². Cette disposition a un impact sur les formes urbaines et permet donc une réflexion sur l'intégration des îlots dans leur environnement proche est ainsi possible.
- **la végétalisation** (évapotranspiration, ombrage, trame verte urbaine) : Les OAP peuvent « définir les actions et opérations nécessaires pour mettre en valeur l'environnement, notamment les continuités écologiques »¹¹³. En précisant les principes d'aménagement des espaces extérieurs, elles permettent d'identifier et préserver la végétation lorsqu'elle peut jouer un rôle pour protéger les constructions futures des rayonnements solaires estivaux et lorsqu'elle peut contribuer au confort hygro-thermique des espaces extérieurs. Plus précisément, elles peuvent :
 - maintenir et renforcer les éléments de la trame végétale : alignements d'arbres, haies, bandes enherbées... avec l'objectif de ne pas dégrader, voire d'améliorer la situation initiale en termes de couverture arborée et biodiversité ;
 - localiser des espaces verts publics existants et à créer ;
 - préciser les éléments remarquables à maintenir ;
 - localiser des bandes végétales en pied de façade à ne pas minéraliser ;
 - prendre en compte l'ensemble de ces éléments dans l'implantation indicative du bâti, ainsi que dans la diversité d'usage des espaces extérieurs: jardins collectifs, jardins privatifs...
 - les OAP peuvent également faire figurer un *coefficient de biotope par surface*. C'est à dire, de définir le pourcentage d'une surface aménagée qui sera définitivement consacrée à la Nature (surface végétalisée et/ou favorable aux écosystèmes locaux et aux espèces locales) dans la surface totale d'une parcelle à aménager ou aménagée¹¹⁴. Ce pourcentage vise à créer un équilibre entre une surface végétalisée, naturelle, et une surface urbanisée ou à construire.

Albédo¹¹⁵ (matériaux des bâtiments et des espaces publics) et **émission de chaleur** (climatisations) : Les OAP permettent de préciser les principes d'aménagement. A ce titre, elles peuvent utiliser plusieurs incitations à limiter les

¹¹¹ Ministère du logement et de l'habitat durable, Fiches techniques : décret sur la modernisation du contenu du PLU, fiche 5 : les OAP. Juillet 2016

¹¹² art. L151-7-5° du Code de l'Urbanisme

¹¹³ art. L151-7 1° du Code de l'Urbanisme

¹¹⁴ ce coefficient vient en complément du « coefficient d'occupation des sols » ; il vise non seulement à conserver un certain taux de foncier non imperméabilisé et non artificialisé, mais aussi des services écosystémiques ; (Conreux-Mantzias L & Faucher H, 2018).

espaces bitumés à faible albédo (voiries et parkings) : optimiser chaque voirie afin de limiter la surface dédiée à la circulation, mutualiser les aires de stationnement pour limiter leur emprise (notamment entre des équipements publics et des commerces), inscrire des emplacements réservés au co-voiturage, à l'auto-partage ou à des parkings relais, afin de favoriser des usages alternatifs de la voiture. **Les OAP peuvent également fixer une obligation de résultat sur le confort d'été, qui prohibe le recours à la climatisation.** C'est l'exemple de l'OAP sectorielle pour la commune de Boé, secteur de la ZAC de Marot du PLUi d'Agen « L'OAP recommande de ne pas installer de climatisation dans les bâtiments, dans le cadre de la certification « Habitat et Environnement » pour les logements collectifs et maisons groupées : garantie de résultats, [...] pas de climatisation. » (Lambert et al. 2017)

Eau (trame bleue urbaine, fontaines, arrosage des espaces verts et chaussées) : Enfin, les OAP peuvent « définir les actions et opérations nécessaires pour mettre en valeur l'environnement, notamment les continuités écologiques » (Art. L151-7 1° du Code de l'Urbanisme), ce qui peut inclure un travail sur les trames bleues, la présence de l'eau dans le milieu urbain et l'infiltration naturelle des eaux pluviales, la lutte contre l'imperméabilisation des sols.

Règlement : Le règlement du PLU(i) fixe, en cohérence avec le PADD, les règles générales et les servitudes d'utilisation des sols. Il est accompagné de documents graphiques sous forme de cartes qui formalisent le champ d'application du règlement par un zonage. Tous les travaux, démolitions, aménagements réalisés [...] devront être conformes à ce règlement et à ses documents graphiques¹¹⁶. **De nombreux articles du règlement permettent de mettre en œuvre une politique liée au climat et à l'énergie. Mais il n'est pas aisé d'obliger les collectivités à rédiger des prescriptions positives dans ce domaine. Le code de l'urbanisme vise plutôt à ne pas entraver ou à ne pas limiter la qualité environnementale des aménagements et la production d'énergies renouvelables.** Ainsi, interdit-il aux collectivités de se fonder sur le contenu d'un PLU(i) pour « s'opposer à l'utilisation de matériaux renouvelables ou de matériaux ou procédés de construction permettant d'éviter l'émission de GES, à l'installation de dispositifs favorisant la retenue des eaux pluviales ou la production d'énergie renouvelable correspondant aux besoins de la consommation domestique des occupants de l'immeuble ou de la partie d'immeuble concernés »¹¹⁷. Le Code de l'Urbanisme détaille également l'ensemble des règles que le règlement pourrait mettre en œuvre dans un objectif climatique (occupation et utilisation des sols interdites, implantations des constructions par rapport aux emprises et voies publiques, obligations imposées aux constructions, travaux, installations et aménagements, en matière de performances énergétique et environnementale...) ¹¹⁸.

- **Depuis la réforme de 2014, l'articulation du contenu du règlement se fait autour de 3 enjeux : Destination des constructions, usages des sols ; Caractéristiques urbaine, architecturale, environnementale et paysagère ; et Équipement et réseaux.** Par suite, la construction du règlement par articles, qui prévalait auparavant, devient facultative mais cette structure était encore, en 2017, familière aux rédacteurs de PLU(i) et la fiche sur le Règlement issue du projet MApUCE a choisi de conserver cette structure (Lambert et al. 2017).
- L'objectif général d'adaptation au changement climatique est peu repris dans la description des objectifs du règlement des PLU(i) tels que décrits par le code de l'urbanisme. On peut néanmoins retenir de l'article L151-18 du code de l'Urbanisme, que « le règlement peut déterminer des règles concernant l'aspect extérieur des constructions neuves, rénovées ou réhabilitées, leurs dimensions, leurs conditions d'alignement sur la voirie et de distance minimale par rapport à la limite séparative et l'aménagement de leurs abords, afin de contribuer [...] à l'insertion des constructions dans le milieu environnant ». Interprétée largement, cette « insertion dans

¹¹⁵ L'albédo, est le pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est-à-dire le rapport de l'énergie lumineuse réfléchi à l'énergie lumineuse incidente. C'est ainsi une grandeur sans dimension. (source : Wikipedia)

¹¹⁶ art. L152-1 du Code de l'Urbanisme

¹¹⁷ art. L111-16 du Code de l'Urbanisme

¹¹⁸ art. R151-9 à 16 du Code de l'Urbanisme

l'environnement » peut englober l'adaptation au changement climatique et donc notamment la lutte contre les îlots de chaleur urbains. Dans ce sens, le règlement du PLU(i) peut favoriser une forme urbaine particulière, une prise en compte des vents dominants (conditions d'alignement, recul des constructions), ou encore de l'ensoleillement et des ombres portées (dimensions et hauteur des constructions, marges de recul).

- Plus précisément, le règlement peut jouer sur certains paramètres en lien avec le micro-climat urbain :
 - **Forme urbaine** (ventilation des rues et ombre portée des bâtiments) : **Les articles 6, 7 et 8** permettent de privilégier une forme urbaine compacte, ou au contraire de créer des coupures d'urbanisation. Les choix à privilégier pour la forme urbaine dépendent donc du contexte climatique et de la topographie de la zone. En règle générale, la compacité urbaine est plutôt favorable au confort d'hiver (meilleure performance énergétique, effet de coupure des vents dominants) et peut avoir des effets bénéfiques sur le confort d'été (effet d'ombrage). En revanche, le phénomène d'îlot de chaleur urbain peut obliger, dans certaines villes ou certains quartiers, à favoriser les coupures d'urbanisation afin d'améliorer la ventilation naturelle des espaces publics. Les choix en matière de recul dépendront également des types de quartiers. En général il est prévu (avec des dérogations possibles) :
 - un alignement dans les centres anciens, et les perspectives monumentales ou urbaines,
 - un recul par rapport aux voies dans les zones péri-centrales plus discontinues. Concernant le confort d'été, ce recul peut être favorable en terme de ventilation, mais peut aussi renforcer l'ensoleillement, sauf si une végétalisation des espaces de recul est prévue.

L'article 10 traite des prescriptions relatives à la hauteur maximale des constructions et celles-ci peuvent impacter la ventilation des rues (effet canyon) et leur ombrage.

Végétalisation (évapotranspiration, ombrage, trame verte urbaine) : La végétalisation des espaces publics ou des toitures peut limiter avec évidence la surchauffe estivale. Le code de l'urbanisme donne compétence au règlement du PLU(i) pour développer les surfaces végétalisées dans les villes. Même si l'objectif affirmé est lié aux enjeux de biodiversité et de trame verte, ces mesures ne manqueront pas d'avoir un effet sur le confort d'été et la limitation des îlots de chaleur urbains.

Espaces boisés classés, Le PLU(i) peut classer en Espaces Boisés Classés, dans n'importe quelle zone, des « bois, forêts, parcs à conserver, à protéger ou à créer », ainsi que des « arbres isolés, haies ou réseaux de haies et des plantations d'alignement ». Ce classement permet d'une part, de contrôler les défrichements, les abattages d'arbres ou de haies et tout changement d'affectation du sol par le biais de la déclaration préalable¹¹⁹. D'une autre part, de constituer des réserves foncières, afin d'utiliser les sites disponibles dans les périmètres concernés par les îlots de chaleur urbains, en les végétalisant pour augmenter les capacités de rafraîchissement d'un quartier ou d'une ville.

