Ilot de chaleur, croissance urbaine et climat urbain : simulations sur Dijon Métropole

Thibaut Vairet

▶ **To cite this version:**

Thibaut Vairet. Ilot de chaleur, croissance urbaine et climat urbain : simulations sur Dijon Métropole. Géographie. Université Bourgogne Franche-Comté, 2020. Français. NNT : 2020UBFCH021 . tel-03202040

HAL Id: tel-03202040
https://theses.hal.science/tel-03202040

Submitted on 19 Apr 2021

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.

UNIVERSITE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE

ECOLE DOCTORALE n°594
SOCIETES, ESPACES, PRATIQUES, TEMPS

Laboratoire Théoriser et Modéliser pour Aménager - UMR 6049 CNRS
Laboratoire BIOGEOSCIENCEs, Equipe CRC - UMR 6282 CNRS

THESE

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Bourgogne Franche-Comté

Doctorat de
Géographie

par

Vairet Thibaut

Îlot de chaleur, croissance urbaine et climat urbain

Simulations sur Dijon Métropole

Sous la direction de

THEVENIN Thomas
RICHARD Yves

soutenue le 14 Décembre 2020

devant le jury composé de :

M. HOUET Thomas	Rapporteur
M. MASSON VALÉRY	Rapporteur
M. CANTAT OLIVIER	Examinateur
M. RUAS ANNE	Examinateur
M. SANDERS LENA	Examinateur

Remerciements

Le re-voilà, ce fameux moment, celui qui boucle la boucle : les remerciements !

Je remercie tout d'abord mes deux directeurs de thèse : Thomas Thevenin et Yves Richard pour m'avoir tout simplement permis de réaliser cette thèse. Par leurs soutiens toujours bienveillants et leurs nombreux conseils durant ces années, ils ont tous deux été des éléments majeurs de ce travail.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont accepté de participer à mon jury : Thomas Houet, Valéry Masson, Olivier Cantat, Léna Sanders et Anne Ruas Mes pensées vont aussi à Christine Lac et Anne Puissant pour leur présence, leurs conseils avisés et surtout leur bienveillance.

Je tiens également à remercier les membres des deux laboratoires qui m'ont généreusement accueilli durant ces années de thèse. Je ne compte pas le nombre de rencontre et d'échange que j'ai eu au sein de ces deux labo.

A Thèma, je remercie sincèrement les personnes que j'ai côtoyé presque chaque jours au cours de ma première année, Patrick, Valérie, Jean-Philippe, Yves, Anne, Julie, Benjamin et Cécilia. Mes collègues de besogne à ThéMA qui ont été là. Mes remerciements vont à Christophe avec qui j'ai réalisé mon premier stage en laboratoire sur la numérisation des cartes d'états-majors Cassigny (un très bon souvenir !). Maître Justin pour ses cours, ses conseils, sa présence et sa bonne humeur et les discussions sur l'univers Star Wars qui ont contribué à rendre ma présence à ThèMA mémorable ! Bien sûr, je remercie les autres doctorants pour tous les bons moments passés ensemble : Emilie, Larissa et Georges.

Je remercie également les membres du CRC pour leur accueil dans leur laboratoire et leur bienveillance (Albin, Thierry, Pierre, Benjamin, Olivier et Marie-Charlotte et Mario !). Mes pensées vont aussi Pascal et Nadège, qui grâce au stage de M1 réalisé avec eux, m'ont permis de découvrir le monde de la recherche et à terme de me lancer dans l'aventure qu'est la thèse. Je remercie sincèrement et particulièrement deux personnes pour leur présence, leur aide pour dompter Meso-NH et dans ce travail en général, Julien et Julita, merci à vous deux. Mes pensées vont aussi à mes collègues (ex)doctorants et amis désormais, Pauline et Sèb, Léa, Marc, Papa, Catinca. Enfin, je remercie un istari, qui a été présent tout du long, toujours là pour parler de tout et de rien (mais surtout d'heroic fantasy).

Mes professeurs, tout au long de mon parcours : M.Flatot, M.Jault, M.Paquelin, M.Bonin, Me.Facchinnetti

Je tiens à remercier l'ensemble de mes amis pour leur présence tout au long de cette thèse et m'avoir permis de penser à autre chose autour de nombreux verres, d'une partie de carte ou le temps d'une (ou plusieurs) soirée, Mathieu, Lomens, Léa, Papa, Brendan, Manon, Marie et Rémy, Samantha, nouridine et céline, ... je pense aussi à mes amis de licence et master pour ces années d'études mémorables ! Justine, Bérénice, Mathieu, Yoann, Cédric, Alexandre, Vincent,

Julien, Vincent et Brenoit ainsi qu'une normande dont les histoires du restaurant permettent de penser à autre chose !

Ma famille, sans qui je ne serais tout simplement pas là, qui m'a poussé et toujours permis d'avoir les outils en main pour arriver là. Mes remerciements sincères et profonds à ma Maman, mon Papa, ma Clémence et mon Julien, dit Gerblé, et bien sûr ma Mémé. Leur présence, ainsi que leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours, ont énormément contribué à être ce que je suis actuellement. Je remercie également Jean-Paul et Marie-Claude pour leur relecture avisée. Enfin, une pensée va a Jean-David, Valérie et surtout la petite Andréa et Petitninja21 pour leur soutien.

Enfin, une pensée toute particulière à la personne qui partage ma vie depuis plus de huit années, de New-York au Portugal en passant par le confinement, qui a été la dans chaque moment, avec qui j'ai vécu tellement de choses, et qui a contribué, bien plus qu'elle ne le pense à ce travail. Celle qui a réalisé (et réussi) un autre travail que la thèse, mais tout aussi difficile : vivre avec un thésard. Oui, toi, qui m'a accompagné et encouragé jusqu'au bout (et pour la suite). Merci à toi ma Mélanie.

"When the Nixon Administration took over in 1969 all the data on North Vietnam and on the United States was fed into a Pentagon computer—population, gross national product, manufacturing capability, number of tanks, ships, and aircraft, size of the armed forces, and the like. The computer was then asked, "When will we win the vietnam war ?" It took only a moment to give the answer : "You won in 1964 !" [1]

1. Ringnalda, D., 1994. Fighting and Writing the Vietnam War. University Press of Mississippi, Jackson.

Avant propos

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre d'une thèse financée pour le ministère.

La thèse a été réalisée au sein des laboratoires Théoriser et Modéliser pour Aménager (ThéMA) et de l'équipe du Centre de Recherches de Climatologie (CRC) du laboratoire Biogéosciences.

SOMMAIRE

Introduction générale **1**

Partie I. L'Ilot de Chaleur Urbain : un problème de société **5**

Chapitre I : L'ICU, un phénomène qui s'amplifie ? **6**

1.1 Contextes urbains et climatiques de la climatologie urbaine 7

1.2 Focus sur un composant du climat urbain : le phénomène d'Îlot de Chaleur Urbain 14

1.3 L'ICU, une modification du bilan énergétique en milieu urbain 15

1.4 Synthèse 21

Chapitre II. Lecture multiscalaire de l'urbain et son climat **22**

2.1 De la ville à l'urbain 23

2.2 Présentation des échelles urbaines 24

2.3 ... et leurs relations avec le climat urbain 33

2.4 Synthèse 44

Synthèse Partie I : L'ICU un phénomène complexe **47**

Partie II : L'ICU, le grand oublié ? **50**

Chapitre III. Possibilités d'intégrations de l'ICU dans les documents d'urbanisme réglementaire **51**

3.1 L'atténuation du phénomène d'ICU comme adaptation au changement climatique 52

3.2 Le Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires et le Plan Climat Air Énergie Territoire 55

3.3 Le SCoT, le document adéquat pour intégrer la problématique de l'ICU 57

3.4 Synthèse 64

Chapitre IV : Étude de la croissance urbaine et de l'ICU de Dijon Métropole **65**

4.1 Développement passé et présent de Dijon Métropole 66

4.2 Réseau MUSTARDijon et étude de l'ICU de Dijon Métropole 70

4.3 Politique de croissance urbaine du Dijon Métropole 75

4.4 Synthèse 83

Synthèse Partie II : La nécessité d'intégrer l'ICU dans l'aménagement urbain **84**

Partie III : L'ICU à la croisée des modèles **85**

Chapitre V : Quelle méthodologie pour l'étude de la croissance urbaine et du climat urbain ? **87**

5.1 Relations entre modèles de croissance urbaine et de climat urbain 87

5.2 Quelles méthodes pour évaluer l'impact de l'urbanisation sur l'ICU ? 88

5.3 Proposition d'une méthode pour l'évaluation de l'impact de la croissance urbaine sur les températures urbaines 93

5.4 Synthèse 97

Chapitre VI : Les modèles de climat **98**

6.1 Fonctionnement général des modèles de climat à Méso-échelle 98

6.2 Présentation du modèle de climat urbain SURFEX/TEB 101

6.3 Synthèse 109

Chapitre VII : Quel modèle de croissance urbaine pour être intégré dans un modèle de

climat ? **111**

7.1 Système Multi-Agents ou Automates Cellulaires : quelle approche pour simuler la croissance urbaine ? 111

7.2 Le modèle SLEUTH : un système d'automate cellulaire adéquat pour l'approche "modèle-dépendante" ? 114

7.3 MUP-City : un modèle de croissance urbaine adéquat pour être intégré dans un modèle de climat 115

7.4 Synthèse 117

Synthèse Partie III : Une approche KIDS to KISS pour étudier le climat urbain **118**

Partie IV : Climat urbain et croissance urbaine : vers un urbanisme prospectif **121**

Chapitre VIII : Penser la croissance urbaine à travers les LCZs **122**

8.1 Méthodologie pour la construction de scénarios de croissance urbaine 122

8.2 Loger les habitants, une réalité intemporelle 124

8.3 Création des LCZs à partir des scénarios 128

8.4 Résultats des simulations de croissance urbaine pour Dijon Métropole 137

8.5 Synthèse 141

Chapitre IX : Simulation climatique : paramétrisation et analyse des biais **143**

9.1 Intégration des scénarios de croissance urbaine 144

9.2 Caractérisation des biais de la simulation de contrôle 146

9.3 Sensibilité de la température aux formes urbaines 161

9.4 Synthèse 166

Synthèse Partie IV : Simuler le climat urbain, un outil prospectif urbain majeur **167**

Conclusion générale **169**

Bibliographie **174**

Annexes **195**

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans le contexte de changement climatique et d'urbanisation croissante, la présence du phénomène d'Îlot de Chaleur Urbain (ICU) accentue la vulnérabilité des villes vis à vis des vagues de chaleur (LI et BOU-ZEID 2013). L'ICU peut se définir par la différence de température entre la ville et sa campagne environnante (HOWARD 1820 ; OKE 1982 ; GRIMMOND 2007). La canicule de 2003 a démontré que ce phénomène a des conséquences sociétales et sanitaires majeures, touchant principalement les populations à risques tels que les enfants en bas-âge et les seniors (FILLEUL et al. 2006 ; XU et al. 2013 ; BASU 2009). À la vue de ces enjeux sociétaux, on pourrait s'attendre à ce que l'ICU soit largement connu et considéré par les décideurs lors de leur prise de décision. Or, aucune méthode, à finalité de recherche ou décisionnelle ne permet, à ce jour et de manière simple, de simuler une croissance urbaine spécifique et d'en étudier l'impact sur le climat urbain (LAMBERT-HABIB et al. 2013).

Actuellement, les recherches sur le climat urbain sont présentées sous forme de recommandations ou de guides pratiques à destination des aménageurs qui peuvent s'appuyer, ou non, sur ces documents, lors de l'élaboration de projets urbains (ADEME, APUR, ...). Bien que ces guides et recommandations soient utiles en tant que support à la décision, il ne s'agit que d'informations qualitatives et non obligatoires. Pour accéder à des variables quantitatives, les aménageurs et décideurs peuvent faire appel à des modèles numériques de climat urbain car ces derniers offrent la possibilité de tester différents scénarios d'aménagement (MASSON et al. 2014). Cependant, l'utilisation de modèles de climat urbain et l'étude des ICU requièrent des infrastructures et des compétences importantes (simulations climatiques et super calculateur, réseau de mesures fixes ou mobiles ou encore télédétection) qui sont actuellement à la portée de quelques laboratoires de recherches (HIDALGO, LEMONSU et MASSON 2018).

Associer une forme urbaine et une modification spécifique du climat reste un champ de recherche à explorer. En raison de la complexité des relations entre la croissance urbaine et le climat urbain, peu de travaux présentent des simulations prospectives de croissance urbaine en

relation avec l'étude des ICU (CHRYSOULAKIS et al. 2013 ; MASSON et al. 2014 ; HOUET et al. 2016). Les besoins de formaliser une méthode simple et généralisable pour étudier et intégrer le climat urbain dans les pratiques d'aménagements sont importants. Afin d'apporter une dimension climatique aux processus d'aménagement urbain, ce travail se décline en deux objectifs :

Le premier, d'ordre fondamental, est l'amélioration des connaissances sur les relations entre la forme urbaine et l'ICU ;

Le second est la construction d'une méthode permettant de concilier croissance urbaine et étude climatique en milieu urbain.

Pour répondre à cette double ambition, il s'agit d'élaborer une méthodologie simple, accessible et généralisable. Cette méthodologie est conçue, d'une part, pour les chercheurs afin d'étudier l'influence de différentes formes urbaines sur le climat urbain, notamment l'ICU. À cette fin, différents scénarios de croissance urbaine spatialisés et contrastés seront élaborés sur la base de documents de planification tels que le Schéma de Cohérence Territorial (SCoT). D'autre part, ce dispositif méthodologique s'adresse aux décideurs et aménageurs pour connaître l'impact de leurs futurs aménagements sur le climat urbain, cette démarche pouvant s'inscrire dans les outils de planifications (SCoT, Plan Locaux d'Urbanisme). Dans cette perspective, le protocole méthodologique mis au point dans cette thèse est fondé sur l'association d'un modèle de croissance urbaine et l'emboîtement de plusieurs modèles de climat.

Ce travail se structure en quatre parties. La première présente le contexte général et l'état de l'art relatif aux ICU. Le double contexte, climatique et urbain, est abordé séparément puis conjointement en s'inscrivant dans le champ de la climatologie urbaine. Le phénomène d'ICU est présenté à travers ses temporalités (cycle diurne), ainsi que l'étude du bilan énergétique en milieu urbain. Une grille de lecture multiscalaire du milieu urbain permet de déterminer l'échelle climatique la plus pertinente pour notre étude.

La seconde partie étudie les moyens d'intégrer l'ICU dans les pratiques d'aménagement et présente le terrain d'étude. Pour ce faire, l'atténuation des ICU est vue comme un levier d'adaptation au changement climatique. Puis, la considération du phénomène d'ICU par les décideurs est discutée, ainsi que la possibilité d'intégrer le phénomène d'ICU dans les documents d'urbanisme, à travers l'étude du SCoT. Cette partie s'achève sur la présentation de Dijon Métropole à travers une étude synchronique et diachronique de sa croissance urbaine. Les travaux actuels sur l'ICU au sein de Dijon Métropole (réseau MUSTARDijon), ainsi que la période d'étude (22 au 26 Juillet 2018) et la base de données d'occupation des sols MApUCE sont eux aussi présentés.

La troisième partie permet d'élaborer un protocole standardisé conçu pour étudier les relations entre l'intensité de l'ICU et la croissance urbaine. Un état de l'art des études mêlant ICU et croissance urbaine est exposé. À partir de cette analyse, la méthode "modèle-dépendante" (sélection des modèles numériques puis construction des bases de données en fonction des données d'entrées des modèles) est adoptée. Le fonctionnement des modèles de climat, tant à l'échelle globale qu'à l'échelle urbaine, est présenté. Le modèle atmosphérique régionale Meso-NH (Ver-

sion 5.4.1) est sélectionné. Celui-ci est couplé avec le modèle de climat de surface SURFEX (Version 8.1) et le modèle de climat urbain TEB (Town Energy Balance). Pour clore ce chapitre, un état de l'art des modèles de croissance urbaine est réalisé à travers la géosimulation. Le modèle MUP-City (Version 1.2.2) est sélectionné afin de simuler la croissance urbaine de Dijon Métropole.

La partie IV se focalise sur la mise en place de la méthode élaborée lors de la partie III. Tout d'abord, la construction de la base de données avec l'estimation de la population et du nombre de logements à l'horizon 2050 est présentée. Puis, différentes méthodes d'élaboration des scénarios prospectifs sont avancées. Une LCZ, représentant une forme urbaine spécifique, est attribuée à chaque scénario de croissance urbaine. La paramétrisation des principales étapes nécessaires au lancement des simulations climatiques est détaillée, notamment l'intégration des simulations de croissance urbaine dans le modèle de climat. Une simulation de contrôle est effectuée pour comparer la sortie de modèle et l'observation du réseau MUSTARDijon. Enfin, les résultats des simulations climatiques intégrant les scénarios de croissance urbaine sont exposés et discutés.

Partie I

L'Îlot de Chaleur Urbain, un problème de société

"*La ville n'aura jamais été aussi porteuse d'espérances et lourde de menaces* "(BURGEL 1993)

Les interactions ont une influence directe (utilisation de la climatisation, températures, qualité de vie, ...) et indirecte (Consommation énergétique, durabilité urbaine,...) sur ce que Sabine Barles désigne par le métabolisme urbain (BARLES 2017a). Ce contexte aux enjeux multiples complique la compréhension et l'analyse des températures de l'air extérieur. A l'intersection du changement climatique et du processus d'urbanisation le phénomène l'îlot de Chaleur Urbain (ICU) se développe (HOWARD 1820 ; OKE 1988). Il se traduit par des températures plus élevées en ville que dans sa campagne environnante, et surtout la nuit et en saison chaude. Canicules et ICU combinés engendrent une surmortalité importante en milieu urbain (ROBINE et al. 2007 ; MACINTYRE et al. 2017 ; PASCAL et al. 2018b). Lors de la canicule de 2003, la surmortalité en France, notamment en milieu urbain, est la plus élevée parmi l'ensemble des pays européens. Ce problème aura tendance à se renforcer en France car depuis 2016, 80% de la population française est urbaine [2], et à l'échelle mondiale, le taux d'urbanisation pour la période 2000 - 2030 devrait être 26 fois supérieur à celui de la période 1970 - 2000 (SETO et al. 2011). L'ICU se situe ainsi au carrefour de deux systèmes complexes : le climat et la ville [3]. Cette position permet, d'une part, de présenter l'ICU comme un objet d'étude par essence interdisciplinaire, qui plus est, à la croisée d'acteurs qui n'ont pas toujours pour habitude ni de communiquer ni de travailler ensemble (techniciens, décideurs et chercheurs). Face à ce constat, *en quoi une différence de température nocturne entre le milieu urbain et sa campagne environnante est un enjeu sociétal majeur ?*

Le premier chapitre présentera les déterminants ainsi que les mécanismes responsables du phénomène d'ICU. Un bref historique de la climatologie urbaine ainsi que du contexte sociétal et climatique actuel permettront de mettre en avant la problématique de l'ICU à travers ses échelles temporelles et verticales (couche limite de surface, ...). L'étude du bilan énergétique en milieu

2. En France, l'équivalent d'un département est urbanisé tous les 7 ans.

3. Un système complexe est un ensemble constitué d'un grand nombre d'entités en interaction qui empêchent l'observateur de prévoir toutes les rétroactions, son comportement ou évolution par le calcul.

urbain ainsi que des principaux facteurs d'apparitions du phénomène d'ICU clôtureront ce premier chapitre.

La citation de Burgel (1993) : "*La ville n'aura jamais été aussi porteuse d'espérances et lourde de menaces*" résume le fait que la ville est au cœur des enjeux, tantôt génératrice de maux (ICU, étalement urbain,...) mais aussi échelon principal pour les résoudre. La présentation des différentes définitions de "ville", "d'urbain" ou encore de "croissance urbaine" mettra en avant la complexité d'étudier conjointement le climat et l'urbain. La mise en avant de quatre échelles urbaines (structure, forme urbaine, design et architecture) ainsi que l'utilisation des Local Climat Zones (LCZs) permettra la mise en relation des différents composants urbains avec l'intensité de l'ICU.

CHAPITRE I
L'ICU, UN PHÉNOMÈNE QUI DEVIENT PROBLÉMATIQUE ?

Le changement et en particulier le réchauffement climatique mondial provoqué par les émissions et concentrations de gaz à effet de serre, devraient s'intensifier d'après toutes les publications scientifiques synthétisées par le GIEC (MEEHL et TEBALDI 2004 ; SCHÄR et al. 2004 ; IPCC 2013). À ce changement est associé un accroissement des intensités et des occurrences des vagues de chaleur (HUTH, KYSELÝ et POKORNÁ 2000 ; MEEHL et TEBALDI 2004 ; BENISTON et al. 2007 ; CHAUVIN et DENVIL 2007). En parallèle, d'après les projections des nations unies basées sur des données démographiques de 2012, la population mondiale, actuellement de 7.7 milliards, augmentera pour atteindre 9,7 milliards en 2050 et plus de 12 milliards en 2100 (NATIONS 2013 ; GERLAND et al. 2014). D'après l'ONU, nous nous situons dans le "*millénaire urbain*", autrement dit, le nombre d'urbains a dépassé le nombre de ruraux et les projections tendent vers une population à 80% urbaine à la fin du siècle (NATIONS 2013 ; ONU 2014). *Ainsi, en quoi et dans quel contexte le phénomène d'ICU tend à s'amplifier ?* Pour répondre à cette question, il est nécessaire de présenter l'évolution actuelle et future de deux enjeux majeurs auxquels la société actuelle doit répondre, à savoir, l'urbanisation croissante et le changement climatique. Puis, un historique de la climatologie urbaine mettra en avant les relations entre le climat et l'aménagement des villes. Enfin, il s'agit d'introduire les notions indispensables à la compréhension du phénomène d'ICU, tant dans ses variabilités spatio-temporelles que ses conditions de formation tels que l'ensoleillement, le vent et la nébulosité.

1.1 CONTEXTES URBAINS ET CLIMATIQUES DE LA CLIMATOLOGIE URBAINE

1.1.1 CONTEXTES URBAINS ET CLIMATIQUES MONDIAUX

La population mondiale augmente, de 1.6 milliard en 1900 à 7 milliards de personnes en 2012, l'humanité n'a jamais été aussi nombreuse. Si, en 1950, moins d'un tiers de la population mondiale vivait dans les villes, la moitié de la population mondiale vit en milieu urbain en 2007 (Fig. 1.1). L'urbanisation désigne le processus de croissance de la population urbaine et d'extension des villes [4] et peut se traduire de deux façons. La première est l'augmentation du nombre de villes dans le monde, et la seconde est l'accroissement de leur taille.

Ce phénomène d'urbanisation est présent depuis les premières citées et villes. La différence entre l'urbanisation contemporaine et "historique" est le taux important d'urbanisation dans le monde qui engendre la nécessité d'augmenter les infrastructures urbaines (logements, commerces,...), d'où l'étalement urbain.

Le taux d'urbanisation mondial entre 2000 et 2030 serait égal à environ 1.8%, tandis que pour la même période, la croissance démographique serait de l'ordre de 1%. Si ce taux reste stable, en 2050, près de 60% de la population mondiale (près de 5 milliards de personnes) vivra en milieu urbain (UNITED NATIONS 2018 ; Fig. 1.1). Si les villes sont des vecteurs de croissance économique (80% de la croissance économique des pays se réalisent dans les villes), elles peuvent être à l'origine de nombreux maux tels que la pollution, l'insécurité, les maladies, etc. Les villes consomment les deux tiers de l'énergie mondiale et génèrent plus de 70% des émissions mondiales de GES (SATTERTHWAITE 2009). Cette urbanisation croissante se déroule dans un contexte de changement climatique, positionnant ainsi les enjeux d'atténuations et d'adaptations au changement climatique au cœur du processus de croissance urbaine.

4. Définition du glossaire d'urbanisation

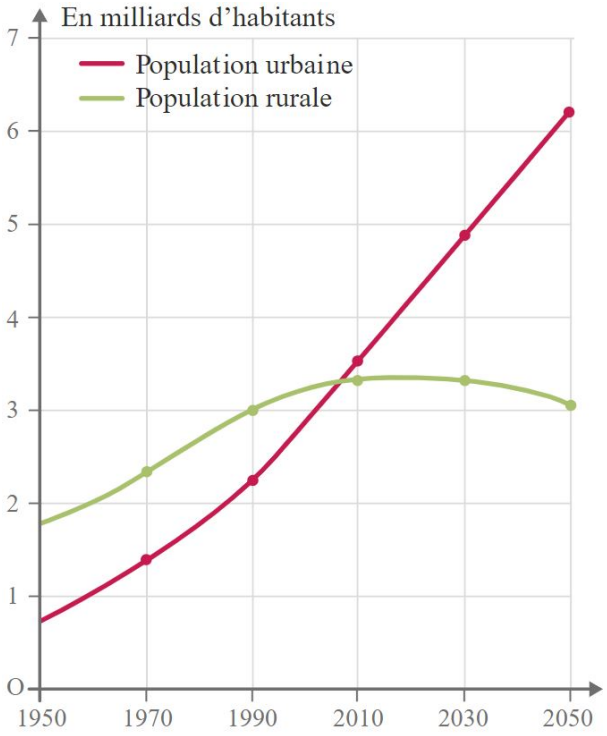


FIGURE 1.1 – Evolution de la population mondiale 1950 - 2050. (UNITED NATIONS 2018)

Depuis maintenant plus de trente années, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publie des synthèses qui quantifient, évaluent et étudient les impacts des apports anthropiques sur le système climatique mondial, notamment en milieu urbain. Cinq rapports sont publiés (IPCC 1990 ; 1996 : 2001 ; 2007 et 2013). Trois rapports spéciaux sont publiés depuis, et le sixième rapport le sera en 2021. La question du changement climatique, de son intensité, de ses modalités, occupe une place majeure dans les recherches scientifiques et montantes dans les débats sociétaux (MCCRIGHT et DUNLAP 2000) et économiques (CLINE 1992).

L'un des objectifs du GIEC est de proposer une gamme de scénarios variés pour documenter les modalités du changement climatique jusqu'à l'horizon 2100 en fonction de décisions que pourraient prendre les sociétés et des comportements que celles-ci pourraient adopter. Pour cela, jusqu'au 4ème rapport (2007), le système climatique mondial était simulé suivant différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols. Les communautés scientifiques socio-économiques puis climatiques travaillaient en série, la seconde attendant que la première ait élaborée des scénarios. Pour le 5ème rapport (IPCC 2013) une stratégie différente est adoptée. Quatre forçages radiatifs possibles, ou Representative Concentration Pathways (RCPs - Trajectoire de forçage radiatif) sont proposés pour 2100. L'IPCC a invité les communautés scientifiques, socio-économiques d'une part, climatiques d'autre part, à travailler en parallèle sur ces trajectoires. Les scénarios puis trajectoires du GIEC permettent d'alimenter la modélisation numérique du système climatique. Ces modèles de climat sont comparés dans le projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIPs, Coupled Model Intercomparison Projects). Ce projet

regroupe des dizaines de groupes de modélisation du climat. Cela permet un cadre de modélisation rigoureux ayant pour ambition d'évaluer et de comprendre les évolutions du climat passé et futur.

Les RCPs supposent des évolutions bien distinctes de concentrations de GES durant le siècle à venir (Fig. 1.2). Actuellement, les études de projections climatiques se concentrent sur des changements estimés à partir d'une référence fixe actuelle ou représentative du début de l'ère industrielle [5]. Les quatre RCPs se distinguent tant par la valeur du forçage radiatif (par rapport aux valeurs préindustrielles) que par les mesures d'atténuations des sociétés (Fig. 1.2) :

— Le RCP 8.5 correspond aux plus fortes émissions de Gaz à Effet de Serre (GES). Il représente une évolution du climat suivant les tendances d'émissions actuelles de GES, à savoir des politiques d'atténuation et des comportements sociétaux qui sont dans le prolongement de l'actuel : forte croissance de la population, faible croissance des revenus, changement technologique modeste et des améliorations menant à une production plus intense d'énergie, essentiellement fossile. Il représente un futur sans véritable politique climatique ;

— Le RCP 6.0 consiste principalement en une intervention menant à des politiques d'atténuation mais de la façon la moins coûteuse possible à court terme ;

— Le RCP 4.5 stabilise à la fin du XXI siècle le forçage radiatif d'origine anthropique. Dans ce RCP, les mesures prises s'appuient principalement sur des nouvelles technologies de production d'énergie à faibles émissions, ainsi que sur le développement de la capture et du stockage géologique du carbone. Ce RCP correspond grosso modo à l'application des accords de Paris (COP 21) ;

— Le RCP 2.6 repose sur une forte atténuation du changement climatique et vise à limiter le réchauffement global en dessous de 2°C par rapport à la période pré-industrielle, sachant que 1°C d'augmentation a déjà été observé. Il s'agit du RCP de "référence", utilisé lors des négociations interétatiques. Cependant les mesures qui doivent être adoptées pour parvenir à ce "uniquement en dessous de 2°C" sont telles que le RCP 2.6 n'est considéré comme atteignable uniquement dans le cas d'une participation importante de tous les pays. Les émissions cumulées entre 2010 et 2100 doivent être réduites de 70% par rapport à l'actuel (VUUREN et RIAHI 2011).

5. ASHTON 1997 marque les dates de la première révolution industrielle 1760 - 1840

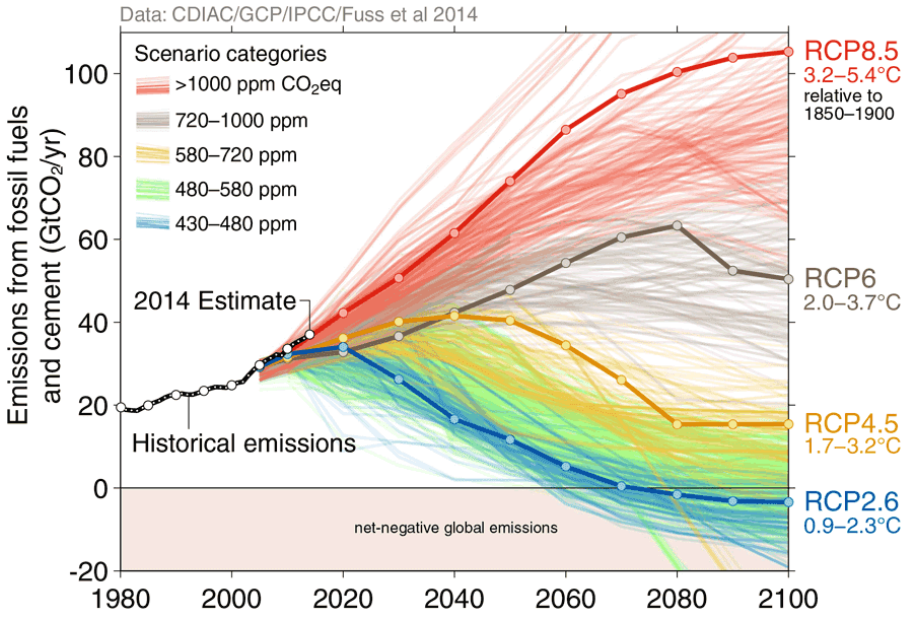


FIGURE 1.2 – Scénarios d'émission du GIEC. Global Carbon Project

Il est démontré que même avec des mesures relativement fortes d'atténuation, la température globale dépassera probablement d'au moins 1.5°C le niveau du début de l'ère industrielle d'ici à la fin du 21ème siècle (COLLINS et al. 2013). Les extrêmes chauds de température vont probablement s'intensifier par rapport à la distribution de la température actuelle (IPCC 2013). D'après Meehl et Tebaldi (2004), une variation relativement faible de la température moyenne mondiale entraîne une très forte augmentation des températures extrêmes élevées et une diminution des températures extrêmes basses (MEEHL et TEBALDI 2004). Ainsi, même avec le scénario 2.6, une augmentation des événements caniculaires extrêmes est à prévoir. Dans un climat dit "stationnaire", le ratio maximum record / minimum record de température devrait être d'environ 1,0. Cependant, le climat moyen s'est réchauffé et le ratio est maintenant d'environ 2 pour 1. Autrement dit, dans le futur, il devrait y avoir deux fois plus d'événements chauds extrêmes que d'événements extrêmes froids. Par ailleurs, les études convergent sur le fait que les événements caniculaires devraient s'intensifier dans les prochaines décennies (MEEHL et TEBALDI 2004 ; OUZEAU et al. 2016). Par ailleurs, de nombreux comportements individuels mais aussi économiques dépendent du climat. En effet, la fonction de production varie selon le climat, par exemple l'agriculture (ROBACK 1982 ; MENDELSHON et NORDHAUS 1994 ; SCHLENKER et ROBERTS 2006 ; DESCHENES et GREENSTONE 2007). La population modifie, elle aussi ses actions en fonction du climat, comme le montrent, par exemple, les travaux de Rehdanz et Maddison (2005) portant sur des données agrégées par pays, qui montrent que le bonheur des populations dépend du climat (MADDISON 2003 ; REHDANZ et MADDISON 2005).

1.1.2 LE CLIMAT URBAIN

Le climat urbain est défini comme une modification du climat local, influencée par les caractéristiques de la ville (structure, densité de population et de bâti, matériaux...). Cependant, cette définition est récente alors que l'Homme se préoccupe du climat urbain depuis plus de 2 000 ans et probablement depuis la fondation des premières cités (YOSHINO 1975). Les écrits de l'ingénieur et architecte romain Vitruvius (75 – 26 av. J-C) rendent compte de la volonté de celui-ci, de prendre en compte les facteurs climatiques environnants dans la conception des cités. D'après lui, l'absence de vent dans la cité serait responsable de l'apparition de certaines maladies et préconise donc de prendre en compte les vents dominants dans l'élaboration des rues et des hauteurs des édifices afin d'améliorer la circulation de l'air en ville. Ainsi, il préconise une mesure des vents et de leurs directions afin de planifier au mieux l'orientation et la largeur des rues (VITRIVIUS, PERRAULT et TARDIEU 1859). Horace (65-68 av. J.-C.) étudie et décrit le climat urbain de Rome avec un intérêt particulier pour la qualité de l'air tout comme Circa (3 av. J.-C. - 65). L'indien Manasara Silpasatra (av. J.-C.), a étudié différentes conditions de luminosité et de ventilation pour améliorer l'aménagement des villes (COLOMBERT et BOUDES 2012).

Au Moyen-Âge (496 - 1492), les contraintes économiques et militaires forcent les populations à se retrancher à l'abri de hautes murailles. Celles-ci empêchent une ventilation optimale de la ville et créent un climat intra-muros plus humide. Il faudra attendre le siècle des Lumières (XVIIIe), des avancées scientifiques et une amélioration économique pour que la qualité sanitaire générale des villes devienne une priorité pour celles-ci. Réduire l'humidité et accéder à l'air, au soleil et à la lumière naturelle sont les principaux objectifs de l'urbanisme au XVIIIe siècle. Le mouvement hygiéniste va alors voir le jour, avec d'importants travaux (Hausseman...) ayant pour but d'assainir les surfaces humides (minéralisation du sol des rues) et d'améliorer la ventilation des vides urbains (alignements des rues, élargissements et création de nouvelles rues, ...). L'arrivée des mesures instrumentales marque un tournant dans la compréhension du climat urbain. En 1774, Cotte s'interroge sur les écarts de températures associés aux dimensions des rues lors des fortes chaleurs et de l'adaptation des villes du contour méditerranéen (le Caire) (COTTE 1774). Ces nouvelles considérations pour l'amélioration de la qualité de vie rendent compte, dès le siècle des Lumières, de l'émergence de la climatologie urbaine comme science (COLOMBERT et BOUDES 2012). Les travaux de Benzerzour (et al., 2011) sur l'étude historique du climat urbain de la ville de Nantes depuis le 17ième siècle tend à démontrer que les températures de la ville actuelle sont plus élevées que ses températures urbaines passées. En cause, l'augmentation des surfaces minérales et la diminution de la ventilation des rues (BENZERZOUR et al. 2011). Le climat en milieu urbain dépend du climat mondial mais aussi, et surtout, de particularités propres induites par la ville. Ces particularités qui, comme nous l'avons vu, sont pressenties à défaut d'être bien connues depuis l'antiquité.

La climatologie urbaine repose sur des relevés *in situ* (sondes, ...), sur des simulations en soufflerie et, aujourd'hui, essentiellement sur des simulations numériques de fiabilité et de complexité croissante. Le constat est que l'échelle d'étude des travaux sur le climat urbain a progres-

sivement diminué, passant du climat urbain de l'ensemble de l'agglomération, au climat urbain à l'échelle du quartier (influence de l'implantation de nouveaux bâtiments sur le climat, matériaux de construction ...) ou encore de la rue (hauteur, largeur, ...) (TAHA 1988 ; ROSENFELD et al. 1995).

Li et Bou-Zeid (2013) expliquent que, non seulement les vagues de chaleur augmentent les températures ambiantes, mais elles accentuent également la différence entre les températures urbaines et rurales (LI et BOU-ZEID 2013 ; SCHATZ et KUCHARIK 2015 ; RAJKOVICH et LARSEN 2016 ; RAMAMURTHY et BOU-ZEID 2017 ; LEHOCZKY et al. 2017). Dans le contexte de changement climatique, la probabilité que les vagues de chaleur deviennent plus fréquentes et plus intenses est importante, le risque thermique des populations urbaines augmente de manière significative. Leurs résultats soulignent les risques graves pour la santé liés à la chaleur auxquels sont et seront confrontés les résidents urbains dans les décennies et le siècle à venir.

Il est à préciser que les préoccupations de la climatologie urbaine ne sont pas uniquement liées aux conditions météorologiques spécifiques à la ville (température, précipitation, ...) mais aussi à la pollution atmosphérique (qualité de l'air) (SHAPOSHNIKOV et al. 2014 ; CHURKINA et al. 2017). Par ailleurs, comme le souligne Kergomard (et al., 2002), les processus de thermodynamique et dynamiques qui conditionnent la formation d'un climat spécifique en milieu urbain sont les mêmes qui conditionnent la dispersion ou la concentration des polluants au sein de celle-ci (OKE 1987 ; MESTAYER et ANQUETIN 1994 ; KERGOMARD et al. 2002).

Afin de mieux comprendre le climat urbain, il est nécessaire d'en présenter les échelles spatiales. Il s'agit d'un travail en trois dimensions : les échelles horizontales communes du géographe, mais aussi la dimension verticale de l'atmosphère et les temporalités emboîtées : du temps long de l'urbanisme au temps court du vent en passant par les rythmes saisonniers et diurnes qui conditionnement le rayonnement.

La couche inférieure de la troposphère est en contact avec la surface terrestre. Cette zone, appelée Couche Limite Atmosphérique (CLA), est définie comme "*la partie de l'atmosphère directement sensible et influencée de façon "rapide" (de l'ordre de la journée au maximum) par la surface*" (Fig. 1.3). Son épaisseur peut varier de quelques centaines de mètres la nuit à plusieurs kilomètres la journée (DUPONT 2001).

La CLA est elle-même composée de trois parties (Fig.1.3). La partie supérieure de la CLA est non turbulente à cause de sa stabilité thermique. De plus, les caractéristiques de cette couche ne sont pas affectées par des éléments particuliers de petit gabarit (par exemple un bâti) mais par des éléments de taille plus importante (montagne,...) (ERELL, PEARLMUTTER et WILLIAMSON 2011). La couche de mélange (ou couche d'Eckman), dont l'épaisseur peut varier de 1,5 à 4 fois la hauteur des éléments de rugosité situés en surface. Cela entraîne une turbulence importante au sein de cette couche qui se situe donc entre la couche d'atmosphère libre et la couche de surface. Puis, la Couche Limite de Surface (CLS) correspond à l'air présent en surface et vécu par les espèces. Cette couche est la plus turbulente et particulièrement hétérogène, notamment du fait des caractéristiques physiques du milieu (reliefs naturels, ville...) qui l'influence.

La CLS définie précédemment est elle-même subdivisée. La climatologie urbaine s'intéresse essentiellement à la strate inférieure de celle-ci, qui est la zone de contact entre l'atmosphère et la surface. Au-delà de l'échelle verticale, l'étude du climat repose aussi sur l'échelle horizontale. Trois échelles spatiales sont communément utilisées en climatologie urbaine (OKE 2004 ; OKE 2006 ; LECONTE 2014) (Fig. 1.3). La méso échelle, (ou échelle méso climatique) s'applique à des emprises spatiales allant de plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Cette échelle permet l'étude de la totalité de l'agglomération et sa périphérie (Fig. 1.3.a). L'échelle locale fait référence à des phénomènes de tailles inférieures. Dans ce cas, les formes urbaines mais aussi le design urbain sont considérés dans l'étude du climat ur- bain. Les stations météorologiques sont placées en fonction des attributs de cette échelle (Fig. 1.3.b). La micro échelle (ou échelle microclimatique) concerne des dimensions spatiales inférieures à 100m. Il s'agit de la plus petite échelle d'étude du climat urbain. Le design urbain, l'architecture extérieure des bâtiments et le confort intérieur sont pris en compte à cette échelle (Fig. 1.3.c), (ROBITU 2005). Enfin, d'après Rosenzweig, la répartition spatiale de l'ICU concorde davantage avec un archipel plutôt qu'à une seule et unique "*île*" (ROSENZWEIG et al. 2005).

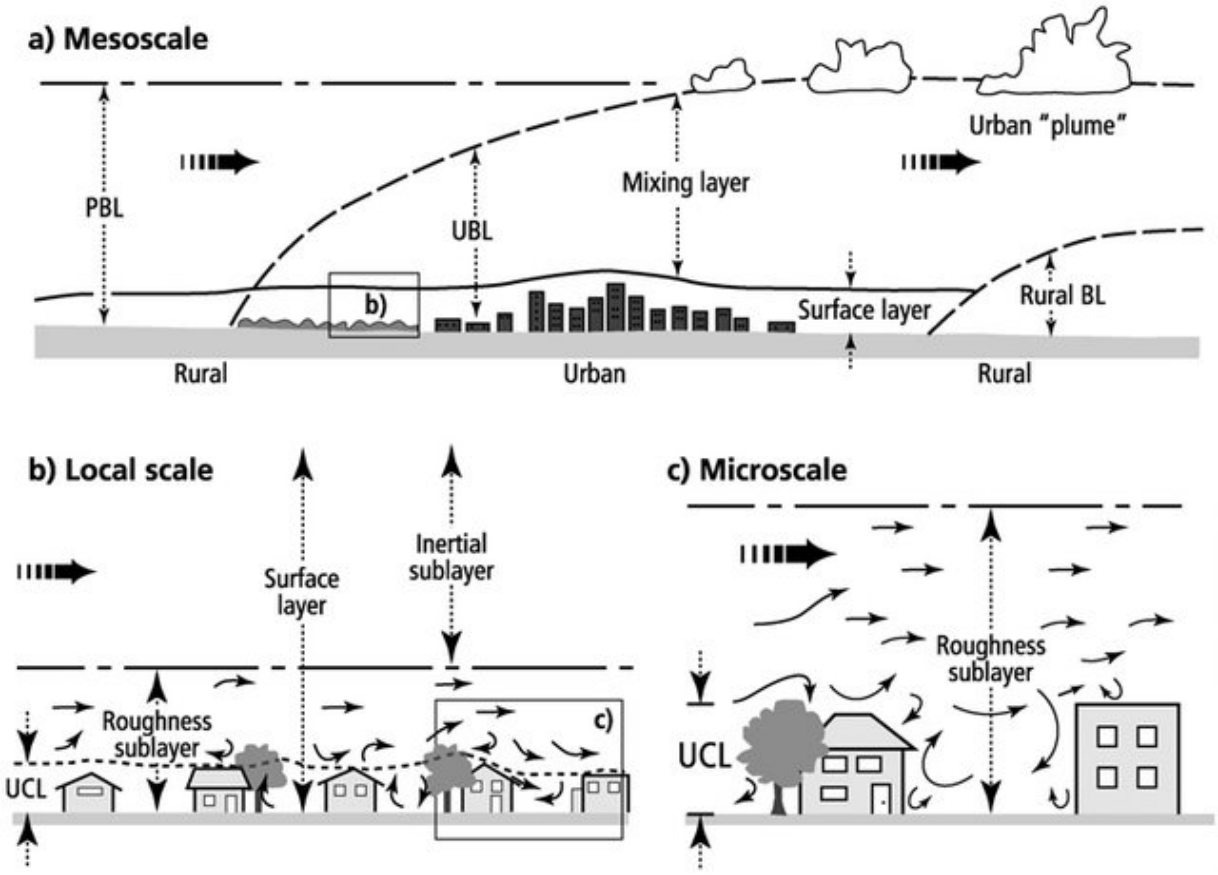


FIGURE 1.3 – Échelles spatiales au sein de la couche limite urbaine (PIRINGER et al. 2002)

1.2 FOCUS SUR UN COMPOSANT DU CLIMAT URBAIN : LE PHÉNOMÈNE D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

L'ICU est une différence de température entre le milieu urbain et sa campagne adjacente (Fig. 1.4). Les travaux d'Howard (1820), sont le point d'origine des études de l'ICU car il y décrit les facteurs responsables (HOWARD 1820). Ces facteurs sont confirmés par Oke (1973, 1982) : la journée, la ville va absorber puis stocker l'énergie solaire et va la restituer durant la nuit sous forme de chaleur, limitant ainsi le refroidissement nocturne de la ville. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les grandes agglomérations, tandis que"*les espaces non bâtis ne captent que 5% de l'énergie solaire, les villes en emprisonnent dès le matin 50%, cette valeur descendant toutefois à 25-30% au cours de la journée*" (OKE 1973 ; OKE 1982 ; SCHERER et al. 1999). L'intensité de l'ICU est négativement corrélée avec la vitesse du vent et la couverture nuageuse (OKE 1982 ; MORRIS, SIMMONDS et PLUMMER 2001 ; KIM et BAIK 2002 ; CANTAT 2004 ; PIGEON et al. 2007) mais positivement corrélée avec la population de la ville (OKE 1973 ; TRAN et al. 2006).

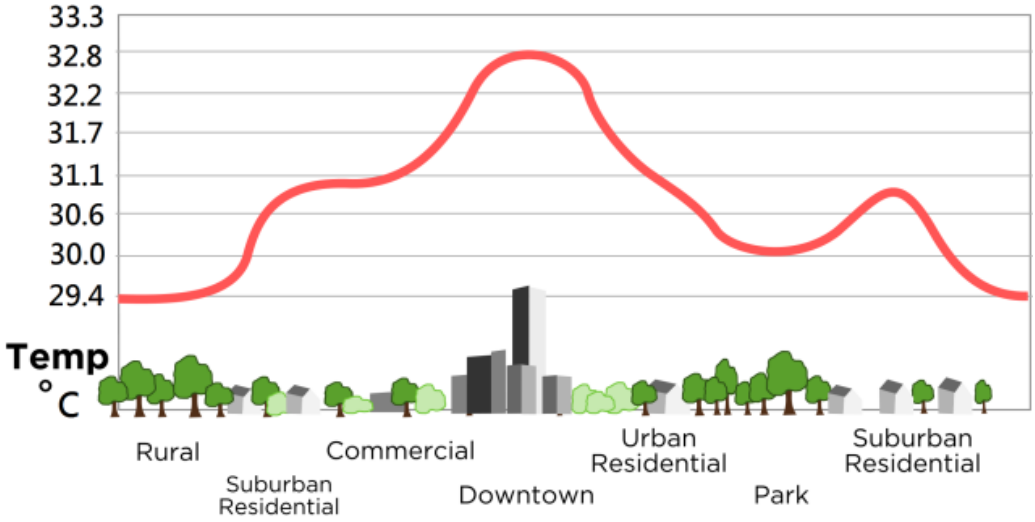


FIGURE 1.4 – Phénomène d'îlot de chaleur urbain (U.S Global Change Research Program)

À l'échelle saisonnière, les conditions climatiques favorables à l'apparition d'un ICU apparaissent plus fréquemment en été sous condition anticyclonique [6]. (KŁYSIK et FORTUNIAK 1999 ; ARNFIELD,J 2003 ; PONGRACZ, BARTHOLY et DEZSO 2006 ; SCHATZ et KUCHARIK 2014 ; ZHOU et al. 2015). Ce phénomène essentiellement nocturne est donc dépendant des conditions climatiques de la veille. Ce phénomène d'ICU est la résultante de l'ensemble de l'énergie impactée par les facteurs "incontrôlables" et "contrôlables" (RIZWAN, LEUNG et LIU 2008). Autrement dit, la température en ville dépend du bilan énergétique, le rapport entre les gains, les pertes et les transferts d'énergie au sein du milieu urbain (Fig. 1.6).

6. zone de haute pression atmosphérique souvent associée à un temps sec, sans nuage et donc ensoleillé.

Le pas de temps le plus pertinent, compte tenu de l'échelle spatiale, est horaire. En début de matinée, la ville peut être plus froide que sa campagne environnante. Cela est dû à des processus liant croissance et réchauffement rapide de la couche limite en milieu rural et des flux de chaleur sensible vers l'atmosphère plus forts. Par ailleurs la ville a restitué durant la nuit, la chaleur emmagasinée durant la veille. La différence de température entre la ville et sa campagne est maximale 2 à 4h après le coucher du soleil (CHOW et ROTH 2006) (Fig 1.5).

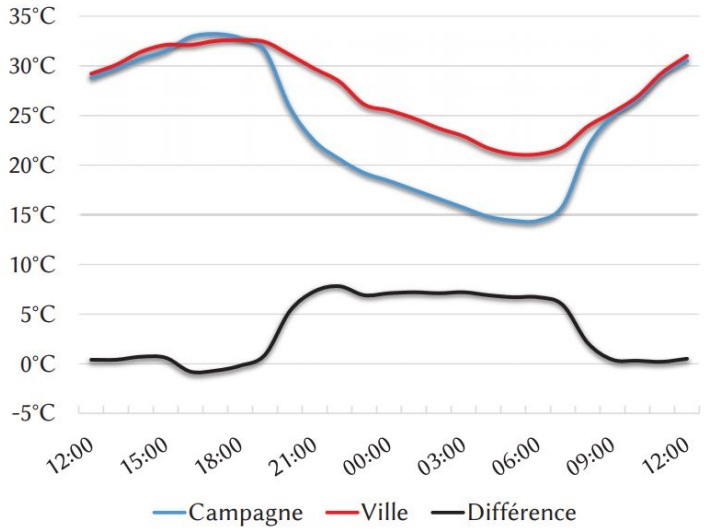


FIGURE 1.5 – Températures observées en ville et à la campagne pendant 24h en condition idéalisée d'observation de l'ICU. Adaptée de Oke T.R. (1987) par Foissard (2015)

La variabilité temporelle et spatiale de l'ICU dépend autant de la répartition de l'urbanisation à l'échelle locale (ZHANG, SHOU et CHEN 2011) que des conditions climatiques à l'échelle globale. L'ICU est un phénomène complexe qui nécessite une approche systémique [7] multi scalaire.

1.3 L'ICU, UNE MODIFICATION DU BILAN ÉNERGÉTIQUE EN MILIEU URBAIN

La présence de rayonnement solaire est un prérequis important pour la formation et l'intensité d'un ICU, mais pas nécessairement obligatoire car la chaleur anthropogénique peut, notamment en période hivernale, contribuer davantage à la formation et l'intensité de l'ICU que les rayonnements solaires. Un milieu urbain dépourvu de ses habitants et des émissions liées aux activités humaines (chauffages, trafics routiers, climatisation. . .) aurait tout de même un ICU directement imputé au piégeage de l'énergie solaire, d'une part, à cause des matériaux de construction de la ville (béton, asphalte, ...) et d'autre part, par la forme de la ville (canyon urbain, ...).

7. champ interdisciplinaire relatif à l'étude d'objets dans leur complexité. Pour tenter d'appréhender cet objet d'étude dans son environnement, dans son fonctionnement, dans ses mécanismes, dans ce qui n'apparaît pas en faisant la somme de ses parties

1.3.1 ENSOLEILLEMENT

L'apport d'énergie provient initialement des rayonnements solaires (Q*) ainsi que des rejets de chaleur anthropiques (combustion, métabolisme et de rejets thermiques (QF). Ces deux apports énergétiques dans le milieu urbain sont à l'origine des flux de chaleurs latentes (Qe), sensibles (Qs) et d'une accumulation de la chaleur au sein des matériaux (Δ Qs)

Le bilan d'énergie du milieu urbain résume les éléments responsables des variations des températures au sein des villes. Cette équation s'écrit :

$$Q* + Qf = Qh + Qe + \Delta Qs \tag{1.1}$$

Q* : Flux du rayonnement net

Qf : Flux de chaleur anthropique

Qh : Flux de chaleur sensible

Qe : Flux de chaleur latent

Δ Qs : Flux de chaleur stockée

Les travaux de Oke (1987) illustrent ce bilan (Fig 1.6). Ces deux graphiques permettent de comparer les flux d'énergie sur une durée de 24h (OKE 1987). Le flux de rayonnement net (Q*) est similaire pour la campagne et le milieu urbain. En revanche, le flux de chaleur latente (Qe) est beaucoup plus faible en milieu urbain (moins de végétation) tandis que le flux de chaleur stockée (Δ Qs) est plus élevé en milieu urbain. Les phénomènes radiatifs et thermiques conduisent à une accumulation de la chaleur au sein des matériaux et du sol (**Δ Qs**). Cette énergie, emmagasinée au cours de la journée dans les matériaux urbains, est restituée dans l'infrarouge thermique, sous forme de chaleur durant la nuit et constitue l'un des principaux facteurs de la formation et de l'intensité de l'ICU (RINGENBACH 2004). Il correspond au transfert de chaleur par convection (transfert d'énergie thermique entre un fluide en mouvement et une paroi solide) entre la surface et l'air.

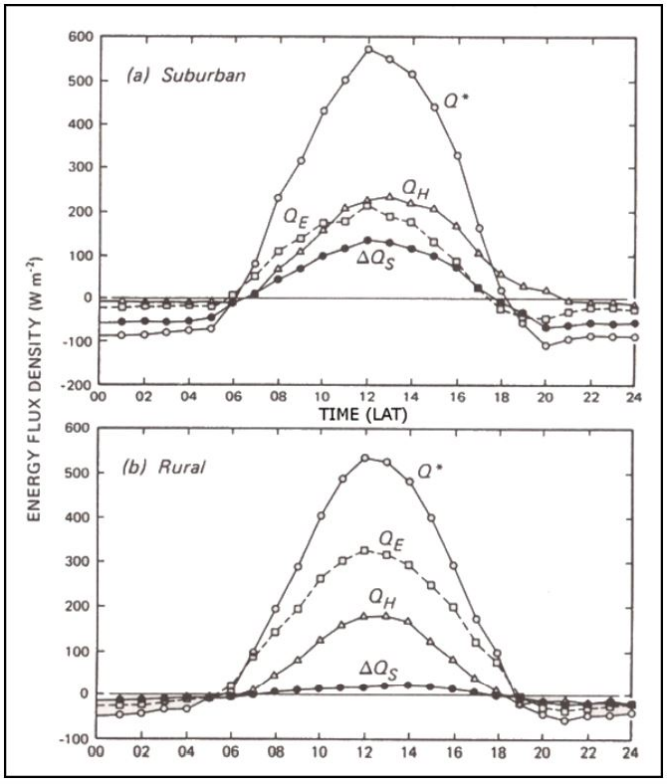


FIGURE 1.6 – Comparaison du bilan énergétique moyen entre la ville ("suburban") et la campagne ("rural") sur 24h, réparti selon les flux suivants : le rayonnement net (Q*), le flux de chaleur sensible (QH), le flux de chaleur latente (QE) et le flux de chaleur stockée (Δ Qs). D'après OKE 1987

Il est aussi à préciser que le flux de chaleur stockée (Δ Qs) ne peut pas être calculé directement, il est donc le plus souvent déduit par rapport aux autres termes du bilan d'énergie.

Le flux du rayonnement net représente les rayonnements solaires reçus par la ville, ainsi que les flux réfléchis et les flux infra-rouges montants et descendants (Fig.1.7). L'apport de rayonnement solaire est atténué par la pollution atmosphérique en zone urbaine (3 à 10% en milieu urbain par rapport aux espaces ruraux environnants) (RINGENBACH 2004. Cette atténuation est compensée par la présence du rayonnement thermique émis par le milieu. Ce rayonnement dépend de la température de surface et de l'émissivité des matériaux. Oke (1978) estime l'albédo (fraction des rayonnements solaires qui sont réfléchis) des villes à 0,15. Les phénomènes radiatifs et thermiques conduisent à une accumulation de l'énergie au sein des matériaux et du sol (**Δ Qs)** (Fig.1.7). Cette énergie est restituée sous forme de chaleur durant la nuit car les zones urbaines se refroidissent moins vite que les surfaces végétales, et constitue l'un des principaux facteurs de la formation et de l'intensité de l'ICU (OKE 1982 ; RINGENBACH 2004). Nunez (et al., 1977) a également noté que le refroidissement nocturne est moins important dans la rue que sur les toits en raison du piégeage du rayonnement infrarouge entre les bâtiments (NUNEZ et OKE 1977).

Le flux de chaleur latent (**Qe**) provient de l'énergie consommée par l'évaporation de l'eau. [8]

8. Le passage de l'eau liquide à l'état gazeux consomme de l'énergie, donc plus l'humidité est importante, plus la chaleur latente est élevée.

(Fig.1.7). La réduction de la présence de végétation en zone urbaine a pour conséquence un flux de chaleur latente nettement inférieur à celui des milieux ruraux adjacents à la ville (Fig 1.6)[9].

La chaleur sensible (**Qh**) est la chaleur, qui contrairement à la chaleur latente, entraîne une modification de la température lorsqu'on l'ajoute ou qu'on la soustrait. Comme le signale Ringenbach (2004), "*le refroidissement radiatif plus rapide que la baisse de la température de l'air met en évidence le rôle du flux de chaleur sensible dans le réchauffement de l'atmosphère*". Le flux de chaleur sensible est alimenté par l'énergie stockée au sein des matériaux **(Δ Qs)** ainsi que par la chaleur anthropique (**Qf**). Celle-ci représente la chaleur générée par les sources mobiles et stationnaires d'une zone comme les climatisations (Fig.1.7). Fan et Silor (2005) ont estimé pour la ville de Philadelphie, que la contribution des flux de chaleur d'origines anthropiques à l'intensité de l'ICU est inférieure à 10% en été contre plus de 50% en hiver. (FAN et SAILOR 2005)

La densité de bâti, le manque de surface en eau et de végétation sont responsables de l'augmentation des flux de chaleur sensible (**Qh**). Le flux de chaleur sensible (Qh) et de chaleur stockée (Δ Qs) constituent en journée 90% des flux d'énergie urbain (ROBERTS et al. 2004). Ainsi **Qh** reste positif même pendant la nuit provoquant l'apparition de l'ICU (ROBERTS et al. 2004).

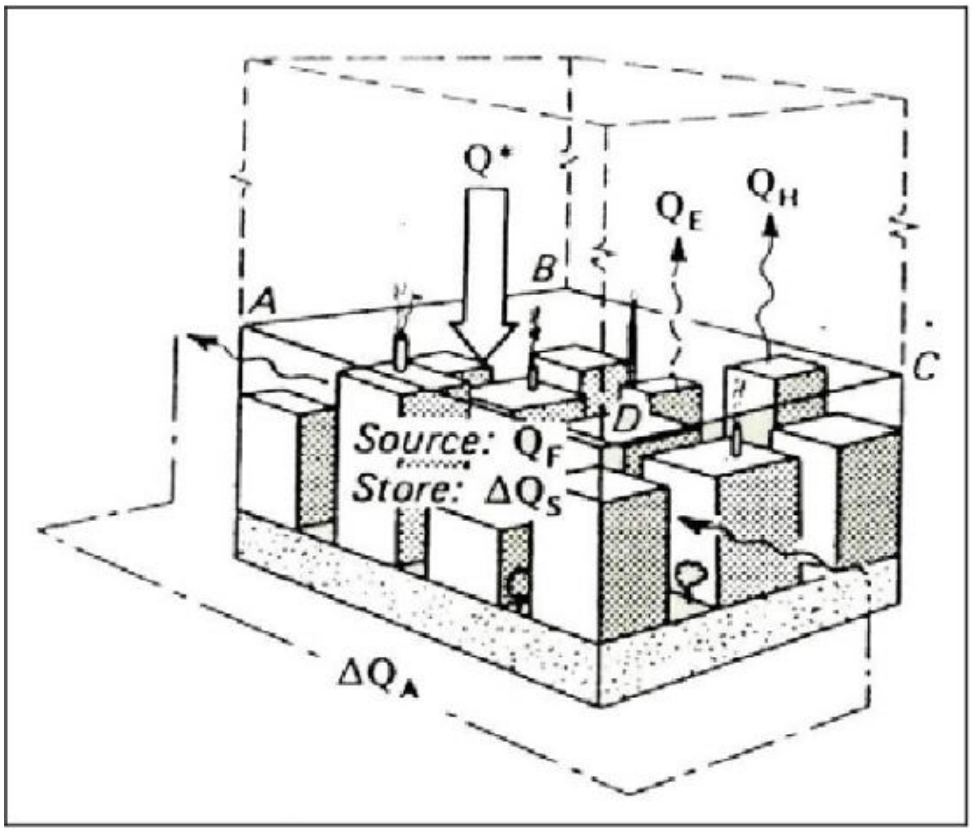


FIGURE 1.7 – Schéma descriptif du bilan énergétique pour une zone urbaine (DUCHENE-MARULLAZ 1980

9. Le flux de chaleur latente correspond à une quantité d'eau évaporée par unité de temps convertie en énergie. Autrement dit, il s'agit de la quantité de chaleur requise pour transformer un gramme de liquide en vapeur, sans changement de température.

1.3.2 VENT

Le vent est un déplacement d'air, essentiellement horizontal, d'une zone de haute pression (masse d'air froide) vers une zone de basse pression (masse d'air chaude). Le vent influence l'ICU, il s'agit d'un des facteurs principaux de l'intensité et de la localisation de l'ICU (MORRIS, SIMMONDS et PLUMMER 2001 ; KIM et BAIK 2002). La circulation atmosphérique en ville est une variable "incontrôlable", dépendante des conditions climatiques globales et régionales (KUTTLER et al. 1998). Mais elle est aussi "contrôlable" car tributaire de la rugosité du milieu urbain, autrement dit, de l'agencement interne de la ville (orientation des rues, hauteur du bâti...). Le vent est un facteur qui peut être pris en compte et, dans une certaine mesure, "contrôlé" par l'aménagement urbain (KENWORTHY 1985). La rugosité urbaine crée des obstacles et diminue la vitesse du vent en milieu urbain. Celle-ci peut être réduite de 20 à 30% pour une hauteur de bâti d'environ 20m. Les écoulements d'air au sein de la CLU et de la CLA sont perturbés à cause de cette rugosité de surface (SACRÉ 1983 ; COLOMBERT 2008.

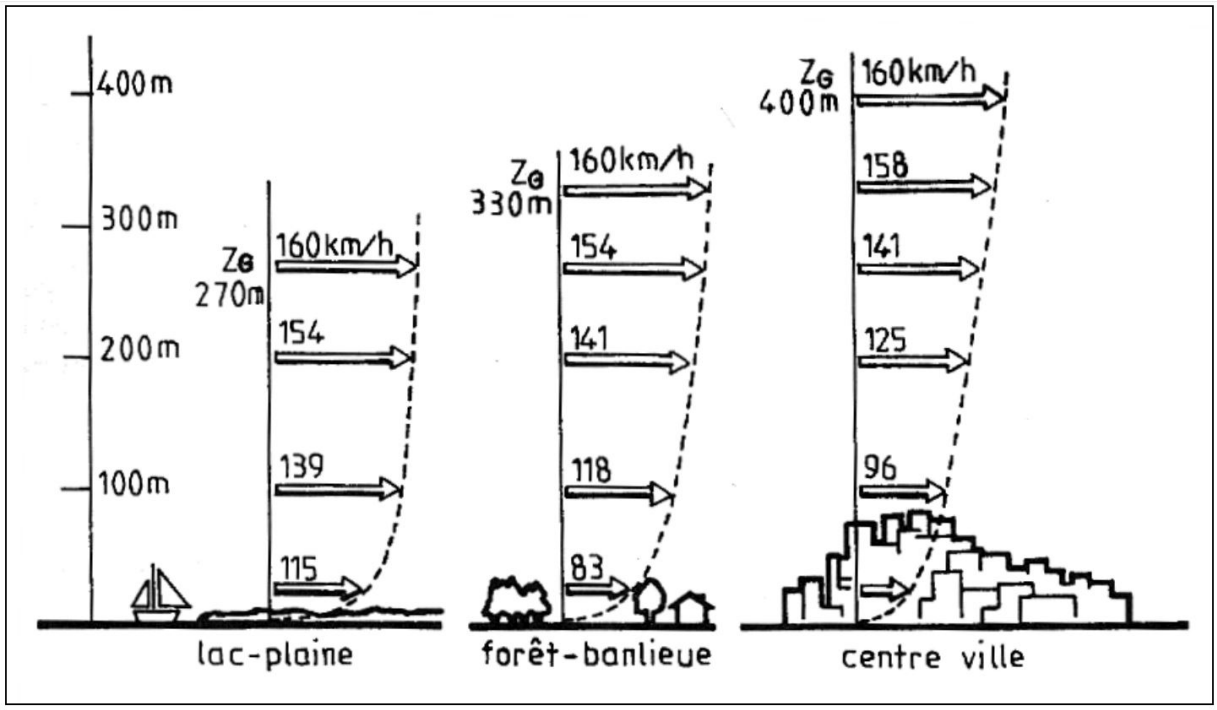


FIGURE 1.8 – Profil de la vitesse du vent pour différentes surfaces (CHATELET, FERNANDEZ et LAVIGNE 1998).

1.3.3 NÉBULOSITÉ

Cantat (2004) définit le type de temps en combinant approches géographiques et climatiques, considérant tout autant l'échelle géographique que la temporalité météorologique des évènements climatiques urbains (CANTAT 2004). Le type de temps est défini comme "*l'unité temporelle de base durant laquelle agit une combinaison d'éléments atmosphériques sensiblement identiques et produisant des effets pratiquement semblables sur un espace donné*". Les possibi-

lités de type de temps peuvent laisser suggérer que la ou les situation(s) optimale(s) d'apparition de l'ICU sont courantes, or, la combinaison entre un ciel clair et un vent faible n'est observée, pour la métropole de Paris, que pour 10% des situations (CANTAT, SAVOURET et ABDELKRIM 2012 ; FOISSARD et al. 2012).

La nébulosité est définie comme la fraction de ciel couverte par des nuages, quels qu'ils soient, à un moment donné en un lieu donné et s'exprime en octas. En journée, le rayonnement solaire incident (Q*) atteignant la ville est réduit si une nébulosité est présente, réduisant ainsi l'intensité de l'ICU. Cependant, la nuit, une forte nébulosité aura tendance à exacerber le phénomène d'ICU. En effet, Pigeon (2007) explique que les nuages absorbent une partie de rayonnement infrarouge émis par les surfaces des villes et réémettent vers celles-ci empêchant le refroidissement nocturne (PIGEON et al. 2007).

De nombreuses études ont montré que la distribution spatiale et les quantités de précipitation à l'intérieur des villes sont influencées par la présence des ICU (ATKINSON 1971 ; CHANDLER et MONDIALE 1976 ; ACKERMAN, CHANGNON et DZURISIN 1978 ; CHANGNON, KUNKEL et REINKE 1996 ; BORNSTEIN et LIN 2000 ; ROZOFF et al. 2003 ; GUO, FU et WANG 2006 ; SHEPHERD 2013 ; LIU et NIYOGI 2019). Lorway (1998) explique que l'ICU contribue à la formation de nuages et peut engendrer des précipitations (LOWRY 1998).

1.4 SYNTHÈSE

L'ICU tend à s'amplifier du fait de l'augmentation de l'urbanisation à travers le monde, ce dans un contexte de réchauffement climatique. Les facteurs incontrôlables à l'échelle d'une agglomération sont identifiés. Si l'ensoleillement, le vent et la nébulosité modulent la formation et l'intensité de l'ICU, le terme de facteurs "*incontrôlables*" avancé par Rizwan (et al., 2008) peut être nuancé. En effet, hormis les flux anthropogéniques (Qf) que l'on associe à l'activité humaine, les autres composantes du bilan énergétique ou encore l'écoulement des vents peuvent être influencés (atténués ou renforcés) par la répartition des éléments bâtis dans la ville. Ainsi, ces facteurs incontrôlables à l'échelle d'une agglomération peuvent être, tout du moins partiellement, modulés par la ville et ses formes multiscalaires :

— l'augmentation du stockage solaire relatif à l'augmentation de la surface urbaine exposée ;
— le blocage du flux d'émission IRT par les façades des bâtiments ;
— la diminution de la vitesse du vent à cause du bâti (Rugosité) ;
— la diminution du flux latent à cause des réductions du couvert végétal en milieu urbain.
— la formation de nuage y est plus importante qu'en campagne, de même pour les précipitations.

Pour la suite de ce travail, l'échelle principale est la méso-échelle urbaine (Fig. 1.3). Les flux d'origine anthropique participent à la formation de l'ICU mais ne seront pas considérés par la suite. Les causes "incontrôlables" de l'ICU (vent, nébulosité...) peuvent être, d'une certaine façon, contrôlées à l'échelle mondiale. Ainsi, toutes les causes de l'ICU peuvent être contrôlées à une échelle donnée (mondiale, étatique, agglomération, ...).

CHAPITRE II
LECTURE MULTISCALAIRE DE L'URBAIN ET SON CLIMAT

D'après une étude réalisée par des économistes, un climat plus chaud tend à renforcer l'étalement urbain et accentue la pression foncière (CAVAILLHÈS et al. 2014). Cet article estime que l'étalement urbain est environ 10% plus prononcé dans les villes françaises aux climats estivaux chauds (Sud de la France) que dans les villes aux périodes estivales plus courtes ou pluvieuses (Centre et Nord de la France). Les auteurs concluent sur le fait que le réchauffement climatique et l'étalement impactent tous deux négativement l'environnement et se renforcent mutuellement. Ils démontrent aussi que l'étalement urbain peut être une des conséquences, méconnue par les autorités, de l'effet à venir du réchauffement climatique (CAVAILLHÈS et al. 2014). Si le climat global influence la croissance urbaine, la ville influence, elle aussi, le climat à son échelle. Cette modification du climat au sein du milieu urbain est, entre autres, à l'origine du phénomène d'ICU. Dans le contexte de changement climatique, le climat urbain se situe au cœur des enjeux futurs. L'appropriation, la traduction ainsi que la transmission des connaissances sur le phénomène d'ICU entre les différents acteurs (chercheurs, décideurs, aménageurs, ...) se heurtent à une réalité sémantique complexe, à des temporalités et à des échelles spatiales différentes. Ainsi, *comment étudier les interactions ville/climat sur des échelles temporelles et spatiales différentes ?*

Il est nécessaire d'expliciter les notions sous-jacentes aux termes de *"Ville", "d'urbain", "d'étalement"* et de *"densification"*, afin d'appréhender la ville dans sa complexité. Cela permet d'avancer et d'étudier différentes échelles urbaines : la Structure (Ville étalé/dense), la Forme (articulation des aménagements effectués à différentes échelles), le Design (Agencement entre bâti, voirie, végétation, vide et plein, ...) et l'Architecture (Type et couleur de matériaux, ...). La relation entre ces différentes échelles urbaines avec le climat urbain et le phénomène d'ICU clôture cette partie.

2.1 DE LA VILLE À L'URBAIN

La ville vient du latin *"Villa"* qui signifie "maison de campagne", maisons autours desquelles, au cours du temps, se sont agglomérés individus, services, etc.... Aujourd'hui, le terme de ville représente "*un milieu physique, le milieu urbain, où se concentrent population et activités*"(Larousse). Pumain (et al., 2006) explique que la ville est un système complexe, multidimensionnel aux temporalités multiples et inscrit territorialement : résultant des interactions entre l'Homme et son milieu, créée pour répondre aux besoins ainsi qu'aux attentes de bien-être de l'Homme. Celle-ci peut recouvrir trois critères (PUMAIN, PAQUOT et KLEINSCHMAGER 2006). Le critère spatial avec une agglomération de population (seuil de 2 000 habitants en France), et de biens, qui exerce une influence sur l'espace alentour et sur son propre espace. Par ailleurs, une ville peut être délimitée par un référentiel temporel comme le temps d'accès au centre-ville par exemple (GUÉROIS et al. 2016). Troisièmement, Gugler (1996) avance l'idée que la démarcation entre milieu urbain et milieu rural est fictive. Il s'agit davantage d'un continuum entre deux espaces plutôt qu'une fracture ou une réelle opposition (GUGLER 1996). Elle peut se définir par des critères fonctionnels (politique, économique, militaire et religieux). Le critère socio-culturel : "*Tout au long de son histoire, la ville ne se caractérise ni par le nombre, ni par les activités des hommes qui y font résidence mais par des traits particuliers de statut juridique, de sociabilité et de culture*" (DUBY 1980). L'ethnographe Lévi-strauss (1955) décrit la ville comme l'objet le plus complexe de l'Homme et apparaît comme ayant une dimension spatiale, sociale et temporelle (LÉVI-STRAUSS 1955). La ville est associée à l'idée (et l'idéal) de civilisation, dont elle est d'ailleurs considérée comme "*l'expression la plus aboutie*" (CIATTONI, BEUCHER et REGHEZZA 2005). Cependant, le terme "*ville*" ne permet pas de faire référence à des échelles inférieures à celle-ci et d'étudier le climat urbain à des échelles fines. Pour ce faire, le terme d'*"urbain"* et ses notions sous-jacentes doivent être précisés.

Dans son dictionnaire "*L'urbain et la Ville*", Denise Pumain établit, dès le titre de l'ouvrage, une différence entre les deux termes. "Urbain" du latin *"Urbanus"* (qui signifie de la ville) est utilisé pour caractériser "*ce qui concerne la ville par opposition à la campagne*". Cette définition, pourtant simple, se heurte rapidement à la réalité des faits. Le premier est la réalité des expansions urbaines et du cadre juridique qui sont présents dans chaque pays (GLÉAU, PUMAIN et SAINT-JULIEN 1996). En effet, chaque pays adopte une posture différente pour définir une ville, qu'il s'agisse de la densité de population, de la distance entre le bâti ou encore des limites administratives. Historiquement, les enceintes médiévales permettaient d'établir de manière nette et précise la frontière entre l'urbain et sa campagne [10]. Aujourd'hui, les espaces périurbains rendent cette définition caduque. Une définition simple de la ville et de l'urbain n'est plus envisageable : "*La nouvelle civilisation qui se met en place à l'échelle planétaire, supprimant l'ancestrale différence entre ville et campagne, et pouvant être définie comme le système opératoire, valable et développable en tous lieux, constitué par des réseaux matériels*

10. A titre d'exemple, la cité grecque d'Athènes ne devient une communauté et une entité géographique et politique (autrement dit : une ville) qu'au moment de la construction de ses remparts.

et immatériels ainsi que par des objets techniques et dont la manipulation retentit dans un circuit bouclé sur les rapports que nos sociétés entretiennent avec l'espace, le temps et les hommes."(CHOAY 1994). Ensuite, la nature même du terme *"urbain"* est sujet à la polysémie et dépend du champ disciplinaire, du statut et de celui qui l'emploie, selon l'intérêt qui peut être porté au cadre bâti, à l'architecture, à l'habitat, aux activités et aux fonctions urbaines, au statut politique ou encore aux modes de vie des habitants (GLÉAU, PUMAIN et SAINT-JULIEN 1996). Des grands schémas de ville sont établis, reposant sur la disposition du bâti (CHAMPION 2001) ou encore sur la localisation de la population (BESSY-PIETRI 2000) à différentes échelles.

Les définitions de "*ville*" et "*d'urbain*" qui seront retenues pour la suite de ce travail sont celles énoncées par Denise Pumain dans son dictionnaire (PUMAIN, PAQUOT et KLEINSCHMAGER 2006). Tandis que la ville est une réalité concrète, l'urbain est, du point de vue des sciences humaines, un champs disciplinaire construit, à travers des théories, des discours et des représentations pour appréhender, considérer et étudier la ville et l'ensemble de ses composantes (PUMAIN, PAQUOT et KLEINSCHMAGER 2006). La notion "d'urbain" permet d'apporter des éléments de compréhension du décalage entre climatologie urbaine et aménagement. La profusion de termes, de définitions ainsi que d'échelles spatiales et temporelles est un frein important pour une meilleure transmission des savoirs entre chercheurs et décideurs.

2.2 PRÉSENTATION DES ÉCHELLES URBAINES ...

2.2.1 STRUCTURE URBAINE : LA VILLE EN GRAND

L'échelle de compréhension la plus étendue spatialement de la ville peut être définie comme la structure ou encore l'armature urbaine. Une définition du dictionnaire de Bavoux (2014) peut être citée : "*La structure est un agencement des constituants visibles et invisibles d'un composant spatial qui, en assurant la cohésion et l'interdépendance des parties, la crée et le maintien comme totalité*" (BAVOUX et CHAPELON 2014). Dans sa thèse, Morgane Colombert (2008) définit la structure urbaine comme comprenant, à la fois, la morphologie, la géométrie, la forme ainsi que les matériaux (et leurs propriétés) (COLOMBERT 2008). La structure urbaine semble ainsi être la méso-échelle urbaine, comprenant, de ce fait, toutes les échelles sous-jacentes (forme urbaine, design urbain et architecture). Le terme structure peut aussi être établi d'après les travaux de l'économiste Anas (et al., 1998) avec la capacité "d'agglomération" (monocentrique) ou de "répulsion" (polycentrique) du système urbain dépendant de ses politiques de croissance et du contexte global (ANAS, ARNOTT et SMALL 1998).

La structure urbaine peut être représentée par des modèles théoriques, étudiant la ville par le prisme du bâti (CHAMPION 2001), des dynamiques démo-spatiales. Denise Pumain établit la variable "taille démographique" comme étant "*un excellent (et le meilleur) résumé de très nombreuses propriétés des villes* (PUMAIN 1997 ; BESSY-PIETRI 2000). D'un point de vu sociologique, la structure de la ville repose sur les relations inter-ethnies en son sein (SÉNÉCAL 2007).

Les travaux de Le néchet (2015) reposent sur l'analyse des travaux de Champion (2001) et proposent six structures urbaines différentes (CHAMPION 2001 ; LE NÉCHET 2015). Pour ce faire, il passe en revue la littérature des différents travaux sur la qualification de la structure métropolitaine et classifie les principales métropoles européennes selon huit critères (population, densité nette, distance au centre, entropie, loi rang-taille, continuité dans le bâti, l'acentrisme et la dimension fractale). Les villes européennes dont la population est supérieure à 500 000 habitants, sont classées en six groupes de structure urbaine (Fig 2.9) :

— La structure métropolitaine dite en "*plateau*", qui correspond à un étalement urbain circulaire, continu et sans rupture ;
— La structure métropolitaine dite "*éclatée*" correspond à un étalement urbain important sans continuité du bâti ;
— La structure métropolitaine en "*doigts de gants*" correspond aux "*corridors d'urbanisation*" (BAVOUX et al. 2005) ;
— La structure métropolitaine en "*pyramide*" est une version de la métropole mono centrique "parfaite" imaginée par les économistes urbains (CLARK 1951 ; ALONSO 1964) respectivement rapide ou lente ;
— La structure métropolitaine en "*satellites*" est une configuration habituelle des aires métropolitaines polycentriques ;
— La structure métropolitaine en "*archipel*". Il s'agit d'une métropole polycentrique résultant de la fusion de plusieurs centres historiques.

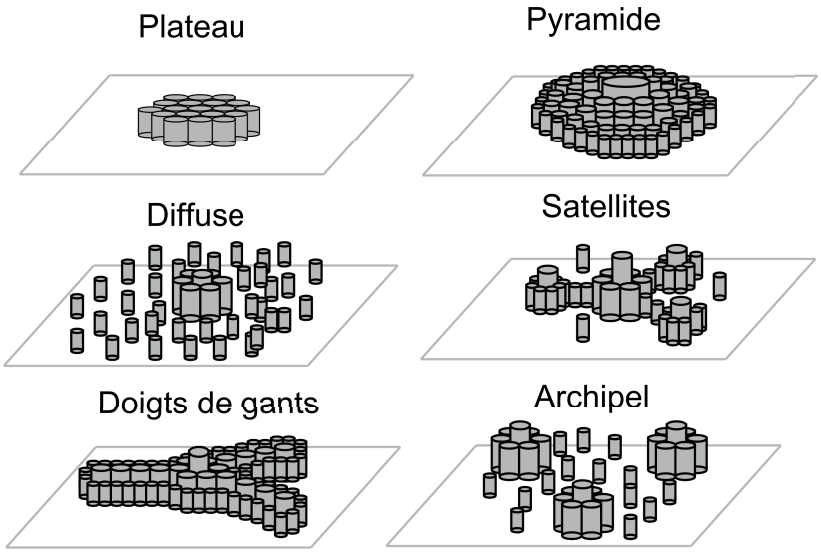


FIGURE 2.9 – Approche multidimensionnelle de la structure métropolitaine (LE NÉCHET 2015)

2.2.1.1 *Quid* de l'étalement urbain ou de la densité

Les villes évoluent, certaines s'étalent, d'autres se densifient selon différents schémas spatiaux sur des périodes temporelles et scalaires différentes. La structure urbaine et ses échelles sous-jacentes sont reliées aux contraintes naturelles mais aussi, et surtout, aux legs historiques qui façonnent la ville à toutes ses échelles et qui favorisent ou empêchent l'émergence de tel ou tel type de forme de ville [11].

Le débat sur "densifier ou étaler la ville" rend compte de la situation actuelle en terme d'aménagement urbain (PEISER 1989 ; GORDON et RICHARDSON 1997 ; LAROCHE, THORETTE et LACASSIN 2006 ; CASTEL 2010 ; SHIRAZI et FALAHAT 2012). Hamin et Gurran (2009) parlent "*d'énigme de la densité"(density conundrum)* (HAMIN et GURRAN 2009). Rousseau (2013) explique que " *le phénomène d'étalement, comme le phénomène de densification se matérialise par la modification des structures de la ville*" (ROUSSEAU 2013). L'une des facettes les plus visibles de l'évolution des villes au cours du temps est l'étalement urbain. Ce dernier peut être défini comme *"le processus d'accroissement important des zones urbanisées en périphérie des villes, qui s'accompagne généralement d'un desserrement des populations et des activités urbaines*" (PUMAIN, PAQUOT et KLEINSCHMAGER 2006). Même si l'étalement urbain est partiellement défini par les sciences, il reste très mal compris par les instances juridiques et institutionnelles (HAUMONT 1974 ; WILSON et al. 2003). Comme l'explique Antoni (2013) " *l'étalement est un processus insidieux . . . , on réalise cependant qu'à travers ces ajouts successifs et insignifiants en eux-mêmes, c'est toute la ville qui s'étend"(*ANTONI *2013)*. Ce phénomène spatial d'étalement urbain résulte d'un processus complexe mêlant, entre autres, économie des territoires, spatialisation des activités et des nœuds de communications, ou encore des faits sociétaux. Les causes de l'étalement urbain sont multifactorielles (LAUGIER 2012) et englobent autant des facteurs économiques que sociaux ou culturels (facteurs micro et macroéconomiques, démographiques, les transports, la préférence du type d'habitat, les problèmes urbains et le prix du foncier).

L'étalement urbain peut prendre différentes formes suivant le contexte économique ou sociétal de la ville. Cependant, quelle que soit la cause, l'étalement urbain s'établit selon cinq possibilités (Fig. 2.10) (GALSTER et al. 2001 ; BATTY, BESUSSI et CHIN 2003).

- L'urbanisation en doigt de gant s'établit le long des principaux axes pénétrants de la ville, et les espaces interstitiels entre ces pénétrantes sont peu urbanisés ;
- L'étalement urbain continu, lorsque la croissance urbaine évolue de manière stable et continue du centre vers la périphérie sans suivre les axes de communications ou autres ;
- La croissance polycentrique sous forme de pôles peu connectés ;
- L'étalement en "*saute-mouton*" correspond à un étalement par pôle sans connexion ;
- Enfin l'étalement discontinu sans logique apparente.

11. " *les villes sont évolutives car elles incorporent toujours du temps historique dans leurs structures*" (PUMAIN 2014)

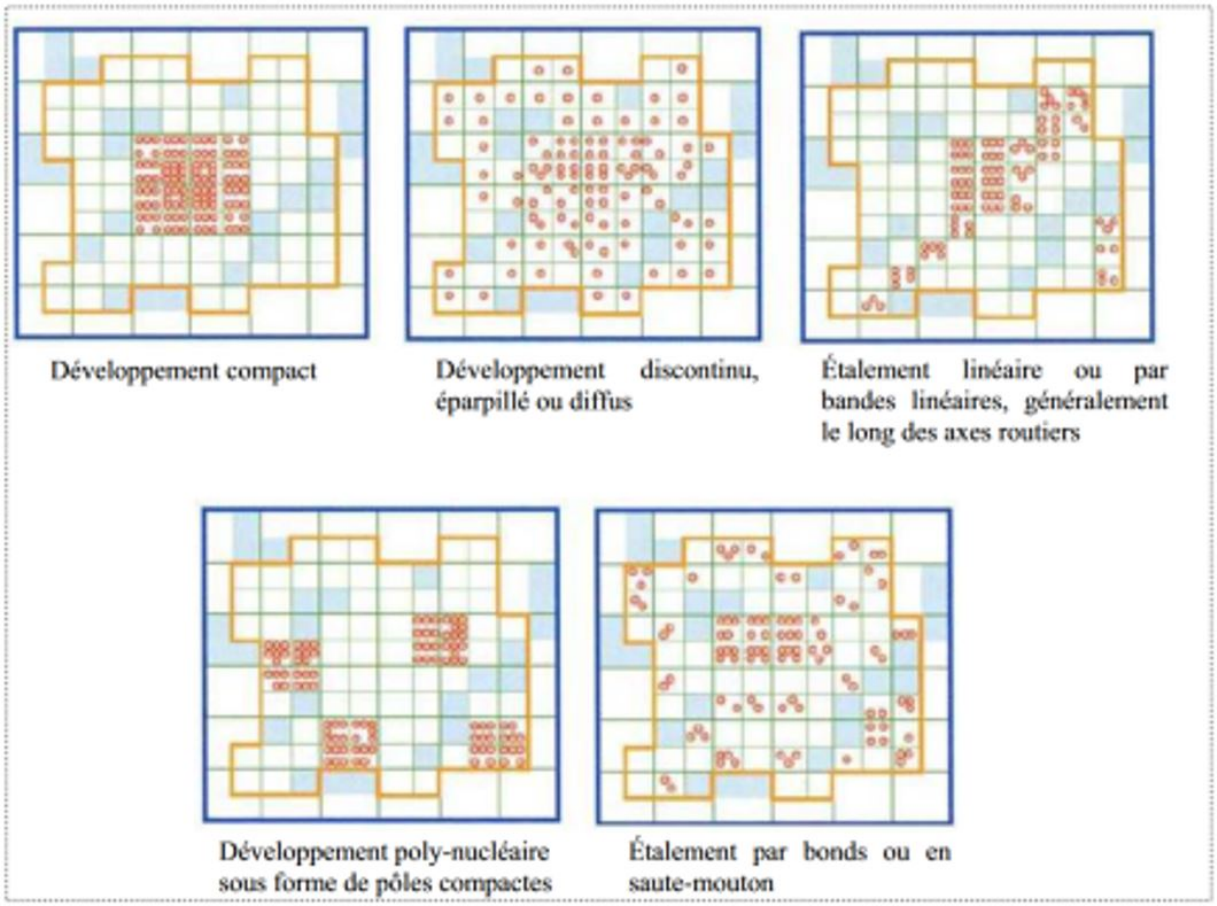


FIGURE 2.10 – Différentes formes de croissance urbaine (GALSTER et al. 2001)

L'étalement urbain impacte négativement les trois piliers du développement durable et induit indirectement de nombreux autres problèmes, tels que la détérioration de qualité de l'air, de l'habitat des espèces ou encore de l'eau (ALBERTI et al. 2003 ; MATTEUCCI et MORELLO 2009). Cependant, malgré tous ces maux, les espaces périurbains continuent d'être attractifs pour les classes moyennes et supérieures. En effet, ceux-ci bénéficient d'un accès relativement rapide à la ville-centre ainsi qu'à la campagne (verte et récréative) et plus généralement d'un cadre de vie agréable (accéder à un logement plus grand et moins cher), même si ce mode de vie est basé sur une utilisation intensive de la voiture (BRAMLEY et POWER 2009 ; YOUSSOUFI 2011). Comme le souligne Mercier et Côté (2012), à la vue des enjeux portés par l'étalement urbain, l'enjeu n'est plus d'empêcher l'étalement urbain, mais d'assurer la meilleure urbanisation possible de la campagne environnante (MERCIER et CÔTÉ 2012).

Les maux portés par l'étalement urbain et le contexte énergétique ont amené les décideurs à repenser la ville et sa croissance. Densifier et requalifier la ville existante est, depuis les années 1990, le modèle dominant des politiques en matière d'aménagement urbain (BREHENY 1997). Cette orientation politique relativement nouvelle de densification et de requalification concorde avec l'avènement du paradigme du développement durable. Cette ville compacte se caractérise par une densité de bâti élevée ayant des bordures nettes et lisses (GEURS et WEE 2006). La

densité vécue et la densité réelle sont deux choses différentes. En 2004, l'APUR a mené une enquête portant sur le vécu de la densité dans quatre quartiers parisiens (APUR 2003). Il apparaît que dans deux quartiers d'urbanisation traditionnelle avec une forte densité celle-ci est synonyme pour les habitants "*d'animation, sociabilité et convivialité*". À l'inverse dans les deux autres quartiers, dont la densité est plus faible et l'urbanisation plus récente (grands ensembles des trente glorieuses), la densité pourtant moindre est synonyme de "*surpeuplement et d'oppression*". Pour ce travail, la croissance urbaine est définie comme le "*résultat de processus socio-économiques qui interagissent à différentes échelles de temps et d'espace hiérarchiquement emboitées* (AGUEJDAD et al. 2016).

La question est de savoir comment densifier la ville. Les éco-quartiers sont la réponse actuelle tant pour renouveler l'espace urbain (en termes de densité et de requalification) que pour l'étalement urbain (BONARD et MATTHEY 2010). Martilli (2014) met en avant une dichotomie entre les échelles globales et locales. Du point de vue global, les villes compactes ont un impact positif car elles minimisent la consommation d'énergie, et, éventuellement, les émissions de CO_2. Mais du point de vue local, les villes compactes ont un impact relativement négatif en créant un climat urbain "dangereux" pour la santé humaine (MARTILLI 2014).

2.2.2 LA FORME URBAINE : DES DÉFINITIONS AUX MULTIPLES FORMES ...

L'échelle "intermédiaire" de la ville est la forme urbaine (GENESTIER 1988). La relation entre structure et forme peut être résumée par la définition : "*les structures ont des formes et les formes correspondent à des structures. La forme du corps humain n'est pas la structure squelettique bien qu'elle en dépende et inversement (un corps qui grossit déforme le squelette)*" (BAVOUX et CHAPELON 2014). La résolution spatiale de la notion de forme urbaine se veut plus fine que celle de la structure urbaine. Historiquement, le terme "forme urbaine" est introduit dans les années 1950 par Muratori MURATORI 1959. Celui-ci a donné vie à cette notion de "*forme urbaine*" avec la publication de son ouvrage intitulé "*Studi per una operante storia urbana di Venezia*" [12] en 1959. Cette notion est utilisée pour comprendre, décrire et analyser au cours du temps et actuellement la ville de Venise (Italie). Selon Saverio Muratori (1959), la "*forme urbaine*" d'une ville ne peut être comprise qu'à travers son histoire, et la construction d'une typologie urbaine est à la base de cette compréhension. La forme urbaine témoigne des différentes actions entreprises par les différents acteurs à travers les époques. Elle permet donc de rendre compte du contexte d'une dynamique historique et sociale dans lequel la forme urbaine s'est construite et continue à évoluer. Lors de l'étude typo-morphologique de Padoue conduite par Aymonino (et al., 1970), celui-ci reprend le concept de "forme urbaine" introduite par S.Muratori (MURATORI 1959 ; AYMONINO 1970 ; CASTEX 2014) et en donne la définition d' "*un processus continu [...] et, s'il est possible de la décrire ou de la caractériser à une période précise, on ne peut négliger pour la comprendre, l'étude des périodes antérieures qui ont conditionné sa croissance et l'ont littéralement formée "*. Ainsi, étudier la croissance des villes devient la première étape à franchir

12. Analyses de l'histoire urbaine de Venise

lors de l'analyse urbaine comme le montre Panerai (1977) où les formes urbaines concilient la prise en compte des modes de vie actuels et le maintien ou la poursuite des dispositions urbaines traditionnelles (PANERAI, CASTEX et DEPAULE 1977).

Le sociologue Dominique Raynaud (1999) explique que "*l'on peut regretter l'absence de définition rigoureuse du concept de forme urbaine*" et rend compte de la difficulté d'apposer à ce concept une définition précise (RAYNAUD 1999). En effet, il explique que "*la polysémie de la notion repose à la fois sur le laxisme terminologique de ces disciplines et sur la complexité même de la notion de forme (qui relève de trois familles étymologiques et sémantiques (1. Incertitudes sur la conjonction. 2. l'urbain et 3. la Forme) fort prolixes (bavard, trop long, ...)*". La polysémie du terme urbain est à considérer lors de la construction et de la compréhension du concept de forme urbaine. Ainsi, à chaque nouvelle lecture de la forme urbaine, le référentiel sémantique et spatial est questionné : tissu, structure, forme ou encore les relations spatiales/humaines/temporelles. La problématique de départ et le but recherché (habitants, climat, image, économie) vont définir le rapport à la notion de forme urbaine.

L'une des définitions la plus complète de la forme urbaine est celle de Burgel et rend compte de la complexité de celle-ci : "*pénétrer dans l'univers des formes urbaines fait entrer dans un monde flou, où se côtoient les constructions matérielles, les pratiques concrètes, les représentations des habitants et les idéologies des concepteurs*" (BURGEL 1993, p161). Une autre définition du sociologue Lefebvre (1970), "*l'urbain est une totalité qui ne peut être appréhendée au moyen des sciences parcellaires, l'urbanisme est une idéologie, la conquête de l'urbain implique une stratégie urbaine [...]*" (LEFEBVRE 1970). Ainsi la forme urbaine peut être définie par son aspect plastique, physique, sensoriel ou perceptuel. Levy (2005) explique que la "forme urbaine" (comme forme du paysage urbain, forme sociale, forme bioclimatique, forme des tissus urbains ou encore des tracés urbains) et son étude dépendent avant tout "*d'un point de vue de départ, d'un regard porté sur la forme, d'une définition préalable qui en délimite le contour et l'approche, à vérifier ensuite sur le terrain*" (LÉVY 2006).

Pour conclure cette approche du concept de "forme urbaine", il peut être dit que celle-ci est large, complexe pour laquelle il existe de nombreuses définitions (GENESTIER 1988 ; SCHWARZ 2010). Cependant, trois constantes sont présentes que nous retiendrons pour la suite :

- La forme urbaine peut et doit s'analyser à différentes échelles. Au niveau local, il s'agit de la forme des parcelles et l'agencement des bâtiments dans celles-ci. À l'échelle urbaine globale, la forme urbaine peut correspondre à une ville dense, étalée ou encore éclatée. L'étude des formes urbaines nécessite une double approche : diachronique (évolution à travers le temps, comparaison entre deux périodes) et synchronique (étude à un instant donné) (MURATORI 1959 ; ANTONI 2012).
- La forme urbaine est une notion multiscalaire (TSAI 2005).
- la perception et l'évaluation de la forme urbaine dépendent de celui qui l'étudie, de son objectif et donc du nombre de caractéristiques utilisées pour la décrire.

La "forme urbaine" est considérée pour ce travail comme le produit historique de l'articulation

des aménagements (évolution des attributs d'un groupe de bâtiment dans une zone délimitée au cours du temps) effectués à différentes échelles (agglomération, quartier, rue, ...) en lien avec l'occupation humaine (politique, sociale,...) de la ville [13].

2.2.3 Design urbain et architecture : des échelles vécues par les habitants

Le design urbain est fondé sur une lecture des composantes physiques de l'espace urbain à l'échelle du piéton et de leur interrelation, tout en considérant l'approche historique, culturelle et sociale (Godier 2009). Il est important de distinguer l'urbanisme, qui correspond à la pratique générale sur la ville (structure et forme), du design urbain, qui est une modification du cadre urbain sur un espace déterminé dans un contexte spatial, économique, politique et social précis. Il s'agit d'éléments perceptibles par les individus. Comme le souligne Wolf (2012), la notion de design urbain "'*permet de répondre à des questions simples comme : peut on s'arrêter ? Passer ? Traverser ? Se reposer ? Circuler en tout temps ? Le design urbain permet de partir de l'objet, de l'espace, du lieu et de l'environnement, et d'intégrer la température, le confort, le bruit, la texture, l'ambiance, la perception.*" (Wolf 2012). Le design urbain est une discipline urbaine à l'échelle de l'individu pour maximiser son confort ou encore ses déplacements.

D'après l'Observatoire Leonardo des Arts et des Techno-Sciences "*L'architecture est l'art de concevoir, de combiner et de disposer, par les techniques appropriées, des éléments pleins ou vides, fixes ou mobiles, opaques ou transparents, destinés à constituer les volumes protecteurs qui mettent l'homme, dans les divers aspects de sa vie, à l'abri de toutes les nuisances naturelles et artificielles. La combinatoire qui préside à l'élaboration de ces volumes s'applique aussi bien à leurs rapports de proportion qu'à leurs matériaux, leurs couleurs et leur situation dans un espace naturel ou dans un contexte environnemental, ensemble qui crée une unité homogène ou non, de dimensions variées, allant du simple abri à la métropole*". L'architecture regroupe les éléments des bâtiments qui sont en interaction avec leur extérieur (rue, cour intérieure, ...) avec différents objectifs (harmonie visuelle, but artistique, maintien de la chaleur dans le bâtiment, ...)

2.2.4 Conceptualisation des échelles urbaines

À travers ces quatre échelles urbaines, il est possible d'étudier une ville dans sa globalité, tant spatialement que temporellement. La figure 2.11 permet de mieux cerner et comprendre le milieu urbain multiscalaire pour la suite de cette étude.

La structure urbaine est l'échelle de compréhension la plus large de la ville. Dans le cas des exemples 1.a et 2.a, la surface de la ville est égale mais leurs structures divergent car l'une présente une structure carrée (1.a), l'autre ronde (2.a) (Fig 2.11, Structure Urbaine). Cependant, ces deux structures urbaines différentes peuvent avoir des formes, design et architecture identiques.

13. http ://collectivitesviables.org/

L'échelle directement sous-jacente à la structure urbaine est la forme urbaine (Fig 2.11, Forme Urbaine). Pour reprendre la définition de forme urbaine, les deux exemples 1.b et 2.b présentent des attributs différents d'un groupe de bâtiments dans une zone délimitée. Le pourcentage d'occupation des sols au sein des deux exemples est identique, la différence repose sur la hauteur du bâti. Il est aussi à noter que la structure et la forme urbaine composent le modèle urbain. L'une des composantes principales du modèle urbain est que cette échelle n'est pas directement ou difficilement perceptible par les individus. La nuance entre forme et design urbain est mince. Le design urbain (Fig. 2.11, Design Urbain) est un agencement différent des éléments constituant la forme urbaine. Ainsi, dans le cas des deux exemples, 1.c et 2.c, les formes urbaines sont respectivement identiques aux exemples 1.b et 2.b mais la répartition spatiale de ces formes urbaines est différente. L'architecture urbaine (Fig. 2.11, Architecture) est une modification des propriétés des bâtiments (albédo, relation entre température de l'air intérieur et extérieur,...). La forme ainsi que le design urbain sont identiques entre les exemples 1.b, c et d (ainsi que 2.b, c et d). Dans le cas de l'exemple de 1.d, l'albédo des bâtiments est modifié, tandis que pour l'exemple 2.d, il s'agit de l'albédo et de l'ajout d'une toiture végétalisée. Enfin, la forme urbaine, le design urbain ainsi que l'architecture forment la morphologie urbaine et celle-ci est vécue par les individus.

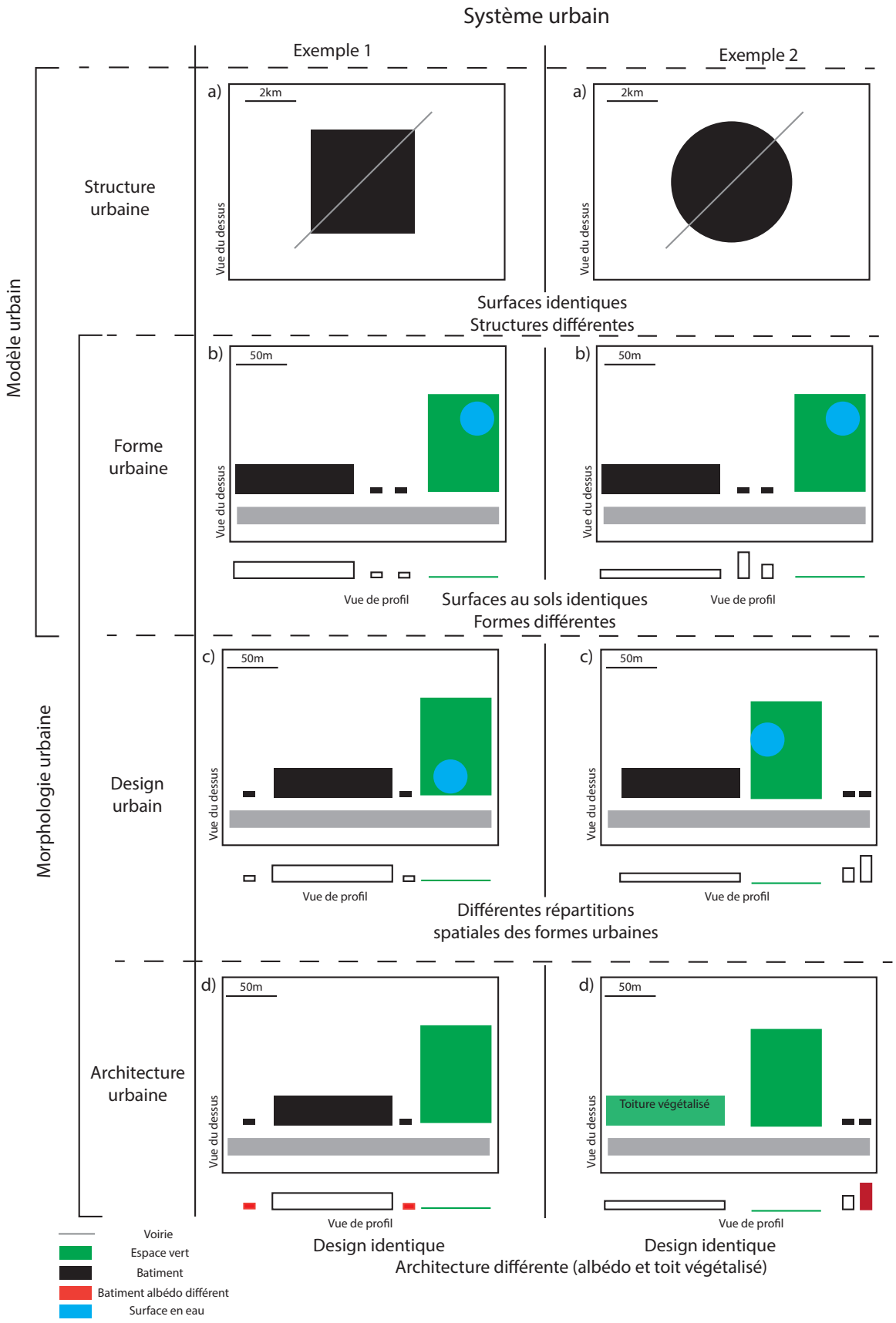


FIGURE 2.11 – Schéma de compréhension des échelles urbaines et leur relation avec le climat. Pour des soucis de compréhension, la Forme urbaine, le Design urbain et l'Architecture sont représentés à la même échelle.