Coefficient de biotope, cet outil n'est pas obligatoire mais peut être utile pour garantir la présence d'espaces végétalisés. Le règlement du PLU(i) « précise les types d'espaces, construits ou non, qui peuvent entrer dans le décompte de cette surface minimale en leur affectant un coefficient qui exprime la valeur pour l'écosystème par référence à celle d'un espace équivalent de pleine terre ». Il peut également « imposer des obligations en matière [...] de plantations » (article R151-43 du Code de l'Urbanisme). Le coefficient de biotope donne des équivalences pondérées par rapport à la végétalisation de la pleine terre, aux différentes formes que prennent la perméabilisation des sols ou la végétalisation des espaces urbains. Il peut être adapté à chaque type de zones, aux différents types de travaux (réhabilitation ou constructions neuves). Il peut varier selon la destination des constructions (exemple : 0,30 pour les logements, 0,60 pour les équipements publics...) ou en fonction des espaces verts déjà présents dans le quartier (le taux sera d'autant plus important que le quartier est pauvre en espaces verts).

En se référant aux articles, voici les principaux points à exploiter :

¹¹⁹ art. L421-4 du Code de l'Urbanisme

- L'article 6, en imposant un alignement ou un retrait des immeubles par rapport à la voirie, peut permettre de végétaliser les pieds d'immeubles et l'espace public.
- **L'Article 9**, sur l'emprise au sol des constructions permet de prescrire une succession de bandes plus ou moins constructibles sur une même parcelle. Ce système de bandes constructibles peut privilégier la constructibilité de la bande la plus proche des voies et emprises publiques et limiter la constructibilité des fonds de terrain. Ceci permet le maintien d'espaces libres et végétalisés dans la partie arrière des parcelles, en favorisant les cœurs d'îlots végétalisés.
- **L'article 11** peut favoriser les toitures végétalisées, lesquelles peuvent déroger aux règles concernant l'aspect extérieur des bâtiments.
- **L'article 12** régleme les places de stationnement, il peut également fixer un coefficient d'imperméabilisation maximum autorisé après aménagement. Il peut également être complété par une disposition de l'article 13.
- **L'article 13 concerne** les prescriptions en matière de gestion des espaces libres et permet d'imposer des obligations aux nouvelles constructions et aux opérations d'aménagement en matière de végétalisation. Il permet de protéger la végétation existante, notamment en interdisant l'abattage d'arbres. Il peut imposer de planter abondamment les espaces non bâtis, les aires de stationnement. Il peut imposer une proportion minimale d'espace vert située par exemple en cœurs d'îlots, imposer les espaces verts de pleine terre... Il peut également préciser le type d'arbres à privilégier ainsi que leur nombre. L'article 13 peut être l'occasion d'utiliser la protection particulière des " éléments de paysage " végétaux afin de les conserver, les remplacer mais aussi préserver la canopée végétale et l'absence d'imperméabilisation du sol. Il est désormais renforcé par les objectifs Zero Artificialisation Nette.
- **Les articles 14 et 15, sur les continuités écologiques et trames vertes**, permet d'identifier et localiser les éléments de paysage et des secteurs à protéger pour des motifs d'ordre écologique, notamment pour la préservation, le maintien ou la remise en état des continuités écologiques et définir, le cas échéant, les prescriptions de nature à assurer leur préservation¹²⁰. « Il peut localiser, dans les zones urbaines, les terrains cultivés et les espaces non bâtis nécessaires au maintien des continuités écologiques à protéger et inconstructibles quels que soient les équipements qui, le cas échéant, les desservent. » Les prescriptions en matière de performance environnementales permettent d'imposer aux projets le respect des continuités écologiques (trames vertes) qu'elles soient à préserver mais aussi à créer ou à restaurer.

Albedo - **L'Article 11** du règlement est relatif à l'aspect extérieur des constructions, et peut aborder l'**albedo** des matériaux des bâtiments et des espaces publics. Dans cet objectif, qui lie esthétique et climat, il peut prescrire une palette de couleurs claires, qui ont un meilleur albedo, limiter les matériaux brillants par exemple, voire « déterminer des règles concernant l'aspect extérieur, en imposant ou en prescrivant l'utilisation de certains matériaux pour les constructions » 5 . **Concernant l'émission de chaleur, il peut interdire l'installation de climatisations.**

En revanche, Lambert considère comme possible que la nouvelle rédaction de l'article L151-18 du Code de l'urbanisme, qui fait désormais référence à « l'insertion des constructions dans le milieu environnant », et non plus à l'insertion « harmonieuse » de ces constructions, permette d'élargir les objectifs de cet article aux préoccupations de l'impact sur le climat urbain, en ne les limitant plus aux seules préoccupations esthétiques, ce qui permettrait d'aller plus loin dans la régulation des matériaux orientés vers les espaces publics. D'autant que l'article R 151-41 donne au règlement du PLU(i) la possibilité de « prévoir des dispositions concernant les caractéristiques architecturales des façades et toitures des constructions ainsi que des clôtures » ;

¹²⁰ art. L151-23 du Code de l'Urbanisme

Eau (trame bleue urbaine, fontaines, arrosage des espaces verts et chaussées). La présence de l'eau en ville peut atténuer les îlots de chaleur urbains. Les PLU(i), pour le moment, appréhendent plutôt les aspects circulation et infiltration des eaux. L'article R151-43 du Code de l'urbanisme dispose ainsi qu'afin de « contribuer à la qualité du cadre de vie, [...] et répondre aux enjeux environnementaux, le règlement peut : [...] 7° Imposer les installations nécessaires à la gestion des eaux pluviales et du ruissellement ; 8° Imposer pour les clôtures des caractéristiques permettant de préserver ou remettre en état les continuités écologiques ou de faciliter l'écoulement des eaux ».

D'autres articles pourraient permettre de prévoir une gestion plus naturelle en milieu urbain.

- **L'article 4**, est relatif à la desserte des terrains par les réseaux publics d'eau et d'assainissement et fixe les conditions d'assainissement individuel. Il peut permettre par exemple de privilégier des techniques de gestion des eaux pluviales alternatives comme l'infiltration, en favorisant des noues ou fossés qui retiennent l'eau un certain temps et peuvent donc rafraîchir le climat urbain.
- **L'article 9**, peut inciter à une récupération des eaux pluviales en augmentant l'emprise au sol. La réutilisation des eaux pluviales sur la parcelle permet alors de fournir une ressource en eau disponible pour les arrosages en période estivale.

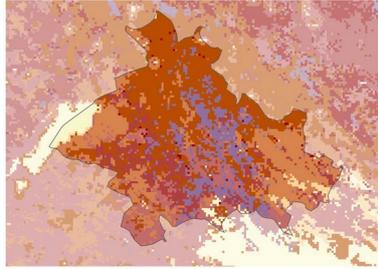
Annexe 2 : Discontinuités spatiales de la vitesse moyenne du vent

Dans les analyses géographiques et thématiques, les discontinuités spatiales sont définies comme la séparation entre deux unités adjacentes. Ce concept a été décrit pour la première fois par Roger Brunet en 1967 mais il a aussi été discuté et enrichi par d'autres géographes (Hubert, 1993 ; Gay, 1995 ; François et Grasland, 1997). Dans le contexte des données atmosphériques de cette étude, la représentation des discontinuités utilise un seul indicateur continu, la vitesse du vent en mètres par seconde. En premier lieu, la localisation et la mesure des disparités entre les classes ont été calculées à l'aide du package de cartographie R développé par Lambert et Giraud. Pour chaque bord, le ratio ou la différence des valeurs du polygone a été calculé(e) sur les deux côtés. Dans ce cas, les discontinuités calculées sont « statiques », ce qui correspond à une rupture dans l'espace en raison de phénomènes locaux et durables. Ces discontinuités peuvent également résulter de phénomènes anthropiques tels que l'urbanisation ou l'étalement urbain. Les valeurs à représenter sont continues (en mètres par seconde) et elles utilisent un gradient de couleur (de l'orange au rouge).