2.3 ... ET LEURS RELATIONS AVEC LE CLIMAT URBAIN

2.3.1 LA STRUCTURE URBAINE : L'ÉCHELLE D'ÉTUDE DES ICU

Les travaux de Zhang (et al., 2010) concernant l'impact de l'expansion urbaine de la ville de Shanghai sur la localisation et l'intensité de l'ICU démontrent que l'accroissement de la population, l'augmentation rapide du produit intérieur brut du pays, la plus grande superficie des routes revêtues et surtout la diminution de la superficie des terres cultivées ont entraîné une augmentation moyenne de l'intensité de l'ICU de 0,28°C tous les dix ans en milieu urbain et de 0,20°C tous les dix ans en banlieue (ZHANG et al. 2010). Une autre étude menée en 2016 sur la ville de Shanghai par Zhao (et al, 2017) porte sur les relations entre la croissance urbaine [14], la forme urbaine (ratio de compacité [15]) et l'intensité [16] de l'ICU (ZHAO et al. 2016). Leurs résultats montrent qu'une croissance urbaine rapide conduit à une modification spatio-temporelle de l'ICU, en particulier le long des routes. Il apparaît qu'une maîtrise de la densité urbaine permet, en réduisant le ratio de compacité (un bâtiment avec peu de surface de mur et de toit et un volume important), de contrôler efficacement l'intensité de l'ICU et d'atténuer sa portée d'influence. Cependant, plus le ratio compacité urbaine est élevé, plus l'intensité de l'ICU est importante. Ils expliquent qu'il est nécessaire de trouver un équilibre entre la densité et la croissance urbaine pour une meilleure gestion des risques liés à l'ICU. Par ailleurs, la relation entre la population et l'intensité maximale de l'ICU est démontrée par (OKE 1973).

L'étude de Li (et al., 2017) porte sur les relations entre la croissance urbaine et les températures de surfaces pour environ 5 000 zones urbaines de plus de 10 km^2 aux États-Unis au cours de la période 2009-2011 (LI et al. 2017). Leur étude montre que la taille de la zone urbaine et sa croissance peuvent expliquer jusqu'à 87% de l'intensité de l'ICU aux États-Unis. Par ailleurs, ils mettent en avant une augmentation plus forte de l'intensité de l'ICU le jour et l'été par rapport à celle de la nuit et de l'hiver.

Les travaux de Li (et al., 2017) et Zhang (et al., 2010) sont similaires, à savoir l'utilisation de données satellites pour étudier l'impact de la croissance urbaine sur l'intensité de l'ICU. Or, même si cette méthode de l'ICU est viable, elle ne permet pas d'étudier l'évolution de l'ICU à travers différents scénarios de croissance urbaine (ZHANG et al. 2010 ; LIN et al. 2017).

Ainsi, si la question "Etaler ou densifier" la ville est sujette à controverse, la question de l'impact de chacune de ces formes d'évolution de villes sur l'ICU l'est également (EWING 1997 ; GORDON et RICHARDSON 1997). Des études tendent à démontrer qu'une forme urbaine dense est moins sujette à l'ICU car elle offre moins de surface qui pourrait être potentiellement réchauffée (STONE et NORMAN 2006). De plus, grâce à l'étude de la relation entre la forme de la ville et l'apparition d'épisodes de chaleurs extrêmes, Stone (2010) constate une augmenta-

14. une analyse spatiale du développement urbain permettant de révéler la relation entre différentes périodes de 1984 à 2014
15. le ratio de compacité urbaine est calculée le rapport entre la surface d'échange totale (toit et mur) avec l'air extérieur et le volume totale du bâtiment
16. extraction de la température de surface à partir de la télédétection

tion deux fois plus importante du nombre de jour de forte chaleur dans les villes “tentaculaires” nord-américaines que dans les villes compactes (STONE, HESS et FRUMKIN 2010).

Bin Zhou (et al., 2017) relient la taille de la ville avec la forme urbaine. Leur étude montre que la taille de la ville est le facteur majeur de l’intensité de l’ICU suivie par sa compacité. Ainsi, du point de vue de l’atténuation de l’ICU, les villes petites, dispersées et étirées sont préférables (ZHOU, RYBSKI et KROPP 2017).

2.3.2 L’UTILISATION DES LCZS POUR L’ÉTUDE DES RELATIONS ENTRE FORME URBAINE ET CLIMAT URBAIN.

Choay (1988) écrit que “*les motifs d’interactions varient à l’infini, ce qui explique l’extraordinaire diversité des villes*” (CHOAY et MERLIN 1988). Cette “*extraordinaire diversité de ville*” est, pour l’étude du climat urbain, un problème majeur. Les Locals Climates Zones (LCZs) sont la réponse actuelle pour formaliser une méthode permettant d’étudier les relations entre climat urbain et forme urbaine (STEWART et OKE 2012).

Un “*laxisme terminologique*” ainsi qu’une méthodologie d’étude des ICU qui ne sont pas réplicables à toutes les villes sont mis en avant par Stewart (2011) puis Stewart et Oke (2012). Ils mettent en lumière le fait que le terme “urbain” semble indéfinissable car compris et interprété différemment d’après la science qui l’étudie “*while such definitions of urban and rural may be evocative of the landscape, they are vague as objects of scientific analysis. In the heat island literature, for example, the term urban evokes an eclectic mix of local settings from which its observations have originated : the wooden quarters*” (STEWART 2011 ; STEWART et OKE 2012). La définition proposée par Oke (et al, 2012) du terme “Urbain” est vue comme un “*constituant, formant ou incluant une ville, une ville ou une partie de ville*”, la ville étant une “*zone densément peuplée... opposée au milieu rural ou à la banlieue*” et caractérisée “*physiquement comme un groupe d’habitations ou bâtiments*”. Par extension, les paysages de banlieue sont ceux situés immédiatement à l’extérieur ou adjacents à une ville, et qui ont des espaces naturels et construits avec des densités de population inférieures à celles des villes mais supérieures à celles du milieu rural.

Comme nous l’avons vu, le flou autour de la notion de forme urbaine dans les sciences humaines ne permet pas de discriminer aisément l’influence de certaines formes urbaines sur l’ICU car “*les chercheurs ont eu l’habitude d’englober sous les notions d’urbain et/ou rural toutes sortes de paysages différents. Par conséquent, les résultats ne peuvent pas être comparés, extrapolés ni généralisés*” (STEWART et OKE 2012). En effet, il est complexe de comparer des résultats entre deux sites d’études ou de mesures à travers le monde à cause d’ambiguïtés puisqu’elles sont menées à différentes latitudes et dans des conditions diverses. Oke (2004) explique qu’il est nécessaire de développer des standards de forme urbaine et leur impact sur le climat urbain pour échanger des données entre les régions, disciplines et laboratoires (OKE 2004).

Ainsi la climatologie urbaine a développé des archétypes de formes urbaines et de morphologies

urbaines pour mettre en évidence l'influence urbaine sur le climat local. Tout d'abord, une classification en zone de terrains urbains (Urban Terrain Zone, UTZ, ELLEFSEN 1990) est avancée, puis les zones de climat urbain (Urban Climate Zone, UCZ, OKE 2004) par oke (2004). Cette approche est basée sur des divisions théoriques du terrain urbain en fonction de leurs capacités à modifier le climat local. Celle-ci est améliorée par Stewart et Oke (2012) pour former les LCZs (STEWART et OKE 2012), Fig. 2.13).

Les LCZs sont des entités spatiales homogènes au regard de leur comportement thermique et de l'intensité des ICU. Ainsi, chaque LCZ génère un climat spécifique qui est identifié à partir d'indicateurs morphologiques et d'occupation du sol (Fig. 2.12). Au total, dix indicateurs (Sky View Factor, Ratio H/W, la longueur de rugosité, la pourcentage de bâti, le pourcentage de surface perméable, le pourcentage de surface imperméable, l'albédo, la hauteur moyenne, les flux de chaleurs anthropiques et la capacité d'une surface à emmagasiner et relâcher la chaleur) présentés par Stewart (2011) permettent d'établir des archétypes urbains.

Local climate zone (LCZ)	Sky view factor[a]	Building surface fraction[b]	Pervious surface fraction[c]	Impervious surface fraction[d]	Height of roughness elements[e]	Terrain roughness class[f]	Surface albedo[g]
LCZ 1 Compact high-rise	0.2-0.4	40-60	<10	40-60	>25	8	0.10-0.20
LCZ 2 Compact mid-rise	0.3-0.6	40-70	<20	30-50	8-20	6-7	0.10-0.20
LCZ 3 Compact low-rise	0.2-0.6	40-70	<30	20-40	3-8	6	0.10-0.20
LCZ 4 Open high-rise	0.5-0.7	20-40	30-40	30-40	>25	7-8	0.12-0.25
LCZ 5 Open mid-rise	0.5-0.8	20-40	20-40	30-50	8-20	5-6	0.12-0.25
LCZ 6 Open low-rise	0.6-0.9	20-40	30-60	20-40	3-8	5-6	0.12-0.25
LCZ 7 Lightweight low-rise	0.2-0.5	60-90	<30	<10	2-4	4-5	0.15-0.35
LCZ 8 Large low-rise	>0.7	30-50	<20	40-50	3-10	5	0.15-0.25
LCZ 9 Sparsely built	>0.8	0-20	60-80	<20	3-8	5-6	0.12-0.25
LCZ 10 Heavy industry	0.6-0.9	20-30	40-50	20-40	5-15	5-6	0.12-0.20
LCZ A Dense trees	<0.4	<10	>90	<10	3-30	8	0.10-0.20
LCZ B Scattered trees	0.5-0.8	<10	>90	<10	3-15	5-6	0.15-0.25
LCZ C Bush, scrub	>0.9	<10	>90	<10	<2	4-5	0.15-0.30
LCZ D Low plants	>0.9	<10	>90	<10	<1	3-4	0.15-0.25
LCZ E Bare rock or paved	>0.9	<10	<10	>90	<0.25	1-2	0.15-0.30
LCZ F Bare soil or sand	>0.9	<10	>90	<10	<0.25	1-2	0.20-0.35
LCZ G Water	>0.9	<10	>90	<10	/	1	0.02-0.10

[a] *Ratio of the amount of sky hemisphere visible from ground level to that for an unobstructed hemisphere*
[b] *Proportion of ground surface with building cover (%)*
[c] *Ratio of pervious plan area (bare soil, vegetation, water) to total plan area (%)*
[d] *Ratio of impervious plan area (paved, rock) to total plan area (%)*
[e] *Geometric average of building heights (LCZs 1–10) and tree/plant heights (LCZs A–F) (m)*
[f] *Davenport et al. (2000) classification of effective terrain roughness (z0) for city and country landscapes*
[g] *Ratio of the amount of solar radiation reflected by a surface to the amount received by it. Varies with surface color, wetness, and roughness*

FIGURE 2.12 – Tableau des valeurs des différents paramètres des LCZs. De STEWART et OKE 2012

Dix catégories composent le système de classification LCZ selon le tissu et la géométrie urbaine (1 à 10 ; Fig. 2.13) et sept selon la couverture de surface (A à G ; Fig. 2.13). La couverture de surface peut évoluer au cours de l'année (cycle végétatif), la classification proposant quatre

variations supplémentaires (Sol humide, sec, neigeux et arbres nus ; Fig. 2.13). Stewart et Oke (2012) expliquent qu'étant donné la difficulté de décrire tous les types possibles de forme urbaine existants, la création de sous-catégories est aussi envisageable à partir de la combinaison de deux ou plusieurs zones climatiques standard. Les LCZs sont statiques, non évolutives. Il n'existe pas de modèle de croissance ou de requalification urbaine intégrant les LCZs. Il est à noter l'absence ou le peu d'appropriation des LCZs par les aménageurs. Ceux-ci utilisent des termes tels que "*ambiance thermique*" ou "*confort thermique*" pour faire référence à l'impact des formes urbaines sur les températures. Si les décideurs et aménageurs construisent et pensent la ville à l'échelle de la parcelle cadastrale, les LCZs permettent de l'étudier à l'échelle d'une maille de taille variable. Celles-ci ne font pas référence à des occupations des sols précises mais plutôt à des archétypes urbains qui peuvent être retranscrits au sein de documents d'urbanisme tel que le SCoT.

À la vue de l'ensemble des éléments abordés (définitions, impacts sur l'ICU,...), une synthèse bibliographique des éléments urbains permet de considérer les éléments de formes urbaines suivants comme facteurs qui influencent le phénomène d'ICU :

- le facteur vue du ciel (YAMASHITA et al. 1986 ; ELIASSON 1996 ; CHEN et al. 2012) ;
- la densité de bâtiment (HU, WHITE et DING 2016) ;
- le pourcentage de bâti, de voirie et de sol imperméable (STONE-JR et RODGERS 2001 ; XU, DING et WEN 2004 ; CHEN et al. 2006 ; HAMIN et GURRAN 2009 ; ALOBAYDI, BAKARMAN et OBEIDAT 2016 ; GUO et al. 2016) ;
- le pourcentage de végétation et de sol perméable (GOMEZ, GAJA et REIG 1998 ; AKBARI, POMERANTZ et TAHA 2001 ; GÓMEZ, TAMARIT et JABALOYES 2001 ; BOWLER et al. 2010 ; LI et NORFORD 2016).

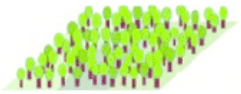
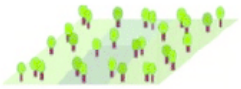
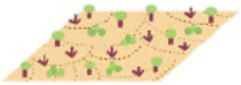
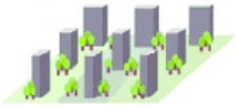
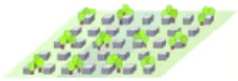
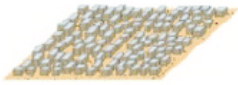
Built types	Definition	Land cover types	Definition
1. Compact high-rise	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	A. Dense trees 	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land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

FIGURE 2.13 – Classification des Local Climate Zones (LCZ)
(STEWART et OKE 2012)

2.3.3 UN DESIGN URBAIN ET UNE ARCHITECTURE AU SERVICE DU RÉCHAUFFEMENT URBAIN

En climatologie urbaine, le design urbain renvoie à la notion de canyon urbain (MASSON 2000). La notion de canyon urbain est utilisée par les climatologues urbains comme étant la plus petite échelle d'étude climatique de la ville. Le canyon urbain est défini comme un volume longiligne de vide urbain délimité en bas par le sol, sur les côtés par les façades alignées des bâtiments d'une rue infinie, et au-dessus par la surface fictive de la canopée urbaine. Cette échelle est idéale pour étudier les mouvements tourbillonnaires en milieu urbain (CHANDLER et MONDIALE 1976 ; DEPAUL et SHEIH 1986 ; GRIMMOND et OKE 1998 ; HIDALGO, MASSON et GIMENO 2009), la quantité de rayonnement solaire reçu (ARNFIELD 1990) ainsi que l'impact local d'aménagements urbains

2.3.3.1 Végétation

Parmi les facteurs "*contrôlables*" de cette échelle, la végétation est l'un des facteurs les plus importants (SHASHUA-BAR et HOFFMAN 2000 ; DIMOUDI et NIKOLOPOULOU 2003 ; SELMI, WEBER et MEDHI 2013). Giridharan (2007) prend en compte les facteurs physiques suivants pour son étude sur l'influence du design urbain sur le climat de la ville : le facteur vue du ciel, l'altitude ainsi que la végétation basse (GIRIDHARAN et al. 2007).

Les bienfaits ou services écosystémiques rendus de la végétation en milieu urbain sont multiples (Fig. 2.14). En effet, que ce soit du point de vue de la réduction des températures, de l'assainissement de l'air ou de son impact sociétal et environnemental, la végétation en milieu urbain est un levier important pour améliorer les conditions de vie en ville (MCPHERSON et al. 1992).

Jean Cavallhès parle de bien "*hédoniste* [17]". Les espaces verts urbains procurent du plaisir aux habitants mais en "contrepartie" ont un prix : celui de la consommation de surface et des coûts d'entretien (4 à 5% des budgets municipaux). Par ailleurs, les surfaces végétales en milieu urbain sont indisponibles pour d'autres usages plus lucratifs et, réduisant la surface disponible, contribuent à la montée (augmentation) des prix du foncier et à repousser les ménages et les activités dans le périurbain. Donc, la mise en place de parcs urbains a un coût non seulement d'entretien mais aussi foncier, ce qui à long terme, peut alimenter l'étalement urbain.

Du point de vue des bienfaits de la végétation sur les individus, les travaux de Wells (2000) démontrent l'importance de la présence de végétation dans le développement cognitif des enfants. Westphal (2003) montre qu'une plus grande présence de végétation a des impacts bénéfiques sur l'économie, sur l'individu mais aussi sur l'ensemble de la communauté (Fig. 2.14) (WELLS 2000 ; WESTPHAL 2003). La présence de végétation en milieu urbain est aussi bénéfique pour la faune qui peut se réapproprier l'espace urbain.

17. Qui procure du plaisir, des impressions agréables (Larousse)

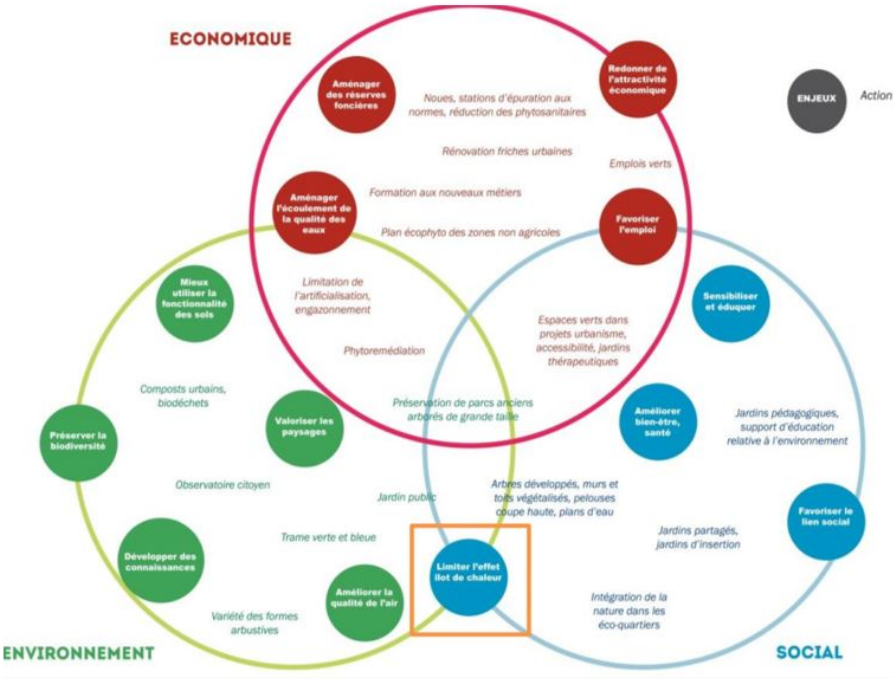


FIGURE 2.14 – Schéma synthétique de l'impact de la végétation en milieu urbain. *ALTERRE* BOURGOGNE 2010

D'après Bernatzky (1982), les parcs urbains peuvent filtrer jusqu'à 80% de la pollution de l'air présente en milieu urbain. En hiver (donc sans leur feuillage), les plantes peuvent conserver jusqu'à 60% de leur efficacité (BERNATZKY 1982). Par le biais de l'évapotranspiration, les arbres contribuent à la diminution des températures en milieu urbain. D'après une étude d'Akbari (1997), pour les conditions propices à l'apparition d'un ICU, l'évapotranspiration peut refroidir l'air urbain de 2 à 8°C (AKBARI et al. 1997). Cependant, pour être active, l'évapotranspiration nécessite des ressources en eau importantes. La présence d'arbres induit aussi la présence d'ombre portée, celle-ci permet une régulation des températures de surface et des bâtiments sous ombrage, mais cette réduction est très localisée (AKBARI et al. 1997 ; SIMPSON et MCPHERON 1998 ; PANDIT et LABRAND 2010 ; CAMERON, TAYLOR et EMMETT 2014 (Fig. 2.15).

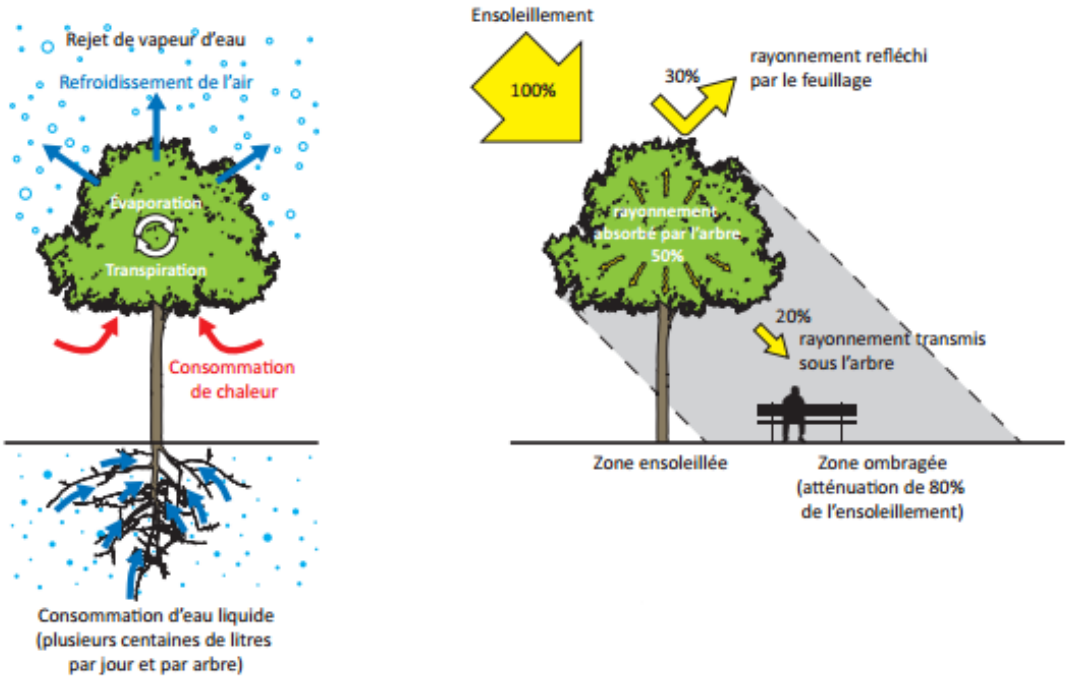


FIGURE 2.15 – Effet d'un arbre sur son environnement en termes de chaleur a. et de rayonnement b. (BIGORGNE, ALBA et C 2012)

Ainsi, Gomez (1998) a noté des températures plus fraîches de 2.5°C par rapport au maximum en milieu urbain au sein du parc Viveros de 20ha à Valence (Espagne) (GOMEZ, GAJA et REIG 1998 ; LEMONSU et al. 2013 ; MASSON et al. 2013a ; LEMONSU et al. 2015 ; PASCAL et al. 2018b).

Une étude menée par Taha (1996) présentée par Akbari (2001), présente une simulation d'implantation d'arbres en milieu urbain dans dix villes nord-américaines (Fig. 2.16). Malgré l'ajout de plusieurs millions d'arbres dans les milieux urbains, les réductions maximales des températures varient entre 1 et 3 °C au maximum (TAHA 1996 ; AKBARI et ROSE 2001).

Location	Millions of addional trees in the simulation domain	Millions of additional trees in the metropolitan area	Max air temperature reduction in the hottest simulation cell (°C)
Atlanta	3.0	1.5	1.7
Chicago	12	5.0	1.4
Los Angeles	11	5.0	3.0
Fort Worth	5.6	2.8	1.6
Houston	5.7	2.7	1.4
Miami	3.3	1.3	1.0
New York City	20	4.0	2.0
Philadelphia	18	3.8	1.8
Phoenix	2.8	1.4	1.4
Washington, DC	11	3.0	1.9

FIGURE 2.16 – Nombre d'arbres ajoutés dans chaque zone métropolitaine et leurs effets simulés sur la réduction des températures ambiantes d'après (AKBARI et ROSE 2001).

Si l'effet de l'évapotranspiration des plantes sur la réduction des températures est admis, la question de la portée de ce refroidissement est encore étudiée. Si Wilmers(1988) explique que le climat urbain (qualité de l'air et ICU) peut être amélioré grâce à la présence de végétation en ville, il constate que la portée du refroidissement et de l'assainissement d'un parc urbain, aussi grand soit-il, est extrêmement limitée (WILMERS 1988). Manin (2007) explique que *"les toitures végétalisées : alors qu'elles constituent généralement de bons refroidisseurs, les toits verts lorsqu'ils sont secs deviennent de véritables pièges à énergie solaire et redistribuent davantage de chaleur à l'air ambiant que la même surface en béton. Ainsi, les espaces verts permettent de refroidir les nuits urbaines tant qu'ils sont suffisamment en capacité d'évapo-transpirer. Il est toutefois à noter que cette fraîcheur ne peut être transmise que dans un rayon de 300 mètres et que seules les maisons situées à moins de 100 mètres du parc profitent d'un refroidissement. Il apparaît donc clair que plus d'habitations pourraient profiter de ce coup de frais si les réseaux de petits espaces verts d'au moins 1 hectare étaient préférés aux grands parcs"*. Ainsi, les petits ou moyens espaces végétalisés seraient plus efficaces que de vastes parcs urbains pour atténuer l'ICU (MANIN 2007).

L'efficacité de telles stratégies de végétation dépend de la disponibilité et de l'approvisionnement régulier en eau. Une étude sur la ville de Paris démontre qu'au-delà d'un taux de végétation de la ville supérieure à 11%, les volumes annuels d'eau ruisselé ne compensent plus ceux nécessaires à l'arrosage estival. Ainsi, la quantité d'eau nécessaire à l'arrosage de toute la végétation urbaine de la région parisienne pendant une période de 6 jours de canicule nécessite de prélever 53% du volume de la Seine. Dans le cas d'un scénario où la végétation est davantage présente, le volume prélevé atteint 73% (DANIEL, LEMONSU et VIGUIÉ 2018). Cependant, dans le scénario où les besoins hydriques de la végétation sont présents, ses avantages pour réguler le microclimat sont indéniables dans une grande partie de la ville de Paris.

Dans le contexte de changement climatique, de modification des ressources hydriques, l'atténua-

tion du phénomène d'ICU par la végétation est, dans une certaine mesure, remis en question. L'urbain, sa forme, son agencement et surtout sa croissance, sont des leviers d'actions durables pour lutter contre l'ICU et améliorer la qualité de vie en ville.

2.3.3.2 Eau

L'impact de l'eau sur les températures en ville dépend avant tout de la surface en eau. En effet, des sources d'eau isolées (fontaine,...) ont un effet de refroidissement très limité dans le temps et dans l'espace. En revanche, des étendues d'eau plus conséquentes et pérennes (rivière, mer, océan, lac,...) influencent de manière notable le climat urbain.

Vinet (2000) souligne que par son inertie thermique, l'eau joue un rôle tampon et atténue les fluctuations de température (VINET 2000). Les résultats obtenus par mesures mobiles en vélo par Theeuwes (2012) à Amsterdam montrent que les canaux, comme les plans d'eau, contribuent à limiter le refroidissement nocturne (THEEUWES et al. 2012). Contre-intuitivement donc, la présence de l'eau ne réduit pas directement l'ICU nocturne mais contribue à la formation de brise thermique à sa surface contribuant à la circulation de l'air.

Toutes les villes ne disposent pas d'un lac ou d'un cours d'eau afin de créer des îlots de fraîcheur (de jour comme de nuit) en permettant un refroidissement très local mais significatif (DANIEL, LEMONSU et VIGUIÉ 2018). L'arrosage de la chaussée est une des solutions potentielles dans la réduction de l'intensité de l'ICU (HENDEL et al. 2015 ; DANIEL, LEMONSU et VIGUIÉ 2018). L'étude de Hendel et al. (2014) sur la ville de Paris porte sur la comparaison entre des températures de chaussées (à 5 centimètre de la surface) non arrosées et arrosées (entre 0.24 et 0.3mm par heure) [18] (HENDEL et al. 2014). Comparées aux températures des chaussées non arrosées, les températures des chaussées arrosées baissent de 5.9 °C en moyenne dans l'après-midi et de 2.3°C le matin (Fig. 2.1). De plus, l'amplitude quotidienne de la température est presque divisée par deux. Le flux de chaleur stockée dans la chaussée est diminué ce qui permet de réduire l'intensité de l'ICU. Hendel (et al., 2014) préconise de débuter l'arrosage de la chaussée quelques minutes avant le début de l'insolation afin de limiter la consommation d'eau et une évaporation inutile. Un arrosage a une fréquence d'une heure lorsque la zone n'est pas ensoleillée et toutes les 30 minutes lors de l'ensoleillement (HENDEL et al. 2014).

18. Au sein de la période de canicule de 2013, pour des jours où la vitesse du vent est inférieure à 10km/h, sans nuages, des moyennes de températures maximales supérieures à 31 °C et des températures minimales moyennes supérieures à 16°C.

Date	Arrosées ou non	Minima	Maxima	Amplitude
7 Juin	Non arrosée	26.0	39.9	14.0
8 Juin	Arrosée	25.3	33.7	8.4
10 Juin	Non arrosée	28.8	43.3	14.5
11 Juin	Arrosée	29.7	36.6	6.8
20 Juin	Non arrosée	22.7	37.9	15.2
22 Juin	Arrosée	22.9	30.7	7.7

TABLE 2.1 – Températures (à 5 cm de la surface) minimales, maximales et amplitudes journalières entre chaussées arrosées et non arrosées pour les 7, 8, 10, 11, 20 et 22 Juin 2013 (en Degré) (HENDEL et al. 2014)

Daniel (et al., 2018) expliquent que malgré des taux d'arrosage raisonnables pour la ville de Paris, la mise en œuvre de politiques d'arrosage de la chaussée à l'échelle de la ville entraîne une consommation totale d'eau très importante, pouvant être potentiellement supérieure au faible débit de la Seine à la fin du siècle DANIEL, LEMONSU et VIGUIÉ 2018. La question de la localisation de cet arrosage est aussi posée. L'arrosage des cours d'écoles ou des lieux publics fréquentés peut être une piste à envisager. La salubrité est aussi à considérer car l'utilisation d'une eau usée peut poser des problèmes de santé publique.

Alors que les climatologues et géographes se sont penchés plus particulièrement sur la formation du climat urbain, les architectes se sont intéressés à l'impact des conditions climatiques et environnementales à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments. Les architectes, focalisés initialement sur les questions de confort intérieur et sur les besoins énergétiques pour le maintenir, se sont ouverts progressivement aux conditions extérieures au bâtiment. Le contexte urbain, modifiant l'apport solaire et le comportement du vent, a ainsi été progressivement intégré dans les pratiques architecturales (ALI-TOUDERT 2005).

Du point de vue de l'impact de l'architecture sur l'ICU, d'après Santamouris (2005), deux écoles existent quant à l'influence des propriétés thermiques et radiatives des matériaux en milieu urbain. Yap (1975) explique que la différence d'albédo entre la ville et la campagne est en grande partie responsable du phénomène d'ICU (YAP 1975). Oke (1991) estime, au contraire, que le rôle de l'albédo est mineur et met l'accent sur les propriétés thermiques des matériaux qui composent la ville (OKE et al. 1991). Le principal rejet anthropique influençant la température urbaine est la climatisation (HASSID et al. 2000 ; OHASHI et al. 2006 ; DE-MUNCK 2013).

À cette échelle, la consommation ainsi que les rejets énergétiques des bâtiments (climatisation, chauffage) peuvent être impactés dans l'étude de l'ICU (MUNCK et al. 2013).

2.4 SYNTHÈSE

La synthèse des relations multiscalaires entre les différents concepts de “forme urbaine” et l’ICU est présentée dans la figure ci-dessous. La figure 2.17 présente deux exemples afin d’illustrer les différentes possibilités de structures, formes, design et architectures en milieu urbain. Une vue du dessus et en coupe pour la forme, le design et l’architecture sont présentés ainsi que les variables qui influencent l’ICU. La structure urbaine (Fig 2.11 a et b) dont la taille et la localisation géographique influencent l’ICU. Dans le cas des exemples 1.a et 2.a la surface est égale et la structure entre les deux villes diverge car l’une présente une structure carrée (1.a), l’autre ronde (2.a) (Fig 2.11, Structure Urbaine). Cependant, ces deux structures urbaines différentes peuvent avoir des formes, design et architecture identiques. Pour la forme urbaine (Fig 2.11, Forme Urbaine), les variables qui influencent l’ICU sont : le Sky View Factor (SVF), la hauteur, la densité, le pourcentage de bâti, voirie et sols imperméables, le pourcentage de végétation et et de sols perméables. La différence de forme urbaine entre les exemples 1.b et 2.b repose sur la hauteur des bâtiments (vue de profil). Il est aussi à noter que la structure et la forme urbaine composent le modèle urbain. Le design urbain (Fig. 2.11, 1.c et 2.c) est un agencement différent des éléments constituant la forme urbaine. Ainsi entre les exemples 1.b et 1.c (ainsi que 2.b et 2.c), les pourcentages de végétation, de voirie et de bâti ainsi que la hauteur moyenne des bâtiments sont identiques mais leur répartition spatiale est différente, modifiant ainsi le SVF ou encore les écoulements des vents et *a fortiori* l’intensité de l’ICU. Cette nuance entre forme et design urbain est une des raisons pour laquelle l’étude de l’ICU est complexe. L’architecture urbaine (Fig. 2.11 1.d et 2.d) est une modification des propriétés des bâtiments (albédo, relation entre température de l’air intérieur et extérieur,...). Le design urbain est identique entre les exemples 1.c et 1.d (ainsi que 2.c et 2.d). Dans le cas de l’exemple de 1.d, l’albédo des bâtiments est modifié, tandis que pour l’exemple 2.d, il s’agit de l’albédo et de l’ajout d’une toiture végétalisée. L’intensité de l’ICU est différente entre les exemples 1.c et 1.d (ainsi que 2.c et 2.d), cela même si la répartition spatiale des éléments urbains est identique.

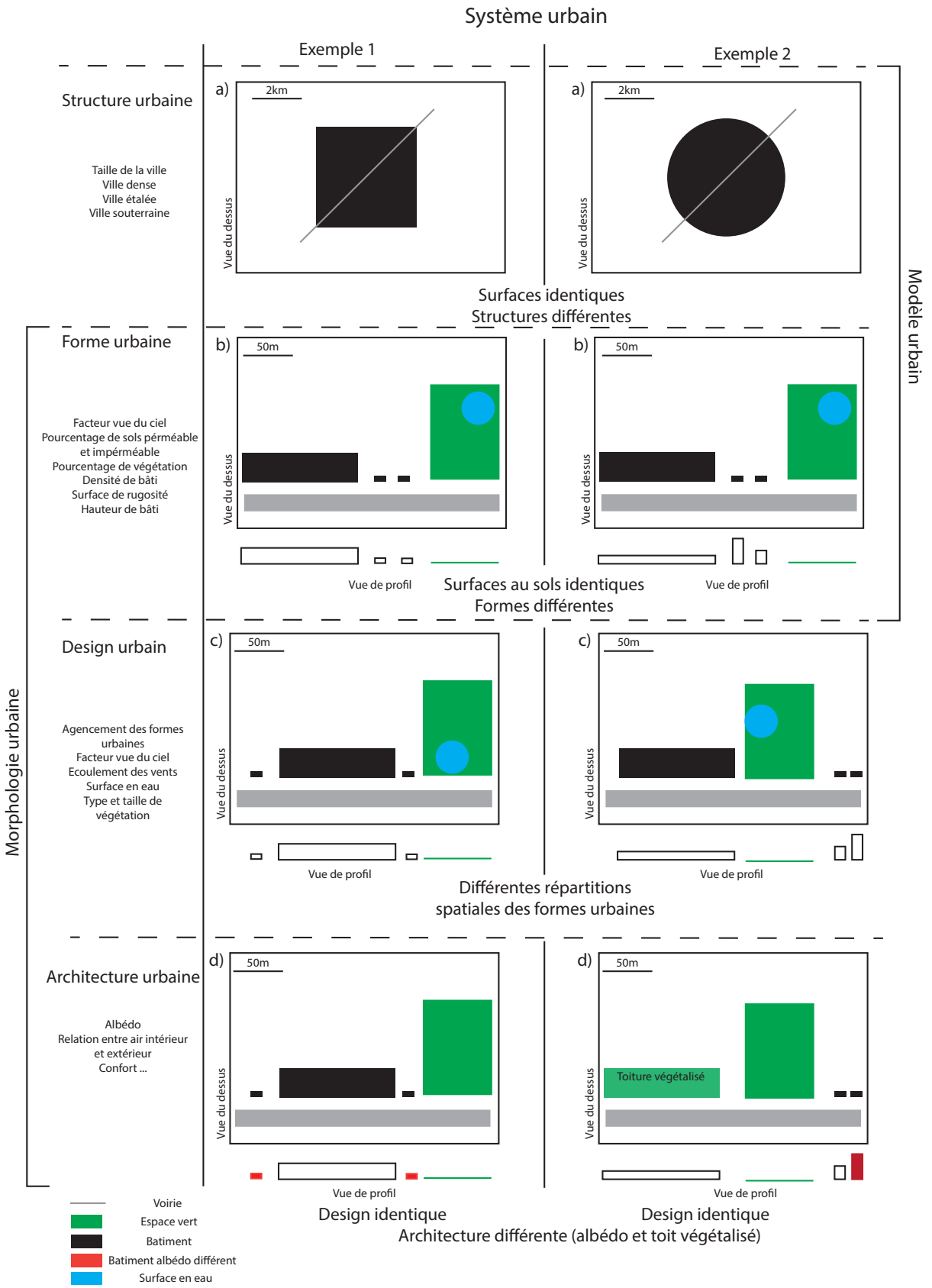


FIGURE 2.17 – Schéma de compréhension des échelles urbaines et leur relation avec le climat. Pour des soucis de compréhension, la Forme urbaine, le Design urbain et l'Architecture sont représentés à la même échelle.

Enfin, la question de l'intégration des enjeux climatiques dans les documents de planification territoriale n'est pas ou peu considérée dans les études portant sur l'ICU. Dans sa définition de phénomène spatial, Durand-Dastès (1973) explique que "*Tout phénomène d'un certain ordre de grandeur est un ensemble de phénomènes d'ordre de grandeur immédiatement inférieur, et compte parmi ses composantes explicatives un phénomène d'ordre de grandeur immédiatement supérieur*". Cette définition synthétise le phénomène d'ICU, il est difficile voire impossible de réduire son étude et sa compréhension à une unique échelle de lecture urbaine. Le système Ville-climat est complexe et réagit en cascade. L'utilisation des LCZs permet de faire le lien entre aménageurs et climatologues (STEWART et OKE 2012 ; HIDALGO, LEMONSU et MASSON 2018). Par ailleurs, le dernier échelon du système urbain est la population. Celle-ci est tributaire du climat urbain et de ses effets (sanitaires et sociaux). Il serait intéressant de mieux connaître la connaissance de la population quant aux enjeux du climat urbaine, notamment la question de l'ICU et de ses impacts. L'annexe (9.4) présente une enquête par questionnaire afin de mieux considérer la connaissance de la population quant à ces enjeux en termes de climat urbain.

SYNTHÈSE PARTIE I : L'ICU UN PHÉNOMÈNE COMPLEXE

Les progrès technologiques ont considéré comme obsolète les "bonnes pratiques" de l'aménagement urbain (mur blanc pour réfléchir les rayons du soleil, bonne orientation des rues pour favoriser l'écoulement de l'air, ...). Dans un contexte de croissance urbaine et de changement climatique s'accompagnant d'une augmentation du nombre d'épisodes caniculaires, les effets indésirables associés au phénomène d'ICU tendent et tendront à s'amplifier et deviennent des enjeux sanitaires et sociétaux de plus en plus préoccupants. Pour de nombreuses villes, notamment en climat tempéré, la problématique de l'ICU n'apparaît qu'à cause de l'intensification de la fréquence et de la durée des épisodes caniculaire dues au changement climatique. Cette partie pose les premiers éléments de compréhensions du phénomène d'ICU pour aboutir au fait que celui-ci est connu. La communauté scientifique est présente, et le manque de recherche sur les relations entre formes urbaines et ICU est et serait préjudiciable. La modification d'une surface ou d'un bâtiment n'influence ni la structure, ni la forme ou encore le climat d'une ville. En revanche, l'accumulation de changements peut modifier l'aspect et le comportement thermique d'une ville. Ainsi, chaque nouveau bâtiment ou modification urbaine devrait être pensé pour s'intégrer dans un système complexe. Par ailleurs, comme nous l'avons vu, le système urbain offre un éventail de possibilités conséquent (couleur, type de bâtiment, ...) pour réduire le phénomène d'ICU. Ainsi dans un contexte de changement climatique et de développement durable, il est nécessaire de penser les aménagements urbains dans leur globalité et pas uniquement par le prisme de certains aménagements (par exemple la végétation, dépendante des ressources en eau). Ainsi, pour ce travail, l'ICU doit être étudié à l'échelle de la structure urbaine mais modifié à l'échelle de la forme et du design. Le nombre de travaux interdisciplinaires portant sur le climat urbain n'a cessé de croître en raison de la complexité des systèmes urbains et climatiques. Aujourd'hui, il est indispensable de renforcer les démarches d'interdisciplinarité transitive et d'intégrer à la pratique de l'aménagement urbain des éléments de climatologie urbaine (OKE 1984 ; BITAN 1988 ; KATZSCHNER 1988 ; ROSENFELD et al. 1995 ; OKE 2006 ; OKE 1988 ; ARNFIELD 1990 ; DE SCHILLER et EVANS 1996 ; THAM et AL. 1999 ; ELIASSON 2000 ; ALCOFORADO 2006 ;

ALCOFORADO et al. 2009 ; MATHIEU 2012a). Cette ouverture aux autres sciences permettrait aux décideurs et aux aménageurs d'intégrer des critères climatiques dans leurs décisions dans le but d'améliorer la qualité de vie en milieu urbain (Fig 2.18). Les différentes disciplines abordées lors de cette partie (climatologie, géographie, aménagement,...) "*entrent en rapport avec l'urbanisme selon des modalités qui vont de la passivité*[19] *à l'agressivité*[20] *en passant par la naïveté*[21] et la transitivité" (MARSHALL 2012). L'urbanisme est une science qui permet d'organiser et rationaliser l'espace des villes, de répartir harmonieusement l'habitat, la voirie, les espaces verts, les industries, les services, en d'autres termes les éléments constituant une ville. L'interdisciplinarité transitive est *"une perfusion par transitivité d'une discipline lointaine par une discipline plus proche"*. L'interdisciplinarité transitive est la posture abordée pour la suite de ce travail (Fig. 2.18). Il serait intéressant de se questionner sur l'apport d'autres sciences qui, par transitivité, pourraient apporter un autre point de vue à la climatologie urbaine. Par exemple, l'écologie avec le développement ou la fuite des espèces animales ou végétales en fonction des températures urbaines. Par le biais d'analyse géographique multiscalaire (Forme urbaine et relation avec l'ICU) et de textes d'aménagements (SCoT et PLU), l'objectif est double. L'urbanisme permet à la climatologie urbaine de tester l'impact de différentes configurations urbaines (SCoT) sur le climat urbain. La climatologie urbaine permet à l'urbanisme d'établir les formes urbaines climatiques pertinentes pour une croissance urbaine durable.

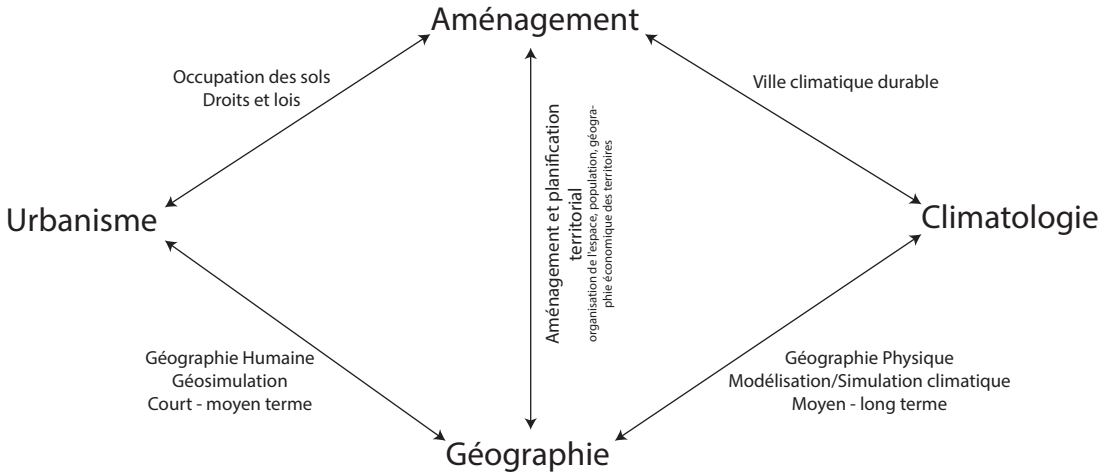


FIGURE 2.18 – Schéma de compréhension de la pluridisciplinarité transitive (urbanisme, géographie, aménagement et climatologie) pour l'étude du climat urbain. D'après MARSHALL 2012

Les causes, conséquences et enjeux principaux du phénomène d'ICU sont présentés, il faut désormais présenter les moyens législatifs permettant d'intégrer l'ICU dans les pratiques d'aménagement ainsi que le terrain d'étude.

19. Interdisciplinarité passive : différentes sciences cohabitent dans un projet commun sous l'égide d'une science "Chef d'orchestre", ou chacune apporte son savoir avec un regard minime sur les autres sciences participant au projet.

20. Interdisciplinarité offensive en sciences : remise en cause d'une science par une autre

21. Interdisciplinarité naïve en sciences urbaines : Une science étudie le domaine de recherche d'une autre science en fonction de ses principes et de ses outils de recherche.

Partie II

L'ICU, le grand oublié ?

*"les espèces qui survivent ne sont pas les espèces les plus fortes, ni les plus intelligentes, mais celles qui s'adaptent le mieux aux changements."(*DARWIN *1859)*

Cette partie positionne le phénomène d'ICU comme un levier d'adaptation pertinent au changement climatique et propose l'agglomération de Dijon comme terrain d'étude pour la suite de ce travail. Il ne s'agit pas ici de réaliser un état de l'art complet du concept de durabilité (économique, social et environnemental) mais d'établir des bases de compréhension et de relation entre le changement climatique et le milieu urbain, notamment l'ICU, à propos de leur intégration dans les documents législatifs. Le concept de développement durable est popularisé avec le rapport Bruntland, publié en 1987 sous l'égide des Nations-Unies (BRUNDTLAND 1987). Ce concept est le pilier des politiques et des prises de décisions pour le développement futur tant à l'échelle mondiale, étatique, régionale ou locale. Ce rapport définit le développement durable comme "*un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs*". Celui-ci doit être économiquement efficace (HOPWOOD, MELLOR et O'BRIEN 2005), socialement équitable (PEARCE et WARFORD 1993 ; GIDDINGS, HOPWOOD et O'BRIEN 2002 ; SMIT et WANDEL 2006 ; OMER 2008) et écologiquement tolérable (DEMPSEY et al. 2011). Le social doit être un objectif, l'économie un moyen et l'environnement une condition (PEARCE et WARFORD 1993 ; GIDDINGS, HOPWOOD et O'BRIEN 2002 ; SMIT et WANDEL 2006).

Actuellement, la transition socio-écologique repose sur l'initiative des citoyens et de la société civile et remplace le concept de développement durable (BARLES 2017a). Cette transition socio-écologique valorise les initiatives locales telles que végétaliser son quartier à Paris avec le permis de végétaliser (BARLES 2017b). Cette transition a aussi pour vocation "*de repérer les complémentarités entre acteurs et encourager les mutualisations des ressources et des énergies*". Si un système humain est au cœur des trois sphères du développement durable et de la transition socio-écologique, il s'agit indéniablement du milieu urbain. La ville peut et doit être un territoire moteur dans le développement et la mise en application de politique sociale, environnementale et durable à travers l'atténuation du phénomène d'ICU. Actuellement, la tendance de la ville intelligente (*smart ciy*) peut permettre, par exemple, la mise en place d'une complémentarité entre

les citoyens et les chercheurs avec la mise en place de capteur connecté (température, humidité, ...) chez l'habitant.

Cependant, Mathieu (2012) explique aussi qu'un milieu urbain durable est une utopie vers laquelle les politiques doivent tendre car "*résoudre les incompatibilités entre développement économique, préservation des ressources et des biens patrimoniaux, équité sociale, pour un même territoire, et pour le long terme, n'est pensable que dans la conscience de son caractère utopique et donc de l'impossibilité de l'atteindre dans ces termes*" (MATHIEU 2012b). Pour tendre vers cette utopie, il s'agit de réfléchir aux modalités d'intégration de l'ICU dans les documents qui fixent le cadre réglementaire de l'aménagement durable.

Comment intégrer la problématique de l'ICU dans les documents d'aménagements ? En quoi Dijon Métropole est-elle un terrain d'étude pertinent pour cette étude ? La dimension législative du phénomène d'ICU, au travers de la présentation des concepts d'adaptation, d'atténuation et des différents documents de planification territoriale, est étudiée. Le rapport de présentation du SCoT est présenté comme un document législatif pertinent pour intégrer des mesures de lutte contre l'ICU. Le terrain d'étude de Dijon Métropole est présenté à travers une étude diachronique et synchronique de sa croissance urbaine. Un état de l'art des différentes études portant sur l'ICU de la métropole est réalisé.

CHAPITRE III. POSSIBILITÉS D'INTÉGRATIONS DE L'ICU DANS LES DOCUMENTS D'URBANISME RÉGLEMENTAIRE

Si le phénomène d'ICU et de changement climatique sont deux phénomènes distincts n'ayant pas les mêmes causes, ils se recoupent dans leur impact à savoir la gestion des températures. Pour le changement climatique, l'atténuation s'établit à l'échelle mondiale à travers des politiques de réductions des émissions de GES. Pour l'atténuation de l'ICU, l'échelle de la ville est la plus pertinente (d'où la difficulté de mettre en place des politiques générales car chaque ville est différente avec sa propre logique de développement). Adapter les milieux urbains aux conséquences croisées du changement climatique et de l'ICU contribue aussi à adapter la société aux changements globaux.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, deux familles de mesures d'atténuation existent pour lutter contre l'ICU. La première est le développement de la végétation en milieu urbain ainsi qu'une meilleure gestion des ressources en eau. L'autre est une meilleure conception et gestion de la structure urbaine, de la forme urbaine ou encore de la morphologie urbaine. *En quoi, dans ce contexte de changement climatique et de croissance urbaine, l'atténuation du phénomène d'ICU est un levier d'action pertinent pour s'adapter au changement climatique et comment inscrire ces actions dans les textes législatifs d'aménagements urbains français ?* L'atténuation de l'ICU comme adaptation au changement climatique en milieu urbain est présentée afin de mettre en avant les relations entre changement climatique, milieu urbain et ICU. Ensuite, l'intégration de la problématique des ICUs au sein des documents juridiques est abordée à travers la mise en avant des différents outils législatifs permettant d'intégrer l'atténuation de l'ICU comme mesure d'adaptation au changement climatique en milieu urbain. Les Schémas Régionaux d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET) et le Plan Climat Air Énergie Territoire (PCAET) de différentes régions et agglomérations seront présentés afin d'étudier l'intégration de la problématique de l'ICU dans les politiques d'aménagements. Enfin, le rapport de présentation du Schéma de Cohérence Territorial est présenté

comme un outil pertinent pour intégrer les Local Climat Zones dans les documents de planifications. Deux exemples d'intégration de mesure de lutte contre l'ICU sont présentées avec le projet de Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie (MApUCE) ainsi que celui de Planification, Adaptation et Energie : Données territoriales et Accompagnement (PÆNDORA).

3.1 L'ATTÉNUATION DU PHÉNOMÈNE D'ICU COMME ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Atténuation et adaptation, le premier est préventif, l'autre curatif, sont les termes plébiscités par les politiques vis-à-vis du changement climatique. Travailler sur des notions de développement durable, d'atténuation, d'adaptation et de mal-adaptation nécessite d'en expliciter les contours. Tout d'abord, atténuation et adaptation ont des échelles spatiales et temporelles différentes. Tandis que l'atténuation du changement climatique est quantifiable, en tonnes de CO_2 rejetées par an, à l'échelle mondiale, l'adaptation est davantage le fruit de politiques plus locales avec des échelles temporelles importantes.

L'adaptation consiste, non pas à traiter les causes, mais à se prévenir des conséquences. Pour notre étude, la vulnérabilité est comprise comme la propension d'une population ou d'un écosystème à subir des dommages en cas de variations climatiques, et dépend de leur capacité d'adaptation. Ainsi, adaptation et vulnérabilité sont deux réactions interdépendantes aux divers effets du changement climatique. D'après le Ministère de la Transition écologique et solidaire, trois grands types d'adaptations peuvent être adoptés. L'adaptation autonome (ou spontanée) n'est pas préméditée et vise une mesure précise. L'adaptation incrémentale s'effectue étape par étape afin d'être pleinement conscient de l'apport de chaque changement et éviter les maladaptations. L'adaptation transformationnelle consiste à adapter ses éléments fondamentaux pour répondre à un risque.

Ainsi, l'idée implicite que l'adaptation marque l'échec de l'atténuation est présente et relègue l'adaptation aux marges des politiques de lutte contre le changement climatique. Concrètement, l'adaptation au changement climatique se traduit, en France, de deux façons. La première est une réduction des émissions de GES, l'autre est une meilleure gestion de l'énergie afin de préparer l'avenir énergétique tels que l'industrie solaire, le stockage de l'électricité, les réseaux intelligents et les biocarburants de deuxième génération. L'idée est que si les causes sont traitées (atténuation), il n'y a pas ou peu de conséquences, donc une adaptation même partielle est inutile. Smit et Wandel (2006) expliquent que " *Adaptation to climate change has the potential to substantially reduce many of the adverse impacts of climate change and enhance beneficial impacts—though neither without cost nor without leaving residual damage*"(SMIT et WANDEL 2006). L'adaptation au changement climatique est bénéfique financièrement et socialement sur le long terme. Plus l'adaptation est effectuée en amont des décisions, moins une révision est nécessaire engendrant des gains financiers et sociaux. À titre d'exemple, il est plus rentable de

construire un bâtiment thermiquement performant que de l'isoler par la suite.

L'atténuation d'un phénomène consiste à en traiter les causes. Deux grands types d'actions sont possibles pour atténuer le changement climatique, le premier est de réduire les sources d'émissions dans les différents secteurs d'activités (par exemple en remplaçant les voitures à moteurs thermique par des voitures hybrides ou électriques). La deuxième famille d'action est le développement des "puits de carbone".

La spatialisation des futurs projets d'aménagements urbains aboutit à des conséquences environnementales, sociales et économiques. Afin de répondre aux objectifs et impératifs du développement durable, il est nécessaire de penser et repenser globalement l'aménagement, plus précisément l'aménagement urbain et l'occupation des sols, dans un contexte de changement climatique et d'atténuation du phénomène d'ICU.

Cependant, il faut être conscient que la frontière entre adaptation et maladaptation est ténue. Une situation dite de maladaptation correspond à une ou plusieurs des situations suivantes [22] :

- Utilisation inefficace de ressources comparée à d'autres options d'utilisation (par exemple, le recours massif à la climatisation à la place d'une meilleure isolation ou d'une meilleure configuration spatiale de la ville) ;
- Transfert incontrôlé de vulnérabilité : d'un système à un autre, mais également d'une période à une autre ; réduction de la marge d'adaptation future (mesures qui limitent la flexibilité éventuelle) ;
- Erreur de calibrage : sous-adaptation ou adaptation sous-optimale (par exemple, un manque de végétation en ville). L'erreur de calibrage est, dans le contexte d'incertitude lié au changement climatique, un axe potentiel important de maladaptation.

Il est compréhensible qu'une adaptation (notamment autonome ou spontanée) qui pouvait sembler pertinente à une époque puisse, sur le long terme, se révéler être une maladaptation. L'adoption de stratégies dites "sans-regrets" (renforcer l'adaptation en considérant l'ensemble des variables tant climatiques que sociales), stratégies qui permettent, d'une part, de réduire la vulnérabilité au changement climatique et d'autre part, de conserver les avantages quelles que soient les évolutions climatiques (qualité de vie,...). Le type de régime (démocratique,...) ne semble pas être un facteur d'une non mise en place de politique d'adaptation au changement climatique. En revanche, le niveau d'éducation de la population détermine fortement l'adoption d'une politique d'adaptation au changement climatique. Enfin, l'économie du pays et l'économie mondiale semblent être les principaux facteurs influençant la mise en place d'une politique d'adaptation mondiale, étatique ou régionale (STEVES et TEYTELBOYM 2013).

Le phénomène d'ICU et de changement climatique sont deux phénomènes distincts n'ayant pas les mêmes causes, ils se recoupent dans leur impact à savoir la gestion des températures. C'est en atténuant l'ICU qu'une adaptation et une réduction de la vulnérabilité au changement climatique est possible (Fig. 3.19). La modification de la forme urbaine est une adaptation pérenne de la

22. https ://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/adaptation-france-au-changement-climatique

ville, tandis que la végétation est davantage tributaire des aléas climatiques et des ressources en eau.

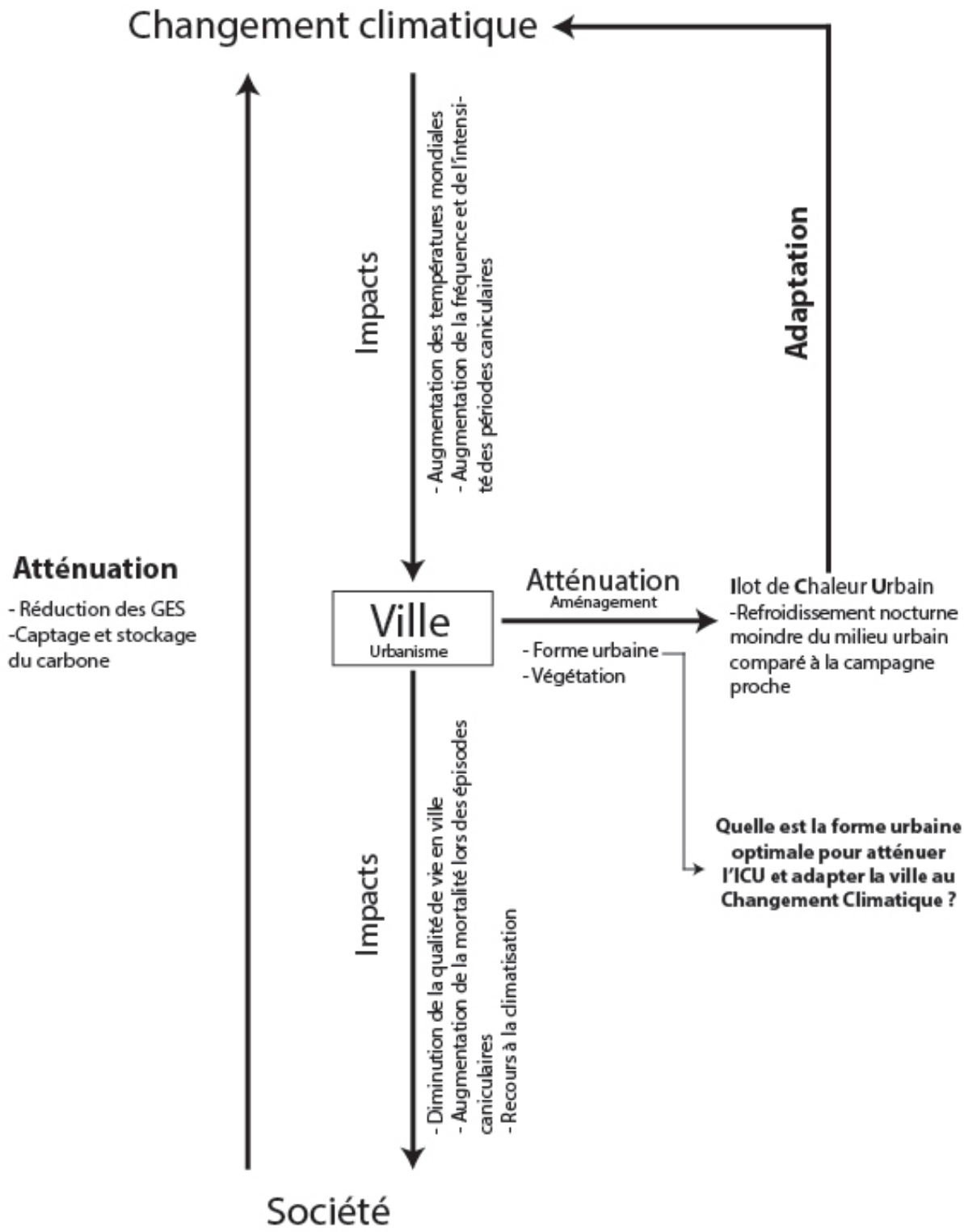


FIGURE 3.19 – Schéma des relations entre l'atténuation du phénomène d'ICU et l'adaptation au changement climatique.

3.2 Le Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires et le Plan Climat Air Énergie Territoire

En France, le schéma d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) est un schéma de planification à l'échelle régionale. Le SRADDET, qui remplace le schéma régional d'aménagement et de développement durable du territoire (SRADDT), créé en 1995, a été institué par la loi portant sur la nouvelle organisation territoriale de la République (NOTRe) dans le contexte de la mise en place des nouvelles Régions en 2016. Trois parties composent la SRADDET. La première, le rapport d'objectifs, *"fixe les objectifs de moyen (2030) et long (2050) termes sur le territoire de la région en matière d'équilibre et d'égalité des territoires, d'implantation des différentes infrastructures d'intérêt régional, de désenclavement des territoires ruraux, d'habitat, de gestion économe de l'espace, d'intermodalité, de logistique et de développement des transports de personnes et de marchandises, de maîtrise et de valorisation de l'énergie, de lutte contre le changement climatique, de pollution de l'air, de protection et de restauration de la biodiversité, de prévention et de gestion des déchets* [23]" Ses objectifs sont définis en onze domaines obligatoires : la lutte contre le changement climatique, la gestion économe des espaces, la pollution de l'air, l'implantation d'infrastructures d'intérêt régional, la protection et la restauration de la biodiversité, l'intermodalité et le développement des transports, la prévention et la gestion des déchets, l'équilibre territorial, le désenclavement des territoires ruraux, le logement et l'habitat, la maîtrise et la valorisation de l'énergie. La seconde partie est le fascicule de règles. Celle-ci est la partie avec laquelle certains documents locaux d'urbanisme devront être compatibles. Le SRADDET est un document d'aménagement du territoire, qui contrairement aux documents d'urbanisme, ne détermine pas de règles d'affectation et d'utilisation des sols. Le SRADDET est davantage un document d'orientation stratégique, à visée prospective et qui est opposable à certains niveaux de collectivité tels que les schémas de cohérence territoriale (SCOT), le plan local d'urbanisme (PLU) ou encore le plan climat air-énergie territorial (PCAET). Chaque région définit son SRADDET en fonction de ses objectifs de croissance et de gestion de ses ressources. Enfin, les derniers documents qui composent le SRADDET sont les annexes, celles-ci ne contiennent aucun document prescriptif mais uniquement des éléments, études et analyses du territoire régional à valeur indicative sur des éléments précis.

La problématique de l'ICU, notamment sa limitation, est présente dans l'ensemble des SRADDET des régions françaises, généralement dans les rubriques des stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Pour ce travail, une première étude des SRADDET de l'ensemble des régions nous montre que l'occurrence d'apparition des termes "îlot(s) de chaleur urbain" ou "température(s) urbaine(s)" ou encore "chaleur urbaine" est de 3 en moyenne, 32 en moyenne pour les termes de "qualité de l'air", 7 pour les termes "confort thermique" et 17 pour les termes de "gestion des déchets". Cette simple recherche d'occurrence d'apparition

23. art. L4251-1 du code général des collectivités territoriales

des termes dans les SRADDET pointe le fait que la question de la qualité thermique des milieux urbains est encore au second plan des problématiques urbaines, notamment celle des ICU.

L'échelle régionale du SRADDET ne permet pas d'apporter des réponses à l'échelle de chaque ville pour lutter contre l'ICU. Ainsi des grandes orientations sont fournies, telles qu'une imperméabilisation moins importante des sols dans le cas du SRADDET de la Bourgogne Franche-Comté. Il est donc nécessaire de se pencher sur une échelle d'action locale afin d'étudier la considération du phénomène d'ICU dans les documents de décision. Le Plan Climat Air Énergie Territoire (PCAET) a été introduit suite au Plan Climat Énergie Territoire (PCET) de 2016, amorcé lors du Grenelle de l'Environnement. L'élaboration d'un PCAET est obligatoire pour tout établissement public de coopération intercommunale (EPCI) de plus de 20 000 habitants. L'EPCI doit coordonner la transition énergétique et animer les actions du PCAET sur le territoire. Le PCAET peut être élaboré par la même instance que celle qui réalise le schéma de cohérence territoriale (SCoT) et décline sur le territoire les objectifs internationaux, européens et nationaux en matière de qualité de l'air, d'énergie et de climat. Pour cela, le PCAET définit, en cohérence avec les engagements internationaux de la France, des objectifs stratégiques et opérationnels pour l'adaptation et l'atténuation du changement climatique, le développement des énergies renouvelables, la maîtrise de la consommation d'énergie, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la dépendance énergétique. Au sein de plusieurs d'entre eux (Lyon, Paris, Toulouse, Strasbourg, etc), la végétation, à travers sa préservation et sa valorisation, est présentée comme principal levier d'action pour limiter l'intensité des ICU. Renforcer la présence des îlots de fraîcheur urbains est, pour de nombreuses agglomérations, la réponse à la problématique des ICU. Le PCAET parisien est ambitieux avec pour objectif "*d'ici 2020, il est souhaité qu'aucun Parisien ne soit à plus de 7 minutes de marche d'un îlot de fraîcheur et d'ici 2030, au moins 300 îlots et parcours de fraîcheur seront créés ou rendus accessibles au public*". La lutte contre l'étalement urbain ainsi que la construction bio-climatique des nouveaux bâtiments sont aussi présentés comme des moyens de lutte contre l'ICU. Dans son PCAET, la métropole de Toulouse souhaite implanter un réseau de sonde connecté en temps réel qui sera composé de 60 capteurs météo afin de caractériser les îlots de chaleur et les îlots de fraîcheur. Dans son PCAET, Dijon Métropole présente un réseau Mesures urbaines de la température dans l'agglomération du Grand Dijon (MUSTARDijon). Ce réseau se veut unique en France par sa longévité, depuis 2014, et dispose actuellement de 60 capteurs.

Ainsi, qu'il s'agisse des SRADDET ou des PCAET, la thématique des îlots de chaleur est présente. Celle-ci est considérée à travers le prisme de l'adaptation au changement climatique, la végétation et la lutte contre l'étalement urbain. Certaines agglomérations comme Toulouse et Dijon se dotent de réseaux de capteurs, afin d'étudier le climat urbain.

3.3 LE SCOT, LE DOCUMENT ADÉQUAT POUR INTÉGRER LA PROBLÉMATIQUE DE L'ICU

3.3.1 FOCUS SUR LE RAPPORT DE PRÉSENTATION DU SCOT

Afin de répondre aux attentes de développements durables, économiques et sociaux multiples des populations tout en considérant le milieu urbain dans sa complexité et en respectant l'agenda politique (mandat), les collectivités doivent opérer des choix et définir des grandes orientations pour améliorer et développer durablement le cadre de vie en milieu urbain. Pour cela, il est nécessaire de penser la planification à une échelle territoriale pertinente. Devant le nombre de documents s'attachant à différents aspects de la question environnementale, il est nécessaire de se pencher plus particulièrement sur les Schémas de Cohérence Territoriaux (SCoT), qui jouent un rôle central dans le paysage de l'aménagement urbain et de l'environnement (Fig. 3.20 [24] [25]).

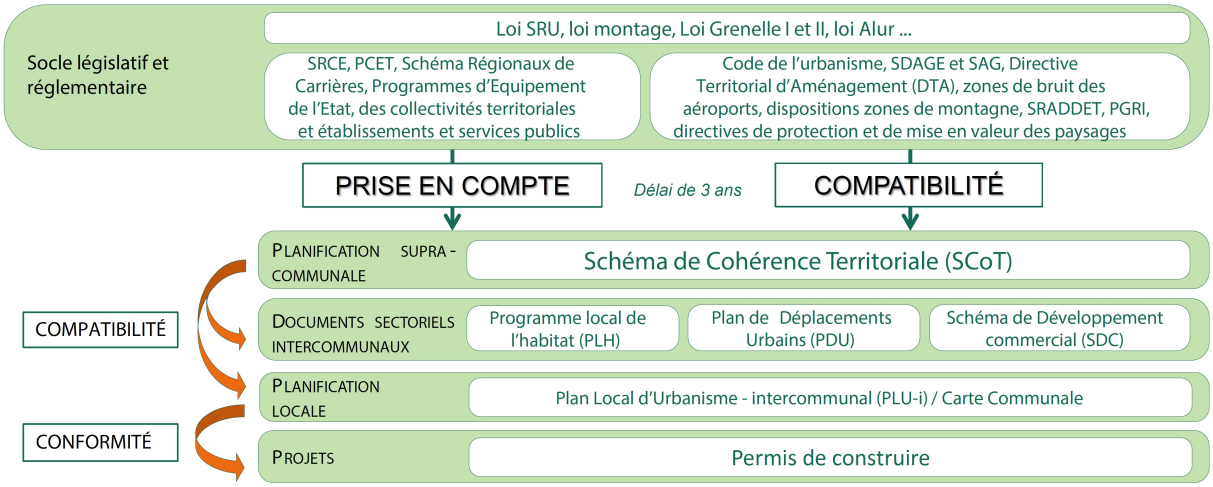


FIGURE 3.20 – Loi SRU : Loi de Solidarité et de Renouvellement Urbain. Source : Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales

L'objectif du Conseil Economique, Social et Environnemental (CESE) [26] est de construire une politique commune pour l'application des principes de développement durable à l'ensemble des métropoles françaises. Il semble que le meilleur échelon pour le traitement du climat urbain soit l'échelle urbaine (KOUSKY et SCHNEIDER 2003). Contrairement aux causes du changement climatique, qui elles, peuvent être traitées à l'échelle étatique ou mondiale, la problématique

24. La compatibilité est une notion souple et moins contraignante sur la conformité. Pour être compatible avec le SCoT, le PLU ne doit pas contrarier une orientation du parti d'aménagement, mais s'inscrire dans la continuité des objectifs du SCoT. En revanche, le permis de construire doit respecter strictement les règles définis dans le PLU

25. SRCE : Schéma Régional Climat Air Energie.. PCET (PCE**A**T) : Plan Climat **A**ir Energie Territoire. SDAGE : Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux. SAGE : Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux. SRADDET : Schéma Régionale d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires. PGRI : Plan de Gestion des Risques d'Inondation.

26. Le CESE possède une fonction consultative, optionnelle et non opérationnelle. Leur rapport est en doublon avec celui de l'assemblée nationale ou de la commission européenne.

de l'ICU nécessite d'être comprise et abordée à l'échelle du territoire urbain. Plusieurs travaux ont identifié le SCoT et le PLU comme les outils de planification territoriaux les plus pertinents pour intégrer la problématique de l'ICU (COLOMBERT 2008 ; LAMBERT, DEMAZEUX et GALLAFRIO 2016). Les actions entre l'aménagement du territoire et le climat urbain doivent être synergiques. Même si cette volonté est louable, il semble que la climatologie, tout du moins dans son versant urbain, ne soit pas ou peu prise en compte lors des décisions d'aménagement (ELIASSON 2000). De nombreux travaux sur la ville climatique « utopique » (LANDSBERG 1973 ; BITAN 1992 ; GOLANY 1996 ; GIVONI 1998) tendent tous à démontrer que le manque de chercheurs dans le processus de décision est préjudiciable. Dans le même temps, Golany (1996) part du principe que si les spécialistes (climatologues, géographe, économistes, ...) mettent à disposition un grand nombre de données sur la ville (climat urbain, congestion, ...), c'est aux professionnels de la ville et non aux spécialistes de les traduire et d'adapter ces données en outil d'aménagement (GOLANY 1996). Landsberg (1973) aborde la question de la ville "météorologiquement" utopique et liste un ensemble de règles à suivre telles que la non-urbanisation des zones inondables, la présence d'un maximum de surfaces couvertes de végétaux, la préservation des arbres, la réduction de l'utilisation de la voiture, la création de parkings en sous-sol et non en surface, la réutilisation de la chaleur, la prise en compte de la ventilation et des problèmes de pollution atmosphérique, etc (LANDSBERG 1973).

Comme le souligne Hidalgo (et al., 2018) : "*Anthropogenic climate change appears to be a window of opportunity to put climate issues on the urban agenda but today climate knowledge and experience in co-construction on the local scale can also contribute the the reflection on climate problems on the global scale*", le contexte actuel de changement climatique et d'urbanisation croissante est adéquat pour intégrer l'ICU dans les textes juridiques. Les grandes orientations en terme de développement durable sont établies à l'échelle mondiale ou nationale (Paquet 3 x 20) et imposées aux échelles locales. Or, il est impossible d'apposer un cadre commun à des systèmes complexes et donc à l'ICU. Cela rend nécessaire la construction d'une méthode qui considère la particularité propre à chaque système urbain (HIDALGO, LEMONSU et MASSON 2018).

La construction et la mise en place d'un projet de territoire à l'échelle de la ville nécessite, notamment s'il s'agit d'un projet porté par un élu et/ou une collectivité locale, une participation collective d'acteurs non-opérationnels (citoyens, entreprises, associations, ...) afin de mener une étude viable de l'évolution du territoire. Ainsi, de l'élaboration jusqu'à la mise en application d'un projet de territoire, les intérêts, les points de vue multiples et parfois contradictoires (politiques et techniques, publics et privés, particuliers et collectifs, etc.) des différents acteurs peuvent et doivent être considérés. Cela permet d'intégrer différentes échelles du territoire (du lotissement pavillonnaire à l'agglomération) au document de planification et de les articuler à différents horizons temporels allant du quotidien du citoyen, au mandat de l'élu jusqu'à l'horizon du SCoT à plusieurs décennies. Ce nombre important d'acteurs peut malgré tout être un frein car il faut concilier les volontés et objectifs de chacun, parfois contradictoires, pour un

développement durable.

Or, malgré ce “frein” à la mise en œuvre de planification, les villes disposent de nombreux outils législatifs afin de maîtriser au mieux la croissance, l’aménagement ou la requalification de leur territoire. Il est donc nécessaire de se pencher sur les documents qui promulguent ou sont susceptibles de promulguer l’aménagement durable (SCoT et PLU), plus particulièrement le climat urbain et le phénomène d’ICU.

Le SCoT et le PLU ont un rôle stratégique pour le territoire. Ces deux documents permettent de définir un spectre d’évolution possible, préférable ou non, du territoire. Ils sont la synthèse de la volonté des territoires quant à l’importance que celle-ci accorde aux problématiques environnementales (qualité de l’air, préservation des espaces verts, prévention des risques naturels prévisibles, nuisances, ...). À travers leur SCoT, les collectivités locales peuvent "*transcrire au sein de leur document une volonté d’une ville en adéquation avec son climat*" (COLOMBERT 2008).

Lambert (2013) explique que les enjeux climatiques urbains peuvent et doivent être intégrés dans le SCoT. Le SCoT est“*l’outil de conception et de mise en œuvre d’une planification intercommunale, à l’échelle d’un large bassin de vie ou d’une aire urbaine, dans le cadre d’un projet d’aménagement et de développement durables (PADD)* [27]”. Il s’agit du principal outil de planification réglementaire en France et “*résulte d’un souhait d’anticipation à travers une prospection d’anticipation nourrissant une réflexion à caractère politique ou stratégique (prospective normative ou contrastée)* (LAMBERT-HABIB et al. 2013). La prospection est une “*exploration méthodique d’un lieu pour trouver quelque chose*“(JULIEN, LAMONDE et LATOUCHE 1975). Autrement dit, le SCoT offre un cadre de réflexion global, permis par l’élaboration de scénario prospectif et l’étude de leurs conséquences (environnementales, sociétales, économiques,...) dans de multiples domaines (environnement, transports, ...). L’élaboration d’un SCoT permet aux communes de réaliser ensemble, en partageant leur vision et leur volonté, certaines études qui seront nécessaires à l’élaboration de leurs Plans Locaux d’Urbanisme (PLU). Le SCoT impose, en termes de compatibilité, ses orientations aux PLU (Fig. 3.20). Sur la base de ces scénarios, le SCoT peut ainsi proposer des recommandations relatives au climat urbain déduites, par exemple, de simulations climatiques.

Le SCoT est composé de trois éléments : le rapport de présentation, le projet d’aménagement et de développement durable (PADD) et le document d’orientation et d’objectifs (DOO) (Fig. 3.21).

27. www.cohesion-territoires.gouv.fr/le-scot-un-projet-strategique-partage-pour-le-developpement-de-lamenagement-dun-territoire

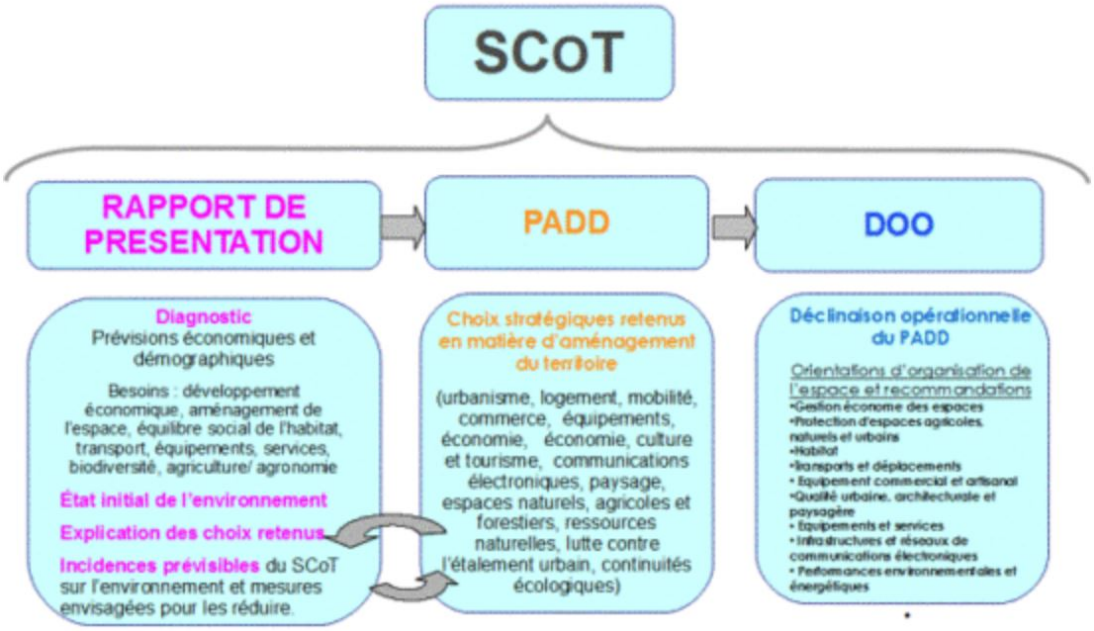


FIGURE 3.21 – Les composants du SCoT. Politiques publiques, aménagement urbanisme, habitat, construction et planification. D'après le Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales

Lambert-habib (2013) démontre que le rapport de présentation du SCOT est l'étape adéquate pour intégrer la problématique de l'ICU (LAMBERT-HABIB et al. 2013). Le rapport de présentation est un diagnostic du territoire sur un thème donné et permet d'orienter et de justifier le PADD et le DOO. Cette étape d'évaluation environnementale du territoire est subdivisée en plusieurs "sous étapes". Une monographie urbaine consiste à décrire l'état initial du territoire de référence afin de disposer d'éléments permettant d'apprécier le contexte et d'inscrire les perspectives de son évolution. Il s'agit lors de cette étape initiale d'étudier l'environnement et les perspectives d'évolutions en exposant, notamment, les caractéristiques des zones susceptibles d'être impactées par la mise en œuvre du SCoT et, s'il y a lieu, des propositions pour réduire ou, si possible, éviter les conséquences dommageables de la mise en œuvre du SCoT. Enfin, différents indicateurs permettant de juger la fiabilité de la mise en place du SCoT sont construits. C'est lors de cette étape que des scénarios de croissance urbaine sont réalisés, discutés et que leurs incidences sur le système sont analysées.

Le PADD est le cadre de référence politique du SCoT. Les politiques territoriales en termes d'habitat, de développement économique ou encore de déplacement sont établies dans le PADD et, par la suite, permettent d'orienter le DOO. Le PADD constitue la principale étape du SCOT car celui-ci doit, à la fois, tirer les conséquences de l'étape de diagnostic et orienter les choix futurs. Le PADD est une traduction des politiques des collectivités publiques en matière d'aménagement de leur territoire.

Le Document d'Orientation et d'Objectifs (DOO) est la traduction concrète du projet de territoire écrit dans le PADD. Le DOO détermine les conditions de croissance urbaine afin que

celui-ci soit maîtrisé (maintien de l'équilibre entre les différents espaces tels que le bâti, les zones végétales, les zones maraîchères, etc.), en accord avec les règles générales de l'organisation du territoire et de gestion des risques. C'est lors de cette étape, en prenant en compte l'évolution démographique, économique, les projets d'équipement (transports ou grandes infrastructures), l'objectif de mixité sociale et d'égalité environnementale, que le DOO précise les objectifs d'offre de nouveaux logements et leur spatialisation.

Cependant, deux limites majeures peuvent être émises pour le SCoT :

— il n'existe aucune obligation juridique à la mise en place d'un SCoT pour une collectivité.
— Le SCoT ne définit que les grandes orientations et les grands principes de croissance mais aucun objectif chiffré précis. Il est du rôle du PLU de chiffrer ces objectifs.

En France, l'ICU n'apparaît que de manière ponctuelle et marginale dans ces lois et schémas. La question de la gestion de l'ICU est laissée au libre choix de la ville et de ses acteurs. Malgré l'épisode de 2003 (FOUILLET et al. 2006 ; CANOUÏ-POITRINE et al. 2006), l'intégration de mesures d'adaptations et d'atténuations au changement climatique est lente. Il y a très peu ou pas d'expert du climat urbain dans les équipes d'aménagement des villes contrairement à d'autres pays tels que l'Allemagne ou le Japon (LAMBERT-HABIB et al. 2013).

Dans le rapport d'observation de la recherche sur la prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans l'urbanisme établi par l'ADEME, deux explications majeures sont fournies afin d'expliquer la prise en compte trop partielle du climat en milieu urbain :

— Le fait d'être porteur de "*la mauvaise nouvelle*". Autrement dit, d'être alarmiste dans un contexte d'incertitude climatique et de vouloir modifier des habitudes "*Les élus s'attaquent aux habitudes très profondément ancrées, pénétrant dans un domaine très sensible, celui du territoire, de la propriété, de l'espace public à (re)partager. La partie est difficile et risquée électoralement parlant* CONSORTIUM BAZARURBAIN 2014".
— En plus d'un certain "courage" politique pour imposer la nécessité de penser l'adaptation au changement climatique, les décideurs doivent penser à long, voire très long terme, ce qui n'est pas en adéquation avec les temps courts de la vie politique locale (environ 5 ans) et du planning de l'urbanisme (entre 10 et 30 ans). Cependant, l'adaptation au changement climatique ne doit pas se faire uniquement au travers la gestion de crise (canicule, inondation, etc.).

Le climat tempéré de la France métropolitaine peut expliquer en partie, pourquoi les problématiques de l'ICU et l'adaptation qu'il conviendrait de mettre en œuvre, préoccupent relativement peu les collectivités. Dans le rapport " Imaginer les métropoles d'avenir", il n'est pas question de climatologie urbaine ou d'environnement urbain dans les projets de croissance urbaine (PERBEN 2008). Les mesures d'adaptations et d'atténuations portent davantage sur les émissions de GES, la lutte contre l'étalement urbain ou encore les aspects économiques de la ville.

3.3.2 CONSIDÉRATION DE L'ICU DANS LES SCOT FRANÇAIS : EXEMPLES DES PROGRAMMES MAPUCE ET PÆNDORA

L'objectif n'est pas ici de présenter en détail l'intégration de la problématique de l'ICU dans les SCoT des différentes agglomérations françaises mais de discuter brièvement de plusieurs d'entre eux : Aix-Marseille, Dijon, Lyon, Paris, Strasbourg et Toulouse. L'étude du SCoT de Dijon Métropole est motivée par la présence du réseau de mesure MUSTARDijon. Tout d'abord, il est important de noter que la considération de l'ICU varie peu entre les SCoT de ces six agglomérations. En effet, de la présentation jusqu'à l'atténuation de l'ICU, les actions présentées sont presque identiques. La présence d'îlot de chaleur sur leur territoire est présenté comme une faiblesse qu'il est nécessaire de mieux cerner afin d'améliorer le confort urbain. Un nombre limité d'actions, tant dans le rapport de présentation que dans le PADD, cible directement l'atténuation de l'ICU. Les actions de lutte concrète contre l'ICU se retrouvent en filigrane d'autres actions d'adaptation au changement climatique telles que la végétalisation, qui sert en premier lieu à assainir la ville et à créer du lien social et qui, en second lieu, devient un îlot de fraîcheur. Les SCoT de Aix-Marseille, Lyon, Paris et Toulouse, présentent une faible prise en compte de l'adaptation aux fortes températures urbaines dans les politiques publiques, "*faute de connaissances et de méthodologies sur cette problématique*". Parmi ces différents SCoT, ceux de la métropole de Toulouse et de Dijon présentent la forme urbaine comme un levier d'action pertinent pour atténuer le phénomène d'ICU. Pour la métropole de Toulouse, la problématique de l'ICU est davantage présentée comme *la prise en compte des éléments climatiques tant dans les formes urbaines, l'architecture que dans l'aménagement des espaces extérieurs*. Pour Dijon, il s'agit de "*privilégier l'approche bioclimatique dans les opérations d'aménagement en travaillant sur l'orientation du bâti, les morphologies, l'exposition au vent, etc*. Enfin, parmi les six SCoT avancées, seul le DOO de l'agglomération de Toulouse aborde la problématique de l'ICU à travers une action concrète avec "*les plantations de haies et de boisements qui sont favorisées, en réponse aux enjeux d'adaptation au changement climatique et de lutte contre les phénomènes d'îlots de chaleur urbain*".

Cependant deux projets, d'envergure nationale, ont vu le jour afin d'inclure des actions concrètes d'atténuation du phénomène d'ICU. Le projet Modélisation Appliqué et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Energie (MApUCE) *"consiste à intégrer dans les politiques urbaines et les documents juridiques des données quantitatives de microclimat urbain, climat et énergie"* (MASSON et al. 2014). Il doit permettre une planification *"au bon moment, au bon endroit, avec le bon outil"* pour améliorer le climat urbain et atténuer l'ICU. L'objectif est double, avec d'une part, la construction d'une base de données urbaine et architecturale à l'échelle du quartier s'appliquant à n'importe quelle ville de France et qui soit accessible [28] (Fig. 3.22). Ces données sont, par la suite, utilisées pour des simulations du microclimat urbain ou encore de la consommation énergétique liée aux bâtiments. Et d'autre part, proposer une méthodologie d'intégration dans les procédures juridiques et les politiques urbaines de données quantitatives de microclimat urbain,

28. http ://mapuce.orbisgis.org/

climat et énergie. Ce projet permet aux collectivités et aux chercheurs d'avoir accès à une base de données fiable pour modéliser le climat urbain.

La construction de la base de données MApUCE est présentée par Erwan Bochet (et al., 2018). Cette base de données permet d'accéder à une grande quantité de variable pré-traitées à 100 mètres de résolution qui peuvent être, par la suite, mobilisées et retravaillées pour servir de données d'entrées d'un modèle de climat (BOCHER et al. 2018) : le pourcentage de surface de bâtiments, de surface de plancher, de végétation, en eau et de routes ; le nombre, le volume, la compacité, la hauteur des bâtiments ; la distance moyenne entre les bâtiments et enfin le type de bâtiment majoritaire.

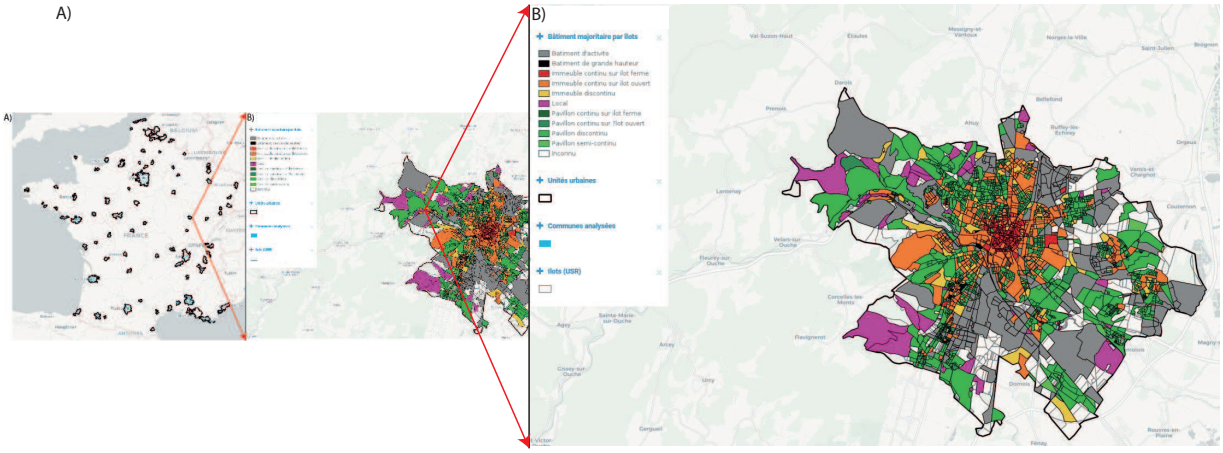


FIGURE 3.22 – A. Carte des villes françaises pour lesquelles les données MApUCE sont disponibles. B.Présentation du type de bâtiment majoritaire par îlot pour Dijon Métropole. Source : orbgis.fr

Le projet de Planification, Adaptation et Énergie : Données territoriales et accompagnement (PÆNDORA) est la continuité opérationnelle du projet MApUCE présenté précédemment. Le projet PÆNDORA se base sur les avancées méthodologiques établies grâce au projet MApUCE afin de concevoir des outils d'accompagnement des acteurs de l'urbanisme sur les thématiques liées à l'adaptation au changement climatique en milieu urbain. Le premier objectif consiste à opérationnaliser, généraliser et pérenniser les méthodes de calcul des indicateurs (LCZ, typologie de bâti, ...) développés lors du projet MApUCE à partir de données de la Bdtopo et du recensement. Le second est d'améliorer les outils de visualisation web (de type mapuce.orbisgis.org ; Fig. 3.22) ainsi que l'extraction des données par un SIG. Le troisième a une portée opérationnelle car il vise à développer des méthodes d'accompagnement des collectivités dans leur élaboration de documents de planification vis à vis de l'adaptation au changement climatique (cartes climatiques urbaines). Enfin, il s'agit de pérenniser des dispositifs d'accompagnement juridique et d'analyse des pratiques des agences d'urbanisme, et de réaliser un premier exercice de suivi d'intégration du climat urbain dans des projets d'aménagements.

3.4 SYNTHÈSE

La difficulté d'intégrer la problématique de l'ICU dans les documents de planification urbaine est résumée par le fait que l'environnement urbain évolue en permanence. Le cadre législatif varie en fonction de temporalités de l'ordre de quelques dizaines d'années car la donne politique est renouvelée régulièrement et les acteurs agissent plus ou moins selon les situations qui se présentent. Ainsi l'environnement global est très fluctuant, les idéologies (environnement, aménagement, ...) évoluent et se transforment en permanence (MOINE 2006).

Par ailleurs, le contexte de changement climatique global porte l'attention des collectivités sur les enjeux de qualité de l'air, de réduction des émissions de GES et des besoins énergétiques. Pour reprendre le terme de Brisepierre (2011) sur l'enjeu énergétique, la thématique de l'ICU et des températures urbaines semble se situer dans un "*angle mort organisationnel*". Par ce terme, il est entendu que la thématique et la problématique des ICU sont plus ou moins connues par les acteurs et décideurs mais ne disposent d'aucun cadre juridique et institutionnel, restant "*au bon vouloir*" des acteurs (BRISEPIERRE 2011). L'atténuation du phénomène d'ICU est une opportunité d'adaptation au changement climatique. Le SCoT est pertinent pour étudier l'influence de différentes formes urbaines sur l'ICU à travers l'intégration des LCZs ainsi que la mise en place de scénarios de croissance urbaine. Le fait que les LCZs soient des archétypes urbains, dont les valeurs d'occupations des sols ou de bâti (hauteur, ...) ne sont pas quantifiées, permet aux décideurs et chercheurs de dialoguer grâce et au travers d'outils tels que MApUCE et PÆNDORA. L'utilisation des LCZs, leur intégration dans le rapport de présentation du SCoT ainsi que l'accès à la base de données MApUCE sont une base solide pour étudier l'impact des formes urbaines sur l'ICU.

CHAPITRE IV : ÉTUDE DE LA CROISSANCE URBAINE ET DE L'ICU DE DIJON MÉTROPOLE

Analyser l'impact des formes urbaines sur l'ICU nécessite de sélectionner un terrain d'étude qui dispose de travaux sur les ICU. La présence d'une base de données de LCZs ou d'un réseau de capteurs est un élément qui peut justifier le choix d'une métropole. Par ailleurs, celle-ci doit disposer d'une base de données urbaines (MApUCE) ainsi que des dynamiques spatiales importantes. Il est aussi à noter le "*manque*" de recherche sur les ICU des villes moyennes. En France, trois métropoles se prêtent particulièrement à cet exercice du fait des travaux déjà menés sur l'ICU dans ces villes : Dijon, Rennes et Toulouse. La métropole Toulousaine bénéficie déjà de nombreux travaux sur son climat urbain. La métropole de Rennes dispose de modélisation de l'ICU dans le contexte du changement climatique. Dijon Métropole, contrairement à la ville de Rennes, bénéficie d'un réseau de mesures (température et humidité) denses et pérennes, qui peut être confronté à des résultats de simulations. Ainsi, nous verrons à travers ce chapitre *dans quelle mesure cet observatoire des températures urbaines permet de mieux appréhender le phénomène d'ICU ?* Deux spécificités de Dijon, liées entre elles, sont à souligner : son évolution et son site. Pour une compréhension optimale de la ville, une approche diachronique, autrement dit, l'étude des périodes morphologiques, est nécessaire (MURATORI 1959 ; CASTEX 2014). Les spécificités topographiques de l'agglomération permettront d'expliquer la structure actuelle de Dijon Métropole. L'étude synchronique rendra compte de ses caractéristiques actuelles. Par ailleurs, la présentation des différentes études sur l'ICU (Réseau MUSTARDijon, LCZ,...) ainsi que l'impact sanitaire de la canicule de 2003 sur Dijon Métropole motiveront son choix. Les dynamiques urbaines de Dijon Métropole seront mises en avant à travers l'étude du SCoT Dijonnais. Enfin, la sélection d'une période d'étude pertinente pour l'analyse de l'ICU sera effectuée.

4.1 DÉVELOPPEMENT PASSÉ ET PRÉSENT DE DIJON MÉTROPOLE

4.1.1 UNE APPROCHE DIACHRONIQUE QUI MET EN AVANT UNE STRUCTURE MONOCENTRIQUE

Pour mener l'étude diachronique de la croissance urbaine Dijon Métropole, un maillage de 150 mètres de résolution lui est appliqué [29]. Pour les périodes antérieures à 1999, les mêmes communes sont sélectionnées afin d'étudier l'évolution de la surface bâtie et de la population. Puis, l'étude est menée grâce aux dates de construction des bâtiments dans chaque maille.

Tout d'abord, Dijon est une ville ancienne datant vraisemblablement du IIe siècle, une cité gallo-romaine coupée des grands bassins hydrographiques et sans fleuve. La ville de Dijon évoluera en tant que capitale du duché de Bourgogne de 880 à 1790. Au cours de cette période, le parc de la colombière ainsi que des remparts verront le jour. La mise en place du canal de Bourgogne en 1808 permettra à la ville de connaître un nouvel essor au début et au milieu du XIXe siècle. La première période considérée (Avant 1913) correspond aux centres historiques des villes composés de bâtiments anciens, d'une superficie bâtie totale d'environ 7km^2 et d'une population d'environ 80 000 habitants (Fig. 4.23 et Tab. 4.2).

La seconde période correspond à la 1^{ere} guerre mondiale, l'entre deux-guerre et la seconde guerre mondiale. Dijon et ses alentours n'ont pas subi de destructions majeures, la croissance urbaine s'est poursuivie notamment au Nord et au Sud du centre-ville de Dijon. En termes d'étalement urbain, la superficie bâtie totale a presque doublée (de 7km^2 à 12km^2 soit 71% d'augmentation des surfaces bâties) et se traduit par une augmentation de 0.17 km^2/an (soit 17 ha/an) entre 1913 et 1945 durant cette période. La population atteint 110 000 personnes (environ 37% d'augmentation) majoritairement logée dans des petits collectifs ou maisons de ville (Fig. 4.23 et Tab. 4.2).

La période 1946 - 1975 correspond aux "trente glorieuses". Durant cette période, la ville s'est développée de plus 216% comparée à la période précédente (soit 0.46 km^2 /an ; 46 ha/an) pour atteindre 26km^2 urbanisée (soit une augmentation net de 16km^{2}de surface bâtie). La population totale est de 190 000 à la fin de la période, soit une augmentation de 72%. Par ailleurs, il s'agit de la première période au cours de laquelle l'urbanisation est davantage présente hors de la limite de la ville de Dijon que dans ses limites (ENAULT 2012) (Fig. 4.23 et Tab. 4.2). L'année moyenne de construction pour la ville de Dijon est 1966, l'année moyenne de construction pour Dijon Métropole est 1967. Lors de cette période, la construction de nouveaux logements porte autant sur la construction de grands ensembles que de maisons de ville. En 1966, la ville de Dijon se distingue par un centre historique classé secteur sauvegardé [30], délimité par de larges boulevards de style « haussmannien » reliant les six places principales avec les autres quartiers de la ville.

29. Il est par ailleurs à noter que seulement les mailles dont les superficies de bâtis sont supérieures à 15% sont sélectionnées
30. le centre-ville historique est classé comme "valeur patrimoniale et ne peut pas subir de modifications urbaines majeures

Lors de la période 1976 - 1999, une nette diminution de la croissance urbaine est constatée, avec une augmentation de la surface de Dijon de 33% comparée à la période précédente (soit 0.33 km^2/an (32 ha/an) jusqu'en 1999). (ENAULT 2012). La population atteint 215 000, soit 25 000 personnes supplémentaires (soit 13% d'augmentation de la population) (Fig. 4.23 et Tab. 4.2).

La superficie bâtie de Dijon Métropole en 2016 atteint 49km^2, soit une augmentation nette de 12km^2 - 0.92km^2/an (92ha/an) et de 44% de la superficie. La loi du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbain était la première loi tentant de limiter l'étalement urbain et à contraindre les communes de plus de 50 000 habitants à avoir 20% de logement social. Cependant depuis 2000, Dijon Métropole s'est étendue de 44%. La population de Dijon Métropole est d'environ 253 000 en 2017, (38 000 personnes supplémentaires, 16% d'augmentation) (Fig. 4.23 et Tab. 4.2).

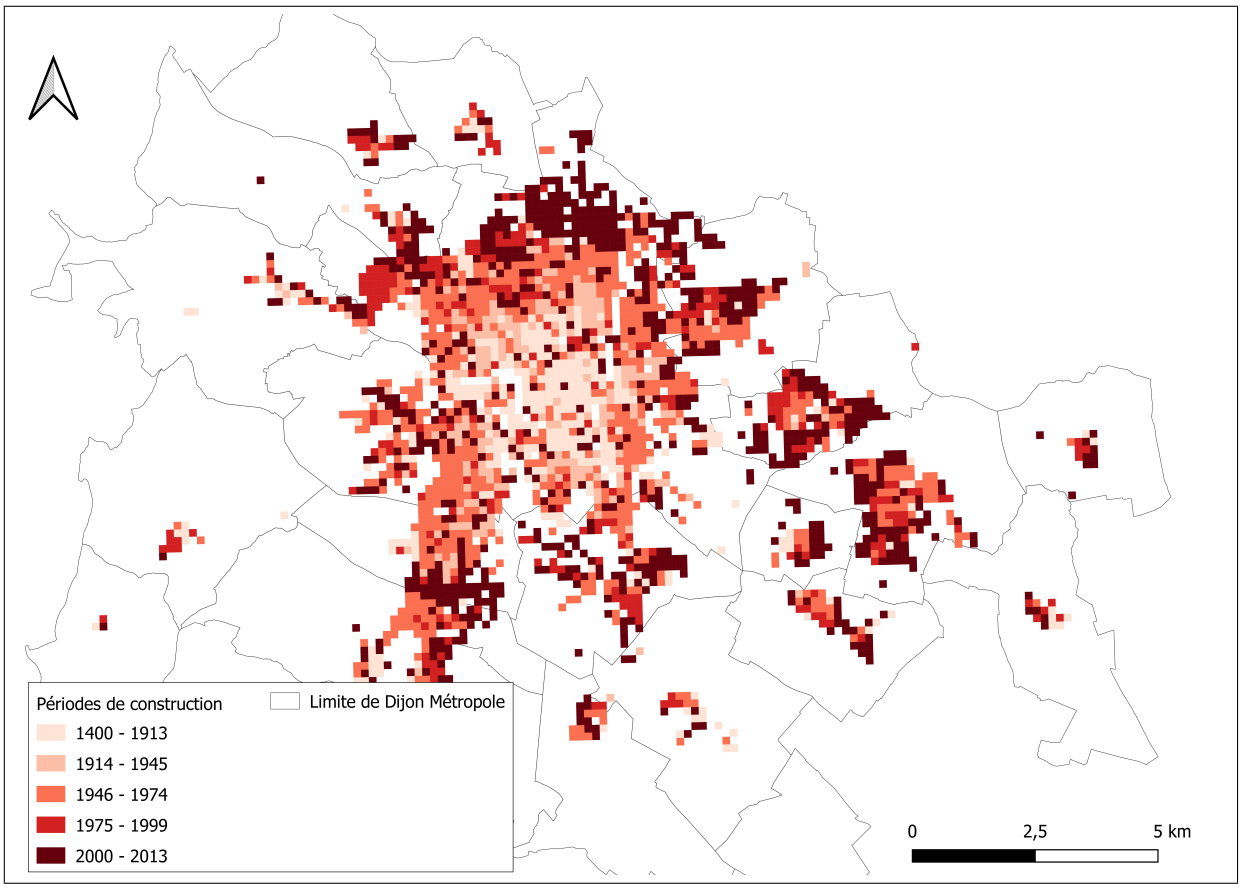


FIGURE 4.23 – Année de construction moyenne du bâti Dijonnais par maille de 2.25 ha. D'après les données cadastrales de Dijon Métropole.