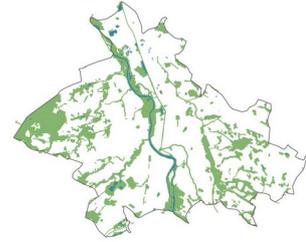
Annexe 3 : Cartes d'analyse du stress thermique diurne pour les types de temps sensibles 7 et 8



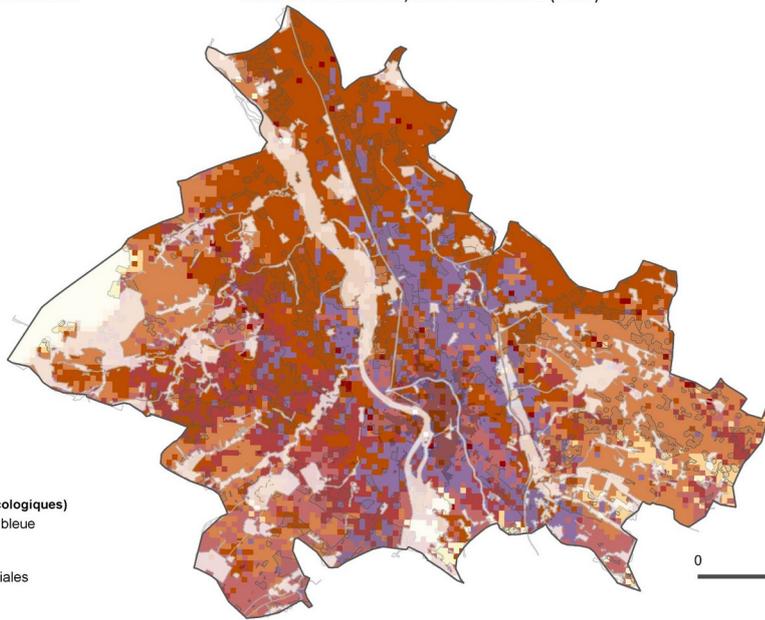
Zones de bâtis denses et zones commerciales



Stress thermique diurne, situation ensoleillée, avec vent du S-E (TTS7)



Trames verte et bleue



Biotope (corridors écologiques)

Trames verte et bleue

Zones urbanisées

Zones commerciales

Bâtis denses

Stress thermique modélisé (indicateur UTCI)

Pas de stress thermique -haut

Chaleur modérée - niveau bas

Chaleur modérée - niveau moyen

Chaleur modérée - niveau haut

Forte chaleur - niveau bas

Forte chaleur - niveau moyen

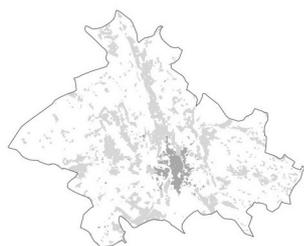
Forte chaleur - niveau haut

Très forte chaleur- niveau bas

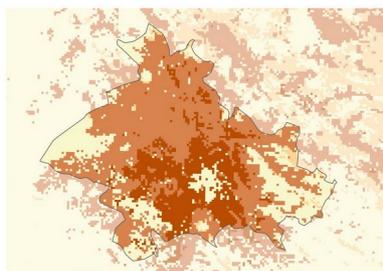
0 5 km

Sources : BD-Mapuce (2015), données climatiques (CNRM, LISST, 2018), Toulouse Métropole (2018)

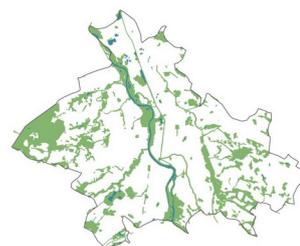
Menut TOME II - Volume de travaux inédits



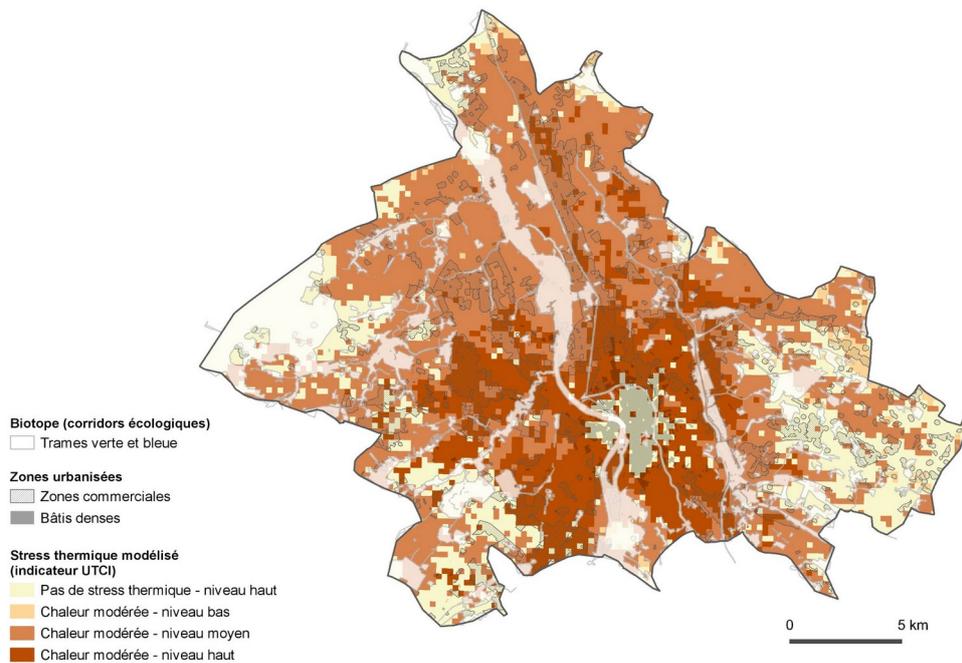
Zones de bâtis denses
et zones commerciales



Stress thermique diurne,
situation ensoleillée, avec vent de N-O (TTS8)



Trames verte et bleue



- Biotope (corridors écologiques)**
- Trames verte et bleue

- Zones urbanisées**
- Zones commerciales
- Bâtis denses

- Stress thermique modélisé (indicateur UTCI)**
- Pas de stress thermique - niveau haut
- Chaleur modérée - niveau bas
- Chaleur modérée - niveau moyen
- Chaleur modérée - niveau haut

0 5 km

Sources : BD-Mapuce (2015), données climatiques (CNRM, LISST, 2018), Toulouse Métropole (2018)

Conception cartographique : N. Touati, J. Hidalgo, LISST, 2020

Annexe 4: Cartes d'analyse de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour les types de temps sensibles 7 et 8



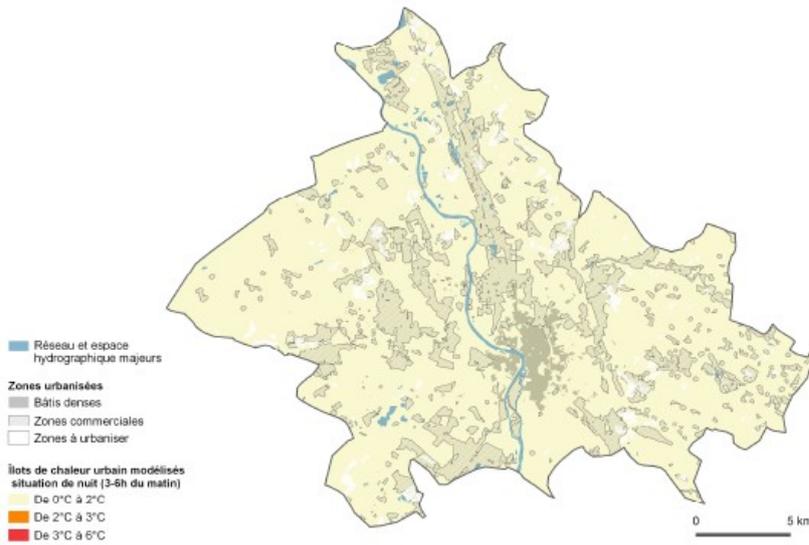
Zones de bâtis denses
et zones commerciales



Îlots de chaleur urbain nocturne,
situation ensoleillée avec du vent du S-E (TTS7)



Zones potentiellement urbanisables,
PLU-H 2018

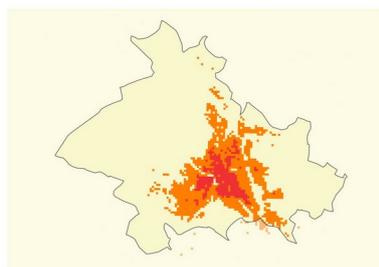


Sources : BD-Mérouse (2015), données climatiques (CNRM, LISST, 2018), Toulouse Métropole (2018)

Menuit TOME II - Volume de travaux inédits



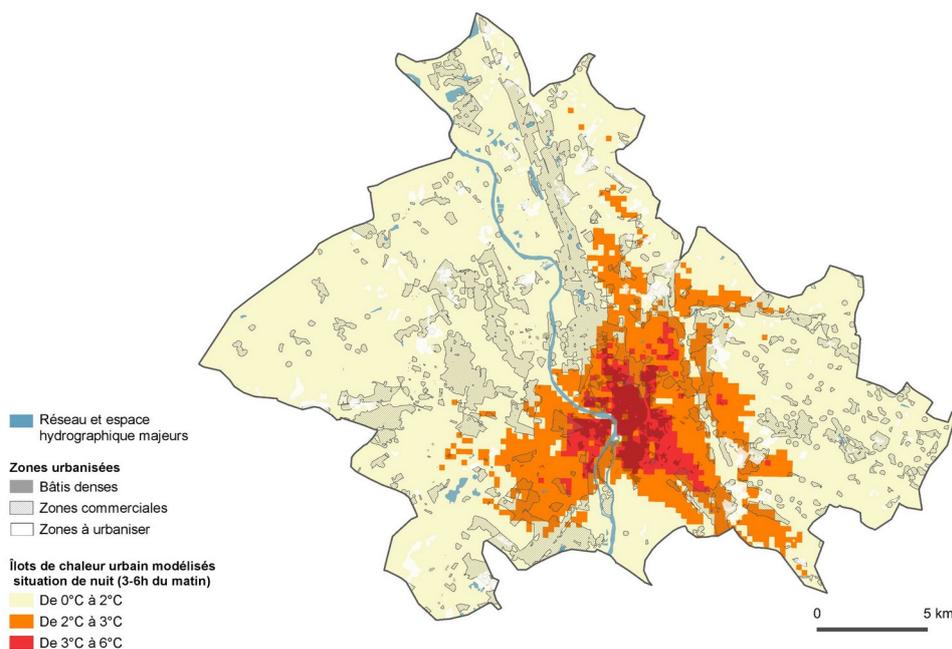
Zones de bâtis denses
et zones commerciales



Îlots de chaleur urbain nocturne,
situation ensoleillée avec vent de N-O (TTS8)



Zones potentiellement urbanisables,
PLUi-H 2018



Sources : BD-Mapuce (2015), données climatiques (CNRM, LISST, 2018), Toulouse Métropole (2018)