Le tableau 4.2 présente l'évolution des surfaces urbanisées ainsi que la population pour Dijon Métropole. La structure de la ville a fortement évoluée en un siècle (1913 - 2013), la superficie de la ville est multipliée par 7 et sa population par 3. Depuis 1913, la croissance moyenne de surface bâtie de la métropole est de 0.43km^2/an (soit 43ha/an) et un gain moyen de population d'environ 1 700 habs/an. La topographique particulière de Dijon (plateau bourguignon à l'Ouest

et plaine de Saône à l'est. Fig 4.24), a eu des conséquences sur la répartition de la population, l'accessibilité et surtout sur l'étalement urbain.

Période	Avant 1913	1914 - 1945	1946 - 1975	1976 - 1999	2000 - 2016
Population	80 000	110 000	190 000	215 000	252 000
Surface anthropisée de Dijon métropole (en km^2)	7	12	26	34	49
Augmentation de la surface par an (km^2/an)	/	0.16	0.52	0.3	0.86

TABLE 4.2 – Evolution de la surfaceanthropisée et de la démographie de Dijon Métropole.

4.1.2 UN RELIEF CONTRAIGNANT LA STRUCTURE URBAINE DE DIJON MÉTROPOLE

L'altitude du territoire de Dijon Métropole varie entre 200m (Magny-sur-Tille, lit de l'Ouche) et 600 mètres (Flavignerot, Mont Afrique). La topographique se caractérise par une dissymétrie (Fig. 4.24). L'ouest est constitué d'un plateau entaillé de vallées, dont la principale est traversée par l'Ouche. Le contraste est remarquable avec les étendues plates de l'est (plaine de Saône occupant le Fossé bressan) où la topographie est douce, malgré quelques collines qui modulent le paysage avec notamment les collines de Saint-Apollinaire et de Montmuzard. Plus finement, au Sud, le contact plateau / plaine s'effectue selon un talus rectiligne orienté NNE-SSO. Ce talus, d'une altitude de 300m environ, est l'emplacement de la côte viticole. Le sud-ouest de l'agglomération Dijonnaise se caractérise par de nombreuses vallées sèches, encaissées et étroites (les « combes »). Celles-ci peuvent être aménagées en parcs municipaux (Combe aux Fées, Combe Persil, et Combe à la Serpent). Au nord, le contact entre le seuil de Bourgogne, entre bassins versants de la Seine et du Rhône, ou « col » entre Morvan et plateau de Langres, et plaine de Saône est moins marqué. Moins réguliere, la transition plaine plateau est entaillée de vallées (Suzon concernant Dijon Métropole, puis Tille plus au Nord). Le dénivelé s'y estompe peu à peu. Au nord-ouest des buttes témoins résiduelles forment le site de Talant et de Fontaine-Lès-Dijon qui surplombent l'agglomération.

Cette topographie spécifique a contraint l'urbanisation de Dijon Métropole. Dijon semble avoir un étalement régulier dans l'espace. Celui-ci est minime dans la partie Ouest de la métropole (Plateau) tandis qu'il est relativement important à l'Est (plaine de Saône). L'agglomération Dijonnaise s'étend, en 2016, sur 239.95km^2 (Dijon Métropole) dont 15km^2 de route, 11km^2 de bâti résidentiel et 24km^2 de surface d'activité. Ces 50km^2 totalement urbanisés représentent environ 20% de la superficie totale de l'agglomération. Cependant, 90% des 50km^2 urbanisés (40km^2) se situent dans une zone de 80km^2 comprenant la ville même et la périphérie proche (Fig. 4.24).

Dijon Métropole, dans son Schéma Départemental d'Aménagement et du Développement Du-

rable du Territoire (SDADDT [31]) datant de Juillet 2010, veut diffuser l'urbanisation vers la plaine de Saône (Est), Seine-et-Tilles (Nord) et l'Ouest du beaunois (Sud) de manière à : "*promouvoir au sein de l'espace urbain et périurbain, une organisation* ***polycentrique hiérarchisée*** *autour des centres villes*". Autrement dit, Dijon Métropole veut se développer en renforçant ses pôles périphériques majeurs situés au Nord (Valmy), Sud (Marsannay-la-côte, Chenôve) et Est (Quetigny, Chevigny) (caractère **polycentrique**) tout en maintenant la ville de Dijon comme force motrice de toute l'agglomération (caractère **hiérarchisé**).

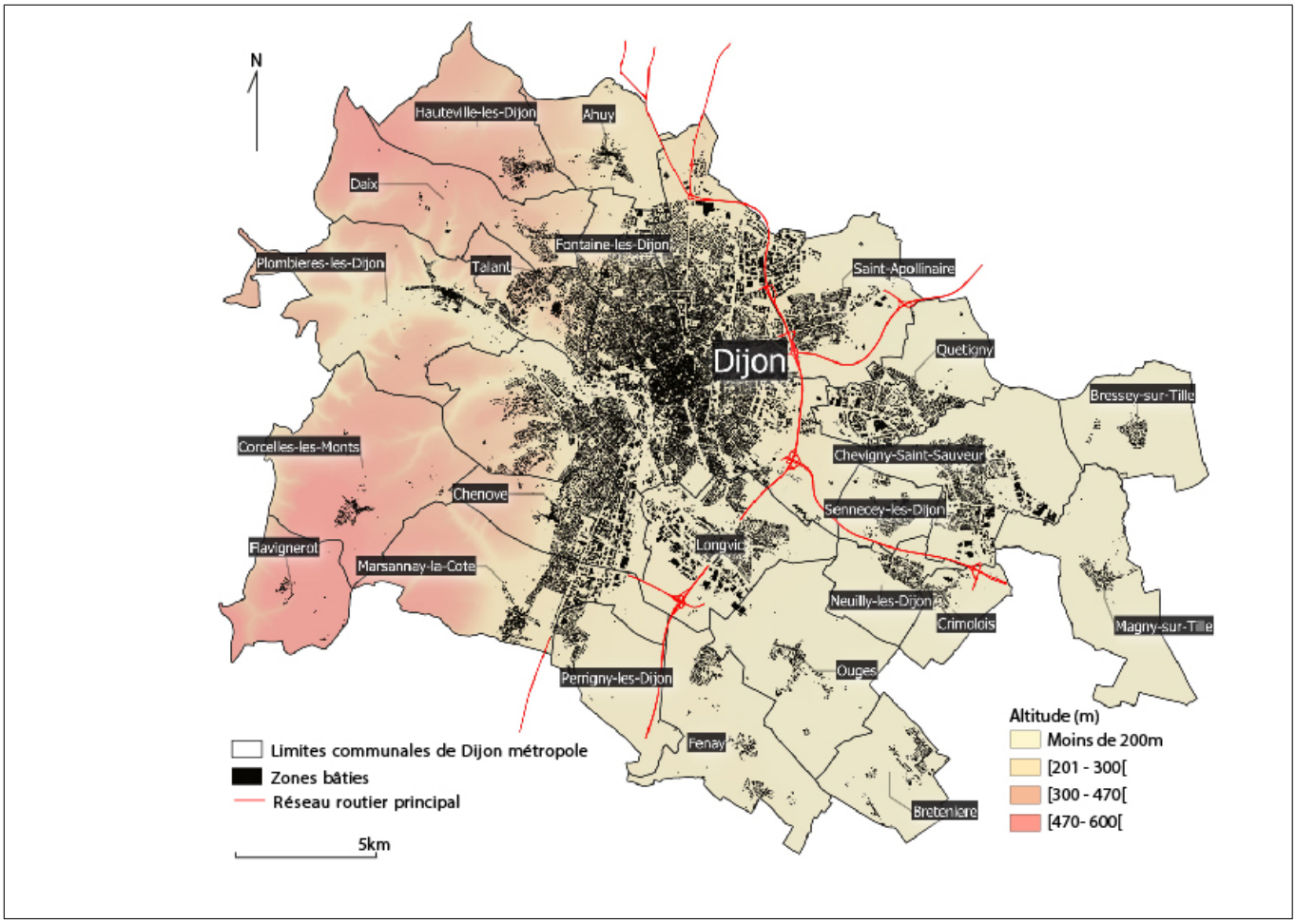


FIGURE 4.24 – Présentation de Dijon Métropole à travers sa topographie, son bâti et son réseau de communication principal

Cette politique se traduit par une réhabilitation et une mise en valeur du centre-ville, avec le développement de voies piétonnes, la protection des immeubles anciens, la restauration des monuments historiques et bâtiments publics.

L'ensemble de ces observations historiques et actuelles permet de caractériser la logique d'éta-

31. Les départements ont l'obligation d'élaborer un rapport sur la situation en matière de développement durable :
— le fonctionnement de la collectivité,
— les politiques qu'elle mène sur son territoire,
— ainsi que les orientations et programmes de nature à améliorer cette situation.

lement de Dijon Métropole. Celui-ci devrait être régulier dans l'espace depuis ou vers les pôles périphériques majeurs et le long des principaux axes de communications. La construction de logements *ex nihilo* sur la commune de Dijon ne devrait pas augmenter, tout l'espace de la commune étant déjà urbanisé. En revanche, la requalification et la rénovation du parc de logements déjà existant sont des alternatives que la commune de Dijon souhaite mettre en place.

4.2 RÉSEAU MUSTARDIJON ET ÉTUDE DE L'ICU DE DIJON MÉTROPOLE

4.2.1 RÉSEAU MUSTARDIJON

L'agglomération de Dijon Métropole bénéficie de travaux sur son climat urbain (POHL et al. 2015 ; VAIRET 2016 ; ZITO et al. 2016 ; RICHARD et al. 2018 ; RICHARD et al. 2019) s'appuyant sur le réseau Measuring Urban Systems Temperature of Air Round Dijon (MUSTARDijon) (Fig. 4.25 et 4.26). Le réseau est constitué d'abris M-RSA contenant des sondes hygro-thermométriques (Fig 4.25. A et B). Ils sont fixés à 3 m du sol (soit 1 mètre de plus que les mesures habituelles) afin de limiter les risques de vol ou de vandalisme (Fig 4.25. C). Les supports choisis sont des candélabres, garantissant homogénéité et éloignement des surfaces chaudes, ceci sans avoir à installer un support. Les abris sont fixés côté sud, au moyen de pattes prolongées, afin d'éviter que la température ne soit influencée par le support, les candélabres variant en couleur comme en matériau (Fig 4.25. A). Des sites ouverts sont choisis, évitant le plus possible les ombres portées (bâtiments, arbres, ...). L'objectif était que les observations soient représentatives du quartier, et le moins possible influencées par l'environnement immédiat (rue, cour, ...), afin d'être comparées avec des températures simulées par modélisation dynamique à la résolution horizontale de 150m (ROUX 2014).

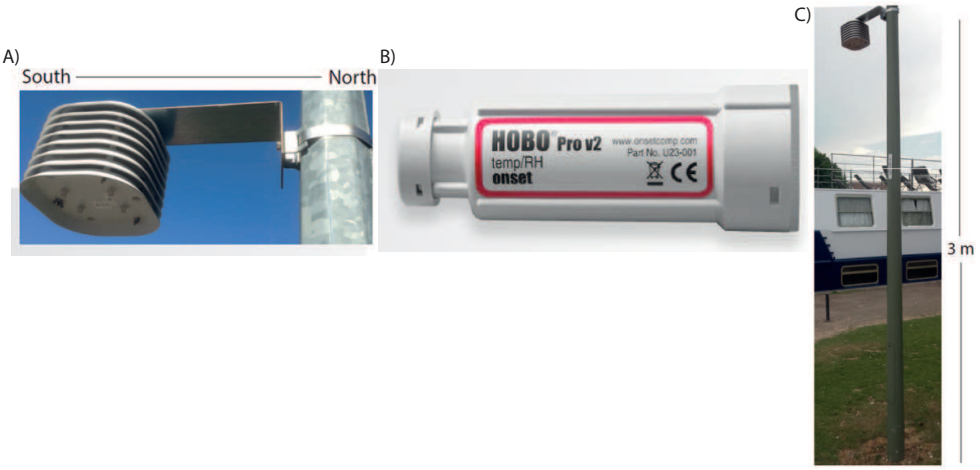


FIGURE 4.25 – Présentation du réseau de mesure MUSTARDijon. A. abris M-RSA contenant des sondes hygro-thermométriques. B. HOBO U23 Pro v2 sensor. C. Exemple de fixation sur candélabre à 3m de hauteur

Ce réseau *in situ* est unique car constitué de 59 sondes thermiques en fonctionnement, pour 50 d'entre elles depuis 2014 et 9 depuis 2016 (Fig. 4.26). Six types de tissus urbains sont instrumentés (OKE 2006) et chacun accueille 8 à 12 sondes. Au sein de chaque type, quelques sondes permettent d'explorer des questions d'échelle plus fine : influence de l'altitude, des parcs et jardins, des plans d'eau et de l'albédo des surfaces. À l'ensemble du dispositif vient s'ajouter la station Météo France Dijon-Longvic (Fig. 4.26 ; Sonde 51) qui sert de station de référence.

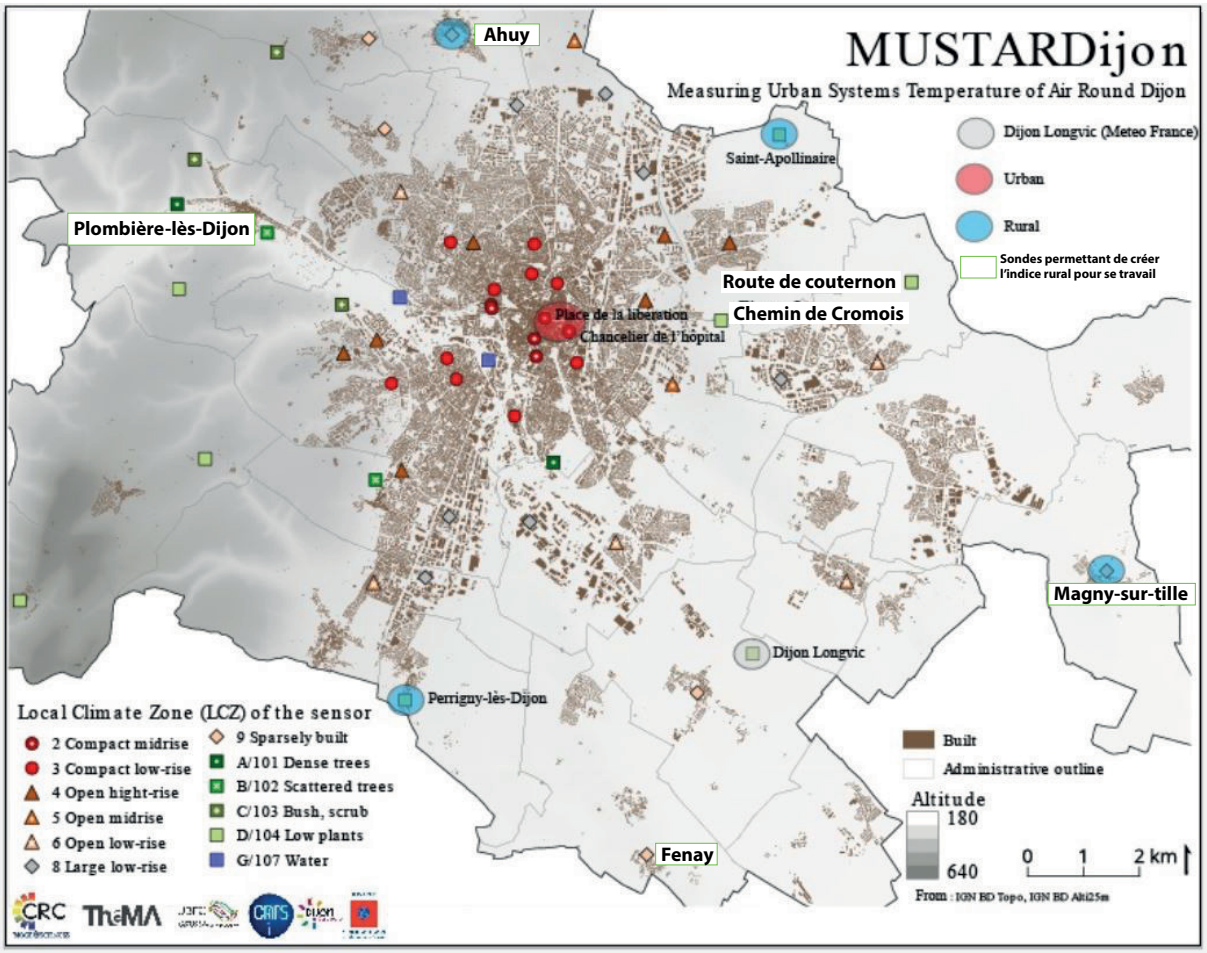


FIGURE 4.26 – Carte du terrain d'étude et du réseau MUSTARDijon avec ses LCZs correspondante (RICHARD et al. 2018)

Le projet WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools) répond à la nécessité actuelle et internationale de construire une base de données accessible et généralisée, fournissant les données nécessaires aux études climatiques. WUDAPT a pour objectif de décrire les surfaces urbaines en recueillant des données sur les formes et les fonctions associées aux villes à travers le monde. La méthode se décline en 3 niveaux hiérarchisées :

— Le niveau 0 représente une cartographie des villes en se basant sur les LCZs. Chaque type de LCZ est caractérisé par un panel d'indicateurs utilisés pour la modélisation climatique (BECHTEL et al. 2019).

— Le niveau 1 met l'accent sur la quantification des variables bâties telles que la hauteur du

bâti (longueur de rue, ...) ou encore ses fonctions (bureau, industrie, résidentiel, etc.).

— Le niveau 2 est le plus précis, il détaille le plus finement le milieu urbain et fait référence aux données urbaines recueillies à une échelle spatiale spécifiée (par exemple 250 m) de l'ensemble d'une zone urbaine. Les sources de ces données peuvent comprendre des données issues de la télédétection ou encore des bases de données locales sur les matériaux de construction et l'âge des bâtiments.

À l'exception de la LCZ 1 (Compact mid-rise - gratte-ciel), l'ensemble des autres LCZs sont présentes sur Dijon Métropole. Les analyses diachronique et synchronique menées précédemment corroborent la localisation spatiale des LCZs, à savoir un centre-ville dense de hauteur moyenne (LCZ 2), avec une première couronne de bâtis denses et peu élevés (LCZ 3) puis une seconde couronne avec des bâtis peu compacts élevés (LCZ 4) et peu élevés (LCZ 5). La méthode WUDAPT a permis d'identifier les LCZs sur Dijon Métropole (RICHARD et al. 2018).

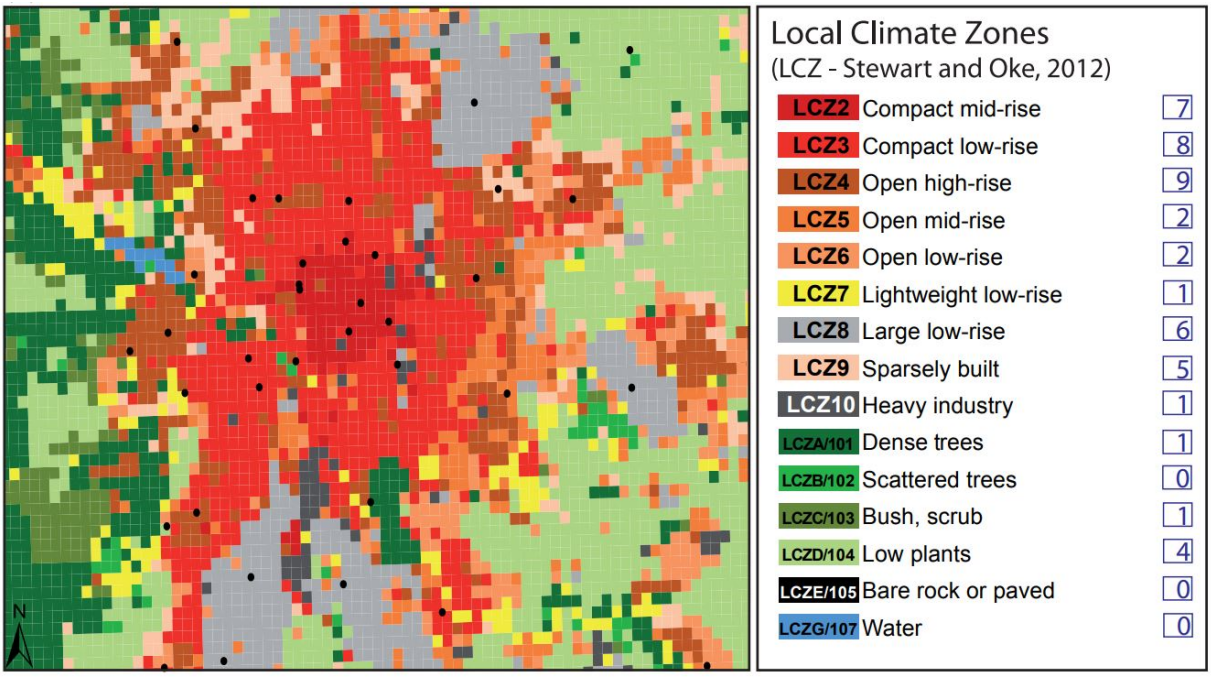


FIGURE 4.27 – Terrain d'étude de Dijon Métropole par : a) Local Climate Zones ; b) Urban Climate Zones (UCZs) ; avec n = le nombre de sonde MUSTARDijon par groupe. (RICHARD et al. 2018)

Les travaux de Richard (et al., 2018) portent sur la période du 28 Juillet au 8 août 2018. Comparées à la moyenne spatiale, les sondes des LCZs urbanisées (LCZ2 (Compact mid rise - centre-ville de Dijon, LCZ3 (Compact Low-rise) - Faubourgs, LCZ4 (Open High-rise) - Immeubles et LCZ8 (Large Low-rise) - Zone d'activités ou zones commerciales) sont systématiquement plus chaudes. Les LCZs des espaces périurbains (LCZ 5, 6 et 9) ont des températures proches de la moyenne. Les LCZs représentant les zones végétalisées ou en eau sont les plus fraîches (LCZC/103, LCZD/104, LCZD/107)(Fig. 4.28).

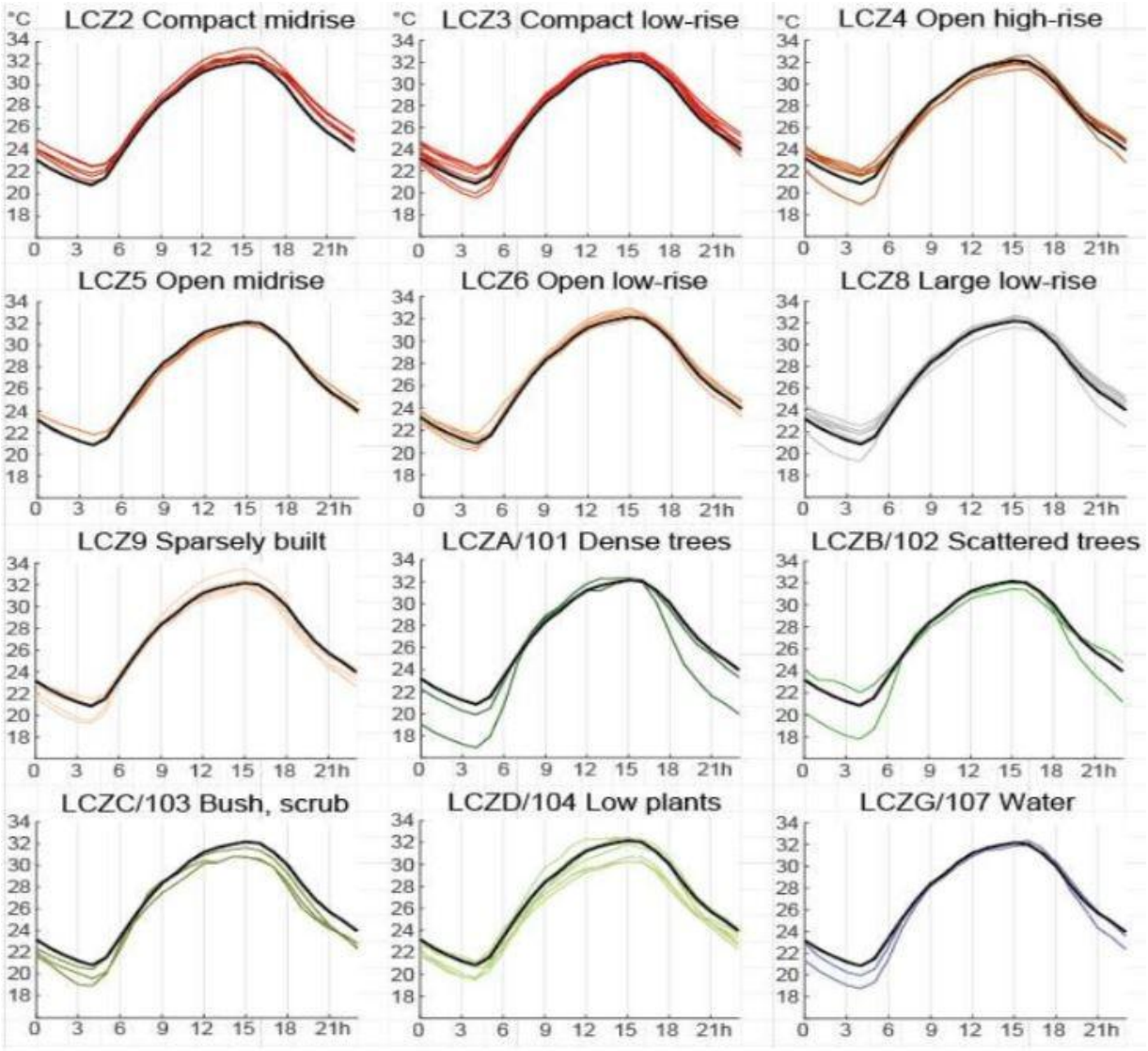


FIGURE 4.28 – Profils thermiques diurnes moyens (24 Juillets au 8 Août 2018) des 60 sondes selon la LCZ (Heure UTC) (RICHARD et al. 2018)

4.2.2 CANICULE ET MORTALITÉ À DIJON

La finesse quantitative spatiale des travaux de Besancenot (et al., 2006) sur la Bourgogne permet de mettre en avant la sensibilité des départements Bourguignon vis-à-vis des épisodes de chaleurs intenses (Fig. 4.29). En effet, la vague de chaleur de l'été 2003 a touché significativement la Bourgogne, du fait de l'addition d'un aléa météorologique intense (températures très élevées, de jour aussi bien que de nuit) et de la forte proportion de population vulnérable, puisque trois des départements (Nièvre, Saône-et-Loire et Yonne) figurent parmi les plus âgés de France. Le nombre de décès lors de la canicule d'août 2003 comparé à la moyenne des décès lors des périodes estivales de 1998 à 2002, rend compte de la vulnérabilité du territoire bourguignon : 1984 décès en 2003 contre une moyenne de 1426 lors des étés précédents (soit une augmentation de 39,1%). La période du 1er au 20 août est l'une des plus durement touchées (1478 décès au lieu

de 920, soit 60,7%), avec un pic du 4 au 18 (1233 décès au lieu de 665, soit 85,4%), avec un maxima le 11 août (130 décès), et un excédent de 182,6% par rapport à la normale (Fig. 4.29). Le climat urbain, notamment l'ICU, lors de cette période de surmortalité sera davantage étudiée dans la suite de ce travail, notamment pour la sélection de la période d'étude. La relation entre la santé et le climat urbaine est un sujet important et sensible à la fois pour les élus et les spécialistes de santé publique telle que l'Agence Régionale de Santé (ARS).

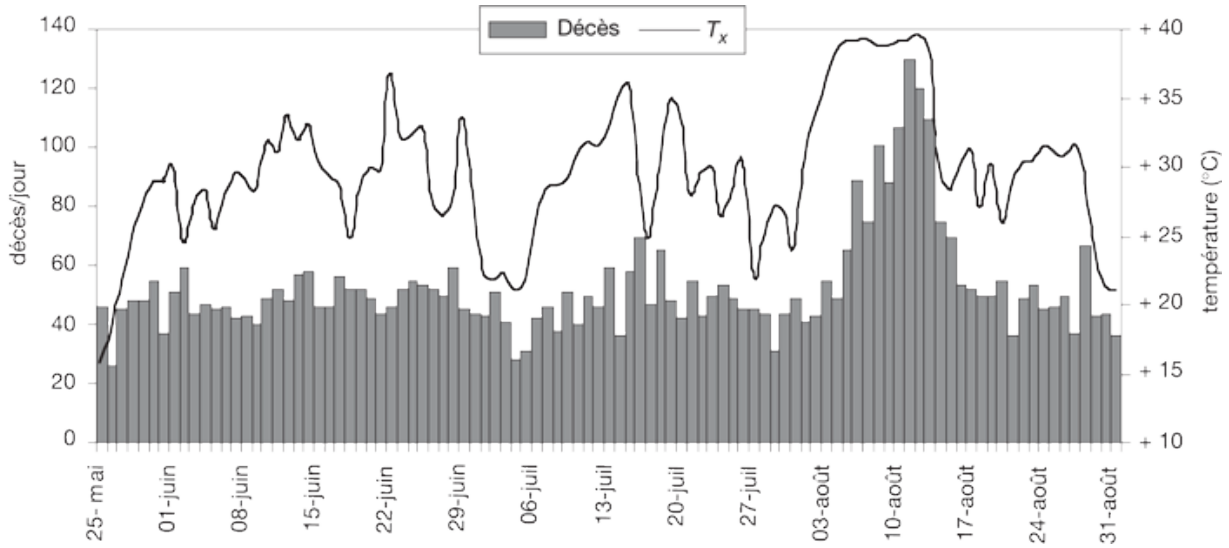


FIGURE 4.29 – Mortalité journalière en Bourgogne et température maximale moyenne de la région, du 25 mai au 31 août 2003 (BESANCENOT, HAVARD et CASSAGNE 2006)

La répartition des décès n'est pas homogène sur le territoire bourguignon, d'importantes disparités spatiales notables existent entre les secteurs intra-urbain, interurbains et ruraux (Fig 4.30). Ainsi, en Côte d'Or, l'arrondissement de Dijon a enregistré une surmortalité de 78%, contre 28% pour celui de Beaune (petites villes et campagnes) et 9% pour celui de Montbard ("rural profond"). À une échelle urbaine plus fine, la mortalité entre la périphérie dijonnaise et l'agglomération dijonnaise est notable : l'agglomération est un peu moins touchée que le reste de l'arrondissement, mais la commune-centre a néanmoins été fortement impactée (93%). Dijon peut être découpé en trois secteurs de mortalité : la commune de Dijon fortement impactée (93%), son agglomération moins touchée (66.4%) et sa périphérie dont les répercussions en termes de mortalité sont importantes (87,4%). L'influence urbaine sur la mortalité est nette dans le cas de Beaune, avec une surmortalité trois fois plus forte dans la ville-centre que dans le reste de l'arrondissement.

	Moyenne 2000-2002	2003	Évolution
Arrondissement de Dijon	**223,3**	**398**	**+ 78,2 %**
Hors Dijon	*82,7*	*155*	*+ 87,4 %*
Dijon (agglomération)	*140,6*	*243*	*+ 66,4 %*
Arrondissement de Montbard	**73,3**	**80**	**+ 9,1 %**
Arrondissement de Beaune	**62,3**	**80**	**+ 28,4 %**
Arrondissement hors ville	33,3	38	+ 14,1 %
Beaune	*29,0*	*42*	*+ 44,8 %*
Département	**359**	**558**	**+ 55,4 %**

FIGURE 4.30 – La surmortalité du 1er au 18 août par unité urbaine en Côte-d'Or (BESANCENOT, HAVARD et CASSAGNE 2006)

Par ailleurs, Dijon Métropole est, après l'agglomération parisienne, l'agglomération qui a connu le pic de surmortalité le plus proéminent (+93%) lors de la canicule de 2003 (BESANCENOT, HAVARD et CASSAGNE 2006).

4.3 POLITIQUE DE CROISSANCE URBAINE DU DIJON MÉTROPOLE

4.3.1 POLITIQUE ET LOGEMENT DE DIJON MÉTROPOLE : PADD DU SCOT ET PLUI

Il est nécessaire de se pencher sur la politique actuelle et future de Dijon Métropole en termes de croissance urbaine afin d'étudier le développement futur de Dijon Métropole. Le nombre de communes comprises dans un périmètre de SCoT est en moyenne de 58. Avec 59 communes, le SCoT Dijonnais est représentatif des SCoT des villes de taille moyenne (Fig. 4.31). Celui-ci est composé de trois EPCI : Dijon Métropole (23 communes), la communauté de communes de la plaine Dijonnaise (22 communes) située au Sud-Est de la métropole ainsi que la communauté de communes Norge et Tille (14 communes) située au Nord-Est de la métropole. Cette répartition spatiale des communes appartenant au SCoT Dijonnais (Nord-Est et Sud-Est) est un élément important de la future spatialisation de la croissance urbaine de la métropole. Le SCoT de Dijon Métropole est d'une superficie inférieure (571 km^2) à la moyenne nationale des SCoT (850 km^2), pour une population moyenne supérieure (291 495 habitants) à la moyenne (112 424 habitants), soit environ 510 habs/km^2 contre 247 habs/km^2 en moyenne.

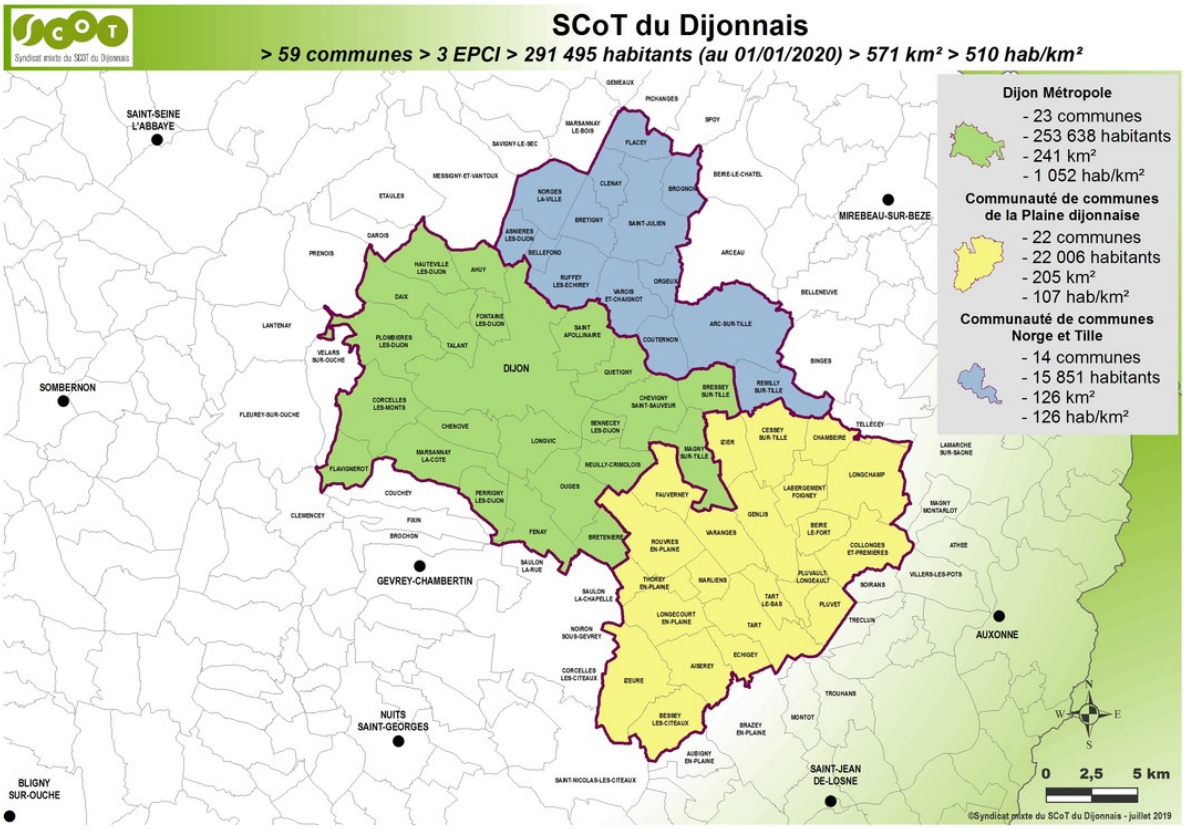


FIGURE 4.31 – Carte du SCoT Dijonnais et de ses 3 EPCI. Source SCoT Dijon

Dans son SCoT daté d'octobre 2019, Dijon Métropole avance trois scénarios à l'horizon 2040 (Fig. 4.3). Le premier est tendanciel et met en avant une croissance quantitative modérée d'un point de vue démographique et économique. Le second est le scénario de croissance vertueuse avec un renouvellement urbain important, la mobilisation des dents creuses ainsi que la réhabilitation et la réduction des logements vacants. Le troisième repose sur une attractivité économique qui entraîne une croissance démographique importante mais une densité forte des nouveaux logements. Sur la base de ces trois scénarios, Dijon Métropole a établi une ligne de conduite d'environ 30 200 logements à l'horizon 2040 (Fig. 4.3). Il est à noter que le précédant SCoT de Dijon Métropole (2014) regroupait 116 communes et cinq communautés de communes supplémentaires comparé au SCoT actuel. Parmi celles-ci, deux étaient situées au Sud (Communauté de communes de Gevrey-Chambertin et du Sud dijonnais), une à l'Ouest (Communauté de communes de la Vallée de l'Ouche) et deux au Nord (Communauté de communes Forêts, Lavières et Suzon ainsi que le Val de Norge). Avec cette rétractation du territoire du SCoT de Dijon Métropole, la croissance urbaine ne pourra être appréhendée qu'en direction de l'Est.

Pour Dijon Métropole, les besoins en logements sont évalués au regard de plusieurs variables. Le point mort qui permet d'estimer le nombre de logements nécessaires pour le maintien des populations, les ambitions démographiques désirées par les élus, les évolutions à l'œuvre sur le marché de l'immobilier ainsi que les potentialités mobilisables sur le territoire du SCoT du Di-

jonnais. Le besoin en logement entre 2020 et 2040 a été estimé à 30 200 logements, soit environ 1 510 par an en moyenne (Fig. 4.3). Dans ces logements sont comptabilisés : la construction neuve, la remise sur le marché des logements vacants, le changement d'usage du bâti ainsi que le renouvellement urbain. La construction neuve concerne environ 75% de ce nombre de logements. Ainsi, à l'horizon 2040, la construction *ex nihlo* de nouveaux logements est estimée à 1 132 nouveaux logements par an pour un total de 22 640 logements à l'horizon 2040.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario retenu par Dijon Métropole
Population	0.3%.an	0.5%.an	0.7%.an	0.5%.an
Besoin en logements	23 400	27 200	28 000	30 200

TABLE 4.3 – Estimation du nombre de logements à l'horizon 2040 en fonction des scénarios de croissance du SCoT de Dijon Métropole

Si aucune localisation précise des nouvelles constructions n'est précisée, la croissance urbaine le long des axes de communications vers les pôles périphériques majeures est avancée. Les transports, individuels et collectifs, se veulent structurant dans la croissance urbaine future de Dijon Métropole. Ainsi, la croissance urbaine de la métropole se rapproche d'un développement de type Transit Oriented Development (TOD) qui se définit comme une croissance urbaine qui "*favorise l'aménagement des noyaux urbains denses, mixtes, accessibles aussi bien en voiture qu'en transport en commun et intégrant un environnement convivial pour les déplacements actifs*" (CERVERO 2004 ; DITTMAR et OHLAND 2012 ; QUINN 2006). Les zones les plus denses d'un TOD sont normalement situées dans un rayon de 400m à 800m autour d'un arrêt de transport (bus, tram, gare, ...) (CERVERO 2004).

Plusieurs limites peuvent être émises quant aux différents scénarios établis dans le SCoT : le manque d'un ou plusieurs scénarios de rupture avec les tendances passées, le manque de spatialisation des nouveaux logements ainsi que le manque d'une forme urbaine pour chaque scénario. Il est à noter que les différents scénarios proposés incluent le climat urbain uniquement avec la qualité de l'air. Là encore, même si Dijon Métropole dispose du réseau MUSTARDijon et a pour vocation de devenir une ville connectée, aucune mention du réseau MUSTARDijon n'est présente dans le SCoT.

Le PLUi De Dijon Métropole remplace et synthétise les 24 PLU des communes de la métropole. Le PLUi contient les PLU (plans locaux d'urbanisme [32]), le Programme Local de l'Habitat (PLH [33]) et le Plan de Déplacements Urbains (PDU [34]). Ce PLUi-HD encadre également la mise

32. principal document d'urbanisme de planification de l'urbanisme au niveau communal ou intercommunal. Il remplace le plan d'occupation des sols (POS) depuis la loi relative à la solidarité et au renouvellement urbains du 13 décembre 2000, dite « loi SRU »

33. Principal dispositif en matière de politique du logement au niveau local défini aux articles L.302-1 à L.302-9-2 du Code de la construction et de l'habitation. Il est le document essentiel d'observation, de définition et de programmation des investissements et des actions en matière de politique du logement à l'échelle d'un territoire.

34. Document de planification défini aux articles L.1214-1 et suivants du Code des transports qui détermine, dans le cadre d'un périmètre de transport urbain (PTU), l'organisation du transport des personnes et des marchandises, la circulation et le stationnement.

en œuvre d'actions et de projets dans le domaine des transports et du logement sur le territoire. Ainsi, Dijon Métropole "*vise à poursuivre le développement vers un territoire post-carbone*. Dans son PLUi, l'environnement urbain n'est abordé qu'à travers trois principes majeurs : les bâtiments bioclimatiques avec l'ensemble des enjeux liés à la réduction des consommations énergétiques, les enjeux de qualité de l'air et la végétalisation avec la création de voies vertes et bleues. Là encore, la problématique de l'ICU figure en filigrane d'autres actions et ne bénéficie pas d'actions concrètes pour l'atténuer.

POPULATION ET LOGEMENTS ACTUELS

Avec un taux de croissance démographique annuel oscillant entre 0.1% et 0.2% pour la dernière décennie et actuellement de 0.3%, Dijon Métropole se fixe des objectifs ambitieux en termes de croissance démographique avec 0.5% environ d'augmentation annuelle à l'horizon 2040. Cette croissance démographique est à mettre en parallèle avec le nouveau statut de Dijon : d'une part métropole et d'autre part capitale régionale de Bourgogne Franche-Comté (BFC). Cependant, ce taux est à nuancer car il s'agit d'une croissance démographique jamais atteinte par Dijon, et aucune des grandes villes de l'Est Français ne se situe dans cet ordre de grandeur. Actuellement, d'après Dijon Métropole, celle-ci compte 253 000 habitants et dispose d'un parc 133 377 logements. Avec une augmentation annuelle de 0.5% jusqu'en 2050, un gain d'environ 45 000 habitants est à envisager. D'après l'INSEE, le parc de logement principal est estimé à 122 804 logements principaux, 2 430 logements secondaires et 9 143 logements vacants, pour une population en résidence principale estimée à 232 001 (Tab. 4.4). De façon contre intuitive, à population égale ou même en déclin, de nouveaux logements doivent être construits pour accueillir une population issue du desserrement des ménages.

Population actuelle (Pop_tot_2017)	253 000
Population Dijon (Pop_Dijon_2017)	153 000
Population Hors Dijon (Pop_HD_2017)	100 000
Population totale résidence principale	232 001
Augmentation annuelle de la population	0.5%
Population supplémentaire estimée en 2050	45 264
Population totale estimée en 2050	298 264
Parc de logement total	134 377
Parc de logement principal	122 804
Parc de logement secondaire	2 430
Parc de logement vacant	9 143

TABLE 4.4 – Présentation du parc de logement et de la population actuelle ainsi que leur projection à l'horizon 2050 pour Dijon Métropole. Source : Dijon Métropole

Dijon métropole souhaite construire entre 1 100 et 1 200 nouveaux logements par an à l'horizon 2040. Cette tendance devrait rester stable ou en légère diminution par la suite.

4.3.2 CHOIX DE LA PÉRIODE D'ÉTUDE

Après la canicule record de l'année 2003 (avec 3°C d'écart à la moyenne), la période estivale de l'année 2018 est la plus chaude enregistrée par Météo-France (Fig. 4.32). La période est marquée par une canicule s'étendant du 24 juillet au 8 août. Lors de celle-ci, potentiellement plus de 39,8 millions de personnes domiciliées dans les départements touchés par la canicule, sont exposées à des températures dépassant les seuils d'alerte basés sur les températures maximales et minimales (contre 53,1 millions en 2003, 28,8 millions en 2006 et 27,4 millions en 2015) (PASCAL et al. 2018a). Au niveau départemental, chaque canicule présente des caractéristiques uniques de période de survenue, de durée, de sévérité [35] et d'intensité [36]. Les impacts sanitaires de la chaleur observés lors de la période estivale ne sont pas limités à la seule période du 24 Juillet au 8 Août puisque les deux-tiers des passages aux urgences pour pathologies liées à la chaleur sont observés en dehors de cette période.

35. Somme journalière des dépassements des températures observées par rapport aux températures d'alerte sur la période de survenue

36. Valeur maximale du dépassement des températures observées par rapport aux températures d'alerte sur la période de survenue

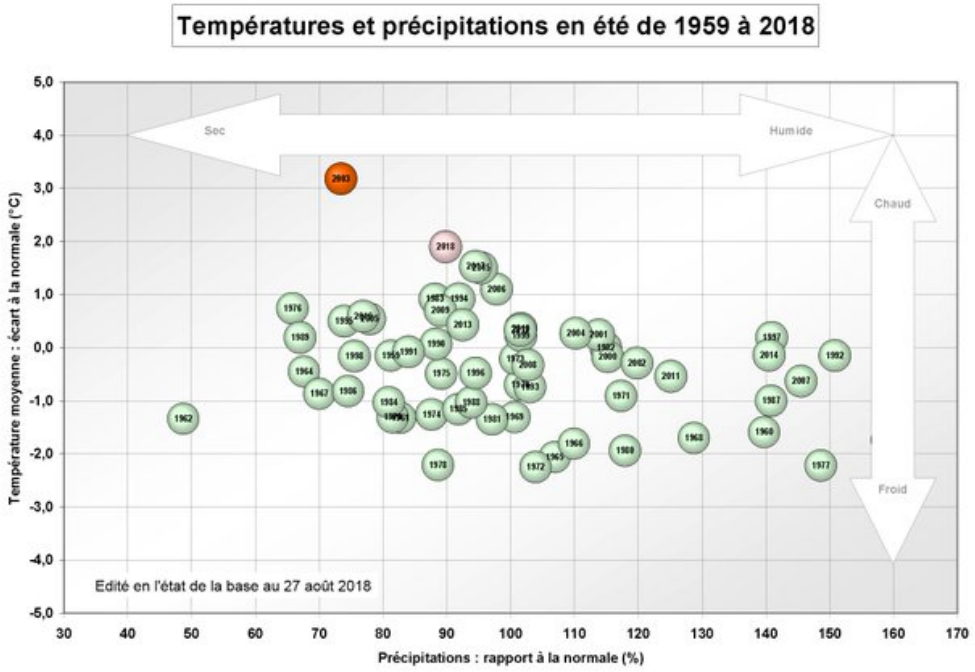


FIGURE 4.32 – Caractéristiques de la canicule de juillet 2018 par rapport aux autres canicules survenues en France (Météo-France)

Afin d'étudier l'influence de la forme urbaine sur l'ICU, il est nécessaire de sélectionner une période temporelle comportant des épisodes de chaleurs importants. La période sélectionnée s'étend du 22 au 26 Juillet 2018 soit une période de cinq jours (Fig. 4.33). Deux raisons ont motivé ce choix. Il s'agit du début de la période de canicule qui s'étend du 24 juillet au 8 août 2018. Les périodes de début de canicules sont les moments ou l'intensité de l'ICU est le plus important, les réserves hydriques en campagnes permettant encore à celles-ci d'évapotranspirer (Fig. 4.33).

Il s'agit de la période où les températures moyennes maximales sont parmi les plus élevées (environ 26 °C). Celle-ci fait suite à un déclin important des températures moyennes le 21 Juillet (environ 21 °C) (Fig. 4.33).

La période du 24 au 29 Juin possède des propriétés similaires avec une phase de déclin des températures (22 au 24 Juin) suivie d'une période d'augmentation des températures moyennes du 24 Juin (19 °C) au 11 Juillet (20.2°C). Les températures moyennes et maximales de cette période sont inférieures de 1 °C environ par rapport aux températures moyennes et maximales de notre période d'étude.

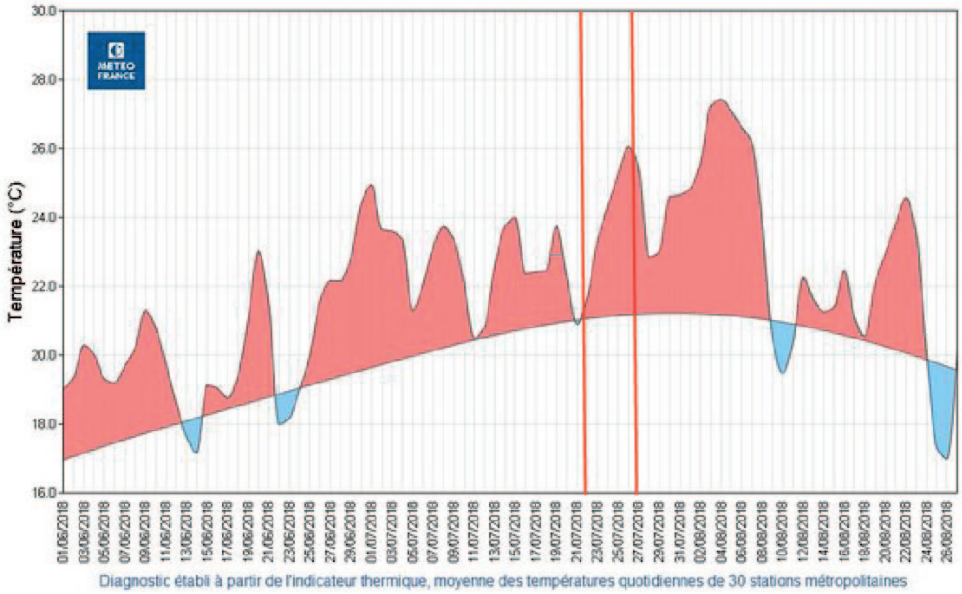


FIGURE 4.33 – Evolution de la température moyenne quotidienne en France par rapport à la normale quotidienne du 1er Juin 2018 au 27 Août 2018 (Météo France)

La figure 4.34 présente plus précisément la période étudiée avec la présentation des données des sondes urbaines et rurales, choisies d'après les travaux de Richard (et al., 2018), ainsi que la station Météo France de Dijon Longvic qui permet l'accès aux données de vents, nuageuses et de températures. Au total, onze heures cumulées de nuages sont présentes sur l'ensemble de la période. Durant la nuit du 25 au 26 Juillet, cinq heures nuageuses sont présentes à savoir 7 octas de 21h à 22h le 25 Juillet et 8 octas de 01h à 03h le 26 Juillet. La vitesse moyenne horaire des vents est inférieure à 7km.h pour l'ensemble de la période. Sur l'ensemble de la période, les écarts de températures moyens entre quatre sondes rurales [37] et la sonde Météo-France [38] sont de -0.3 °C. Pour l'ensemble des journées (12h - 18h), les écarts de températures moyens sont d'environ 0.5 °C. Pour l'ensemble des nuits (23h - 3h), les écarts de températures moyens sont de -1.5°C. °C avec un écart maximal de - 1.8°C. Les sondes considérées par Richard (et al., 2019) pour créer l'indice rural de température diffèrent légèrement de celles qui sont considérées pour ce travail. En effet, une croissance urbaine de la métropole suggère que des sondes en zones rurales, Saint-Apollinaire et Perrigny-lès-Dijon, seront localisées en zones bâties. Ainsi, les sondes de Fenay, au sud, et de Plombière-lès-Dijon à l'Est sont préférées car plus éloignées de la métropole. Sur l'ensemble de la période, les écarts de températures moyens entre quatre sondes urbaines (Parking Saint-Anne, Place de la république, Place Henri Barbant et Rue chancelier de l'hospital) (Fig. 4.26) et la sonde Météo-France sont de 1.6 °C. Pour l'ensemble des

37. Ahuy, Fenay, Magny-sur-Tille et Plombières-lès-Dijon (Fig. 4.26)
38. Sonde 51 - Aéroport Dijon Longvic, (Fig. 4.26)

journées (12h - 18h), les écarts de températures moyens sont de 0.7 °C avec un écart maximal de 1.3°C. Pour l'ensemble des nuits (23h - 3h), les écarts de températures moyens sont de 1.7°C. °C avec un écart maximal de 2.1°C. Les températures moyennes des quatre sondes urbaines et rurales pour la période, présentent de faibles écarts moyens d'environ 0.3°C pendant la journée (12h - 18h) mais significatifs durant les nuits (23h - 3h) avec un ICU moyen de 3.3°C et maximal de 4.8°C le 25 Juillet à 23h.

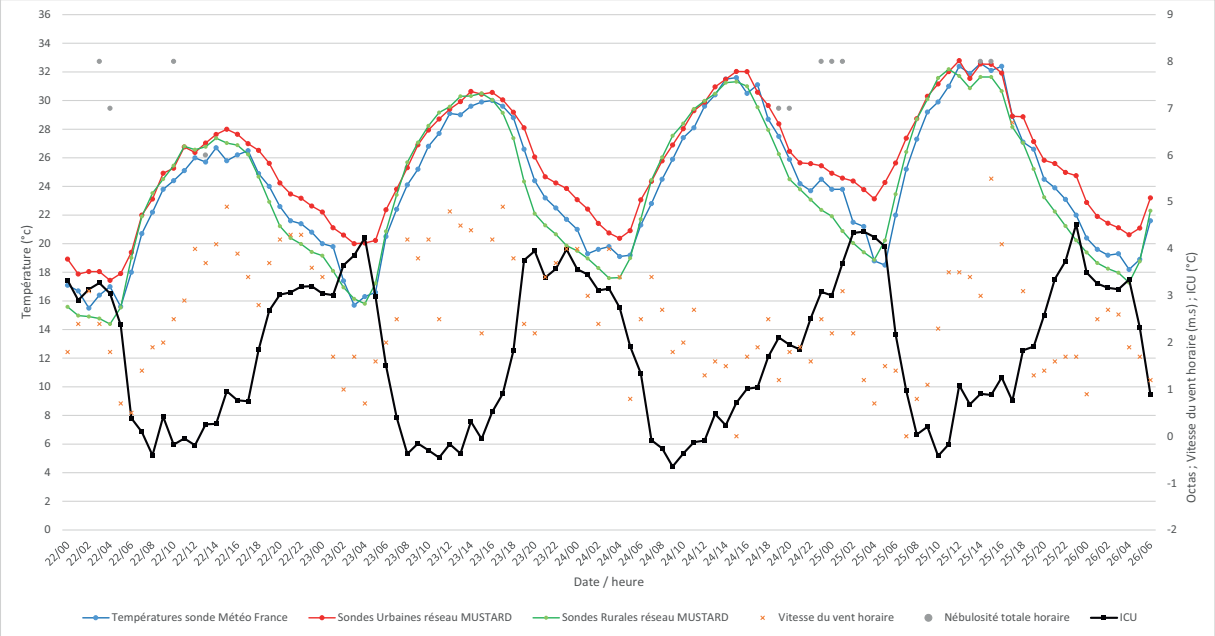


FIGURE 4.34 – Présentation de la période d'étude du 22 au 26 Juillet 2018 en heure UTC d'après le réseau de mesure MUSTARDijon et la station Météo-France.

4.4 SYNTHÈSE

Dijon Métropole est une agglomération dynamique dans l'amélioration de sa qualité de vie, comme l'attestent les nombreux labels et prises de décisions en faveur de l'environnement urbain. En 2020, Dijon Métropole est arrivée finaliste du label capitale verte européenne pour son exemplarité environnementale. En effet, tant dans son Schéma Départemental d'Aménagement et du Développement Durable du Territoire (SDADDT) que dans son SCoT, le volet environnemental est porté par les instances institutionnelles. L'ambition affichée de Dijon Métropole est de devenir une référence écologique en France et c'est ainsi que, dans le cadre de son PCET, le réseau MUSTARDijon est mis en place. Le nombre important d'acteurs impliqués (ADEME, Météo-France, Alterre BFC, les laboratoires CRC-Biogéoscience et ThéMA) permettent d'avoir un réseau qui est aujourd'hui l'un des plus denses et les plus anciens de France. Cependant, malgré la présence du réseau MUSTARDijon, ni le SCOT ni le PLUi de l'agglomération de Dijon avancent des actions concrètes dans l'amélioration du climat urbain notamment pour limiter les effets de l'ICU. Enfin, les travaux sur les LCZs de Dijon Métropole lui permettent d'être un terrain d'étude pertinent pour ce travail. La période d'étude s'étend du 22 au 26 Juillet 2018 ce qui correspond à une période de début de la canicule (22 Juillet au 8 Août 2018) et de surmortalité importante. L'intensité de l'ICU y est supérieure à 3 °C pour l'ensemble des nuits. La structure de la métropole est guidée par la topographie du site (Plateau à l'Ouest, plaine à l'Est), ainsi qu'un SCoT qui guide la croissance urbaine, définit par un développement de type (TOD), vers l'Est de la métropole. La forme urbaine, renseignée grâce aux LCZs et à la méthode WUDAPT, présente un cœur de ville dense, puis de moins en moins dense au fur et à mesure de l'éloignement au centre. L'échelle temporelle pour l'exercice prospectif est fixé à 2050 car cela permet de simuler une croissance urbaine importante. Ainsi, Dijon Métropole à l'horizon 2050 sera étudiée sous climat actuel (2018).

SYNTHÈSE PARTIE II : LA NÉCESSITÉ D'INTÉGRER L'ICU DANS L'AMÉNAGEMENT URBAIN

Pour conclure cette partie sur l'intégration de la problématique de l'ICU dans les documents d'aménagement, le contexte climatique actuel est propice à l'intégration des mesures d'atténuations de l'ICU dans le document d'orientations et d'objectifs du SCoT. L'atténuation du phénomène d'ICU, à travers la modification de la forme urbaine, est un levier d'action pertinent pour l'adaptation de la société au changement climatique. La thématique de l'ICU n'est peu ou pas considérée dans les documents d'aménagement (SRADDET, PCAET et SCoT). Or, le manque de considération du phénomène d'ICU est préjudiciable à la mise en place d'une ville durable. Le rapport de présentation du SCoT permet d'intégrer la problématique de l'ICU à travers la construction de scénario d'urbanisation, et le DOO peut permettre la création de variables chiffrées. L'objectif est maintenant d'appliquer cette méthode à la thématique de l'ICU.

Dijon Métropole est un terrain d'étude pertinent pour cette étude car celle-ci est dynamique dans ses politiques de croissance urbaine et de diagnostic de lutte contre l'ICU. La présence du réseau de mesure *in situ* MUSTARDijon permet un accès à des données de températures qui pourront être confrontées à des simulations climatiques.

Nous pouvons aussi noter que, malgré l'existence de nombreux documents juridiques, il n'existe pas actuellement de démarche générale, pour étudier l'impact de futurs aménagements sur le climat urbain qui puisse être mobilisée par les aménageurs ou les chercheurs. Le nombre de logements est une thématique importante pour les collectivités. Par ailleurs, cette variable influence fortement toutes les échelles urbaines Pour la suite de ce travail, il s'agit d'étudier les méthodes permettant d'intégrer les dynamiques spatiales aux LCZs pour analyser l'impact de différentes formes urbaines sur l'ICU.

Partie III

L'ICU, à la croisée des modèles

Simuler un système complexe,
un exercice pas si simple ...

Pour étudier le climat urbain sous plusieurs scénarios de croissance urbaine, il faut déjà les modéliser et les simuler. Ces deux termes sont des notions clés pour l'étude du climat urbain et les analyser permettra de mieux identifier leur utilité ainsi que leurs limites. La définition de modèle, faisant consensus, est celle de Haggett (1965) : "*in model we created an idealized representation of reality in order to demonstrate certain of its properties*", celle-ci peut aussi être comprise comme « a simplified version of reality, built in order to demonstrate certain of the properties of reality »(HAGGET 1965). De ce point de vue, le terme "*modèle*" renvoie à des éléments de la réalité auxquels une représentation simplifiée est attribuée en fonction de paramètre le constituant qui paraît faire sens. La modélisation est davantage qu'une simplification, et renvoie à l'ensemble d'un processus d'abstraction et de mise en hypothèses des éléments à mettre en place pour l'étude d'un phénomène, telles que la sélection de variables clés ou l'évolution du système ce qui nécessite une connaissance fine du système à modéliser. Le modèle et la problématique amènent donc à privilégier certaines variables et à en exclure d'autres. Si dans un système compliqué, l'identification des variables clés est relativement simple, dans le cas d'un système complexe, il est plus difficile d'identifier les variables importantes et surtout les relations de causalité qui les relient (MINSKY 1965 ; BATTY 2007). Par ce processus de modélisation, Banos (2010) explique que celle-ci offre la "*possibilité nouvelle de plonger au cœur de la complexité des sociétés humaines en compagnie de modèles simples, maniables et robustes*" permettant une compréhension simple et transmissible d'éléments complexes (MINSKY 1965 ; BATTY 2007 ; VARENNE 2008 ; BANOS et al. 2010 ; VARENNE 2016). Si le modèle est une réalité physique ou concrète, la modélisation "*désigne toute la procédure ou toute pratique individuelle ou collective au cours de laquelle on recourt à une ou le plus souvent - à plusieurs modèles, cela de manière systématique et éventuellement itérative, en s'orientant selon une certaine perspective et selon certains objectifs d'enquête bien définis au départ*". (VARENNE 2016). La simulation est une représentation du comportement d'un processus au moyen d'un modèle matériel (ou informatique) dont les paramètres représentent des variables du processus étudié.

L'ICU se situe au carrefour de deux systèmes complexes : le climat et la ville. L'objectif de cette partie est de construire une méthode généralisable qui, à la fois, permet de simuler une croissance urbaine et son impact sur le climat. Cette 3e partie permettra de nous interroger sur les modalités de couplage entre modèle de climat et modèle de croissance. *Quelle méthode pour que modèle de climat et modèle de croissance urbaine communiquent ?* Il est nécessaire de mener une synthèse de différentes méthodes existantes mêlant croissance, scénarisation et climat urbain. Cela aboutit à la formalisation d'une méthode permettant de concilier la croissance urbaine, le climat urbain et document législatif (SCoT). De cette méthode, le fonctionnement général des modèles de climat urbain est présenté et plus particulièrement le modèle MNH/TEB qui est utilisé pour la suite de ce travail. Enfin, un état de l'art des modèles de croissance urbaine sera présenté afin d'effectuer le choix du modèle adapté à notre démarche.

CHAPITRE V : QUELLE MÉTHODOLOGIE POUR L'ÉTUDE DE LA CROISSANCE URBAINE ET DU CLIMAT URBAIN ?

De nombreux travaux portent sur la mesure, la modélisation et la simulation du climat urbain. Il en est de même pour la croissance urbaine. Pour étudier ces deux visions du système urbain, les mêmes outils sont mobilisés, modélisation et simulation informatique, sur le même terrain d'étude. L'objectif est commun, puisqu'il s'agit d'améliorer la compréhension des dynamiques urbaines. Il est nécessaire de se *questionner sur les méthodes actuelles qui permettent d'étudier le climat et la croissance urbaine*. Au cours de cette partie, la présentation successive de ces deux approches permettra de présenter le cadre méthodologique pour aborder conjointement croissance urbaine et climat urbain. La première "scénario-dépendante" repose sur la sélection du modèle le plus approprié. Il peut être nécessaire de modifier ou de développer un nouveau modèle, voire d'en développer un nouveau pour pouvoir répondre aux exigences de la thématique étudiée. La seconde approche est qualifiée de "modèle-dépendante". Elle consiste à sélectionner des modèles de simulations puis de construire, *a posteriori* les scénarios de croissance urbaine.

5.1 RELATIONS ENTRE MODÈLES DE CROISSANCE URBAINE ET DE CLIMAT URBAIN

La majorité des travaux porte sur l'évolution passée ou l'état actuel du système urbain et de son influence sur l'ICU. Cela s'explique d'une part, par les données disponibles (image satellite pour l'évolution de la ville ou la température) et d'autre part, par le fait qu'il n'est pas nécessaire d'élaborer des scénarios de croissance urbaine, des bases de données nouvelles ou encore de croiser des modèles de croissance urbains et climatiques. Or, cela peut être une contrainte forte car seules les formes urbaines existantes sont étudiées.

Du point de vue de la climatologie urbaine, c'est à l'échelle de la structure urbaine que les si-

mulations de croissance urbaine pour étudier les ICU sont réalisées. Le but de cette échelle est de donner des indications sur ce que serait le climat urbain sous divers scénarios d'évolution de ville ou de climat global. Dans le but de renforcer la réalité des scénarios urbains, ceux-ci s'appuient sur des scénarios socio-économiques (BAUER et al. 2017 ; DELLINK et al. 2017 ; FRICKO et al. 2017 ; GUIVARCH et ROZENBERG 2013 ; HOUET et al. 2016 ; LEMONSU et al. 2015 ; MASSON et al. 2014 ; MOSS et al. 2010). Il est aussi à noter que les travaux portent majoritairement sur de très grandes villes (mégapole, mégalopole,...) (BORNSTEIN 1968 ; LEMONSU et al. 2015 ; PENG et al. 2012 ; TRAN et al. 2006) tandis qu'il y a un "*manque*" de recherche sur des villes de tailles plus modestes (BLAZEJCZYK, OKONIEWSKA et WIECLAW 2006 ; HINKEL et al. 2003 ; IVAJNŠIČ, KALIGARIČ et ŽIBERNA 2014 ; KOPEC 1970 ; PINHO et ORGAZ 2000 ; SANTAMOURIS 2007 ; VARDOULAKIS et al. 2013.

Houet (2016) combine des scénarios de croissance urbaine à long terme et à fine échelle dans une optique d'adaptation au changement climatique. Les scénarios sont volontairement contrastés (de 40% d'étalement urbain à 90% d'étalement) pour constater des différences de températures significatives entre eux et répondre à des logiques de croissance établies avec des décideurs et experts. Les résultats de Houet (2016) tendent à démontrer qu'un étalement urbain raisonné (avec une présence de végétation importante) n'est pas synonyme d'augmentation des températures urbaines. Le principal levier de réduction des températures en milieu urbain serait de définir et d'intégrer des stratégies d'atténuations et d'adaptations au changement climatique dans les politiques d'aménagements (HOUET et al. 2016).

Lemonsu (2015) simule l'impact d'expansions urbaines sur l'ICU parisien (LEMONSU et al. 2015). En journée, les températures de l'air pour le scénario dense sont moins élevées que les températures associées aux autres scénarios (ville étalée, ville verte) à cause des ombres portées des bâtiments (AGUEJDAD et al. 2012). Pourtant, la nuit, l'ICU semble être plus marqué sous scénario urbain dense. Par ailleurs, l'intensité et son expansion spatiale sont modérément impactées par le processus de densification et par la forme urbaine. Les scénarios urbains modélisés pour les simulations climatiques sont généralement des scénarios de fortes densités urbaines pour générer des différences significatives en termes de climat urbain (KOHLER, BLOND et CLAPPIER 2016).

5.2 QUELLES MÉTHODES POUR ÉVALUER L'IMPACT DE L'URBANISATION SUR L'ICU ?

5.2.1 L'ÉTUDE D'IMPACT, LA MÉTHODE CLASSIQUE POUR L'ÉTUDE DU CLIMAT URBAIN

L'approche dite modèle d'impact (ou encore « étude de cas ») est la plus courante (Fig 5.35). Elle consiste, à partir d'un état initial connu du système (Fig. 5.35. A) d'en modifier un élément clairement identifié (Fig. 5.35. B) sur la base de connaissances d'experts, d'urbanistes et

de scientifiques pouvant reposer sur des documents d'urbanisme et de prospective territoriale (SCoT) ; puis de simuler informatiquement cette modification et d'en étudier l'impact sur le système (Fig. 5.35. C). Cette approche permet d'évaluer l'impact du changement climatique ou de quelques paramètres seulement sur le climat urbain (GIRIDHARAN et al. 2007 ; JAFFAL, OULDBOUKHITINE et BELARBI 2012 ; MASSON et al. 2014 ; LIN et al. 2017). Par exemple, sur notre terrain d'étude, nous avons étudié l'impact de variation d'albédo des toits, des murs et des routes, sur l'intensité de l'ICU (VAIRET 2016). Une augmentation de l'ensemble des valeurs d'albédo des toits, murs et routes permet une diminution maximale de l'intensité de l'ICU sur la métropole que de 1.5 °C. Ce type d'approche est généralement utilisé pour les études à court terme. La vision des urbanistes, liée à la réglementation et aux opérations urbaines, prévoit des plans d'urbanisation pour les prochaines décennies. La différence cruciale entre les approches de modélisation d'impact et systémique est que cette dernière permet à la ville d'évoluer à l'aide de simulations prenant en compte les tendances à long terme, plutôt que d'utiliser des scénarios restreints par des documents d'urbanisme et des décideurs. Ainsi, cette approche limite fortement l'éventail des stratégies d'adaptation urbaines pouvant être testées.

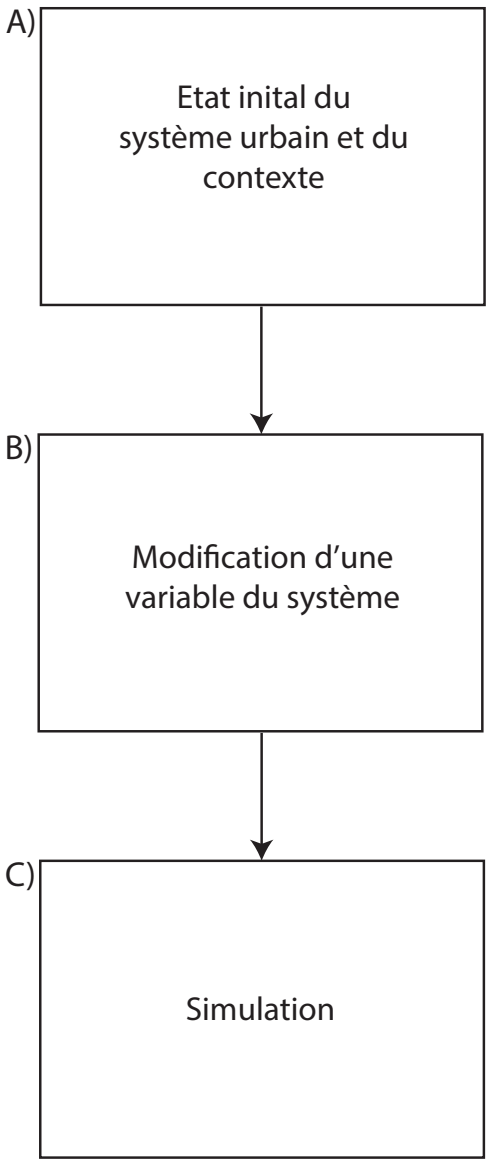


FIGURE 5.35 – Schéma conceptuel d'une "étude d'impact"

5.2.2 LES MÉTHODES "SAS" ET "SCÉNARIO-DÉPENDANT" POUR UNE ÉTUDE PLUS FINE DU CLIMAT URBAIN

La méthode proposée par Masson (et al., 2014) est plus ambitieuse que la modélisation classique d'impact en termes de processus simulés et de perspectives utilisées pour quantifier différentes stratégies d'adaptation des villes face au changement climatique (MASSON et al. 2014). Pour mettre en œuvre cette méthode systémique, un large panel interdisciplinaire de chercheurs est nécessaire tout au long du processus (Fig. 5.36).

Les objectifs de l'étude sont définis ainsi que le contexte et l'état initial. Cette étape nécessite l'intervention, à de multiples reprises, d'aménageurs urbains ainsi que de chercheurs (Fig. 5.36 ; A). La sélection d'une variable clé est facultative mais permet cependant aux scénarios de garder

une cohérence d'ensemble autour d'une variable directrice (Fig 5.36. B), par exemple un nombre de logements ou d'arbres plantés. Des scénarios de croissance urbaine sont ensuite élaborés. L'aspect interdisciplinaire de cette approche permet d'une part, de considérer une multitude de variables et d'autre part, de construire de nombreux scénarios cohérents (Fig. 5.36. C). Cette construction de scénarios de croissance urbaine, mêlant des décideurs et des acteurs, impose de modifier les modèles, tant de croissance urbaine que climatique, en fonction des scénarios élaborés. Par ailleurs, plus les scénarios de croissance urbaine sont complexes, plus le nombre de modèle de croissance urbaine devant être utilisé ainsi que les modifications qui devront leurs être apportées seront importants (Fig. 5.36. D). Afin d'étudier le climat urbain sous divers scénarios de croissance urbaine, Masson (et al., 2014) utilisent trois modèles : un modèle d'étalement reposant sur des bases économiques (NEDUM, VIGUIÉ, HALLEGATTE et ROZENBERG 2014), un modèle de spatialisation (SLEUTH, CLARKE 2008) et un modèle d'architecture spécifiquement développé pour ce travail (GENIUS, BONHOMME et al. 2013) (Fig. 5.36). Le critère principal pour le choix du modèle d'expansion urbaine est de disposer d'un modèle capable de produire des projections du système urbain à très long terme pour différents scénarios. Les modèles urbains utilisés par les agences de planification urbaine (par exemple TRANUS, BARRA 2005) utilisent souvent des règles basées sur l'extrapolation des tendances passées qui peuvent être valables pour de courtes périodes (10 à 20 ans). Le modèle NEDUM permet de simuler la croissance de la ville sur de plus longues périodes. Cependant, à fine échelle, le modèle NEDUM doit être amélioré grâce au modèle SLEUTH. Plutôt que d'estimer le taux de croissance de l'urbanisation à partir de cartes urbaines précédentes (en extrapolant ainsi les tendances passées), SLEUTH devient dépendant des scénarios élaborés par les utilisateurs. Enfin, une fois que l'emplacement des nouvelles zones urbaines et la quantité de bâtiments à construire sont simulés, il reste à connaître le type de construction et ses caractéristiques. GENIUS identifie les principales caractéristiques de la morphologie urbaine existantes pour des blocs carrés de 250 mètres environ. Chaque bloc est catégorisé d'après une Local Climat Zone (LCZ) (STEWART et OKE 2012). Puis, les scénarios d'extensions de NEDUM et SLEUTH sont catégorisés en fonction des LCZs du modèle GENIUS (Fig. 5.36. D).

Les simulations et leurs résultats dépendent du modèle de simulation urbain et/ou climatique utilisés (Fig. 5.36. E et F). Ce couplage de modèles (Economique, spatiale et architectural) permet, d'une part, de fournir une meilleure description des processus reliant les éléments du système urbain. D'autre part, cet interfaçage permet de mener une analyse interdisciplinaire des impacts pour un très large éventail de variables [39].

L'approche "*Storyline And Simulation*" (SAS) consiste à définir des scénarios, puis de les spatialiser et enfin d'évaluer leur impact (ALCAMO 2008 ; HOUET et al. 2016) (Fig. 5.36.)

— Identifier une variable clé sur les bases de l'étude de l'état initial du système à étudier (Fig. 5.36. A et B) Le modèle doit être calibré sur les tendances passées du système.

39. coûts monétaires, répartition de la population dans la ville, architecture, formes, énergie, microclimat, anticipation des effets secondaires des mesures d'adaptation, définition des exigences pour que les mesures d'adaptation énergétiques atteignent les niveaux de performance attendus, etc.

— Combiner les hypothèses d'évolution du système au sein de scénarios d'évolutions cohérents. Cette étape peut être réalisée avec des acteurs et des décideurs (Fig. 5.36. C).
— Relier les variables de scénarios aux données d'entrée des modèles puis construire des projections quantitatives pour chaque type de données d'entrée (Fig. 5.36. C et D).
— Raffiner et enrichir le récit avec les données quantitatives puis réitérer le processus en construisant de nouveaux scénarios quantitatifs en fonction des résultats des simulations (Fig. 5.36. C, E et F).

Ce processus itératif permet de construire des scénarios qualitativement et quantitativement meilleurs après chaque itération. Les récits s'affinent car les possibilités de variable offertes par les modèles sont connues.

Cependant, certaines limites peuvent être émises quant à cette méthode. Le fait de devoir adapter ou construire un modèle pour répondre à la thématique constitue le principal frein de celle-ci. Cela nécessite des ressources humaines importantes avec les décideurs, aménageurs et chercheurs. La seconde est que cette méthode peut se révéler chronophage du fait du nombre d'acteurs, décideurs et chercheurs impliqués dans le processus et de leurs visions différentes du système urbain complexe (temporalité, ampleur des modifications urbaines, localisation des changements, ...). Enfin, cette méthode nécessite un savoir-faire technique conséquent car il faut combiner et adapter des éléments mathématiques formels (modèle et simulation) en fonction des scénarios reposant, en partie, sur des archétypes urbains. Pour les deux méthodes, du fait du caractère complexe propre au milieu urbain et aux ICU, les scénarios sont difficilement reproductibles. La forte dépendance des utilisateurs des modèles vis-à-vis des concepteurs de ceux-ci est le frein principal de ces méthodes.

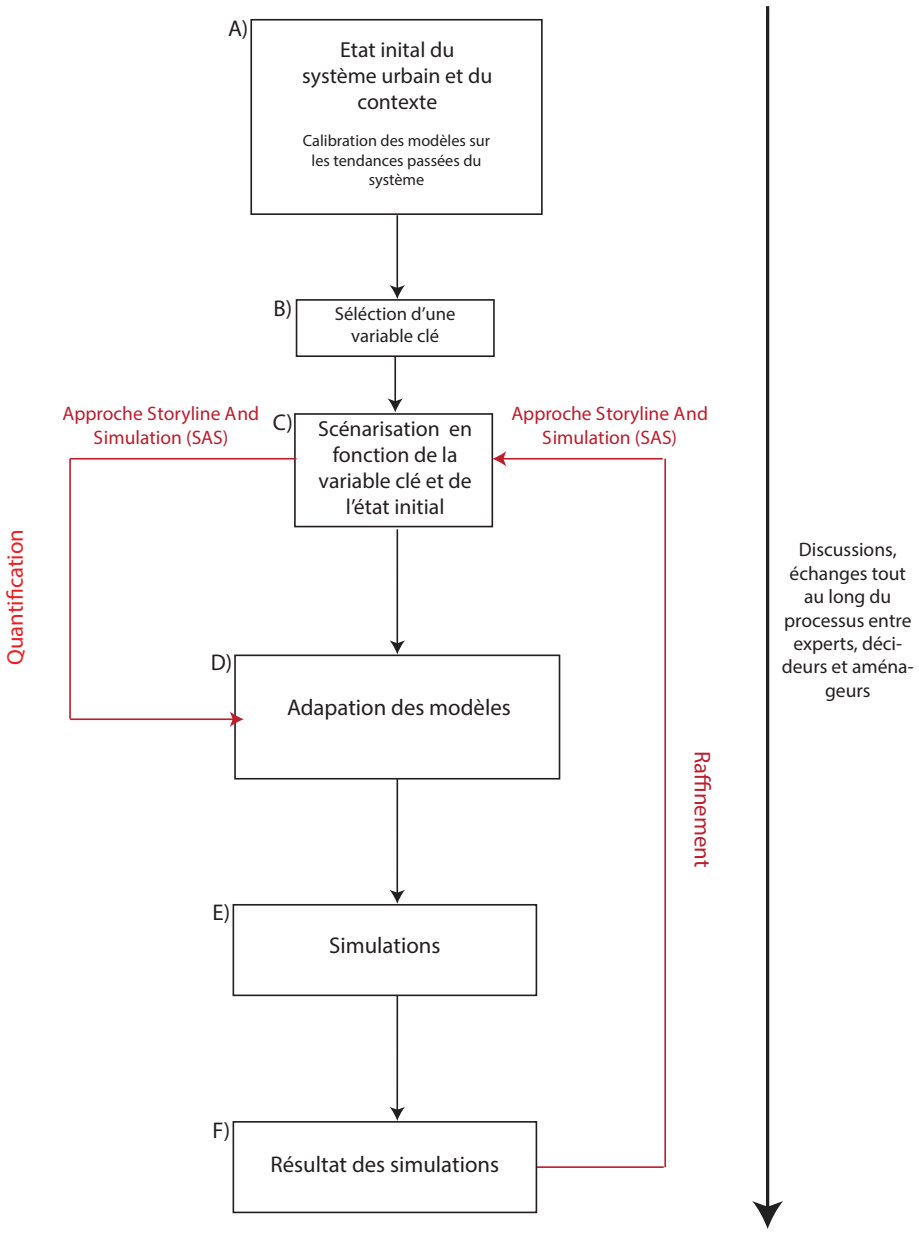


FIGURE 5.36 – Schéma de l'approche "scénario-dépendante" de l'étude de MASSON et al. 2014, et *Storyline And Simulation* (ALCAMO 2008)

5.3 PROPOSITION D'UNE MÉTHODE POUR L'ÉVALUATION DE L'IMPACT DE LA CROISSANCE URBAINE SUR LES TEMPÉRATURES URBAINES

Comme le souligne GODET et ROUBELAT 1996, "*il n'est pas acceptable de restreindre les futurs possibles au nom de la logique et des contraintes d'un modèle construit sur le passé. Au lieu de déterminer des variantes en fonction des modèles il faudrait partir des scénarios pour construire les modèles les plus appropriés à représenter l'évolution que l'on veut explorer. En*

d'autres termes, il faut plier les modèles à la réalité que l'on veut construire et non l'inverse : les moyens ne doivent pas l'emporter sur les fins". Comme le souligne Hidalgo (et al., 2018), les limites de l'approche "scénario-dépendant" sont des freins à la mise en place d'une méthode généralisable pour l'étude de l'ICU (HIDALGO, LEMONSU et MASSON 2018). L'approche "scénario-dépendante" peut, en effet, être intégrée dans des documents de planifications (SCoT) et répond parfaitement aux enjeux de planification du SCoT. Son caractère chronophage ainsi que sa mise en place peuvent se révéler complexe. Entre chercheurs et décideurs, les temporalités (la recherche scientifique, des mandats, des PCAET, ...) mais aussi des échelles (métropole, quartier, rue, habitation, habitant, ...) et des objectifs (recherche ou outil d'aide à la décision) divergent. À cette divergence s'ajoute la dépendance des utilisateurs face aux modélisateurs et le caractère chronophage de cette méthode. Il s'agit donc de construire une méthode qui soit :

— Reproductible et généralisable qui permette d'intégrer les particularités de croissance (vision des décideurs et aménageurs) de chaque système urbain. Chaque ville devrait potentiellement avoir accès à cette méthode et la mettre en place ;
— Moins chronophage en termes de ressources humaines mobilisées et qui ne nécessite pas l'intervention de l'ensemble des acteurs (décideurs et chercheurs) à chaque étape ;
— Indépendante vis à vis de la technicité nécessaire à la modification des modèles de croissance et de climat urbain pour l'intégration des scénarios.

C'est dans cette posture d'amélioration des interactions entre climatologues et aménageurs que la méthode "modèle-dépendante" (ou data-driven) est pertinente. D'après Houet (et al., 2016), cette approche consiste à construire des scénarios prospectifs à partir des possibilités offertes par les modèles disponibles. Ainsi, la construction des scénarios prospectifs est plus ou moins contrainte par le type et le nombre d'entrées du modèle. Cette approche peut être considérée comme allant à l'encontre de la finalité de la démarche du SCoT qui, rappelons-nous, consiste à explorer le champ des possibles et orienter le territoire vers divers horizons et surtout suffisamment contrastés. (MAESTRIPIERI et PAEGELOW 2013 ; HOUET et al. 2016).

L'approche proposée est synthétisée dans la figure 5.37 et repose davantage sur une segmentation des tâches plutôt que sur un dialogue continu entre les différents acteurs (experts climatiques, aménageurs, ...).

Il s'agit dans un premier temps de sélectionner un modèle de simulation climatique urbain Fig. 5.37. A). Son échelle de simulation ainsi que ses données d'entrées doivent être étudiées. Les données d'entrées vont guider la sélection du modèle de croissance urbaine. Il s'agit de sélectionner un modèle de croissance urbaine dont les données de sorties peuvent être intégrées dans le modèle de simulation climatique (Fig. 5.37. B). Cette étape peut être facultative si les décideurs/aménageurs utilisent les scénarios spatialisés établis dans le SCoT. La calibration du modèle sur les tendances passées du système est dépendante de l'étude menée. Ensuite, une variable clé doit être sélectionnée, variable qui doit s'inscrire dans un modèle de climat (5.37. A), impacter la croissance urbaine (Fig. 5.37. B), être au cœur des politiques et des scénarios urbains (Fig. 5.37. C). La variable du nombre de logements répond à l'ensemble de ces critères.

Il est à noter que la sélection de modèle de simulation atmosphérique et urbain n'est réalisé qu'une seule fois par des experts en modélisation. Il est nécessaire d'identifier et de présenter clairement les données d'entrées aux décideurs et aménageurs. Ainsi, différents scénarios de croissance urbaine peuvent être établis (Fig. 5.37. D) en fonction de l'état initial du système urbain et de la variable clé (Fig. 5.37. C). Les scénarios sont tout d'abords créés en fonction des tendances locales et globales à partir de plusieurs variables (économiques, sociales,...). Cette étape peut être réalisée par des décideurs et aménageurs car la base de données MApUCE permet un accès simple à des bases de données intégrables dans les modèles atmosphériques. Une fois plusieurs trames scénaristiques construites à partir d'un nombre de logements fixes, il faut établir des scénarios de croissances urbaines (Fig. 5.37. D). Puis, les attributs des logements des scénarios (Hauteur, nombre, pourcentage de bâti,...) sont établis en fonction des possibilités du modèle de climat (5.37. A) et de croissance urbaine (5.37. B). Chaque scénario fait référence à une LCZ différente. En fonction du nombre de logements établis lors de l'étape précédente (Fig. 5.37. E), les scénarios peuvent être spatialisés (Fig. 5.37. F) à l'aide du modèle de croissance urbaine (Fig. 5.37. B). Une fois que les différents scénarios possèdent des attributs et sont spatialisés, ceux-ci peuvent être transmis à des techniciens, chercheurs ou experts des modèles de climat pour y être intégrés. Les dernières étapes consistent à intégrer les scénarios de croissance urbaine, ainsi que leurs différents attributs dans le modèle de climat (5.37. A et G) puis à lancer des simulations pour chaque scénario (5.37. H). Les principales limites quant à cette méthode sont :

— La marge de manœuvre pour élaborer des scénarios contrastés et robustes, est limitée par les fonctions disponibles de l'outil de simulation. Cette démarche peut donc sembler contradictoire avec la démarche à visée prospective du SCoT ;
— Il n'existe actuellement pas de système permettant la mise en place de cette méthode ;
— Vigué (2014) démontre l'intérêt de privilégier le couplage de modèles de spatialisation au lieu d'utiliser un seul et unique modèle, souvent mono-disciplinaire (VIGUIÉ, HALLEGATTE et ROZENBERG 2014).

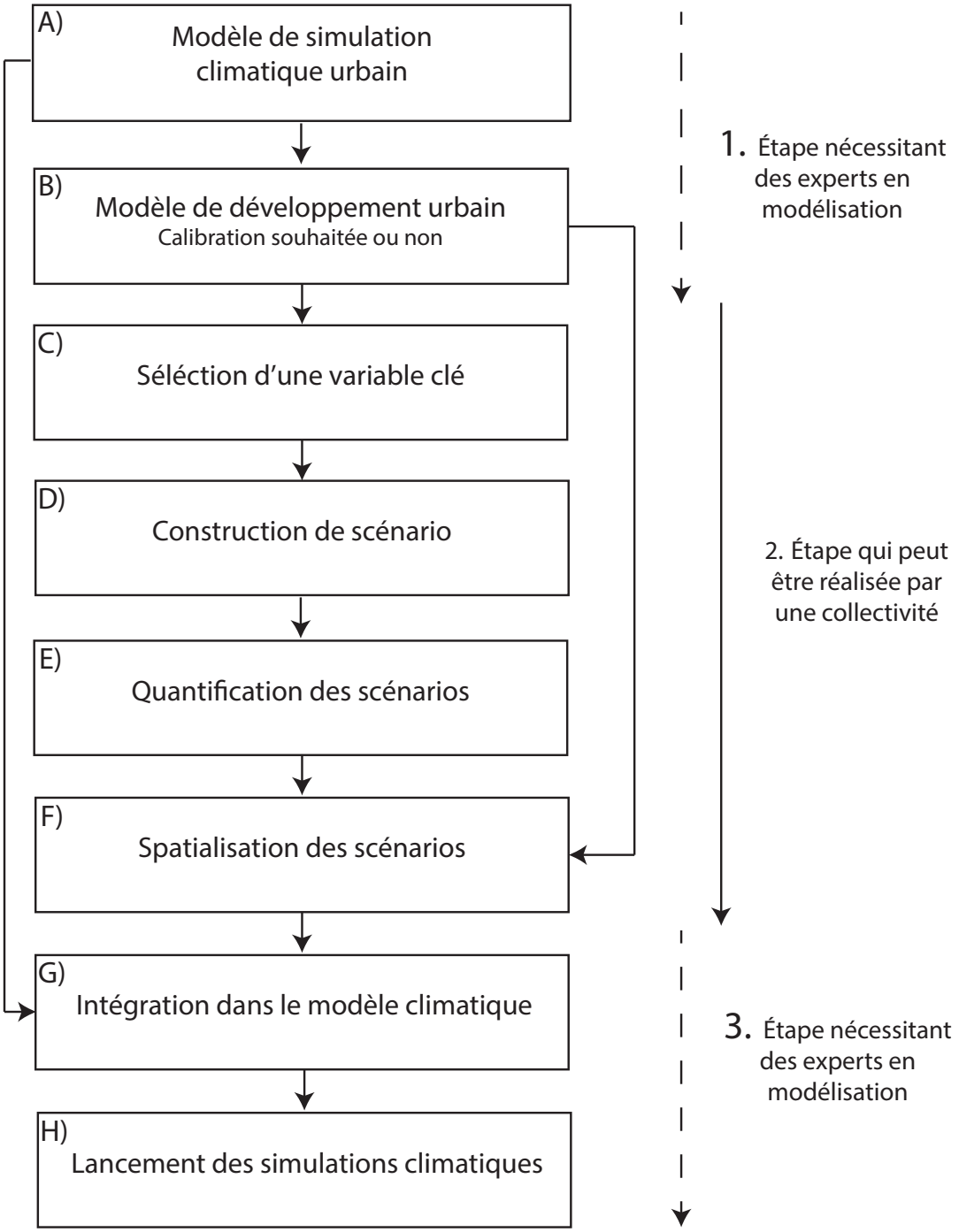


FIGURE 5.37 – Schéma de l'approche "modèle-dépendante" proposée

5.4 SYNTHÈSE

Si l'approche "modèle-dépendante" peut se révéler paradoxale avec la démarche prospective du SCoT, les limites avancées de l'approche "scénario-dépendante" sont importantes. En France, le manque d'experts sur le climat dans les collectivités territoriales est un frein important à la mise en place de politiques d'adaptation au changement climatique et à l'ICU. La difficulté pour les territoires et collectivités de mettre en place une chaîne de modélisation permettant d'étudier l'ICU est le principal frein de la méthode "scénario-dépendante" car elle requiert systématiquement un expert en climatologie urbaine à chaque étape du processus (Fig. 5.36).

La méthode "modèle-dépendante" proposée ne nécessite pas la présence d'expert climatique à chaque étape du processus. Les collectivités et décideurs sont libres d'établir des scénarios et hypothèses de croissances urbaines spatialisés en s'appuyant, ou non, sur des simulations de croissance urbaine. La seule condition est que les données doivent être au format correspondant aux modèles de climat et de croissance urbaine utilisés. Le protocole s'applique à l'ensemble des modèles de climat, tant que les données d'entrées du modèle utilisé sont connues et identifiées. La base de données MApUCE permet à toute ville de disposer des données nécessaires à sa mise en place. Les limites des deux approches "scénario-dépendante" et "modèle-dépendante" nous questionnent sur l'actuelle existence d'une méthodologie adaptée aux exigences du SCoT.

CHAPITRE VI : LES MODÈLES DE CLIMAT

La mise en place de la méthode “modèle-dépendant” débute par la sélection d’un modèle de climat. Si plusieurs méthodes permettent d’étudier le climat urbain (mesures fixes ou mobiles ou encore la télédétection), seule la modélisation permet d’étudier le climat urbain sous divers scénarios de croissance urbaine. L’objectif est de présenter et de sélectionner un modèle de climat urbain et d’en analyser les données d’entrées. Cette présentation des données d’entrées est primordiale car de celles-ci dépendent le modèle de croissance urbaine ainsi que la construction des scénarios. Compte tenu de la faible résolution spatiale des Modèles de Circulation Générale (MCG) (de l’ordre de 150 km), ceux-ci ne peuvent pas représenter adéquatement les processus à l’échelle urbaine, notamment le phénomène d’ICU. Ce chapitre porte non pas sur une présentation exhaustive des modèles de climat ou de leur fonctionnement mais davantage sur les notions indispensables pour la mise en place de la méthode “modèle-dépendant”. *Quel modèle de climat urbain choisir pour étudier l’influence de la forme urbaine sur l’ICU ?* Pour répondre à cette question, il est nécessaire de présenter les grands principes régissant la modélisation climatique en milieu urbain (données d’entrées, échelle, ...). Puis, un focus est réalisé sur les modèles méso-échelle (de quelques kilomètres à moins de 2 000 kilomètres) et urbains (micro-échelle) permettant de simuler l’ICU. Les modèles atmosphériques AROME et Meso-NH couplés au modèle de surface SURFEX/TEB sont utilisés pour ce travail.

6.1 FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL DES MODÈLES DE CLIMAT À MÉSO-ÉCHELLE

Au sein d’un modèle de climat, l’atmosphère est représentée par ses principaux paramètres (pression, vent, température, humidité) grâce à un maillage artificiel en trois dimensions, ou voxels, du milieu à modéliser (Fig. 6.38). L’ensemble des modèles de climat repose sur la résolution des différentes variables atmosphériques (vent, déplacement des vents, composition

chimique, température, pression, ...) à l'intérieur de ces voxels. La taille des voxels ainsi que la taille du domaine à simuler conditionnent la précision du modèle et le temps de calcul informatique.

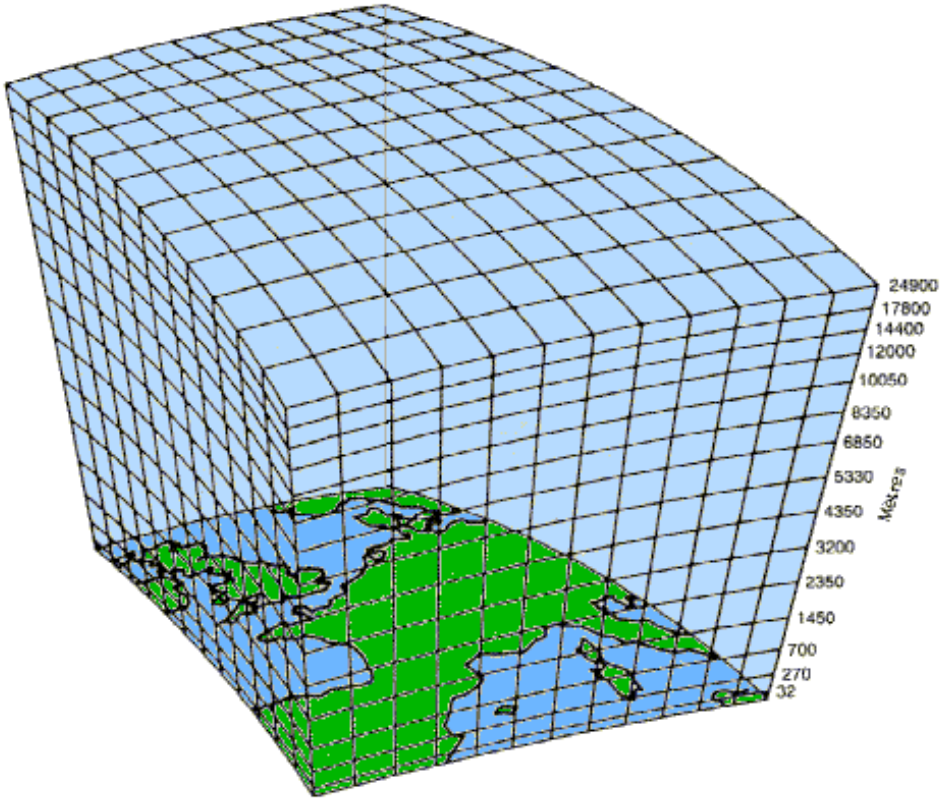


FIGURE 6.38 – Exemple du maillage artificiel permettant la mise en place des modèles et simulations climatiques. D'après Fairhead - CNRS

La descente d'échelle (ou désagrégation) se fait par emboîtements successifs [40] de domaines dont la résolution horizontale (c'est-à-dire la taille de la maille) est améliorée entre chaque domaine (Fig. 6.39. Cette descente d'échelle s'accompagne d'échanges entre les domaines selon deux modes : "1-way nesting" ou "2-way nesting". Les conditions aux limites des domaines emboîtés sont données par le domaine Parent, excepté pour celui qui doit être forcé aux bornes (dans le cas d'un modèle atmosphérique) soit, par un modèle de taille supérieure (MCG, Modèle Climatique Régional - MCR, ...), soit par des données issues de l'observation directe (ballon sonde, ...), indirecte (télédétection, ...) ou soit par des ré-analyses (analyse *a posteriori* qui regroupent et croisent des données d'observation et de modélisation afin de fournir une présentation cohérente de l'atmosphère à un moment donné pour une couverture spatiale homogène).

— 1-way nesting : les informations échangées se font du domaine Parent vers le domaine Enfant (Top-down).
— 2-way nesting : les informations échangées se font du domaine à maille Parents vers le

40. Les travaux de Skamarock et al., 2008 présentent les configurations d'emboîtement autorisées et non autorisées par le modèle (SKAMAROCK et al. 2008).

domaine Enfant (Top-down) mais incluent des échanges des domaines Enfants vers les domaines Parents (Bottom-up).

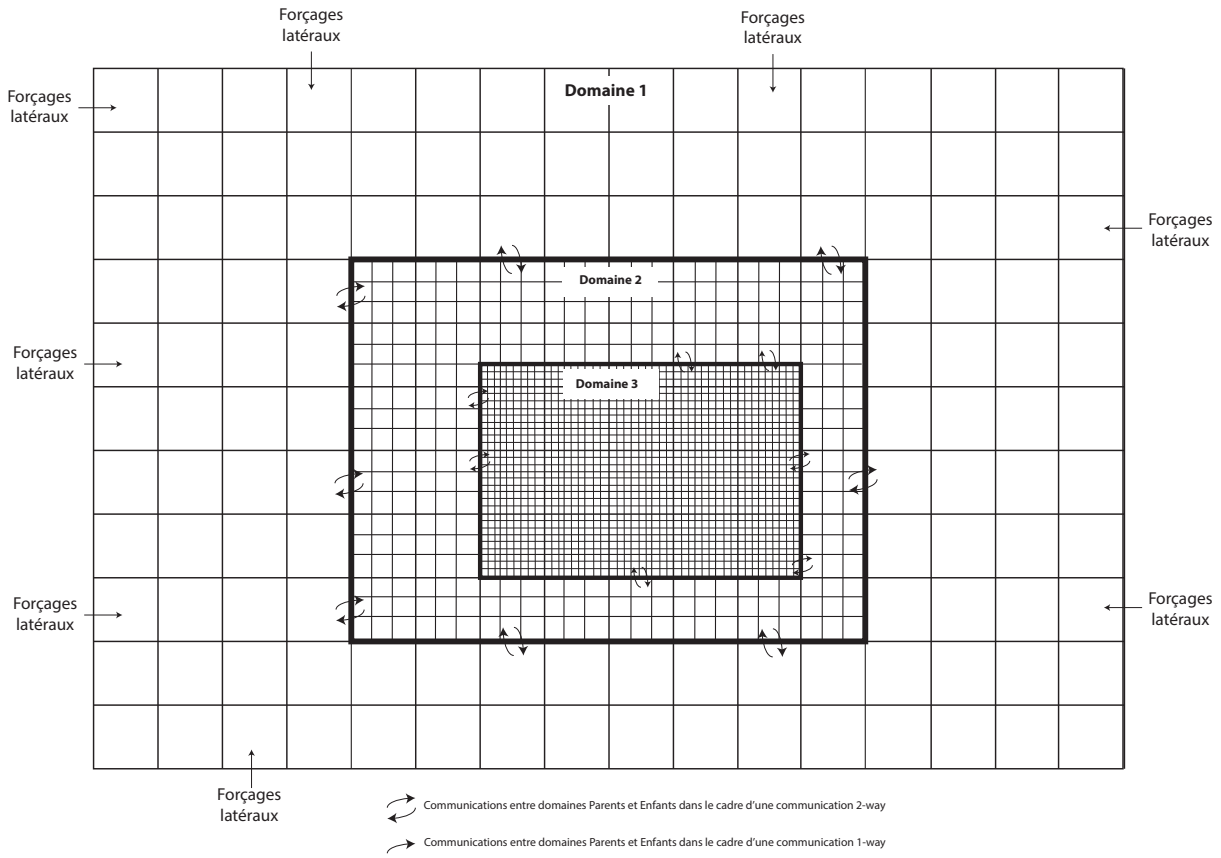


FIGURE 6.39 – Fonctionnement schématique de l'imbrication de domaine (ici de facteur 3). D'après la documentation Meso-NH

Il existe de nombreux MCG (RegCM, WRF, ...). Le parti pris pour ce travail est de mobiliser un modèle développé en France. Deux critères sont à considérer pour le choix du modèle de climat pour notre étude : celui-ci doit être à haute résolution afin d'étudier la ville et doit pouvoir être couplé avec un modèle de climat urbain. À la vue de ces critères, deux modèles français s'avèrent adaptés :

AROME (Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle) est le modèle de prévision numérique du temps à maille fine exploité en opérationnel à Météo-France (CNRM). Il est opérationnel, évalué et validé depuis décembre 2008 (SEITY et al. 2011). Avec une résolution de maille d'1.3 km, AROME couvre un domaine limité à la France métropolitaine et les pays voisins. Il est conçu pour améliorer la prévision à courte échéance des phénomènes dangereux tels que les fortes pluies méditerranéennes, les orages violents, le brouillard ou encore les ICU en période de canicule. La principale limite de ce modèle, pour notre étude est sa résolution, trop grossière, pour l'étude du climat urbain sur Dijon Métropole. Les fichiers de sorties d'AROME peuvent être utilisés en données d'entrées d'autres modèles atmosphériques.