Conception cartographique : N. Touati, J. Hidalgo, LISST, 2020

Bibliographie

- Akbari, H., Kolokotsa, D. (2016). Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy And Buildings*, 133, 834–842.
- Aleksandrowicz, O., Vuckovic, M., Kiesel, K., Mahdavi, A. (2017). Current trends in urban heat island mitigation research: Observations based on a comprehensive research repository. *Urban Climate*, 21, 1–26.
- Alonso, L., Renard, F. (2020). A Comparative Study of the Physiological and Socio-Economic Vulnerabilities to Heat Waves of the Population of the Metropolis of Lyon (France) in a Climate Change Context. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 1004.
- Archer, D., Dodman, D. (2015). Making capacity building critical: Power and justice in building urban climate resilience in Indonesia and Thailand. *Urban Climate*, 14(partie 1), 68–78.
- Ashie Y., Tanaka T., Sadohara S. and Inachi S. (2015). Urban climatic map studies in Japan: Tokyo and Yokohama. Chapter in *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning. The Urban Climatic Map. Routledge.*
- Aylett, A. (2015). Institutionalizing the urban governance of climate change adaptation: Results of an international survey. *Urban Climate*, 14, 4–16.
- Barlow, J. (2014). Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate*, 10(2), 216–240.
- Barroca, B. (2017). Ville, risque, systémique. La vie de la recherche scientifique, Sncs Fsu, *Penser la complexité*, 410 (automne 2017), pp.28-30. 10.1111/j.1435-5597.1964. hal-01658261
- Baumüller, J. (2005). Stuttgart21, Amt für Umweltschutz. Stuttgart, version 4.
- Sylvain Bigot, Sarah Duché, Malika Madelin, Sandra Rome. (2017). 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, BSGLG, 68 (2017/1) - Climatologie 68 (2017), pp.13-36. halshs-02153176
- Bulkeley, H., Betsill, H. (2003). *Cities and climate change*. Routledge, Londres.
- Bocher E., Petit G., Bernard J. and Palominos S. (2018). A geoprocessing framework to compute urban indicators: The MApUCE tools chain. *Urban Climate*, Elsevier, 24, pp.153-174.
- Cantat, O. (2014). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps, *Norois*, 191 | 2004/2, URL : <http://journals.openedition.org/norois/1373> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/norois.137>
- Champeaux, J., Masson, V., and Chauvin, F. (2005). ECOCLIMAP: A global database of land surface parameters at 1 km resolution. *Meteorological Applications*, 12(1), 29-32
- Chapman, L. (2015). Urban Meteorological Networks: An urban climatologists panacea?. *ICUC-9*, Toulouse, France.
- Ching, J., Mills, G., Bechtel, B., See, L., Feddema, J., Wang, X., Ren, C., Brousse, O., Martilli, A., Neophytou, M., Mouzourides, P., Stewart, I., Hanna, A., Ng, E., Foley, M., Alexander, P., Aliaga, D., Niyogi, D., Shreevastava, A., Bhalachandram, S., Masson, V., Hidalgo, J., Fung, J., de Fatima Andrade, M., Baklanov, A., Wei Dai, D., Milcinski, G., Demuzere, M., Brunzell, N., Pesaresi, M., Miao, S., Chen, F. (2018). World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT), an urban weather, climate and environmental modeling infrastructure for the Anthropocene. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(9), 1907–1924.

- Chouillou Delphine (2018). La qualité environnementale urbaine : prendre en compte les représentations et les pratiques sociales des habitants dans la fabrique urbaine, l'exemple toulousain. Thèse Université Jean Jaurès.
- Morgane Colombert, J.L. Salagnac, Denis Morand, Youssef Diab. Le climat et la ville : la nécessité d'une recherche croisant les disciplines. *VertigO : La Revue Électronique en Sciences de l'Environnement*, VertigO, 2012, pp.73-94. (hal-00941956)
- Conreaux-Mantzias L & Faucher H. (2018). Orientations et outils de gestion de la consommation d'espace au plan national. In *Annales des Mines-Responsabilité et environnement* (No. 3, 29-33). FFE
- Crombette, P., Le Corre, S., and Tinel, C. (2014). Traitement d'images satellitaires à Très Haute Résolution Spatiale et identification de zones à enjeux dans l'aménagement des Trames Vertes urbaines, *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, p. <http://www.sfpt.fr/rfpt/index.php/RFPT/article/view/130>, <https://hal-univ-tlse2.archives-ouvertes.fr/hal-01140009>
- Bernard Cros, Pierre Durand, Hélène Cachier, Drobinski Philippe, Emeric Fréjafon, et al.. The ESCOMPTE Program: an overview. *Atmospheric Research*, Elsevier, 2004, 69 (3-4), pp.241-279. 10.1016/j.atmosres.2003.05.001. hal-00136317
- Dabberdt, W., Frederick, G., Hardesty, R., Lee, W.C., Underwood, K. (2004). Advances in meteorological instrumentation for air quality and emergency response [En ligne]. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 87, 57–88. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s00703-003-0061-8> [Consulté le 15 juin 2020].
- Daniel, M., Lemonsu, A., Déqué, M., Somot, S., Alias, A., Masson, A. (2019). Benefits of explicit urban parameterization in regional climate modeling to study climate and city interactions [En ligne]. *Climate dynamics*, 52(5–6), 2745–2764. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4289-x> [Consulté le 15 juin 2020].
- Debrye L., Dumas G., Edouart V., Haouès-Jouve S., Hidalgo J., Touati N, Salvi I, Roques G. (2020). Prise en compte du climat dans la construction de la Métropole de demain. Guide de Recommandations. Toulouse Métropole- LISST.
- Desjardins X., 2011. Pour l'atténuation du changement climatique, quelle est la contribution possible de l'aménagement du territoire. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Aménagement, Urbanisme, document 523, mis en ligne le 22 mars 2011. URL : <http://cybergeo.revues.org/23531> ; DOI : 10.4000/cybergeo.23531
- Dumas G., Masson V., Louit G., Hidalgo J., Edouart V., Hanna A., Poujol G. and Barrié F. (2020). A real-time atmospheric measurement network : The first phase of urban climate services in Toulouse, *Climate Services*, 24, 100274, doi:10.1016/j.cliser.2021.100274
- Dumas G, (2017). Conception et mobilisation des cartographies des « Zones Climatiques Locales », entre recherche en climatologie urbaine et métiers de l'urbanisme. Mémoire de Master 2 Villes Habitat et Transition Ecologique (VIHATE) 2016-17
- Dupont E., L. Menut, B. Carissimo, J. Pelon and P.H. Flamant, (1999). Comparison between the atmospheric boundary layer in Paris and its rural suburbs during the ECLAP Experiment, *Atmospheric Environment*, 33, 979-994.
- Fagan-Watson, B., Burchell, K. (2016). Heatwave planning: community involvement in co-producing resilience. *Building Research & Information*, 44(7), 754–763.
- Fischer, L. (2009). Phénomènes radiatifs et îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Strasbourg, *Revue Géographique de l'Est* [En ligne], vol. 45 / 2 | 2005, mis en ligne le 10 juin 2009, consulté le 12 janvier 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rge/473> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rge.473>

- Garuma, G.F. (2018). Review of urban surface parameterizations for numerical climate model [En ligne]. *Urban Climate*, 24, 830–851. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.006> [Consulté le 15 juin 2020].
- Glossary of Terms for Thermal Physiology 2003. *Journal of Thermal Biology* 28, 75-106
- Graham, A., Mitchell, C.L. (2016). The role of boundary organizations in climate change adaptation from the perspective of municipal practitioners. *Climatic Change*, 139(3), 381–395.
- Grafakos, S., Viero, G., Reckien, D., Trigg, K., Viguie, V., Sudmant, A., Graves, C., Foley, A., Heidrich, O., Mirailles, J., Carter, J., Chang, L., Nador, C., Liseri, M., Chelleri, L., Orru, H., Orru, K., Aelenei, R., Bilska, A., Pfeiffer, B., Lepetit, Q., Church, J., Landauer, M., Gouldson, A., Dawson, R. (2020). Integration of mitigation and adaptation in urban climate change action plans in Europe: A systematic assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121(109623).
- Groleau (1998). Solene, Guide d'utilisation. CERMA, 62 p
- Groleau, D. (2000). SOLENE un outil de simulation des éclaircements solaires et lumineux dans les projets architecturaux urbains. Document technique.
https://groupes.renater.fr/wiki/solenetb/_media/public/solene/artepa99.pdf
- Goldreich, Y. (2003). *The Climate of Israel: Observation, Research and Application*. Springer New York.
- Groot, A.M.E., Bosch, P.R., Buijs, S., Jacobs, C.M.J., Moors, E.J. (2015). Integration in urban climate adaptation: Lessons from Rotterdam on integration between scientific disciplines and integration between scientific and stakeholder knowledge. *Building and Environment*, 83, 177–188.
- Hamdi, R., Van deVyver, H., De Troch, R., Termonia, P. (2014). Assessment of three dynamical urban climate downscaling methods: Brussels's future urban heat island under an A1B emission scenario. *International Journal of Climatology*, 34 (4), 978–999.
- Hamdi, R., Duchêne, F., Berckmans, J., Delcloo, A., Vanpoucke, C., Termonia, P. (2016). Evolution of urban heat wave intensity for the Brussels Capital Region in the ARPEGE-Climat A1B scenario. *Urban Climate*, 17, 176–195.
- Hauouès-Jouve S, Lemonsu A, Gauvreau B, Amossé A, Can A, Carissimo B, Gaudio N, Hidalgo J, Lopez-Rieux CX, Chouillou D, Richard E, Adolphe L, Berry-Chikhaoui I, Bouyer J, Challéat S, de Munck C, Dorier E, Guillaume G, Hoonart S, Le Bras J, Legain D, Levy J-P, Masson V, Marry S, Nguyen-Luong D, Rojas Arias J-C, Gao Z (2021). EUREQUA project : an interdisciplinary and participative approach to assess urban environmental quality. *Environment and Planning B : Urban Analytics and City Science*, doi : 10.1177/23998083211037350
- Hatvani-Kovacs, G., Bush, J., Sharifi, E., Boland, J. (2018). Policy recommendations to increase urban heat stress resilience. *Urban Climate*, 25, 51–63.
- Hebbert, M., Mackillop, F. (2013). Urban Climatology Applied to Urban Planning: A Postwar Knowledge Circulation Failure. *International Journal of Urban and Regional Research*, 37, 1542–1558.
- Heidrich, O., Dawson, R.J., Reckien, D., Walsh, C.L. (2013). Assessment of the climate preparedness of 30 urban areas in the UK. *Climatic Change*, 120, 771–784.
- Hidalgo J., Pigeon G., Masson M. (2008a). Urban-Breeze Circulation during the CAPITOUL Experiment: Experimental Data Analysis Approach. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102 (3-4), 223-241
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00703-008-0329-0>
- Hidalgo, J., Masson V., and Pigeon G., (2008b). Urban-breeze circulation during the CAPITOUL experiment : Numerical approach. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4), 243-262