Meso-NH est un modèle atmosphérique de recherches développé conjointement par le CNRM-

GAME et le Laboratoire d'Aérologie de Toulouse (LAFORE et al. 1998 ; LAC et al. 2018). C'est un modèle qui permet des simulations climatiques à relative large échelle (supérieur à 10km), à méso-échelle (environ 1km) et à échelle fine (de 100m à 1cm). Par ailleurs, il est important de souligner que des conditions initiales doivent être fournies à Meso-NH pour qu'il puisse simuler une évolution du climat.

Pour cette étude, la version 5.4.1 du modèle Meso-NH est utilisée pour simuler le climat urbain car la résolution du modèle permet de descendre à l'échelle urbaine contrairement à AROME. Les fichiers de sorties d'AROME servent de données d'entrées atmosphériques à Meso-NH. La modélisation du climat urbain nécessite de coupler le modèle atmosphérique (Meso-NH) avec un modèle de surface. Celui-ci permet d'ajuster les températures de surfaces en fonction d'échanges thermiques spécifiques entre les différents états des surfaces et l'atmosphère.

6.2 PRÉSENTATION DU MODÈLE DE CLIMAT URBAIN SURFEX/TEB

6.2.1 SURFEX

Meso-NH peut être couplé avec le modèle SURFEX (pour notre étude, il s'agit de sa version 8.1) qui est une plateforme de SURFace EXternalisée développée au CNRM. L'une des particularités de SURFEX est qu'il peut être directement couplé avec le modèle atmosphérique AROME ou Meso-NH. D'après Masson (et al, 2013), SURFEX est développé dans l'optique de modéliser les interactions surface-atmosphère selon les spécificités suivantes (MASSON et al. 2013a) :

- Fournir une interface avec la base de données physiographiques permettant la création de différents types de domaines ;
- Inclure un composant d'assimilation de données pour les applications numériques de prévision météorologique et de surveillance de la surface terrestre ;
- Proposer un code unique pour toutes les surfaces.

Les modèles Meso-NH et SURFEX utilisent un maillage en point de grille C d'Arakawa [41] (Fig. 6.40). L'utilisation de la grille C d'Arakawa signifie que la température potentielle [42] ou encore l'humidité sont calculées au centre du voxel tandis que la température à 2 mètres est calculée en fonction de l'occupation des sols et de la température potentielle du voxel.

41. Il existe un total de six configurations possibles de grille.

42. La température potentielle est la température hypothétique qu'une parcelle d'air acquerrait si celle-ci était redescendue au niveau de la mer par compression adiabatique (sans échange de chaleur entre le système et le milieu extérieur)

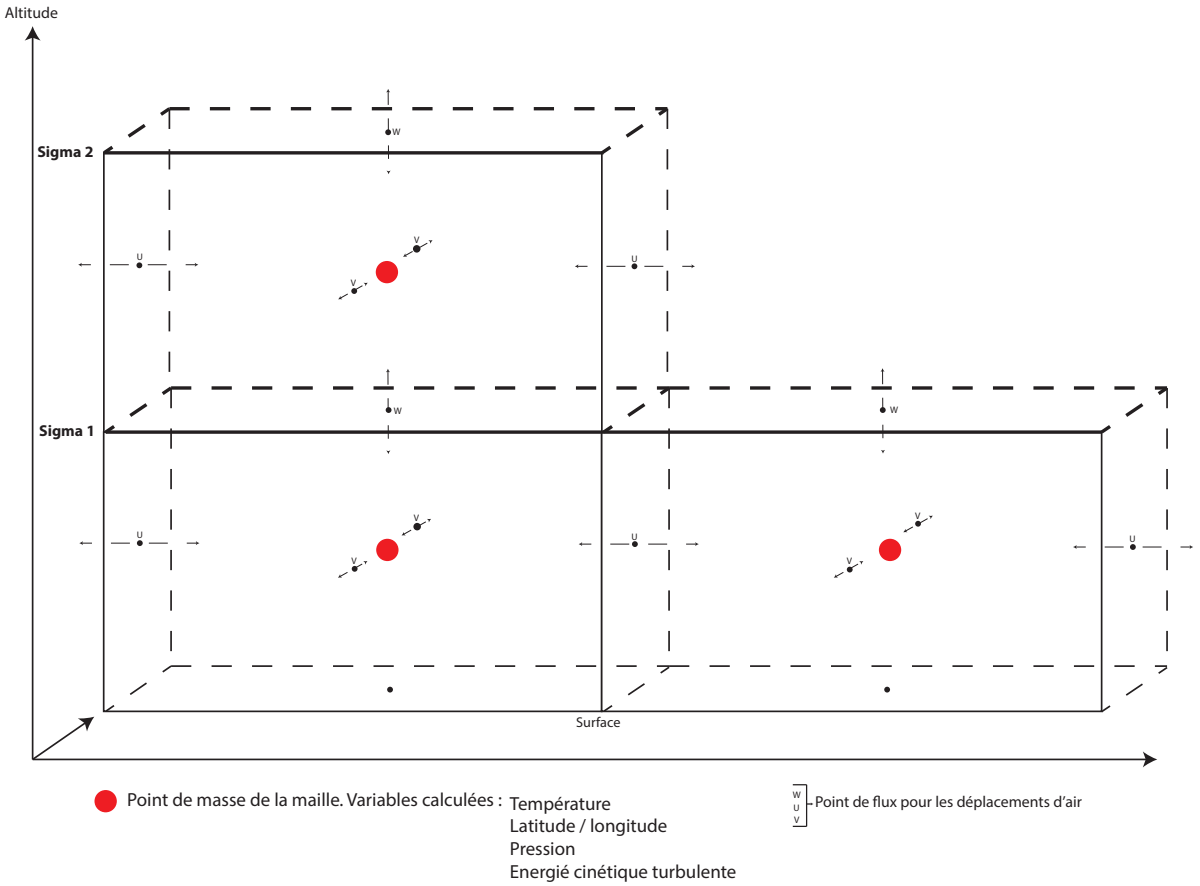


FIGURE 6.40 – Représentation schématique de la grille C d'arakawa et des interactions entre les modèles SURFEX et MNH

SURFEX peut avoir plusieurs utilisations, allant du calcul de flux de chaleur, de quantité de mouvement et d'eau mais aussi de flux de CO2, d'eau de mer, de neige ou encore d'aérosols continentaux. Celles-ci permettent de modéliser la surface du domaine grâce à quatre modules pour le couplage océan-atmosphère (Fig. 6.41) :

— Flake pour simuler les réservoirs hydriques continentaux (MIRONOV 2008) ;
— Seaflux utilisé pour simuler les océans ou les mers (LEBEAUPIN 2007) ;
— TEB pour simuler les surfaces urbaines (MASSON 2000) ;
— et enfin le module ISBA (Interaction between Soil Biosphère and Atmosphere (NOILHAN et PLANTON 1989) qui simule les échanges pour les surfaces naturelles et agricoles.

Le modèle SURFEX simule les flux de surface en fonction de l'occupation des sols (module TEB/ISBA/SEAFLUX ou FLAKE) et des flux radiatifs provenant du modèle Meso-NH (Fig. 6.41). Ainsi, lors de chaque pas de temps de simulation, chaque voxel au premier niveau, donc en contact avec la surface, est soumis aux champs atmosphériques suivants : la température, l'humidité spécifique, les composantes horizontales du vent, la pression, les précipitations totales, les rayonnements infrarouges et solaires direct, les rayonnements infrarouges et solaires diffus, les concentrations en espèces chimiques ou en poussière.

Le modèle SURFEX avec le modèle correspondant à l'état de surface, calcule (Fig. 6.41) :

— les flux moyens de quantité de mouvement ;
— les flux de chaleur sensible ;
— les flux de chaleur latente ;
— la température radiative de surface ;
— les albédos de surface directs ;
— les albédos de surface diffus ;
— l'émissivité de surface.

Cette information est ensuite utilisée comme condition à la limite inférieure du modèle atmosphérique.

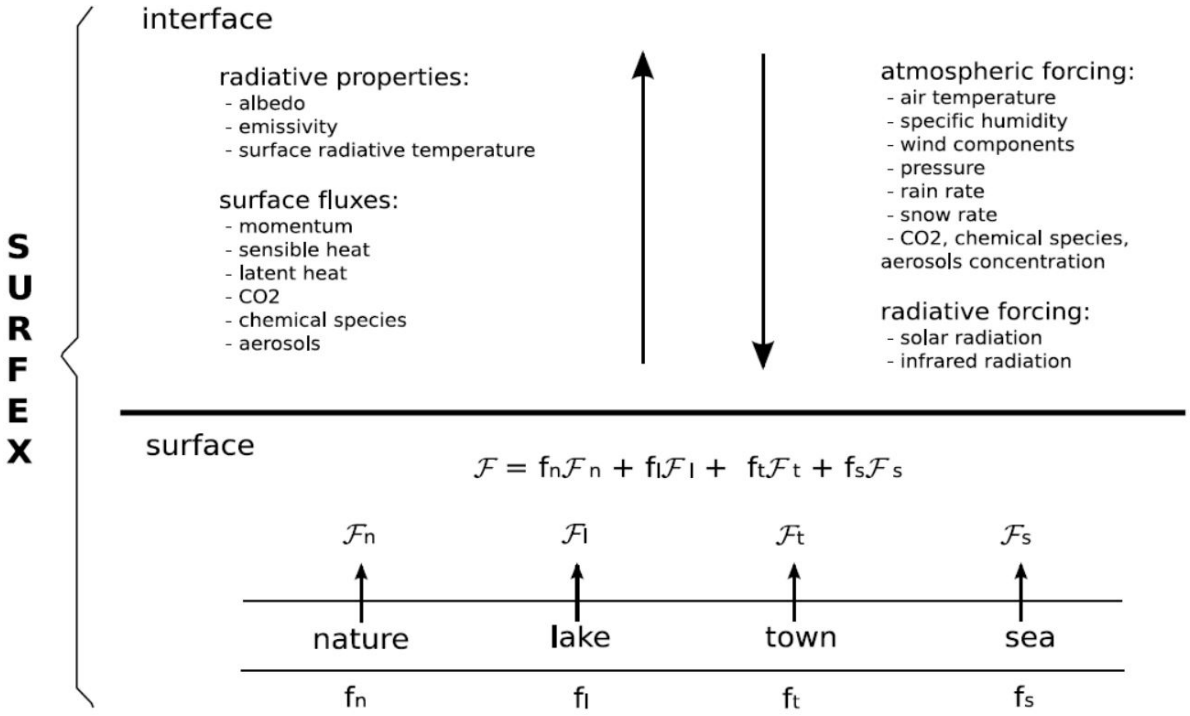


FIGURE 6.41 – Schéma du fonctionnement de SURFEX et de son interaction avec le modèle atmosphérique. Source : CNRM

Le couplage de ces modules avec SURFEX permet d'étudier plus finement les processus climatiques en milieu urbain (TEB) et leur relation avec l'ICU : la qualité de l'air (SARRAT et al. 2006), la structure verticale de la couche limite supérieure (PIGEON et al. 2007) ou encore les vents urbains (HIDALGO et al. 2008 ; HIDALGO, MASSON et GIMENO 2009).

Pour représenter l'hétérogénéité de la surface dans une maille, l'approche présentée dans la figure 6.42 est utilisée. Les surfaces sont divisées de façon homogène dans chaque point de grille. Ensuite, chaque surface reçoit les mêmes données de forçage, dans notre cas celles-ci proviennent du modèle Meso-NH. Puis chaque surface modélise ses flux propres. Enfin les flux sont agrégés au prorata de leurs fractions d'occupation de la maille et renvoyés vers l'atmo-

sphère.

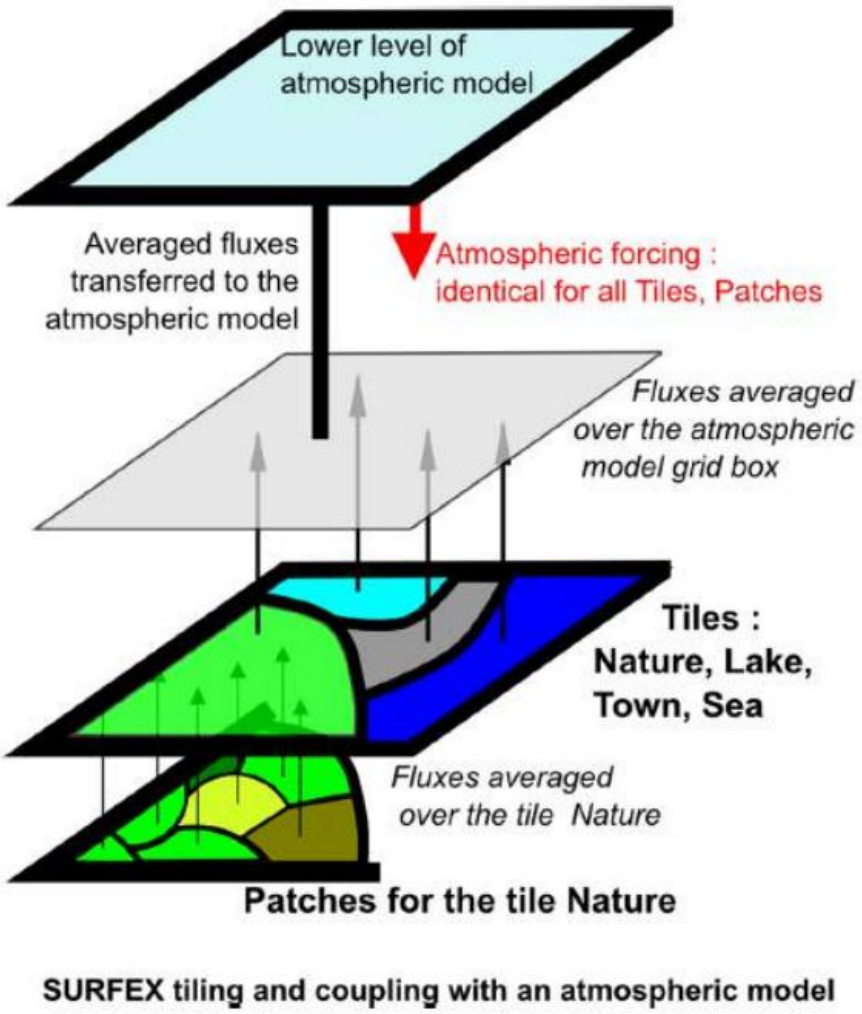


FIGURE 6.42 – Représentation schématique de SURFEX et couplage avec un modèle de climat (MASSON et al. 2013b)

6.2.2 MODÉLISATION CLIMATIQUE URBAINE ET MODÈLE TEB

D'après le CNRM, la modélisation climatique urbaine "*consiste en la modélisation du bilan d'énergie des surface urbaines et du micro-climat urbain*" à travers :

- Une meilleure compréhension des processus urbains ;
- Le couplage des paramètres des surfaces urbaines avec un modèle atmosphérique ;
- La validation des paramétrisations et du modèle.

Des schémas de surfaces sont développés pour permettre une meilleure représentation du climat urbain (COLOMBERT 2008). Masson (2006) distingue trois catégories de modèles urbains :

— Les modèles empiriques [43]. Ceux-ci s'appuient sur des observations en utilisant peu de données de forçages et d'équations complexes. Ces modèles utilisent des schémas relativement simples mais leurs problèmes résident dans le traitement statistique des surfaces (différentes occupations des sols, ...) ;
— Les modèles d'espaces végétalisés adaptés pour inclure des surfaces urbanisées [44]. Il s'agit de schémas de transfert Sol-végétation conçus initialement pour des milieux non urbanisés, qui sont adaptés à la dimension urbaine ;
— Les modèles de canopée urbaine [45] établissent le bilan énergétique de surface via trois paramètres : les bâtiments 3D, les interactions radiatives entre les murs et les routes ainsi que le bilan énergétique des toits, murs et routes. Ces modèles de canopée urbaine peuvent être divisés en deux catégories :
  — Les modèles mono couches, notamment le modèle TEB, pour lesquels les échanges de flux entre la surface et l'atmosphère ont lieu dans la partie supérieure des canyons urbains et des toits. Si cela permet de simplifier les échanges radiatifs, les caractéristiques de l'air au sein des canyons doivent être calculées et les températures sont considérées uniformes au sein du canyon.
  — Les modèles multi-couches utilisent une approche par la résistance aérodynamique, c'est-à-dire que les échanges avec l'atmosphère ont lieu au niveau du sol et à plusieurs niveaux atmosphériques en contact avec les bâtiments.

Le modèle Town Energy Balance (TEB) permet de calculer les échanges d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère (MASSON 2000 ; MASSON, GRIMMOND et OKE 2002 ; LEMONSU, GRIMMOND et MASSON 2004 ; PIGEON et al. 2008). La plupart des paramètres urbains sont simplifiés (MASSON 2006), la façon la plus simple de procéder est d'utiliser un modèle végétation-atmosphère dont les paramètres sont modifiés pour ressembler aux paramètres urbains (MASSON et al. 2013a). Ainsi, le modèle TEB ne reproduit pas exactement chaque bâtiment, mais en conserve la principale caractéristique géométrique interagissant sur les échanges énergétiques et radiatifs : une longue rue avec deux bâtiments identiques se faisant face [46]. De la même façon, pour effectuer le bilan énergétique de la ville, il n'est pas nécessaire de simuler un nombre important de rues avec des orientations différentes. À cause de la complexité des échanges énergétiques en milieu urbain, le bilan énergétique est divisé de façon à considérer trois surfaces [47] : les murs, les routes et les toits (MARTILLI, CLAPPIER et ROTACH 2002 ; MASSON 2000).

La figure 6.43 présente les cinq processus énergétiques considérés par TEB (MASSON et al. 2013b) :

— Les ondes courtes et longues sont piégées par la géométrie du canyon. Les ombres de bâtiments sont considérées dans le bilan énergétique ;

43. par exemple le modèle NARP-LUMPS de GRIMMOND et OKE 2002
44. par exemple le modèle SM2-U de l'école centrale de Nantes
45. Par exemple TEB ou UCM
46. appelée aussi la "rue canyon"
47. D'autres modèles utilisent ce type d'approximation

— Prise en compte des flux de chaleurs anthropiques (Qf) (trafic routier, climatisation, chauffage, ...) ;
— Interception de l'eau et de la neige par les toits et les routes créant des flux de chaleur latente (Qe) ;
— Flux de chaleur provenant de l'émission thermique des matériaux (Qh) et stockage de chaleur dans les bâtiments et les routes (Δ Qs) ;
— Interaction entre les surfaces du bâtiment et l'air du canyon urbain. Les flux de chaleur provenant du bâtiment son transmis au canyon.

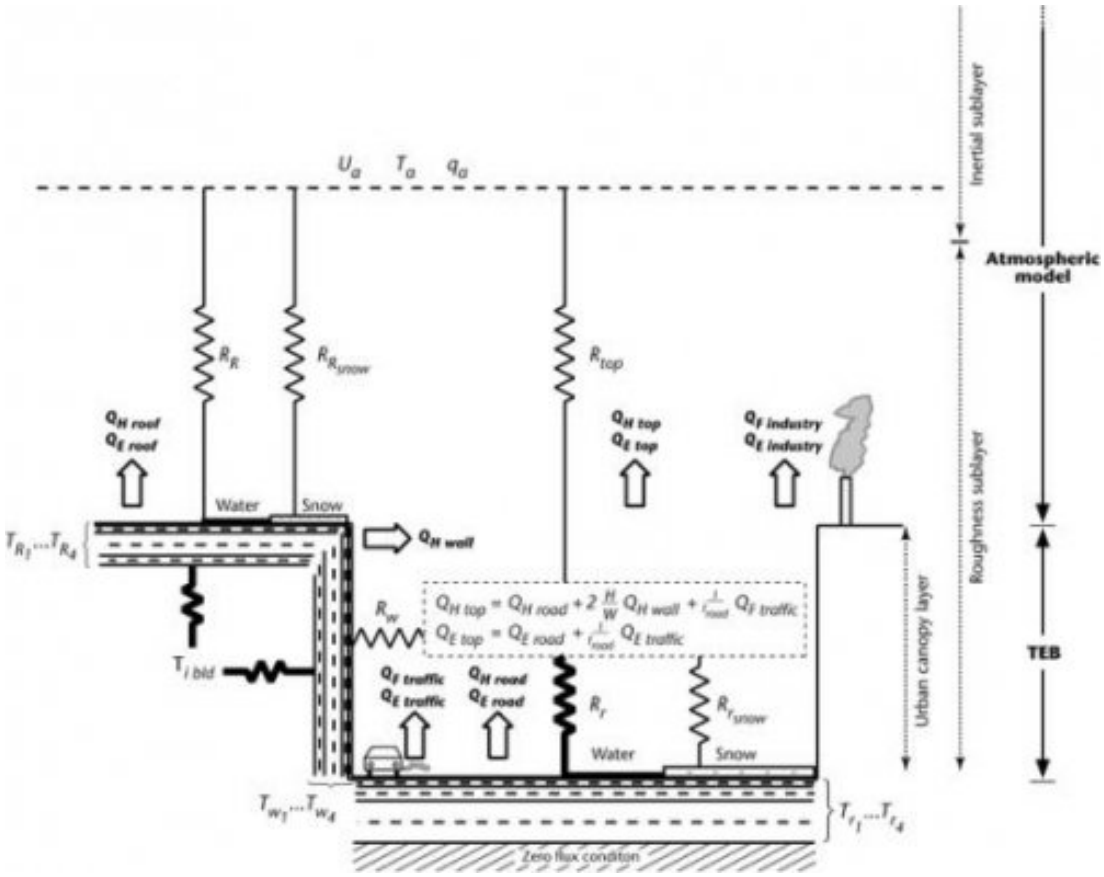


FIGURE 6.43 – Schéma représentant le bilan d'énergie intégré dans TEB (MASSON 2000)

L'occupation des sols dans chaque maille du domaine conditionne le module de SURFEX qui va être utilisé. Ainsi, si du bâti est présent dans la maille, le module TEB s'active pour calculer les flux énergétiques dans cette maille. La végétation avec le module TEB-veg est directement incluse dans la rue canyon. TEB-Veg permet de modéliser les interactions entre le bâti et la végétation. Ainsi la végétation interagit directement avec l'air du canyon (LEMONSU et al. 2012).

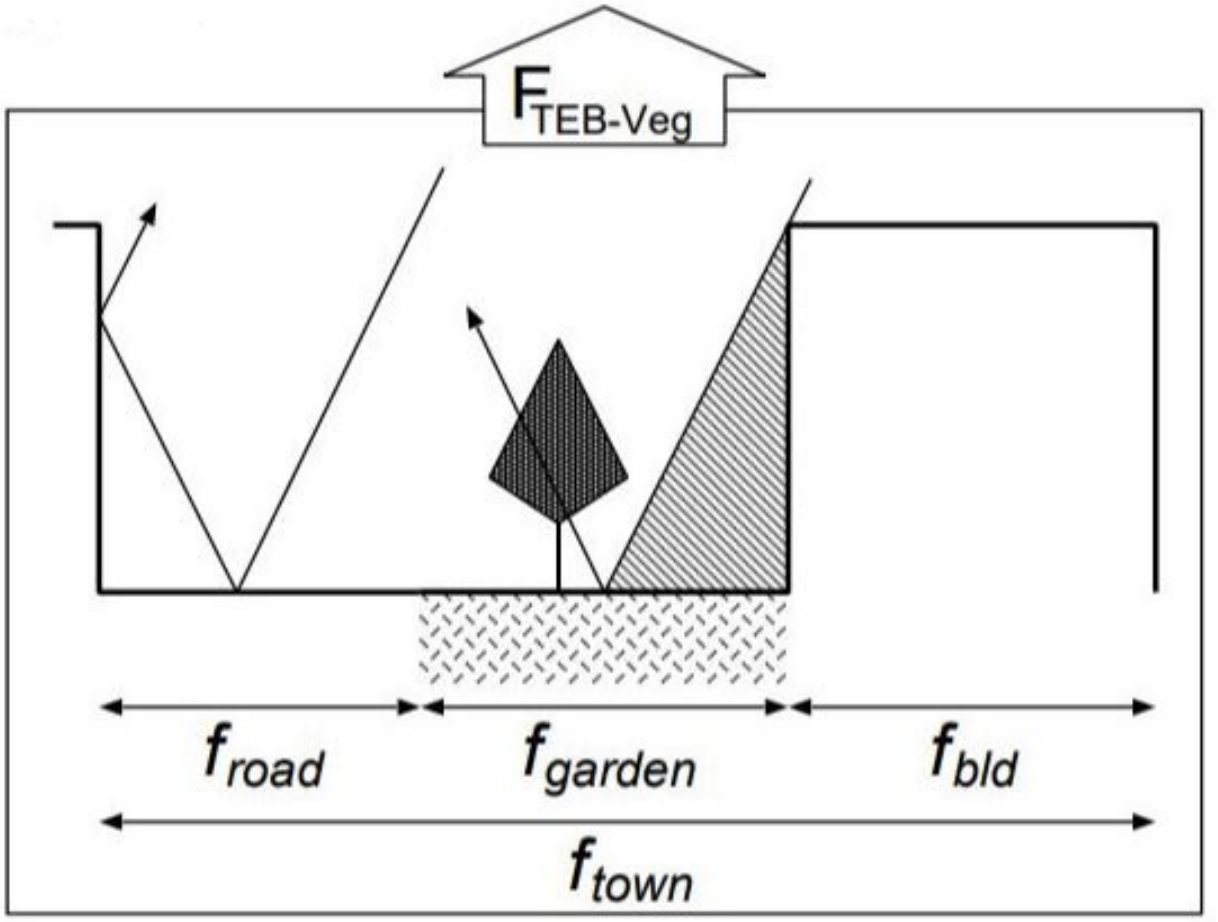


FIGURE 6.44 – Approche de TEB-VEG pour calculer les flux de surfaces dans chaque maille (LEMONSU et al. 2012)

Le modèle TEB peut être enrichi de différents modules lui permettant de simuler différents aspects du milieu urbain : les échanges de flux entre le bâtiment et le canyon urbain (TEB-BEM [48]), les toitures végétalisées (TEB-GREENROOF).

La figure 6.45 présente les données d'entrées de TEB. Si une maille est considérée comme urbaine (TOWN = 1), alors un pourcentage de bâti (BLD) et de végétation (Garden) doivent être renseignés. Le pourcentage de surface de route dans la maille est calculé en fonction du pourcentage bâti et du pourcentage de végétation, cela afin d'obtenir un pourcentage égal à 100%. Si le pourcentage de surface de bâtiment est supérieur à 0, alors la hauteur moyenne des bâtiments doit être renseignée ainsi que le ratio de surface au mur sur la surface au sol (afin d'estimer si il y a un seul grand bâtiment ou plusieurs petits bâtiments) et enfin la longueur de rugosité (Rugosité des terrains qui perturbe l'écoulement de l'air et le rend turbulent [49]). Chaque variable doit être fournie sous la forme Latitude, Longitude, Valeur. La position de la maille est

48. Il s'agit d'un modèle permettant de représenter la consommation énergétique des bâtiment, ceci à l'échelle de ville, ainsi que l'impact de ces consommations sur le micro climat urbain (chauffage et climatisation)BUENO et al. 2012

49. La longueur de rugosité est environ égale à 1/10 de la hauteur des éléments de surface

la position de son point de masse (Fig. 6.40).

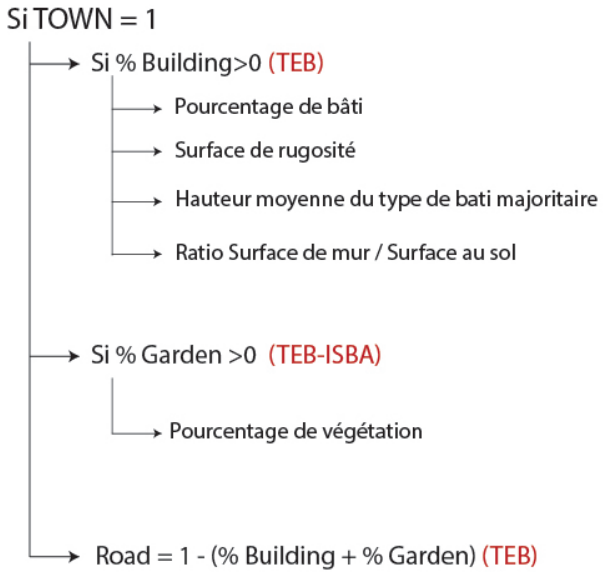


FIGURE 6.45 – Présentation des données d'entrées sélectionnées du modèle TEB. D'après MASSON 2000.

En vue d'initialiser les champs de surface, le CNRM a développé une base de données numériques mondiale des écosystèmes observés sur les surfaces continentales. Ainsi, ECOCLIMAP est une base de données mondiales qui peut être utilisée pour initialiser les schémas de transfert sol – végétation – atmosphère (SVAT) dans les modèles météorologiques et climatiques à toutes les échelles. Sa résolution spatiale est de 1km et repose essentiellement sur des observations satellitaires. Un total de deux cent quinze types d'écosystèmes est présent en Europe et le bassin méditerranéen, dont 168 en France. Ceux-ci sont obtenus en combinant des cartes d'occupation du sol et des cartes climatiques existantes.

Enfin, la modèle TEB est validé pour différentes saisons pour différentes régions du monde : Montréal (LEMONSU 2010), Afrique sahélien (OFFERLE, GRIMMOND et FORTUNIAK 2005), Bâle (HAMDI et MASSON 2008) ou encore Mexico (MASSON, GRIMMOND et OKE 2002), pour la périphérie d'Oklahoma city (LEMONSU et MASSON 2002). Et des villes françaises : Toulouse (PIGEON et al. 2008), Nantes (LEMONSU, MASSON et BERTHIER 2007) ou encore le cœur de ville historique de Marseille (LEMONSU, GRIMMOND et MASSON 2004)

6.3 SYNTHÈSE

Au cours de ce chapitre, nous avons vu que la première étape consiste à forcer le modèle atmosphérique Meso-NH, avec un modèle atmosphérique plus grossier AROME (1.3km) (Fig. 6.46. A). Cette résolution de 1.3km du modèle AROME est trop grossière pour étudier le climat urbain. Comme expliqué précédemment, le modèle Meso-NH permet d'affiner progressivement la résolution. Ainsi, notre première maille est de résolution 1.25km (Fig. 6.46. B), inférieure à la résolution du modèle forceur AROME. Les conditions de surfaces sont calculées grâce au modèle SURFEX et au modèle TEB ou ISBA suivant l'occupation des sols (Fig. 6.46. B.1). La base d'occupation des sols est fournie par ECOCLIMAP (Fig. 6.46. B.2). Le second domaine est de résolution 450m (Fig. 6.46. C). Là encore, les conditions de surface sont calculées grâce au modèle SURFEX et aux modèles TEB ou ISBA suivant l'occupation des sols (Fig. 6.46. C.1). La base d'occupation des sols est fournie par ECOCLIMAP (Fig. 6.46. C.2). Le troisième domaine est de résolution 150m (Fig. 6.46.D) et permettra d'analyser le climat urbain sur Dijon Métropole. Les conditions de surface sont calculées grâce au modèle SURFEX et aux modèles TEB ou ISBA suivant l'occupation des sols (Fig. 6.46. D.1). La base de données d'entrées du modèle TEB (Fig. 6.46. D.2) est MApUCE (Fig. 6.46. D.2.1), car cette base de données peut être modifiée aisément à travers différents scénarios de croissance urbaine, contrairement à la base de données ECOCLIMAP. Cela permet de modifier cette base de données pour y intégrer des scénarios de croissance urbaine. La base de données d'entrées du milieu végétal hors surface urbanisée est ECOCLIMAP (Fig. 6.46. D.3.1).

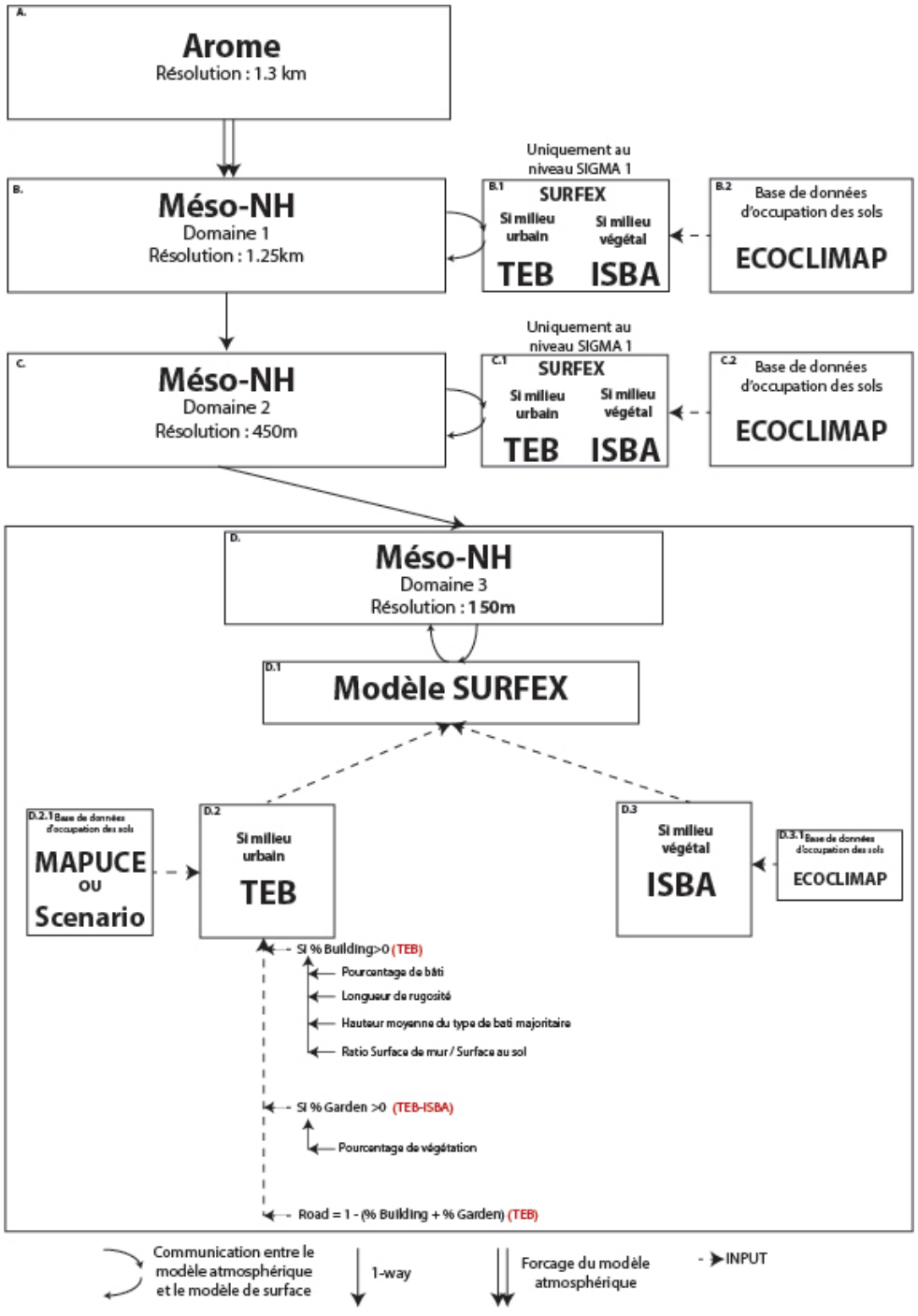


FIGURE 6.46 – Synthèse des étapes de simulations et de l'intégration des scénarios de croissance urbaine

CHAPITRE VII : QUEL MODÈLE DE CROISSANCE URBAINE POUR ÊTRE INTÉGRÉ DANS UN MODÈLE DE CLIMAT ?

En géographie, l'utilisation de modèles tient une place importante notamment dans l'étude des systèmes urbains (SANDERS 2001 ; SANDERS 2013 ; MATHIAN et SANDERS 2014). Antoni (et al., 2011) expliquent "*qu'en urbanisme, en aménagement ou en transport, la modélisation consiste en effet souvent à simplifier la réalité du monde, de manière à mieux comprendre comment les décisions et les événements qui interagissent les uns avec les autres. Elle permet alors également de les reproduire ou de les modifier in vitro, afin de tester des solutions qui permettraient d'influencer ou d'orienter leurs conséquences, de décider à l'avance des politiques et des stratégies qui peuvent conduire à un futur souhaitable*" (ANTONI et al. 2011). Depuis une vingtaine d'année, deux grandes approchent tendent à s'imposer dans le domaine de la microsimulation des dynamiques urbaines : les systèmes multi-agents (SMA) et les automates cellulaires (AC). Ceux-ci diffèrent selon qu'ils développent une approche exclusivement spatiale ou qu'ils essaient de traduire certaines interactions entre l'usage et l'occupation du sol. Cette division des approches nous amène à préciser le modèle de croissance urbaine *ad hoc* pour alimenter le modèle de climat. *Ainsi, quel modèle choisir pour simuler la croissance urbaine et l'intégrer dans un modèle de climat ?* Pour répondre à cette question et sélectionner un modèle de croissance urbaine, il est nécessaire de présenter les méthodes de modélisation SMA et d'AC. Puis un focus est réalisé sur la sélection du logiciel de croissance urbaine MUP-City pour la suite de cette étude.

7.1 SYSTÈME MULTI-AGENTS OU AUTOMATES CELLULAIRES : QUELLE APPROCHE POUR SIMULER LA CROISSANCE URBAINE ?

L'objectif du chapitre est double. Il est question ici de reproduire, à l'aide d'un outil informa-

tique, Dijon Métropole et de simuler sa croissance à l'horizon 2050. Cela, tout en modélisant la croissance urbaine en conformité avec les besoins du modèle de climat Méso-NH. La croissance urbaine de Dijon Métropole répond à des normes (TOD, ...) qui ont été mises en avant dans la partie précédente [50]. Pour simuler cette croissance du système complexe qu'est l'urbain, il est nécessaire de se tourner vers un concept propre à la simulation géographique. La géosimulation, définie par Léna Sanders (2005) comme"*un ensemble de concepts, méthodes, et techniques, qui combinent les apports de l'intelligence artificielle et des sciences de l'information géographique, pour simuler la dynamique de systèmes spatiaux*", nous donne des clés de compréhension afin d'explorer le fonctionnement de systèmes spatiaux exprimant de façon réaliste les situations simulées (SANDERS 2005 ; WEISBUCH 1989). La géosimulation, comme l'explique Daudé (2004), *postule que la répétition de processus plus ou moins élaborés au niveau individuel a une incidence sur le devenir de la diffusion à un niveau global* DAUDÉ 2004. Autrement dit, à partir des échelles les plus fines du système étudié, il s'agit d'identifier, d'analyser et de comprendre des processus à l'échelle globale (DAUDÉ 2004). Ainsi, par sa définition même, la géosimulation compte de nombreux champs disciplinaires, par exemple les mobilités quotidiennes (BANOS et al. 2010) ou résidentielles (BADARIOTTI et WEBER 2002 ; HIRTZEL 2015), l'occupation du sol (ANTONI 2006), l'extension urbaine (BATTY 2007), les relations inter-urbaines (PUMAIN 2014.b). Du point de vue opérationnel, deux approches de géosimulation sont mises en avant : la simulation multi-agents (SMA) et les Automates Cellulaires (AC) BENENSON 2004 ; BATTY 2007. Ces deux approches se définissent comme des modèles objet-centrés et reposent sur trois caractéristiques. Les modèles de géosimulation diffèrent dans leur représentation des entités simulées. En effet, les approches traditionnelles, telles que celles généralement utilisées pour l'occupation des sols ou les transports grandes échelles, représentent souvent l'espace urbain de manière agrégée où les unités spatiales sont décrites à des résolutions grossières comme des objets modifiables qui peuvent être réunies en unités plus grandes ou divisées en un nombre quelconque de plus petites (BENENSON 2004). La représentation du comportement des objets est une autre caractéristique des modèles de géosimulation. Ceux-ci se concentrent sur les résultats collectifs du comportement interactif des objets simulés. Enfin, les modèles de géosimulation sont basés sur des unités de temps correspondant aux temporalités propres des objets en interaction. Benensen et Torrens (2004) parlent d'une "horloge interne "("internal clocks") propre à chaque objet qui permet des évolutions temporelles basées sur des événements plutôt que sur le temps (BENENSON 2004).

Les deux approches sont illustrées dans la figure 7.47 ci-dessous. Un système multi-agent (SMA) est un système composé d'entités informatiques nommées "agents". Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et d'interagir avec et sur son environnement ou avec d'autres agents (BURA et al. 1996 ; AMBLARD et PHAN 2006 ; BATTY 2007). Le comportement d'un agent est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents. Ce type de relations entre plusieurs agents forme ce qu'on appelle des SMA. Ces multiples agents évoluent et interagissent dans un environnement commun. La notion d'interaction entre agents est essentielle car chacun d'eux est impliqué dans une dynamique commune, au lieu d'évoluer parallèlement et indépendamment des autres.

50. Parite II, Chapitre IV

L'autre approche de la croissance urbaine repose sur les automates cellulaires (AC) (Fig. 7.47). Cette approche est l'une des plus utilisées dans la littérature (LANGLOIS et PHIPPS 1997 ; DELORME 1998 ; DUBOS-PAILLARD, GUERMOND et LANGLOIS 2003 ; MORENO, BADARIOTTI et BANOS 2012). Il s'agit d'un objet mathématique évoluant par étapes selon des règles. Il est constitué d'une grille dont les cases sont appelées « cellules », pouvant prendre plusieurs états, le plus souvent deux, "mort" ou "vivant", cet état étant dépendant de celui des cellules adjacentes. Ces règles de transition doivent être paramétrées au préalable de la simulation et dans le cas d'une simulation de croissance urbaine, une étude diachronique de l'urbain est nécessaire afin de déterminer les facteurs majeurs de l'extension urbaine (par exemple, le long des axes de communication, en saute-mouton, à proximité des zones existantes, ...).

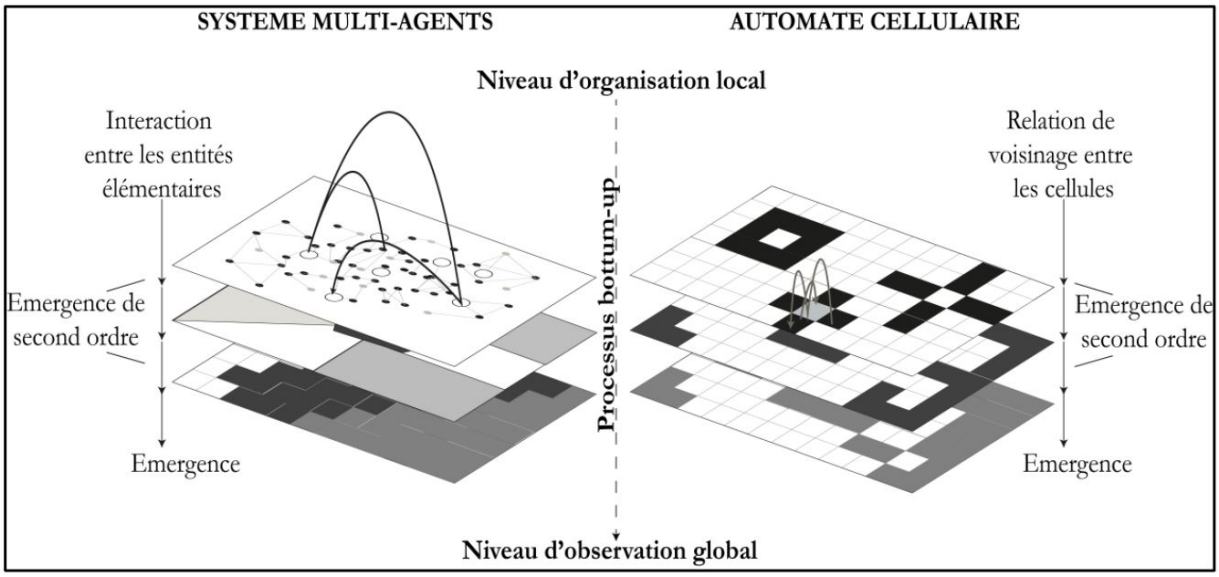


FIGURE 7.47 – Processus d'organisation et d'observation de deux approches de géosimulation : le système multi-agents(à droite) et l'automate cellulaire (à gauche). D'après EMERY 2015

Même si les automates cellulaires et les systèmes multi-agents présentent de nombreuses similitudes, des différences existent néanmoins, et celles-ci expliquent qu'une approche sera privilégiée à l'autre selon l'étude à mener. Comme expliqué, l'automate cellulaire représente l'espace et le temps selon une grille régulière de cellules. L'évolution de ces dernières est établie en fonction des caractéristiques des cellules voisines et en respectant des règles de transition. Au contraire, dans les SMA, les objets peuvent entretenir des relations avec toutes les entités de l'espace étudié. Les SMA se révèlent idéaux pour représenter des problèmes possédant de multiples méthodes de résolution, particulièrement la représentation des dynamiques spatio-temporelles d'objets (par exemple les mobilités urbaines) (DAUDÉ 2005 ; AMBLARD et PHAN 2006 ; BANOS 2013).

Pour notre étude, les données d'entrées nécessaires au modèle de climat (Méso-NH) reposent sur un maillage. Le choix du modèle de croissance urbaine s'oriente de lui-même, non pas sur un modèle de croissance urbaine qui repose sur des interactions entre des agents (SMA), mais sur un modèle de croissance qui repose sur des relations de voisinage entre des cellules.

7.2 LE MODÈLE SLEUTH : UN SYSTÈME D'AUTOMATE CELLULAIRE ADÉQUAT POUR L'APPROCHE "MODÈLE-DÉPENDANTE" ?

SLEUTH est un modèle d'automate cellulaire développé dans le but de modéliser la croissance urbaine (CLARKE et GAYDOS 1998). Celui-ci a été utilisé par Masson (et al., 2014) pour simuler la croissance urbaine de la ville de Toulouse et en étudier le climat. L'acronyme du modèle SLEUTH (Slope, Land Cover, Excluded, Urban, Transportation, Hillshade) [51] correspond aux données d'entrées qui sont nécessaires à son exécution : les pentes, l'occupation du sol, les zones à exclure de l'urbanisation, les zones urbanisées, le réseau de transport et l'ombrage. Aguejdad et al (2016) expliquent que la popularité de SLEUTH, comparée aux modèles urbains d'automate cellulaire conventionnels, tient en partie par la simplicité et la disponibilité de ses variables d'entrées (CANDAU 2002 ; JANTZ, GOETZ et SHELLE 2003 ; GOLDSETIN, DIETZEL et CLARKE 2005 ; JANTZ et GOETZ 2005 ; DIETZEL et CLARKE 2007 ; CLARKE 2008 ; TRIANTAKONSTANTIS et MOUNTRAKIS 2012 ; AGUEJDAD et al. 2016 ; DOUKARI, AGUEJDAD et HOUET 2016). La prise en compte du temps se fait par l'intermédiaire de processus de changement et d'évolution d'état des cellules (BATTY 2007). Ce processus constitue aussi une des limites des automates cellulaires en ne pouvant intégrer des objets mobiles (KRAJZWICZ, HERTKORN et ROSSEL 2002). Pour notre étude, l'inconvénient majeur du modèle SLEUTH est le nombre limité de scénarios qui peuvent être élaborés du fait que SLEUTH est calibré sur des données historiques afin de reproduire les patrons spatiaux de croissance urbaine passée, limitant les créations *ex nihilo* (JANTZ et GOETZ 2005 ; SYNNEFA et al. 2010 ; AGUILERA, VALENZUELA et BOTEQUILHA-LEITÃO 2011 ; MITSOVA, SHUSTER et WANG 2011).

Doukari (et al., 2016) expliquent que " *le modélisateur est souvent confronté aux limites des outils de simulation existants qui, calibrés à partir de données passées, sont particulièrement non adaptés à la spatialisation de scénarios prospectifs en rupture avec les tendances passées"* (DOUKARI, AGUEJDAD et HOUET 2016) C'est en réponse à la limite du modèle SLEUTH de ne pas pouvoir créer de rupture avec les tendances passées que le modèle de simulation spatiale SLEUTH* est avancé. Celui-ci est dédié à la projection de scénarios contrastés et prédéfinis d'expansion urbaine. SLEUTH* constitue une version "scénario-dépendante" issue de la modification du modèle SLEUTH par une "*maîtrise de la quantité de changement de manière exogène au modèle et indépendante des tendances passées, une maîtrise des formes urbaines en offrant à l'utilisateur la possibilité de spécifier les pourcentages contributifs de chacune des formes d'urbanisation adaptées à chaque scénario et l'intégration d'un facteur additionnel de localisation des changements, en l'occurrence l'attractivité du territoire ou le prix des loyers*" (DOUKARI, AGUEJDAD et HOUET 2016).

Ainsi, dans le cadre de scénarios sans rupture avec les tendances passées et réalistes, tels que ceux élaborés dans les SCoT, l'utilisation du modèle SLEUTH est pertinente et robuste. Le modèle SLEUTH* adopte une approche "scénario-dépendante" ce qui est contradictoire avec notre approche qui se veut "modèle-dépendante".

51. Pente, Type de sol, Zones inconstructibles, zone urbaine, Transport et Ombrage

7.3 MUP-CITY : UN MODÈLE DE CROISSANCE URBAINE ADÉQUAT POUR ÊTRE INTÉGRÉ DANS UN MODÈLE DE CLIMAT

Le modèle de croissance urbaine se veut simple, généralisable, reproductible et qui soit intégrable dans le modèle de climat urbain Meso-NH. L'échelle spatiale est aussi à considérer dans le choix d'un modèle de croissance urbaine. En effet, celui-ci doit simuler la croissance urbaine à l'échelle de la maille de taille définie et non pas à la parcelle cadastrale. Le modèle MUP-City est privilégié au modèle SLEUTH car, d'une part, celui-ci ne peut pas simuler des scénarios de rupture urbaines. D'autre part, MUP-City a été conçu pour reproduire des modèles de croissance urbaine fondés sur le concept TOD. Cette hypothèse d'urbanisation guidée par les axes de communication est centrale dans ce travail.