- Hidalgo, J., Haouès-Jouve, S., Medhbi, Z., Bretagne, G., Guilouhfi, J., Lau, K., Moure, T., Ng, E., Van-Hammers, H. (2018a). Initiating climatic awareness in urban planning practices through participatory action research. *Cities and climate change science conference*, Edmonton, Canada.
- Hidalgo, J., Dumas, G., Masson, V., Petit, G., Bechtel, B., Bocher, E., Foley, M., Schoetter, R. and Mills, G. (2018b) Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations *Urban Climate* 27p. 64-89
- Hidalgo, J. and Jouglu, R. (2018c). On the use of local weather types classification to improve climate understanding: An application on the urban climate of Toulouse *PLoS ONE* 1312
- Hidalgo, J., Lemonsu, A., Masson, V. (2019). Between progress and obstacles on urban climate interdisciplinary studies and knowledge transfer to society. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1), 5–18.
- Hintz, M.J., Luederitz, C., Lang, D.J., Wehrden, H. (2018). Facing the heat: A systematic literature review exploring the transferability of solutions to cope with urban heat waves. *Urban Climate*, 24, 714–727.
- Horsfall, T.C. (1904). *Improvement of the dwellings and surroundings of the people: the example of Germany*. Manchester University Press, Manchester.
- IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- INVS, (2010) actualisation (2109) Impacts sanitaires du changement climatique en France Quels enjeux pour l'InVS ? <https://www.santepubliquefrance.fr/>
- Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhes, J., Hilal M. and Wavresky, P. (2010) Les types de climats en France, une construction spatiale, *Cybergeo : European Journal of Geography* URL : <http://cybergeo.revues.org/23155> ; DOI : 10.4000/cybergeo.23155
- Kanda, M. (2006). Progress in the scale modeling of urban climate: Review [En ligne]. *Theor. Appl. Climatol.*, 84, 23–33. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0141-4> [Consulté le 15 juin 2020].
- Kassner, C., Vortrage, S. (dir.) (1910). *Die meteorologische Grundlagen des Stadtebaues [The meteorological basics of city planning]*. Ernst und Sohn, Berlin.
- Kastendeuch P.P., Najjar G., Lacarrere P., Colin J., 2010 : Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg. *Climatologie*, 7, 21-36.
- Kohler M., Tannier C., Blond N., Clappier A. (2017), Can urban-sprawl countermeasures create energy-efficient cities? A case study of the Strasbourg-Kehl urban region, France-Germany. In: *Urban Climate*. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2016.12.006>
- Kohler M., Blond N., Clappier A. (2016), A city-scale degree-day method to assess building space heating energy demands in Strasbourg Eurometropolis (France). In: *Applied Energy*, 184, 40:54. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.075>.
- Kratzer, A. (1937). *Das Stadtklima [City climate]*. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- Kraucunas, I., Clarke, L., Dirks, J., Hathaway, J., Hejazi, M., Hibbard, K., Huang, M., Jin, C., Kintner Meyer, M., Van Dam, K., Leung, R., Li, H. Y., Moss, R., Peterson, M., Rice, J., Scott, M., Thomson, A., Voisin, N., West, T.

Menut TOME II - Volume de travaux inédits

- (2015). Investigating the nexus of climate, energy, water, and land at decision-relevant scales: the Platform for Regional Integrated Modeling and Analysis (PRIMA). *Climatic Change*, 129(3–4), 573–588.
- Kusaka, H. (2008). Recent Progress on Urban Climate Study in Japan. *Geographical Review of Japan* [En ligne], 81(5), 361–374. Disponible à l'adresse : <http://doi.org/10.4157/grj.81.361>
- Kusaka, H., Hara, M., Takane, Y. (2012). Urban Climate Projection by the WRF Model at 3-km Horizontal Grid Increment: Dynamical Downscaling and Predicting Heat Stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya Metropolises. *Journal of the Meteorological Society of Japan* [En ligne], 90B, 47–63. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-B04>
- Kwok Y.-T., R. Schoetter, K. Lau, J. Hidalgo, C. Ren, G. Pigeon and V. Masson 2019 : How well does the Local Climate Zone scheme discern the thermal environment of Toulouse (France) ? An analysis using numerical simulation data, *International Journal of Climatology*, published online, doi:10.1002/joc.6140
- Lac C., J.-P. Chaboureau, V. Masson, J.-P. Pinty, P. Tulet, J. Escobar, M. Leriche, C. Barthe, B. Aouizerats, C. Augros, P. Aumond, F. Auguste, P. Bechtold, S. Berthet, S. Bieilli, F. Bosseur, O. Caumont, J.-M. Cohard, J. Colin, F. Couvreur, J. Cuxart, T. Dauhut, G. Delautier, V. Ducrocq, J.-B. Filippi, D. Gazen, O. Geoffroy, F. Gheusi, R. Honnert, J.-P. Lafore, C. Lebeaupin Brossier, Q. Libois, T. Lunet, C. Mari, T. Maric, P. Mascart, M. Mogé, G. Molinié, O. Nuissier, F. Pantillon, P. Peyrillé, J. Pergaud, E. Perraud, J. Pianezze, J.-L. Redelsperger, D. Ricard, E. Richard, S. Riette, Q. Rodier, R. Schoetter, L. Seyfried, J. Stein, K. Suhre, O. Thouron, S. Turner, A. Verrelle, B. Vié, F. Visentin, V. Vionnet, P. Wautel (2018). Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications, *Geoscientific Model Development*, 11, 1929-1969, doi : 10.5194/gmd-11-1929-2018
- Lambert-Habib, M.L., Hidalgo, J., Fedele, C., Lemonsu, A., Bernard, C. (2013). How is climatic adaptation of cities taken into account by legal tools? – Focus on the introduction of water and vegetation in the French town planning documents. *Urban Climate*, 4, 16–34.
- Lambert M. L., Demazeux C et Gallafrio M. 2017 Fiches-outils: Le PLU(i), Règlement du PLU(i) <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354285v1>
- Lambert M. L., Hidalgo J, Masson V, Bretagne G et Haouès-Jouve S, Urbanisme et (micro-) climat. 2019. Outils et recommandations générales pour les documents de planification. Guide Méthodologique issu du projet MapUCE
- Lambert M. L., et Cobourg-Goze E. 2020. Adapter les territoires au changement climatique: Outils juridiques d'urbanisme et d'aménagement. Territorial Editions
- Lee, T., Painter, M. (2015). Comprehensive local climate policy: The role of urban governance. *Urban Climate*, 14(partie 4), 566–577.
- Lemonsu, A. and Masson V., 2002 : Simulation of a summer urban Breeze over Paris. *Boundary-Layer Meteorol.*, 104, 463-490
- Lemonsu A, Grimmond CSB, Masson V (2004) Simulation of the Energy Budget of an old mediterranean city core. *Journal of Applied Meteorology*, 43:312-327.
- Lemonsu A, Masson V, Pigeon G, Moppert C (2006) : Sea-Town Interactions over Marseille : 3D Urban Boundary Layer and thermodynamic fields near the surface. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1-3),171-178.
- Lemonsu A (2018) Etude du climat urbain pour l'amélioration du cadre de vie et l'adaptation au changement climatique. Habilitation à Diriger les Recherches. Institut Polytechnique de Toulouse.
- Lemonsu A, Amossé A, Gaudio N, Haouès-Jouve S, Hidalgo J, Le Bras J, Legain D, Marchandise S (2019) Comparison of microclimate measurements and perceptions as part of a global evaluation of environmental quality at neighbourhood scale. *International Journal of Biometeorology*, 10.1007/s00484-019-01686-1, in-line first

- Lopez, X., Haouès-Jouve, S., Hidalgo, J., (2015). Integration of urban climate issues in urban planning: reflections on which are the keys of success. *ICUC9*, Toulouse, France.
- Mason, S.G., Fragkias, M. (2018). Metropolitan planning organizations and climate change action. *Urban Climate*, 25, 37–50.
- Masson, V. (2000). A Physically-based scheme for the Urban Energy Budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol.*, 94, 357–397.
- Masson, V. (2006). Urban surface modelling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 35–45.
- Masson V., L. Gomes, G. Pigeon, C. Liousse, V. Pont, J.-P. Lagouarde, J. Voogt, J. Salmond, T. R. Oke, J. Hidalgo, D. Legain, O. Garrouste, C. Lac, O. Connan, X. Briottet, S. Lachéradé, P. Tulet, (2008). The canopy and aerosol particles interactions in toulouse urban layer (CAPITOU) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4), 135-157
- Masson V., P. Le Moigne, E. Martin, S. Faroux, A. Alias, R. Alkama, S. Belamari, A. Barbu, A. Boone, F. Bouyssel, P. Brousseau, E. Brun, J.-C. Calvet, D. Carrer, B. Decharme, C. Delire, S. Donier, K. Essaouini, A.-L. Gibelin, H. Giordani, F. Habets, M. Jidane, G. Kerdraon, E. Kourzeneva, M. Lafaysse, S. Lafont, C. Lebeaupin Brossier, A. Lemonsu, J.-F. Mahfouf, P. Marguinaud, M. Mokhtari, S. Morin, G. Pigeon, R. Salgado, Y. Seity, F. Taillefer, G. Tanguy, P. Tulet, B. Vincendon, V. Vionnet, and A. Voldoire, (2013). The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of Earth surface variables and fluxes, *Geoscientific Model Development*, 6, 929-960,doi:10.5194/gmd-6-929-2013
- Masson, V., Marchadier, C., Adolphe, L., Aguejidad, R., Avner, P., Bonhomme, M., Bretagne, G., Briottet, X., Bueno, B., de Munck, C., Doukari, O., Hallegatte, S., Hidalgo, J., Houet, T., Le Bras, J., Lemonsu, A., Long, N., Moine, M.P., Morel, T., Nologues, L., Pigeon, G., Salagnac, J.L., Zibouche, K. (2014). Adapting cities to climate change: a systemic modelling approach. *Urban Climate*, 10, 407–429.
- Masson V., W. Heldens, E. Bocher, M. Bonhomme, B. Bucher, C. Burmeister, C. de Munck, T. Esch, J. Hidalgo, F. Kanani-Sühring, Y-T Kwok, A. Lemonsu, J.-P. Lévy, B. Maronga, D. Pavlik, G. Petit, L. See, R. Schoetter, N. Tornay, A. Votsis, J. Zeidler, (2020a). City-descriptive input data for urban climate models : Model requirements, data sources and challenges, *Urban Climate*, 31, doi:10.1016/j.uclim.2019.100536
- Masson V., A. Lemonsu, J. Hidalgo, J. Voogt (2020b). Urban Climates and Climate Change, *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 411-444, doi:10.1146/annurev-environ-012320-083623
- Mestayer PG, Durand P, Augustin P, Bastin S, Bonnefond J-M, Bénech B, Campistron B, Coppalle A, Delbarre H, Dousset B, Drobinski P, Druilhet A, Fréjafon E, Grimmond CSB, Groleau D, Irvine M, Kergomard C, Kermadi S, Lagouarde J-P, Lemonsu A, Lohou F, Long N, Masson V, Moppert C, Noilhan J, Offerle B, Oke TR, Pigeon G, Puygrenier V, Roberts S, Rosant J-M, Saïd F, Salmond J, Talbaut M, Voog J (2005) The urban boundary-layer field campaign in Marseille (ubl/clu-escompte) : set-up and first results. *Boundary-Layer Meteorology*, 114:315-365.
- Mhedhbi, Z. 2021 : Construire une expertise climatique locale pour mettre à l'agenda l'adaptation au changement climatique dans la planification et l'aménagement urbains. Le cas du Grand Tunis. Thèse en Urbanisme et Aménagement
- Moloney, S., Fanfgeld, H. (2015). Emergent processes of adaptive capacity building: Local government climate change alliances and networks in Melbourne. *Urban Climate*, 14(partie 1), 30–40.
- Najjar G., Kastendeuch P.P., Stoll M.-P., Colin J.R., Nerry F., Ringenbach N., Bernard J., De Hatten A., Luhache R. et Viville D., 2004 : Le projet Reclus, télédétection, rayonnement et bilan d'énergie en climatologie urbaine à Strasbourg. *La Météorologie*, 46, 44–50.

- Ng E., & Ren C. (2015). *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*. Routledge.
- Ng, E., Ren, C. (2018). China's adaptation to climate & urban climatic changes: A critical review. *Urban Climate*, 23, 352–372.
- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J. (2017). *Urban Climate*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Olazabal, O., De Gregorio Hurtado, S., Olazabal, E., Pietrapertosa, F., Salvia, M., Geneletti, D., D'Alonzo, V., Feliú, E., Senatro Di Leo, Reckien, D. (2014). How are Italian and Spanish cities tackling climate change? A local comparative study. *BC3 Working paper series*, 03.
- Onur, A.C., Tezer, A. (2015). Ecosystem services based spatial planning decision making for adaptation to climate changes. *Habitat International*, 47, 267–278.
- Pigeon G., A. Lemonsu, J. Barrié, V. Masson, and P. Durand, 2006 : Urban thermodynamic Island in a coastal City analyzed from an Optimized Surface Network. *Boundary- Layer Meteorol.*, 120, 315-351
- Pigeon G., A. Lemonsu, V. Masson, 2008 : Fiches climatiques des stations capitoul. *Projet Formes urbaines, modes d'habiter et climat urbain dans le périurbain toulousain*.
- Pisello, A.L. (2017). State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities. *Solar Energy*, 144, 660–680.
- Hervé Quénot. *Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique*. Géographie. Université Rennes 2, 2011
- Reckien, D., Flacke, J., Dawson, R., Heidrich, O., Olazabal, M., Foley, A., Hamann, J.P., Orru, H., Salvia, M., De Gregorio Hurtado, S., Geneletti, D., Pietrapertosa, F. (2014). Climate change response in Europe: what's the reality? Analysis of adaptation and mitigation plans from 200 urban areas in 11 countries. *Climatic Change*, 122, 331–340.
- Reckien, D., Salvia, M., Pietrapertosa, F., Simoes, S., Olazabal, M., Hurtado, S.D.G., Geneletti, D., Lorencová, E.K., D'Alonzo, V., Krook-Riekkola, A., Fokaides, P., Ioannou, B., Foley, A., Orru, H., Orru, K., Wejs, A., Flacke, J., Church, J., Feliu, E., Vasilie, S., Nador, C., Matosović, M., Flamos, A., Spyridaki, N.A., Balzan, M., Fülöp, O., Grafakos, S., Paspaldzhiev, I., Heidrich, O. (2019). Dedicated versus mainstreaming approaches in local climate plans in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 948–959.
- Richard E., Colombert M., Bertrand F., Lefranc M. et Eddazi F. 2018. Documents d'urbanisme et enjeux énergie-climat : quelles possibilités d'intégration ? . *Revue Internationale d'Urbanisme, APERAU*
- Rumbach, A. (2016). Decentralization and small cities: Towards more effective urban disaster governance?. *Habitat International*, 52, 35–42.
- Ryan, D. (2015). From commitment to action: a literature review on climate policy implementation at city level. *Climatic Change*, 131(4), 519–529.
- Sarzynski, A. (2015). Public participation, civic capacity, and climate change adaptation in cities. *Urban Climate*, 14(partie 1), 52–67.
- Shooshtarian, S., Rajagopalan, P., Sagoo, A. (2018). A comprehensive review of thermal adaptive strategies in outdoor spaces. *Sustainable Cities and Society*, 41, 647–665.
- Schoetter R., Masson V., Bourgeois A., Pellegrino M., Lévy J.-P., 2017. Parametrisation of the variety of human behaviour related to building energy consumption in the Town Energy Balance (SURFEX-TEB v.8.2). *Geosci. Model Dev.*, 10, 2801-2831

- Soto, D., Renard, F., et Emmanuel Thimonier-Rouzet (2015). Premières réflexions sur la préfiguration d'un observatoire lyonnais du climat, *EchoGéo* [En ligne], 34 <http://echogeo.revues.org/14377> ; DOI : 10.4000/echogeo.14377
- Stavropoulos-Laffaille X, Chancibault K, Andrieu H, Lemonsu A, Masson V (2017) Validation hydrologique d'un modèle hydro-microclimatique urbain (TEB-Hydro) : analyse de sensibilité sur le bassin versant de Rezé (Nantes, France), *La Houille Blanche*, 3:14-21
- Stewart, I.D., Oke, T.R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 1879–1900.
- Stock, P. (1992). Climatic classification of town areas. Dans *Planning applications of urban and building climatology*, Hörschele, K. (dir.). Institut für Meteorologie und Klimaforschung – Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 16. P168-177
- Stock, P., Beckröge, W. (1985). Klimaanalyse Stadt Essen. KVR, PO15, Planungshefte Ruhrgebiet, Essen.
- Tanaka, T., Ogasawara, T., Koshi, H., Yoshida, S. (2009). Urban environmental climate maps for supporting urban-planning related work of local governments in Japan: Case studies of Yokohama and Sakai. *ICUC7*, Yokohama, Japon.
- Thibaud, J.P. (2018). Vers une écologie ambiante de l'urbain [En ligne]. *Environnement Urbain*, 13. Disponible à l'adresse : www.erudit.org/fr/revues/eue/2018-v13-eue04046/1052702ar/ [Consulté le 5 octobre 2020].
- Tornay N., R. Schoetter, M. Bonhomme, S. Faraut, A. Lemonsu and V. Masson 2017. GENIUS: A methodology to define a detailed description of buildings for urban climate and building energy consumption simulations, *Urban Climate*, 10, 75-93, doi:10.1016/j.uclim.2017.03.002
- Touati, N., Gardes, T. and J. Hidalgo. A GIS plugin to model the Urban Heat Island from urban meteorological networks, *Urban Climate*, 34, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100692>
- Touchard O., Sinda Haouès-Jouve, Julia Hidalgo et Bretagne G. 2020 Kit des données clés de l'adaptation. Diagnostiquer l'adaptation au changement climatique dans les documents d'urbanisme. ADEME. <https://www.ademe.fr/kit-donnees-cles-ladaptation>
- UCCRN (2011). *Climate change and cities (first assessment report of the Urban Climate Change Research Network)*. Cambridge University Press, Cambridge.
- UN (2011). *Cities and climate change: UN-Habitat global report on human settlements*. Earthscan, Londres.
- Vairet T., 2020 These. Sensibilité d'un modèle de climat à la forme urbaine. Application sur Dijon Métropole
- Van der Linden S., (2015). The social-psychological determinants of climate change risk perceptions: Towards a comprehensive model. *Journal of Environmental Psychology*, vol. 41, p. 112-124.
- Webb, B. (2017). The use of urban climatology in local climate change strategies: a comparative perspective. *International Planning Studies*, 22(2), 68–84.
- WMO (2017). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Part II, chapters 9 and 10 [En ligne]. Disponible à l'adresse : www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf [Consulté le 15 juin 2020]
- WMO (2019). Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environment Services. Volume I: Concept and Methodology. WMO-No.1234.

Menut TOME II - Volume de travaux inédits

Živojinović, I., Wolfslehner, B. (2015). Perceptions of urban forestry stakeholders about climate change adaptation – A Q-method application in Serbia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4), 1079–1087.

Tables

1. Table des figures et des tables

Figure 1. Schéma illustrant, l'îlot de chaleur urbain, défini comme l'élévation relative de la température de l'air dans les zones urbanisées par rapport aux zones moins urbanisées environnantes. Exemple de la région parisienne (Source : Aude Lemonsu, CNRM, Météo France)

Figure 2. Types de zones climatiques locales définies par Stewart and Oke (2012)

Figure 3. Exemple de carte d'analyse pour l'îlot de chaleur urbain à Toulouse (source : BD-Mapuce (2015), données climatiques (CNRM, LISST, 2018), Toulouse Métropole (2018), conception cartographique : N. Touati, J. Hidalgo, LISST (2020))

Figure 4. Application de cartes climatiques dans la planification urbaine (d'après (Hidalgo et al. 2019)). Les couleurs indiquent le nombre de villes par pays qui ont mené des études en s'inspirant de cette lignée de travaux cartographiques. Le tableau correspond à la date de la première étude publiée pour chaque ville

Figure 5. Illustration de l'évolution disciplinaire de l'objet d'étude climat urbain avec une référence non exhaustive aux disciplines impliquées

Figure 6. Composition générique d'un Plan Local d'Urbanisme (Source : Luc Moreau, DDT49)

Figure 7. Les rubriques relatives au climat urbain dans les démarches labellisées d'éco-conception (Source : Delphine Chouillou, 2018)

Figure 8. Les trois degrés de la relation juridique en urbanisme (Source : Luc Moreau, DDT49). La conformité impose la retranscription à l'identique de la règle, son respect à la lettre. La compatibilité implique de respecter l'esprit de la règle. La prise en compte induit de ne pas s'écarter de la règle

Figure 9. Périmètre thématique du panorama des recherches en climatologie urbaine présenté dans ce chapitre

Figure 10. Déploiement expérimental pendant les campagnes ECLAP (haut à gauche), CAPITOUL (haut à droite) et MEGAPOLI (en bas). Sources : Menut et al., 2000, Masson et al. 2008, Baklanov et al. 2013

Figure 11. Réseaux pérennes d'observation de Dijon, Toulouse et Rennes respectivement

Figure 12. Observation et caractérisation de la végétation urbaine à partir de moyens de télédétection

Figure 13. Description du protocole instrumental pendant le projet EUREQUA. Structure portable pour les mesures de micrométéorologie (à gauche) et enquête itinérante (à droite) (source : Lemonsu et al. 2019)

Figure 14. Diverses représentations de la température de l'air pendant la campagne CAPITOUL. En haut à gauche, l'évolution journalière de la température de l'air sur différentes zones urbaines à partir de stations météorologiques. En haut à droite, évolution spatiale de la température de l'air à partir de transects d'avion. En bas, spatialisation de la température de l'air à partir de mesures de stations météorologiques (Source : Hidalgo et al. 2008 ; Toutai et al. 2020)

Figure 15. Exemple de données d'entrée (positionnement des données de la température de l'air, topographie, fraction urbaine) et résultat de la spatialisation via le plug-in développé par Touati et al. (2020)

Figure 16. A gauche, exemple d'interface du modèle SOLENE pour le calcul de l'ensoleillement et à droite exemple de simulation d'image de radiométrie en bleu/blanc/rouge à partir du modèle DART (Sources : Groleau, 2000 et site web du modèle DART)

Figure 17. A gauche schéma de présentation du modèle Méso-NH couplé à SURFEx. A droite les différentes paramétrisations physiques prises en compte dans le modèle urbain TEB (Source : Foucart, 2019 ; Météo-France)

Figure 18. Le modèle conceptuel de données du plan local d'urbanisme est décrit ici à l'aide du formalisme UML¹²¹

Figure 19. Carte d'analyse climatique urbaine basée sur le VDI 3787-Part 1 montrant les zones correspondantes et les pourcentages de chaque climatope par rapport à la surface totale de Toulouse Métropole

Figure 20. Carte des zones climatiques locales (LCZ) groupées de la Métropole toulousaine et les pourcentages de surface pour chaque groupe de LCZ

Figure 21. Carte synthétique et corrélations spatiales entre les climatopes et les LCZ.

Figure 22. Proportion de LCZs dans les différents climatopes

Figure 23. Distribution de la température de l'air modélisée, Tair, à 2 m au-dessus du sol pour différents climatopes au cours de la nuit

Figure 24. Cartes climatiques à partir de données de simulation d'îlot de chaleur urbain nocturne pour Toulouse Métropole. En haut à gauche, carte d'analyse avec une présentation pixelisée ; en haut à droite carte de zones à enjeux à base de croquis ; en bas carte à l'échelle communale où l'information climatique a été projetée sur l'îlot urbain. (Réalisation cartographique : Najla Touati et moi-même pour les deux premières cartes ; Arnaud Mayis de l'aua/T avec l'appui du LISST pour la dernière)

Figure 25. Analyse statistique (clusterisation PAM) de la forme spatiale de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour le panel de villes du projet ANR-MApUCE (Source : Suher, 2021)

Figure 26. Carte de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour Orleans et pour les autres villes du groupe 1 (Source : Suher, 2021)

Figure 27. Carte de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour Metz et pour les autres villes du deuxième groupe en intensité et étendue de l'îlot de chaleur urbain (Source : Suher, 2021)

Figure 28. Carte de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour Lorient et pour les autres villes du troisième groupe en intensité et étendue de l'îlot de chaleur urbain (Source : Suher, 2021)

Figure 29. Carte de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour Toulon et pour les autres villes du dernier groupe en termes d'intensité et étendue de l'îlot de chaleur urbain (Source : Suher, 2021)

Figure 30. La première table de chorèmes proposée par Brunet (1986)

Figure 31. Modèle d'îlot de chaleur urbain (UHI) étape 1 : les structures de base (Source : Jegou et al. 2021)

Figure 32. Étapes 2 et 3 du modèle d'îlot de chaleur urbain : modificateurs et structures dérivées (Source : Jegou et al. 2021 ; réalisation, Najla Touati)

Figure 33. Dernière étape du modèle d'îlot de chaleur urbain : adaptation à la forme générale de l'agglomération toulousaine. (Source : Jegou et al. 2021)

¹²¹ Langage de Modélisation Unifié, de l'anglais *Unified Modeling Language* (UML), est un langage de modélisation graphique à base de pictogrammes conçu comme une méthode normalisée de visualisation dans les domaines du développement logiciel et en conception orientée objet.

Figure 34. Dernière étape du modèle d'îlot de chaleur urbain : adaptation à la forme générale de l'agglomération toulousaine. (Source : Jegou et al. 2021)

Figure 35. Modèles graphiques de recommandations pour l'îlot de chaleur nocturne (à gauche) et le niveau de stress thermique diurne (à droite). (Source : Jegou et al. 2021)

Figure 36. Représentation chorématique de l'analyse de l'ICU de Metz

Figure 37. Représentation chorématique des recommandations pour la gestion de l'ICU de Metz

Figure 38. Emplacements des principaux toponymes cités dans la présente étude

Figure 39. Échelles spatiales utilisées dans le projet MApUCE : a) bâtiment, b) bloc et c) îlot, également appelé unité spatiale de référence (source : Hidalgo et al., 2018b)

Figure 40. Typologies de bâtiment et zones climatiques locales de la métropole toulousaine. Sources : BDMApUCE en 2015, une classification proposée par Dumas et Hidalgo s'appuyant sur la base de données MApUCE en 2017, Stewart et Oke (2012), et IGN ©, 2017

Figure 41. (A) Type de temps sensible 7 : jour typique d'été bien ensoleillé avec vent de sud-est. La température peut atteindre les 40 °C. Il est caractérisé par une grande amplitude thermique entre le jour et la nuit et un vent de sud-est persistant mais faible (2 m s⁻¹ le matin, 3,5 m s⁻¹ dans l'après-midi et 2,5 m s⁻¹ le soir). (B) Type de temps sensible 8 : jour typique d'été bien ensoleillé avec vent de nord-ouest. Bien que présent aussi pendant les autres saisons, il s'agit du type de temps sensible le plus fréquent en été. La température reste relativement élevée en été, la température maximale est de 30 °C, mais elle est plus douce que dans le TTS 7. Le vent de nord-ouest peut être relativement fort et humide, avec des pics de 4 m s⁻¹ dans l'après-midi. (C) TTS 9 : jour ensoleillé, très chaud en été, avec un vent de nord-ouest. Ce type de temps est très courant. En été, la température peut grimper jusqu'à 40 °C. Le vent souffle d'ouest le matin à nord-ouest l'après-midi, puis sud-ouest dans la soirée. La vitesse du vent varie elle aussi entre 2 m s⁻¹ le matin, 4 m s⁻¹ en milieu de journée et 2 m s⁻¹ à nouveau en fin de journée. Ce type de situation météorologique est très favorable à la formation d'un îlot de chaleur nocturne intense. (T fait référence à la température de l'air, RR aux précipitations, HU à l'humidité relative et FF à la vitesse du vent)

Figure 42. Domaines de simulation (gauche) et zoom sur le domaine à plus haute résolution (D4, 250 m, droite)

Figure 43. Échelle d'intervalles pour l'UTCI (Universal Thermal Climate Index) en termes de stress thermique. Échelle d'intervalles proposée par l'Action COST 730 (droite ; UTCI, 2003). Proposition d'échelle d'intervalles utilisée dans cette étude (gauche).

Figure 44. Carte d'analyse de l'indicateur de stress thermique (UTCI) en journée à partir de simulations numériques pour la situation météorologique type (TTS 9) la plus favorable à la formation d'un îlot de chaleur urbain (ICU) fort en été

Figure 45. Carte d'exposition aux niveaux de stress thermique diurne des emplois privés

Figure 46. Les cartes d'analyse thématique du vent en journée pour les TTS 7, TTS 8 et TTS 9 : les discontinuités spatiales de la vitesse moyenne du vent (gauche), le ratio de vitesse (partie supérieure droite) et l'analyse de la fréquence de la combinaison direction/vitesse du vent (partie inférieure droite)

Figure 47. Carte d'analyse de l'indicateur ICU à l'aide de simulations numériques du type de temps sensible le plus favorable à la formation de ce phénomène en été (TTS 9)

Figure 48. Carte indiquant la densité de population et les niveaux d'exposition aux ICU du TTS 9, qui correspond à un temps d'été ensoleillé avec un vent faible orienté ouest-nord-ouest

Figure 49. Les cartes d'analyse thématique du vent la nuit pour (a) le TTS 7, (b) le TTS 8 et (c) le TTS 9 représentent les discontinuités spatiales de la vitesse moyenne du vent (gauche), le ratio de vitesse (partie supérieure droite) et l'analyse de la fréquence de la combinaison direction/vitesse du vent (partie inférieure droite)

Figure 50. Cartes des zones à enjeux en fonction du niveau de stress thermique diurne et du vent et de l'ICU nocturne et du vent

Figure 51. Couverture et première de couverture du Guide de recommandations édité par Toulouse Métropole à destination de ses services et des personnels en charge de la planification et de l'aménagement urbains intitulé « Prise en compte du climat dans la construction de la métropole de demain »

Figure 52. Analyse climatique de Berlin (vue générale, échelle 1/265 000 ; source : Senate Department for Urban Development and the Environment, Environmental Atlas)

—

Table 1. Exemple de leviers d'action face au risque de températures extrêmes en milieu urbain

Table 2. Synthèse des objectifs du Schéma de cohérence territoriale (SCOT) et du Plan local d'urbanisme intercommunal (PLU(i))

Table 3. Contenu réglementaire d'un PCAET (Source : <http://www.occitanie.developpement-durable.gouv.fr/quel-est-son-contenu-r8335.html>)

Table 4. Documents d'aide à l'intégration des enjeux climat-énergie dans les documents d'urbanisme avec une focale adaptation et prise en compte des enjeux microclimatiques locaux issus du projet MAPUCE

Table 5. Responsabilités des collectivités territoriales en matière d'urbanisme (source : Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales)

Table 6. Résumé des moyens et objectifs techniques en lien avec la gestion du risque de températures extrêmes en milieu urbain dans le Schéma de Cohérence territoriale (SCOT)

Table 7. Résumé des moyens et objectifs techniques en lien avec la gestion du risque de températures extrêmes en milieu urbain dans le Plan Local d'Urbanisme Intercommunal (PLUi)

Table 8. Premiers éléments du tableau d'éléments libellés « InformationUrbaType » dans le Standard PLU V2017

Table 9. Caractéristiques de la journée la plus représentative de chaque type de temps sensible (TTS). Les fréquences sont fournies en base annuelle et par saison et les types de temps sensibles sont répertoriés par ordre de fréquence. Les caractéristiques des principales variables météorologiques (température et humidité de l'air, vent et précipitations) sont également présentées. Pour les directions du vent, les abréviations suivantes sont utilisées : ouest (O), nord-ouest (NO), nord-est (NE) et sud-est (SE)

2. Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 5 |
| Partie I- Climat urbain : agenda et perspectives d'un risque climatique..... | 9 |
| Introduction. Un sujet de recherche internationalisé et interdisciplinaire..... | 9 |
| 1. Quelle définition pour le climat urbain ?..... | 9 |
| 2. Des risques composites définis par le changement climatique et le climat urbain..... | 9 |
| 3. Internationalisation et interdisciplinarité, deux marques de la climatologie urbaine aujourd'hui..... | 11 |
| Chapitre 1 : Rendre opérationnel le savoir en climatologie urbaine, un enjeu d'actualité..... | 12 |
| 1. Articuler production de connaissances et besoins opérationnels..... | 12 |
| 1.1 Un intérêt ancien mais ténu, allant croissant..... | 12 |
| 1.2 Quelques obstacles à cette articulation..... | 12 |
| 1.3 La mise en agenda du changement climatique, une fenêtre d'opportunité pour lever certains obstacles..... | 13 |
| 2. Des outils pour faciliter la gestion et les applications..... | 14 |
| 2.1 Les grandes lignes d'un horizon de recherche appliquée..... | 14 |
| 2.2 Multiplication des efforts d'intégration entre savoirs climatiques et urbanistiques..... | 15 |
| 2.3 Un point sur les outils cartographiques..... | 16 |
| 3. Les difficultés de l'opérationnalisation du savoir autour du risque climatique urbain..... | 19 |
| 3.1 L'échelle d'intervention..... | 19 |
| 3.2 Le poids de la segmentation disciplinaire, entre recherche et action..... | 20 |
| 3.3 Les vertus des processus ascendants : montée en compétences et diffusion interservices. | 21 |
| 4. Discussion : Rétroaction des savoirs du local vers le global..... | 22 |
| Synthèse de la PARTIE I..... | 25 |
| | 26 |
| Partie II – Nouvelles injonctions réglementaires et recherche en climatologie urbaine en France...27 | |
| Chapitre Premier : panorama du cadre réglementaire sous l'angle de l'adaptation à la hausse des températures..... | 27 |
| 1. La planification spatiale réglementaire..... | 27 |
| 2. La planification énergétique et climatique :..... | 29 |
| 3. Les documents méthodologiques d'aide à l'intégration des enjeux climat-énergie dans les documents d'urbanisme..... | 32 |
| 4 L'intégration progressive des enjeux climatiques dans la planification spatiale réglementaire | 34 |
| 5. Discussion..... | 41 |
| Chapitre 2 : Les recherches en climatologie urbaine en France en 2021 : des recherches fondamentales à la climatologie urbaine appliquée..... | 43 |
| 1. Contours et motivation de cet état de l'art..... | 43 |
| 1.1. Motivation :..... | 43 |
| 1.2. Objectifs :..... | 43 |
| 1.3. Délimitation thématique et parti pris :..... | 43 |
| 2. Une recherche en climatologie urbaine qui s'installe en France dans les années 1990 à 2000 | 46 |
| 3. Des études à l'échelle du quartier pour étudier avec précision une multiplicité de sujets en lien avec le microclimat..... | 48 |
| 4. De l'observation aux outils de modélisation..... | 50 |
| 4.1 Les outils de modélisation..... | 51 |
| Synthèse de la PARTIE II..... | 57 |

| | |
|---|-----|
| | 58 |
| Partie III: Une contribution aux recherches à l'interface entre sciences du climat et l'urbanisme via leur dimension cartographique..... | 59 |
| | 59 |
| Chapitre Premier : Vue d'ensemble des travaux portés sur la cartographie climatique..... | 59 |
| 1. La cartographie à visée opérationnelle est un champ mature pour un certain nombre d'enjeux environnementaux mais c'est un champ de recherche émergeant pour le climat..... | 59 |
| Ministère de l'Équipement, ministère de l'Environnement, Environnement et aménagement : cartes utiles..... | 59 |
| 2. Diverses approches cartographiques été proposées et ont fait leurs épreuves avec Toulouse comme terrain d'application..... | 61 |
| 3. Conclusion..... | 81 |
| Deuxième chapitre : | 82 |
| Cartographier le climat urbain pour la gestion du confort d'été en urbanisme : de l'analyse climatique et la sémiologie graphique aux recommandations..... | 82 |
| 1. Introduction..... | 82 |
| 2. Cadre théorique et méthodologique..... | 84 |
| 3. Représentation du terrain et des données..... | 88 |
| 4. Cartes climatiques pour Toulouse..... | 97 |
| 5. Discussion sur la sémiologie graphique des cartes climatiques..... | 111 |
| 6. Conclusion..... | 113 |
| Synthèse de la PARTIE III..... | 115 |
| Discussion finale..... | 117 |
| Annexe 1 : | 123 |
| Annexe 2 : Discontinuités spatiales de la vitesse moyenne du vent..... | 131 |
| Annexe 3 : Cartes d'analyse du stress thermique diurne pour les types de temps sensibles 7 et 8..... | 132 |
| Annexe 4: Cartes d'analyse de l'îlot de chaleur urbain nocturne pour les types de temps sensibles 7 et 8..... | 134 |
| Bibliographie..... | 137 |
| Tables..... | 147 |
| 1. Table des figures et des tables..... | 147 |
| 2. Table des matières..... | 151 |