Le logiciel MUP-City répond à l'ensemble de ces critères. Celui-ci est utilisé dans sa version 1.2.2 (TANNIER 2017). Il s'agit d'une application informatique en libre accès dédiée à l'identification de lieux où une urbanisation est possible pour des villes de 100 000 à 1 000 000 d'habitants à partir du tissu urbain existant (FRANKHAUSER et al. 2010 ; TANNIER et al. 2010 ; FRANKHAUSER et al. 2010 ; TANNIER et al. 2010 ; TANNIER et al. 2012). Le principe de modélisation est celui de l'application d'une règle d'urbanisation sur la base d'une représentation spatiale cellulaire multi-échelle. Le logiciel possède des caractéristiques communes avec les automates cellulaires. Il s'agit d'un maillage au sein duquel les cellules peuvent être dans deux états : bâties ou non bâties ("vivante" ou "morte"). Le changement d'état s'opère en fonction de l'état de la cellule en question mais aussi en fonction de l'état des cellules voisines. Pour identifier les emplacements des futures zones urbanisées, le logiciel procède à une décomposition multi-échelle de la zone urbaine considérée à partir d'une grille de décomposition initiale (COLOMB 2017) (Fig.7.48. A et B). Des règles d'aménagements ainsi que les zones inconstructibles sont présentes dans chaque mailles issues de la décomposition (distance au réseau de communication, distance aux arrêts de transports en communs, ...) (Fig.7.48. C). Ces règles sont définies par l'utilisateur en fonction des objectifs de son étude. Le résultat d'une simulation se présente sous la forme de cartes de la région urbaine composées de cellules à urbaniser carrées de taille précédemment définie. Chaque cellule est caractérisée par son intérêt à être urbanisée, celui-ci varie entre 0 (intérêt nul) et 1 (intérêt maximal) (COLOMB 2017, Fig.7.48. D).

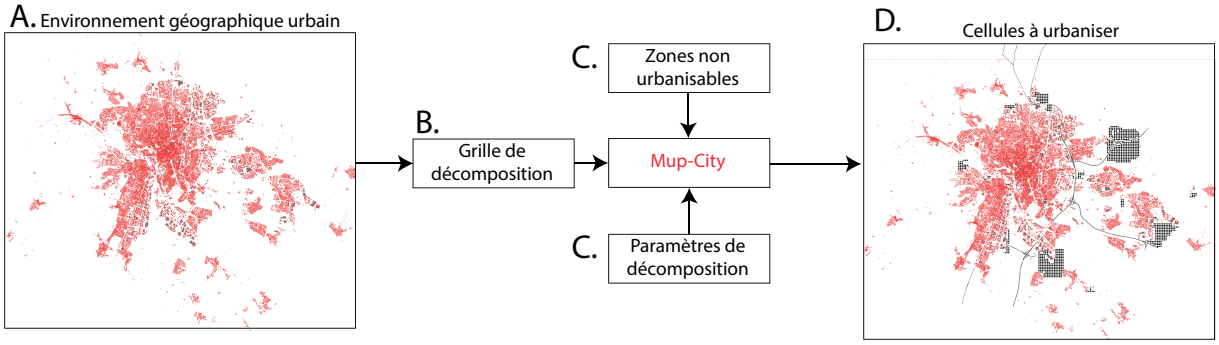


FIGURE 7.48 – Schéma descriptif de MUP-City avec un exemple de résultat de simulation superposé à une photographie (COLOMB 2017)

Si pour ce travail, l'échelle de développement est la ville dans sa totalité, les aménageurs peuvent avec

MUP-City, se concentrer sur un quartier. Dans le cas d'une simulation, le processus est mono-échelle, l'utilisateur décide de la taille de la cellule ainsi que du nombre de cellules à urbaniser (TANNIER 2017). Les données d'entrées du logiciel peuvent être mobilisées, sans traitement, par les agglomérations. La localisation des bâtiments existants est présente dans le cadastre (Fig. 7.49). Les réseaux de transports principaux peuvent être mobilisés par les décideurs et sont disponibles sur la BD-Topo de l'IGN(Fig. 7.49). Pour cette étude, les zones inconstructibles (Fig. 7.49) regroupent les zones anthropisées déjà existantes (les bâtiments, les parcs urbains, les carrières, les axes de communications majeurs et les cimetières) ainsi que les zones viticoles, les lacs, les carrières et canaux. La croissance urbaine est simulée avec le changement d'état des cellules qui peuvent, suivant les différentes contraintes, devenir "bâties".

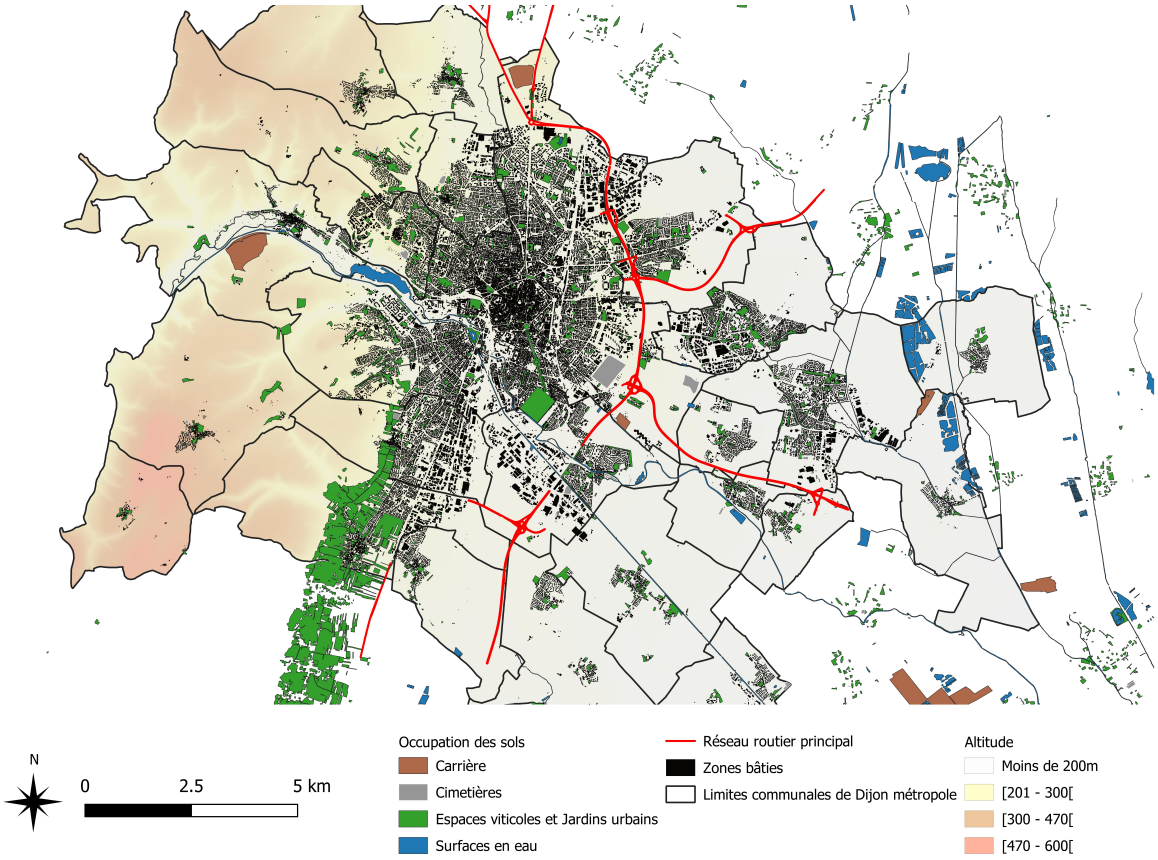


FIGURE 7.49 – Données d'entrées nécessaires au modèle de croissance urbaine MUP-City

7.4 SYNTHÈSE

Au cours de ce chapitre nous avons vu qu'il était indispensable d'utiliser des modèles pour étudier l'évolution du climat urbain sous divers scénarios de croissance urbaine. Il est à noter que la complexité des systèmes urbains est un frein à la mise en place d'une méthode. La complexité des modèles (SMA, Automate cellulaire), tant dans leur paramétrisation que dans l'analyse de leurs résultats, est un frein important à la mise en place d'une démarche généralisable et accessible. Peu de travaux utilisent les SMA pour l'étude du climat urbain, encore moins dans l'étude des ICU. À titre d'exemple, les récents travaux de Xu (et al., 2019) ont expérimentés les SMA pour étudier le climat urbain (XU, TONG et XU 2019). Leurs résultats montrent que les SMA peuvent être utiles pour évaluer le comportement des personnes dans les espaces publics en fonction des différents climats pour, à termes, suggérer des emplacements de sièges ou aménager des îlots de fraîcheur. Le tableau 7.5 présente les principales caractéristiques modèles SLEUTh et Mup-City. Dans le cadre de simulation des scénarios du SCoT, le modèle SLEUTH est à privilégier. Il est pertinent pour établir des scénarios sans rupture avec les tendances passées et réalistes. Cependant, le modèle de croissance urbaine MUP-City lui a été préféré car, d'une part, il peut simuler des scénarios qui ne sont pas "trajectoire dépendant" et d'autre part, les bases de données requises sont mobilisables par les acteurs territoriaux (Cadastre, Base d'occupation des sols et zones inconstructibles). Enfin, les fichiers de sorties sont spatialisés et de nouvelles valeurs d'occupations des sols peuvent être ajoutées par la suite. Actuellement, il n'existe pas de modèle de croissance ou de requalification urbaine intégrant les LCZs. Modéliser la croissance urbaine sur la base des LCZs peut être un premier pas afin d'étudier croissance et climat urbain. Enfin, pour la mise en place de politique "éclairée", telles que les scénarios présents dans le SCoT, une calibration des modèles de croissance urbaine sur les tendances urbaines passées est nécessaire.

	SLEUTH	Mup-City
Type de modèle	Simulation des changements d'occupation et d'usage des sols	Potentiel d'urbanisation
Modèle spatialement explicite	Oui	Oui
Modèle dynamique	Oui	Oui
Processus économiques	Non	Non
Dépendance des données passées	Oui	Non
Nombre limité de variables d'entrées	Oui : 6 facteurs	Oui : 3 facteurs
Pente	Oui	Non
Occupation du sol	Oui	Non
Zones protégées	Oui	Oui
Zones urbanisées	Oui	Oui
Réseau routier	Oui	Oui
Ombrage	Oui	Non

TABLE 7.5 – Synthèse des principales approches et caractéristiques des modèles SLEUTH et Mup-City. D'après AGUEJDAD et al. 2016

SYNTHÈSE PARTIE III : UNE APPROCHE KIDS TO KISS POUR ÉTUDIER LE CLIMAT URBAIN

Pour conclure, au cours de cette partie, la "modélisation" et la "simulation" informatique de croissance et du climat urbain sont des outils indispensables à l'étude du climat urbain, tant pour la transmission des connaissances que pour l'étude des relations entre deux systèmes complexes : le milieu urbain et le climat. L'approche de Masson (et al., 2014), dite "scénario-dépendante", s'affranchit des données disponibles et adapte les modèles de simulations *a posteriori* nécessitant du temps ainsi que des compétences qui ne sont pas mobilisables par des aménageurs. L'approche proposée consiste à établir les données d'entrées des modèles *a priori*, puis à construire les scénarios qui seront ensuite quantifiés à l'aide la variable clé : le nombre de logements. Le modèle Arome, de résolution 1.3km est utilisé pour forcer aux bornes, toutes les trois heures, le modèle Meso-NH. Afin d'étudier le climat urbain, une descente d'échelle doit être effectuée. Ainsi, trois domaines sont utilisés, le premier d'une résolution de 1.25km, le second de 450m et le troisième domaine d'une résolution de 150m. C'est au sein de ce troisième domaine que la base de données MApUCE (de 100 mètres de résolution) est modifiée en fonction des scénarios de croissance urbaine. Les modèles atmosphériques AROME et Meso-NH doivent, pour simuler la surface, être couplés à des modèles de climat de surface. Dans notre étude, il s'agit du modèle SURFEX. Ce modèle SURFEX, en fonction de l'occupation des sols dans la grille de surface, fait appel à d'autres modèles pour gérer ce type de surface (TEB pour le milieu urbain, ISBA pour la végétation en dehors du milieu urbain). La littérature scientifique montre que le critère principal retenu pour sélectionner un modèle de croissance urbaine et l'intégrer dans un modèle de climat est sa capacité à simuler des structures urbaines à très long terme pour différents scénarios, apportant chacun un changement significatif de l'environnement urbain. Le modèle de croissance urbaine MUP-City est sélectionné afin de spatialiser les scénarios de croissance.

Un parallèle peut être effectué entre deux approches de modélisations avancées par la communauté de SMA. Arnaud Banos et Lena Sanders (2012) proposent une grille de lecture pour comparer et replacer les différents modèles utilisés par les géographes BANOS et SANDERS 2012.

— Le premier axe illustre le niveau d'abstraction (stylisé-particulier), qui oppose "*d'un côté les mo-*

*dèles reposant sur des informations complètes et fines au niveau spatial ["scénario-dépendant"], de l'autre les modèles dits "concepts driven" ["modèle-dépendante"], en général plus parcimonieux sur le plan des variables mobilisées"*BANOS et SANDERS 2012.

— Le second axe illustre le degré de parcimonie avec lequel le modèle est mis en place. La modélisation dite KISS (Keep It Simple Stupid) a pour objectif de présenter une vision simple et parcimonieuse d'un système à étudier, tandis que la modélisation dite KIDS (Keep It Descriptive Stupid) vise à apporter une vision descriptive et complexe d'un système à étudier (EDMONDS et MOSS 2004 ; BANOS et SANDERS 2012 ; BANOS 2013 ; DELAY 2015).

L'approche KISS/KIDS nous permet de conceptualiser notre méthode. L'étude des données d'entrées Meso-NH et MUP-City nous positionne dans le cadran C (Fig. 7.50. C). Puis, la création d'une variable clé du nombre de logements à travers l'étude du SCoT, des LCZs et d'une étude synchronique et diachronique de la croissance urbaine de Dijon Métropole nous entraînent vers le cadran B (Fig. 7.50. B). De ce nombre de logements invariant calculé de manière réaliste, des scénarios de croissance urbaine peuvent être construits suivant différentes perspectives (Fig. 7.50. A) en fonction des éléments mis en avant dans les cadrans B et C. Enfin, la simplification des scénarios à travers les LCZs, permet à ceux-ci d'être intégrés dans un modèle de simulation (Fig. 7.50. D). Si on applique l'approche KISS/KIDS à l'approche "scénario-dépendante' : il s'agit, dans un premier temps, d'élaborer des scénarios prospectifs, qui peuvent être inscrits dans le SCoT (scénarios tendanciels), avec des décideurs et des aménageurs (7.50. B). Des scénarios de ruptures et non tendanciels peuvent aussi être établis afin d'élargir la gamme des futurs (7.50. A). Enfin, il est nécessaire de sélectionner le modèle (climatique et/ou urbain) approprié, de le modifier en fonction des scénarios, et si nécessaire, de développer un modèle afin de répondre aux exigences de la thématique étudiée (7.50. C.h).

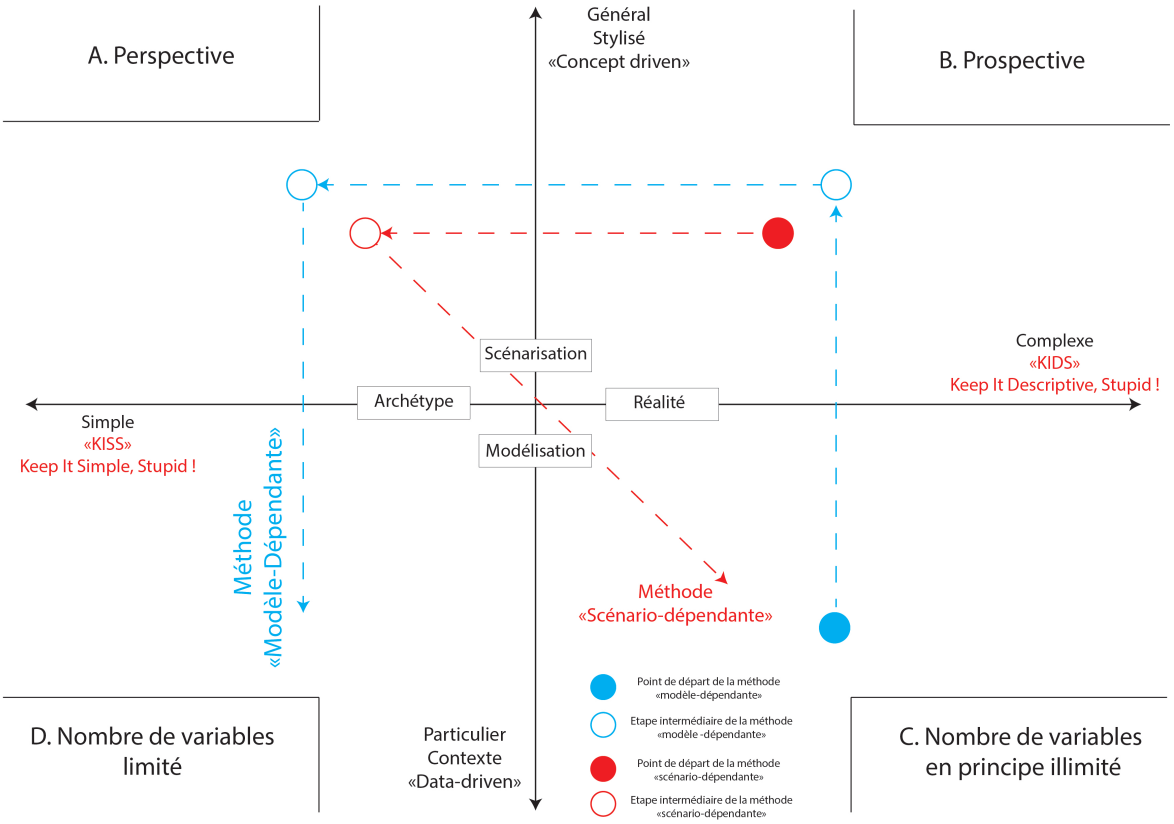


FIGURE 7.50 – Conceptualisation de la méthode “modèle-dépendante” à travers l’approche KIDS/KISS. D’après BANOS et SANDERS 2012

Partie IV

Climat urbain et croissance urbaine : vers un urbanisme prospectif

Cette partie est celle présentant et analysant les principaux résultats de ce travail à travers la mise en place de la chaîne de modélisation présentée lors de la partie précédente. Nous disposons de deux modèles, l'un de croissance urbaine (MUP-City) l'autre de climat urbain (Meso-NH/TEB), dont nous connaissons les données d'entrées ainsi que d'une méthode permettant à ceux-ci d'interagir. Il s'agit maintenant d'appliquer cette méthode "modèle-dépendante" et de répondre à la question centrale de ce travail, à savoir *dans quelle mesure les scénarios de croissance urbaine, associés à différentes formes urbaines, influencent-ils le climat urbain ?* Au cours du chapitre VIII, il s'agit d'étudier comment quantifier et spatialiser des scénarios en vue d'être insérés dans les modèles MUP-City et Meso-NH. Le premier objectif vise à élaborer un scénario tendanciel fondé principalement sur un nombre de logements à construire. Cette première étape est ensuite complétée par des scénarios d'anticipation contrastés afin d'esquisser des situations futures (JULIEN, LAMONDE et LATOUCHE 1975). Une LCZ spécifique est attribuée à chaque scénario de croissance urbaine. Le chapitre IX présente les différentes étapes de lancement des simulations climatiques du modèle atmosphérique Meso-NH. La caractérisation des biais de la simulation de contrôle est présentée avec l'étude des températures à 2m et potentielles au sein des domaines 2 et 3 et leur confrontation aux données d'observation. Enfin, ce chapitre expose les résultats des simulations climatiques en réponse aux différents scénarios de croissance urbaine.

CHAPITRE VIII : PENSER LA CROISSANCE URBAINE À TRAVERS LES LCZS

Van Vliet (et al., 2010) expliquent parfaitement les difficultés à concilier modélisation et scénarisation "*is still uneasy and remains a great challenge due to the different philosophies and assumptions underlying them*" (VLIET, KOK et VELDKAMP 2010). À la complexité intrinsèque des modèles (climatique et urbain) s'ajoute la complexité de construire des scénarios cohérents qui puissent s'intégrer dans ces modèles. L'objectif de ce chapitre est de présenter une méthode généralisable de calcul du besoin en logements à l'horizon 2050 pour Dijon Métropole. *Dans cette perspective, comment insérer des scénarios de croissance urbaine à travers la méthode de scénarios composés (tendanciel et d'anticipation) en respectant la méthodologie des LCZs ?* Trois étapes successives sont nécessaires pour intégrer des scénarios de croissance urbaine reposant sur les LCZs. Pour ce faire, il s'agit de calculer le nombre de logements nécessaires à l'évolution démographique ainsi qu'à l'évolution de la société (Point mort). Ce nombre de logements est invariant entre chaque scénario. À partir de ce nombre invariant de logements établi, différents scénarios d'évolution sont construits pour chaque LCZ. Puis, la paramétrisation du modèle MUP-City avec l'intégration des différents scénarios est présentée. La présentation des résultats des simulations de croissance urbaines clôtureront ce chapitre.

8.1 MÉTHODOLOGIE POUR LA CONSTRUCTION DE SCÉNARIOS DE CROISSANCE URBAINE

Comme nous l'avons vu dans le chapitre V, les études mêlant climatologie urbaine et urbanisation nécessitent d'impacter significativement la ville pour percevoir des variations climatiques urbaines. Une approche scénaristique offre la possibilité d'identifier des leviers d'actions pour lutter contre l'ICU afin d'atténuer et de s'adapter aux changements climatiques, sous un jeu d'hypothèse contrôlé, maîtrisé et connu. À la vue de la complexité des relations entre le milieu urbain et son climat [52], une approche scéna-

52. Cf. Chapitre II et III

ristique, même partielle du système, permettrait aux décideurs de mieux penser leurs actions. Pour rappel, il s'agit ici de fournir, non pas des conseils à appliquer systématiquement, mais des pistes de réflexions. L'objectif *in fine* viserait à sensibiliser les acteurs et décideurs aux répercussions de leurs actions à moyen et long terme.

Une démarche de scénarisation résulte le plus souvent d'une volonté d'anticipation (scénario exploratoire) afin de nourrir une réflexion à caractère politique ou stratégique (scénario normative ou stratégique). Il est nécessaire de présenter deux limites de la scénarisation prospective :

— Le futur est indéterminé et indéterminable : il n'existe que des potentialités de devenir. Ainsi la prospective présente l'ensemble des futurs possibles (les futuribles). Cela, d'une part en évitant de considérer uniquement ce qui est en ligne directe avec la représentation que nous nous faisons des dynamiques en cours, et d'autre part, en considérant que tout est possible sans prendre en compte les dynamiques en cours et les contraintes qu'elles supposent pour demain. Ainsi, la prospective s'attache à décrire les futurs possibles sans préjuger de ceux qui sont souhaitables (le souhaitable pouvant différer selon les individus et les organisations).

— Même si le futur est indéterminé et indéterminable, celui-ci reste le fruit d'actions entreprises par différents acteurs. Toute prospective doit prendre en compte les interactions de la nécessité, du hasard, et des actions humaines. Les actions que nous entreprenons aujourd'hui contribuent à construire le futur.

La figure 8.51 nous montre la méthodologie globale pour la construction des scénarios urbains puis leur spatialisation à travers la géoprospective. La géorprospective pose le territoire non pas comme simple support des changements mais un acteur important lors de la construction de ceux-ci. Les scénarios sont spatialisés (VOIRON 2006 ; EMSELLEM, LIZIARD et SCARELLA 2012 ; HOUET et GOURMELON 2014).

Julien et al (1975) expliquent que la construction de scénarios "*se fonde sur des analyses synchroniques et diachroniques*" afin d'élaborer des scénarios de croissance urbaine cohérents (Fig. 8.51. A). L'étude synchronique et diachronique de la croissance urbaine de Dijon Métropole a été réalisée lors du Chapitre IV. Le relief ainsi que les espaces viticoles ont contraint l'urbanisation vers l'Est (plaine de Saône) (8.51. A.1). La croissance de la métropole est de type polycentrique hiérarchisé (le long de ses axes de communication vers ses pôles périphériques proches) (8.51. A.2).

L'étape suivante consiste à élaborer un scénario exploratoire tendanciel. Cette double étude de la croissance urbaine de Dijon Métropole a permis d'aboutir à une situation actuelle (Population et textes législatifs de croissance urbaine présentés dans le chapitre IV) (Fig. 8.51. B.1). À travers les études exposées dans les chapitres IV et V, la variable du nombre de logements est pertinente pour étudier conjointement la croissance urbaine et son impact sur l'ICU (Fig. 8.51. B.2). Il s'agit de calculer un nombre de logements à l'horizon 2050. Ce calcul repose sur les besoins de la population (Démographie et calcul du "point mort" (Fig. 8.51. B.3).

Sur la base du nombre de logements calculé pour ce scénario tendanciel, des scénarios contrastés peuvent être établis. Pour rappel, les scénarios doivent être contrastés entre eux afin de constater des différences en termes de climat urbain. (Fig. 8.51. C). À partir de ce nombre de logements fixes, plusieurs scénarios

peuvent être construits (Fig. 8.51. C.1). Ce nombre de logements, constant quel que soit le scénario, permettra de les comparer par la suite (Fig. 8.51. C.2). Les scénarios sont ensuite quantifiés (occupation des sols pour chaque scénario à l'aide des LCZs) et spatialisés avec le modèle de croissance urbaine MUP-City (Fig. 8.51. C.3).

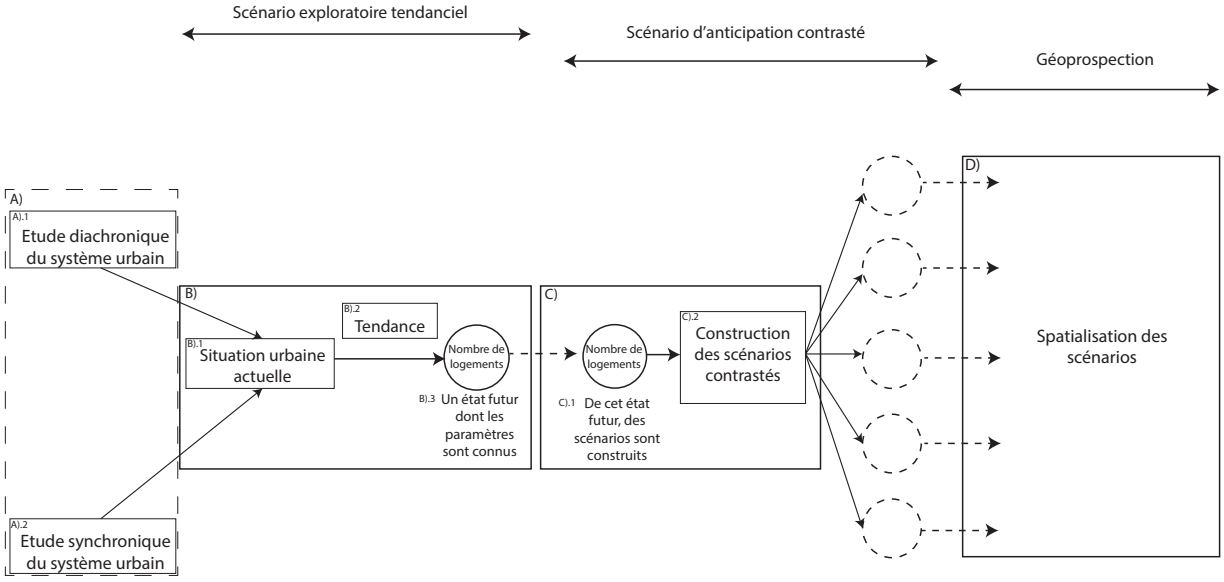


FIGURE 8.51 – Schéma de la méthode de construction des scénarios.

8.2 LOGER LES HABITANTS, UNE RÉALITÉ INTEMPORELLE

8.2.1 DÉMOGRAPHIE ET "POINT MORT"

La notion de "besoins en logements" est complexe. Elle renvoie à la question de la satisfaction des attentes des ménages tant en termes quantitatifs (nombre de logements) que qualitatifs (type, taille, ...). Les besoins qualitatifs et quantitatifs de la population, en termes de logements, répondent à des logiques exogènes et endogènes à la ville. La démographie et les nouveaux arrivants (facteurs exogènes) participent autant à la construction de nouveaux logements que les processus de décohabitation ou encore de renouvellement du parc de logements (facteurs endogènes). Ainsi, au nombre de logements à construire pour accueillir la nouvelle population, il faut ajouter des logements pour l'évolution de la population existante. La méthode utilisée repose sur la prise en compte des flux [53] : ceux des nouveaux ménages (démographie), ceux impactant le parc de logements (reconfiguration du parc) et l'évolution du nombre d'habitants par logement.

Pour Dijon Métropole, comme nous l'avons vu dans le chapitre IV, environ 30 200 logements sont à prévoir, dont 22 600 nouveaux à l'horizon 2040, soit 1 130 nouveaux logements par an. Cette tendance devrait être en déclin après 2040, car Dijon Métropole, pour se conformer à la loi SRU [54], doit construire

53. Il existe d'autres méthodes pour calculer le besoin de logement mais celles-ci font appel à des besoins qualitatifs des ménages telles que l'approche normative qui consiste à établir le nombre de logement de demain en fonction de l'évolution des "modes de vie" et de la "demande potentielle" ainsi que des normes de logement qui en découlent : salubrité, confort minimal,...

54. 20% de logement sociaux dans le total du parc de logement

davantage de nouveaux logements (Fig. 8.6). Ainsi, environ 34 000 nouveaux logements sont à prévoir à l'horizon 2050.

	Population supplémentaire estimée	Nombre de nouveaux logements supplémentaire estimés	Nombre de nouveaux logements annuels supplémentaire estimés
Horizon 2040 (SCoT)	37 600	22 640	1 130
Horizon 2050 (SCoT)	45 264	33 948	1 029

TABLE 8.6 – Estimation du nombre de logements à l'horizon 2050 avec l'évolution du PLUi-HD de Dijon Métropole

L'estimation du parc de logements en 2050 nécessite des calculs complémentaires pour aboutir à un résultat considérant l'ensemble des variables influençant le parc de logements.

La méthode utilisée par la suite est de combiner les projections démographiques et le calcul du "point mort" pour estimer le nombre de logements à l'horizon 2050 (Fig. 8.52). Le "Point mort" est la mesure *a posteriori* de la production de logements correspondant à la stabilité démographique au cours d'une période révolue. Il correspond au nombre de logements nécessaires pour accueillir le nombre de ménages issu de la population actuelle compte tenu de l'évolution de la société.

Utilisé de manière prospective, le "point mort" permet d'évaluer les besoins globaux en logements à partir d'un certain nombre d'hypothèses basées sur le desserrement des ménages, les variations internes du parc et le renouvellement de celui-ci. De manière générale, un ménage, au sens statistique du terme, désigne l'ensemble des occupants d'un même logement sans que ces personnes soient nécessairement unies par des liens de parenté [55] (en cas de cohabitation, par exemple).

Le taux d'occupation est le nombre de personnes par logement. À l'inverse, le desserrement des ménages est la diminution du nombre de personnes par logement. Deux facteurs sociétaux influent sur l'évolution du nombre de personnes par logements : l'évolution de la structure par sexe et âge de la population, et les comportements de cohabitation (à sexe et âge donnés). La structure par âge importe car les ménages des personnes âgées sont généralement des ménages plus petits que la moyenne (PARANT 1981). Depuis vingt ans, les déformations de la structure par âge (vieillissement de la population) expliquent environ la moitié de l'évolution du nombre de personnes par ménage. Le nombre moyen de personnes par ménage diminue aussi du fait de la "désaffection" dont souffrent les moyens "traditionnels" de cohabitation (TOULEMON 2011 ; TOULEMON 2012). La décohabitation des générations, la mise en couple plus tardive et l'éclatement de la cellule familiale (divorce, séparation, ...) sont autant d'autres éléments explicatifs du desserrement des ménages en France (TOULEMON 2011). Ainsi, de manière contre intuitive, à population égale ou en légère diminution, une ville doit construire des logements liés au desserrement des ménages.

— Il est tout d'abord nécessaire de calculer le taux d'occupation actuel des logements. Celui-ci varie entre la ville centre (1.86 habs/log ; Taux Occupation Dijon) et la périphérie (2.4 habs/log ; Taux Occupation Hors Dijon). Pour Dijon Métropole, le taux d'occupation moyen est 2.07 habitants par logement, ce qui est cohérent avec les données de son PLU (Fig. 8.52. A). Ce nombre d'habitant par foyer tend à diminuer d'environ 0.35%/an d'après l'INSEE. En l'absence de bouleversement

55. Un ménage peut être composé d'une seule personne (INSEE).

majeur de notre environnement économique ou sociétal, ces tendances devraient se poursuivre. À l'horizon 2050, la taille des ménages estimée pour l'ensemble Dijon Métropole est ainsi de 1.84 habitants/logement (Fig. 8.52. B).

— Il faut désormais estimer le nombre de nouveaux logements à construire d'ici 2050 pour loger cette nouvelle population issue de la modification des habitudes de vie. La méthode de calcul est apportée par le Cerema (MERTINY, GUERRINI et HEIN 2013). Pour ce faire, le nombre d'habitants en résidences principales est nécessaire ainsi que la taille moyenne des ménages pour une période donnée et celle estimée. Ainsi, pour accueillir la population actuelle de Dijon Métropole avec un taux d'occupation de 1.84, il faudrait 15 395 logements supplémentaires en 2050 (Fig. 8.52. C).

— Le taux d'occupation moyen des ménages étant fixé, nous pouvons estimer le nombre de logements nécessaires en 2050 pour accueillir la nouvelle population. Pour rappel, en 2050, avec un taux de croissance annuel de 0.5%, la population devrait augmenter de 45 264 habitants. Ainsi, avec un taux d'occupation de 1.84, la construction de 24 600 logements est nécessaire d'ici 2050 (Fig. 8.52. D).

— Le renouvellement du parc de logements (restauration,...) fait partie intégrante du calcul car les logements rénovés sont déjà construits et ne nécessitent pas de construction supplémentaire. La moyenne nationale de rénovation est de 0.1% annuel du parc de logements, ce taux est identique pour Dijon Métropole. Le nombre de logements apporté par la restructuration du parc est à soustraire du nombre de logements apporté par le desserrement et la variation interne du parc. La métropole dispose de 134 377 logements, 0.1% de restructuration annuelle équivaut à environ 134 logements par an sur une période de d'environ 30 ans, soit 4 521 logements (8.52. E).

— La variation interne du parc est l'évolution du nombre de logements secondaires et vacants au profit des logements principaux. À Dijon Métropole, 6,8% des logements sont vacants, ce qui constitue le plus fort taux de toutes les régions françaises. Ce taux de logements vacants est plus important que la moyenne nationale à cause du nombre de logements vacants au centre-ville historique (chambres de domestique). De plus, la ville étant étudiante, il est normal que le taux de vacance soit légèrement plus élevé que la moyenne nationale pour s'adapter aux besoins étudiants (location une partie de l'année, ...). Le Conseil économique, social et environnemental régional (CESER) de Bourgogne Franche Comté explique que "*la rénovation du parc permettrait de, certes, réduire ce taux de vacance au profit des logements principaux, mais au prix d'un investissement estimé à 900 millions d'euros (pour 30.000 logements)*". Le CESER préconise plutôt la "déconstruction", car le patrimoine ne correspond plus aux attentes des habitants. La variation interne du parc est une variable qui dépend fortement de la ville (étudiante, touristique, ...) ainsi que de sa politique urbaine. Ainsi, pour des raisons de lisibilité et de cohérence, la variation interne du parc de logements est considérée comme nulle.

— Enfin, le nombre de logements à construire dû à l'effet démographique (24 600 logements. (Fig. 8.52. D) est ajouté au point mort (14 975 (Fig. 8.52. C). Puis le nombre de logements établi du renouvellement urbain est à soustraire car il s'agit de logements qui ne seront pas à construire (de même que la variation interne du parc mais celle-ci est considérée comme nulle), soit 4 521 logements rénovés (Fig. 8.52. E). Soit un total de **35 054 logements** à construire à l'horizon 2050

(Fig. 8.52. F).

Variables	Calcul
A) Calcul du Taux d'Occupation Actuel (TO_2017) de la métropole de Dijon	
Population de Commune de Dijon (PCD) Population des Communes Hors de Dijon (PCHD) Taux d'Occupation de la Commune de Dijon (TOD) Taux d'Occupation des Communes Hors de Dijon (TOHD) Population Totale de Dijon Métropole (P_tot_DM)	$TO_2017 = \frac{(PCD * TOD) + (PCHD * TOHD)}{P_tot_DM}$ $TO_2017 = \frac{(153\,000 * 1.86) + (100\,000 * 2.04)}{253\,000}$
TO_2017 = 2.07	
B) Calcul du Taux d'Occupation à l'horizon 2050 (TO_2050) de la métropole	
Taux d'Occupation Actuel (TO_2017) Taux de Desserement des Ménages (TDM) Année Actuelle (A_2017) Année de l'horizon souhaité (A_2050)	$TO_2050 = TO_2017 * (1 - TDM)^{A_2050 - A_2017}$ $TO_2050 = 2.07 * (1 - 0.035)^{33}$
TO_2050 = 1.84	
C) Calcul du Nombre de Logements pour le Desserement de la Population (NB_lo-	
Taux d'Occupation Actuel (TO_2017) Taux d'Occupation à l'horizon 2050 (TO_2050) Population actuelle en Résidence Principale (PRP)	$Nb_log_DP = \frac{PRP}{TO_2050} - \frac{PRP}{TO_2017}$ $Nb_log_DP = \frac{232\,000}{1.84} - \frac{232\,000}{2.07}$
NB_log_DP = 14 975	
D) Calcul du Nombre de Logements pour l'évolution de la population (NB_log_EP)	
Population Totale de Dijon Métropole (P_tot_DM) Taux d'Evolution de la Population (TEP) Taux d'Occupation à l'horizon 2050 (TO_2050) Année Actuelle (A_2017) Année de l'horizon souhaité (A_2050)	$NB_log_EP = \frac{P_tot_DM * (1 + TEP)^{A_2050 - A_2017}}{TO_2050}$ $NB_log_EP = \frac{253\,000 * (1 + 0.05)^{33}}{1.84}$
NB_log_EP = 24 600	
E) Calcul du Nombre de logements Renouvellement Urbain (NB_log_RU)	
Nombre de logements en résidence principale (Nb_log_RP) Taux Renouvellement des logements par an (TRL) Année Actuelle (A_2017) Année de l'horizon souhaité (A_2050)	$NB_log_RU = (NB_log_RP * TRL) * (A_2050 - A_2017)$ $NB_log_RU = (132\,000 * 0.01) * 33$
NB_log_RU = 4 521	
F) Estimation du nombre de logements à construire à l'horizon 2050 (NB_log_2050)	
Nombre de Logements pour le Desserement de la Population (NB_log_DP) Nombre de Logements pour l'évolution de la population (NB_log_EP) Nombre de logements Renouvellement Urbain (NB_log_RU)	$NB_log_2050 = (NB_log_DP + NB_log_EP) - NB_log_RU$ $NB_log_2050 = (14\,975 + 24\,600) - 4\,521$
NB_log_2050 = 35 054	

FIGURE 8.52 – Calcul du nombre de logements pour l'horizon 2050 à Dijon Métropole.

A la suite des calculs effectués, le résultat du nombre de logements est supérieur de 3.2% comparé à la tendance du nombre de logements estimé par le SCoT prolongée jusqu'en 2050. Ainsi, l'estimation du

nombre de logements à construire en 2050 semble cohérente avec la réalité (Fig. 8.7). Deux explications peuvent justifier le léger décalage entre notre estimation et la tendance actuelle.

— La variable “variation interne du parc” n’est pas considérée.
— Le renouvellement du parc (1% annuel) est probablement sous-estimé.

	Population supplémentaire estimée	Nombre de logements supplémentaire estimé	Nombre de logements supplémentaire estimé par an
Horizon 2040 (SCoT)	37 600	22 640	1 130
Tendance du SCoT : Horizon 2050	45 264	33 948	1 029
Calcul du nombre de Logements Horizon 2050	**45 264**	**35 054**	**1 062**

TABLE 8.7 – Estimation du nombre de logements à l’horizon 2050 avec l’évolution du PLUi-HD de Dijon Métropole et le calcul du nombre de logements effectué

8.3 CRÉATION DES LCZS À PARTIR DES SCÉNARIOS

8.3.1 IMAGINER LA VILLE DE DEMAIN

Pour notre travail, le terme scénario est défini comme un récit, c’est-à-dire une description non tendancielle du futur.

Plusieurs concepts clés peuvent être utilisés pour la construction de scénarios de croissance urbaine (GODET 1983 ; GODET et ROUBELAT 1996 ; HOUET et al. 2016) :

— Démographie
— Conditions de vie/aspiration des ménages, modes de vie /Répartition des ressources
— Économie du secteur logement/système productif bâti/ pression foncière
— Équipements /services/infrastructures de communication
— Économie générale régionale et dynamique du marché du travail
— Représentation-Image-Attractivité
— Environnement, biodiversité
— Acteurs publics et privés
— Facteurs exogènes

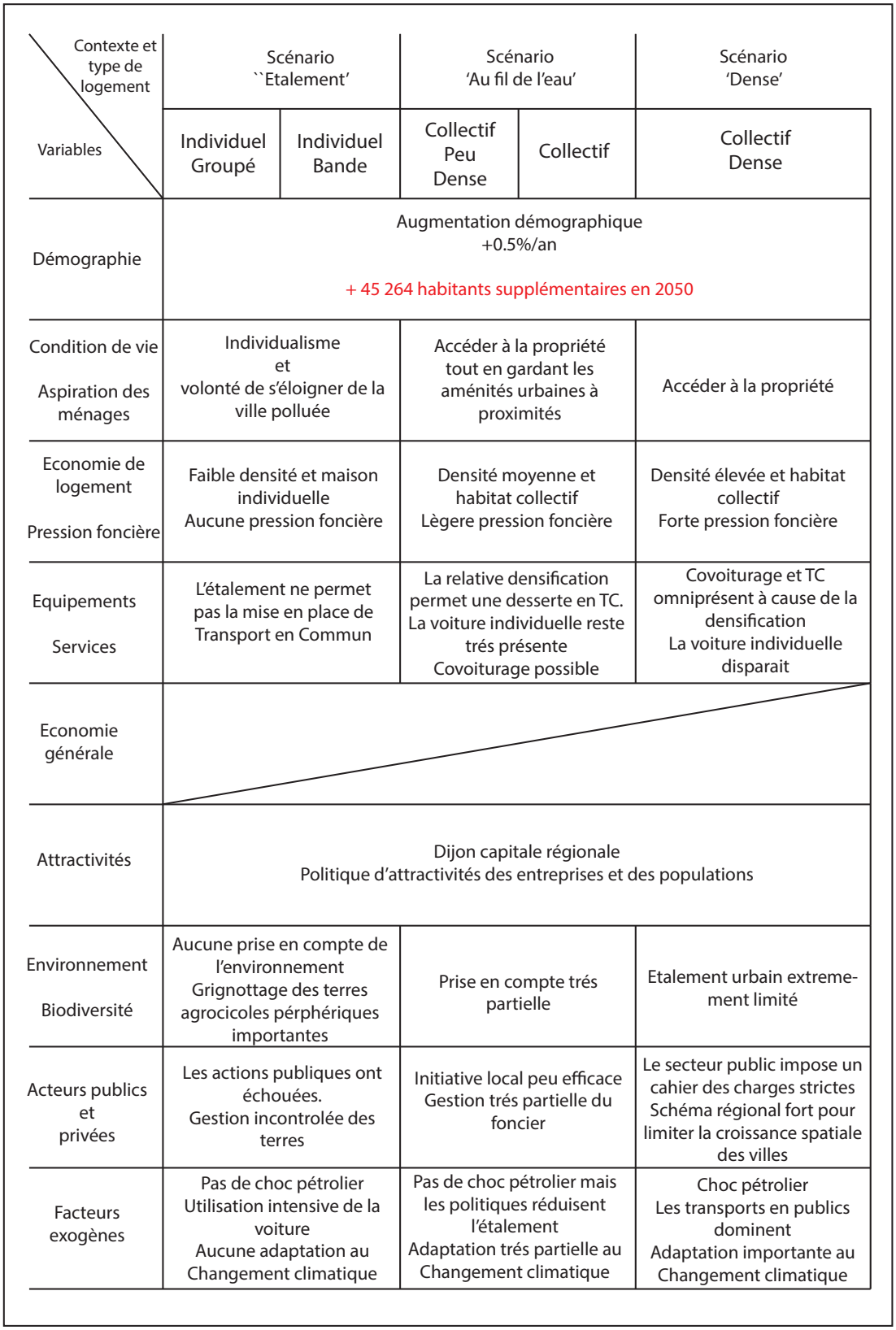
Ces différents concepts peuvent être utilisés pour générer différentes structures, formes et designs urbains, à travers le nombre de logements. À partir de ces neuf concepts, trois grandes familles de scénarios sont élaborées (Fig. 8.53). Trois variables sont communes à l’ensemble des scénarios. La variable de l’évolution démographique est commune à tous les scénarios afin que ceux-ci soient comparables par la suite. Dijon Métropole reste une capitale régionale qui attire population et capitaux. Enfin, la variable de l’économie générale n’a pas été construite. En effet celle-ci dépend d’un nombre de facteur trop important pour être élaborée.

— La première famille de scénarios est une désadaptation urbaine de la métropole (Scénario d’éta-

lement conséquent) : les plans d'aménagement échouent à cause de dissensions politiques. La résultante est que des terres agricoles périphériques à la ville sont converties en zones anthropisées. L'environnement n'est pas au cœur des préoccupations, et aucune action n'est entreprise afin de limiter l'étalement urbain ou la consommation d'espace. Les zones nouvellement urbanisées sont contraintes par les axes de communications autoroutiers principaux. L'accès à la maison individuelle est la priorité pour les nouveaux arrivants, l'étalement urbain n'est pas modéré. Cette famille de scénarios est nuancée de deux façons :

  - Pour la première nuance, les logements seront de types individuels groupés.
  - Pour la seconde nuance, les logements seront de types individuels en bande.

- La seconde famille de scénarios est "Au fil de l'eau". Les plans d'aménagements actuels sont respectés dans les grandes lignes. L'étalement urbain se poursuit, mais à un rythme modéré. L'environnement est une préoccupation sociétale majeure et une place est accordée aux zones vertes à proximité des logements collectifs. Là encore, l'urbanisation est contrainte par les axes de communications. Cette famille de scénarios est, là aussi, nuancée
  - Il s'agit, soit de logements collectifs peu denses (logements collectifs avec entrées individuelles).
  - Soit de logements collectifs de taille moyenne (avec entrées collectives).
- Enfin, la troisième famille de scénario s'inscrit dans le cadre d'une véritable adaptation au changement climatique visant également à minimiser l'anthropisation des surfaces (Scénario Dense). Les plans d'aménagements sont entièrement voués à la densification urbaine. L'étalement urbain est extrêmement limité, voir interdit dans certaines zones. L'environnement est une préoccupation majeure. Pour ce scénario, les logements sont collectifs, denses et localisés le long des axes de communications en périphérie proche de l'agglomération.



Contexte et type de logement / Variables	Scénario ``Etalement'		Scénario 'Au fil de l'eau'		Scénario 'Dense'
	Individuel Groupé	Individuel Bande	Collectif Peu Dense	Collectif	Collectif Dense
Démographie	Augmentation démographique +0.5%/an + 45 264 habitants supplémentaires en 2050				
Condition de vie Aspiration des ménages	Individualisme et volonté de s'éloigner de la ville polluée		Accéder à la propriété tout en gardant les aménités urbaines à proximités		Accéder à la propriété
Economie de logement Pression foncière	Faible densité et maison individuelle Aucune pression foncière		Densité moyenne et habitat collectif Lègere pression foncière		Densité élevée et habitat collectif Forte pression foncière
Equipements Services	L'étalement ne permet pas la mise en place de Transport en Commun		La relative densification permet une desserte en TC. La voiture individuelle reste trés présente Covoiturage possible		Covoiturage et TC omniprésent à cause de la densification La voiture individuelle disparait
Economie générale					
Attractivités	Dijon capitale régionale Politique d'attractivités des entreprises et des populations				
Environnement Biodiversité	Aucune prise en compte de l'environnement Grignottage des terres agrocicoles périphériques importantes		Prise en compte trés partielle		Etalement urbain extreme-ment limité
Acteurs publics et privées	Les actions publiques ont échouées. Gestion incontrolée des terres		Initiative local peu efficace Gestion trés partielle du foncier		Le secteur public impose un cahier des charges strictes Schéma régional fort pour limiter la croissance spatiale des villes
Facteurs exogènes	Pas de choc pétrolier Utilisation intensive de la voiture Aucune adaptation au Changement climatique		Pas de choc pétrolier mais les politiques réduisent l'étalement Adaptation trés partielle au Changement climatique		Choc pétrolier Les transports en publics dominent Adaptation importante au Changement climatique

FIGURE 8.53 – Scénarios de croissance urbaine. D'après les travaux de HOUET et al. 2016.

8.3.2 SCÉNARISATION : DE LA FICTION À LA RÉALITÉ GRÂCE AUX LCZS

Pour calculer le nombre de logements à construire à l'horizon 2050, il est nécessaire d'estimer l'emprise spatiale de ces nouveaux logements pour chacun des scénarios (Fig. 8.53). Le modèle de simulation de croissance urbaine (MUP-City [56]) génère ainsi un nombre de mailles de dimension voulue à urbaniser. La densité de logements est une donnée quantitative alors que la forme urbaine se révèle à la fois quantitative (hauteur, ...) et qualitative (perception, souhait de la population). Il existe plusieurs formes urbaines pour chaque niveau de densité. Il n'existe cependant pas de relation directe entre le type d'habitat et la densité de logement. Pour une emprise spatiale similaire, un même nombre de logements peut être réparti selon une quasi-infinité de possibilités (FORCE 1999).

Comme nous l'avons vu au cours de la partie I, les LCZs fournissent des indicateurs d'occupations des sols et de formes pour plusieurs configurations urbaines. En France, le référentiel des densités de l'Île de France (IDF) permet aussi l'accès à l'occupation moyenne des sols et de forme urbaine pour plusieurs configurations spatiales.

La figure 8.54 présente les données pour chacun des scénarios. Celles-ci sont le fruit de l'étude des LCZs du milieu urbain de Dijon (EMERY et al. 2017), du référentiel de densité de l'Ile de France (En annexe Fig. 9.80 et 9.81) et des scénarios. Afin d'obtenir des formes urbaines correspondantes à la réalité du terrain d'étude pour chacun des scénarios, il a été choisi d'effectuer un tirage aléatoire, pour chacune des LCZs des scénarios, de dix LCZs existantes sur le terrain d'étude, puis de faire la moyenne de ses attributs (pourcentage de voirie, bâti et végétation ainsi que la hauteur). La figure 8.55 présente un exemple concret de l'occupation des sols de chaque LCZ pour la Métropole de Dijon.

La famille de scénarios de croissance urbaine avec logements individuels (Fig. 8.54. Logements Individuels Groupés et Logements Individuels en Bandes) correspond respectivement aux LCZs 9 (Sparsely Built) et 6 (Open Low-Rise). La famille de scénarios de logements Collectifs Peu Denses et Logements Collectifs correspond respectivement aux LCZs 3 (Compact Low-rise) et 2 (Compact midrise) (Fig. 8.54). Enfin le scénario de logements collectifs denses fait référence à la LCZ 4 à la différence que ce scénario se veut vertueux, la présence de végétation (55%) y est donc bien plus importante.

56. Cf. Partie III. Chapitre V

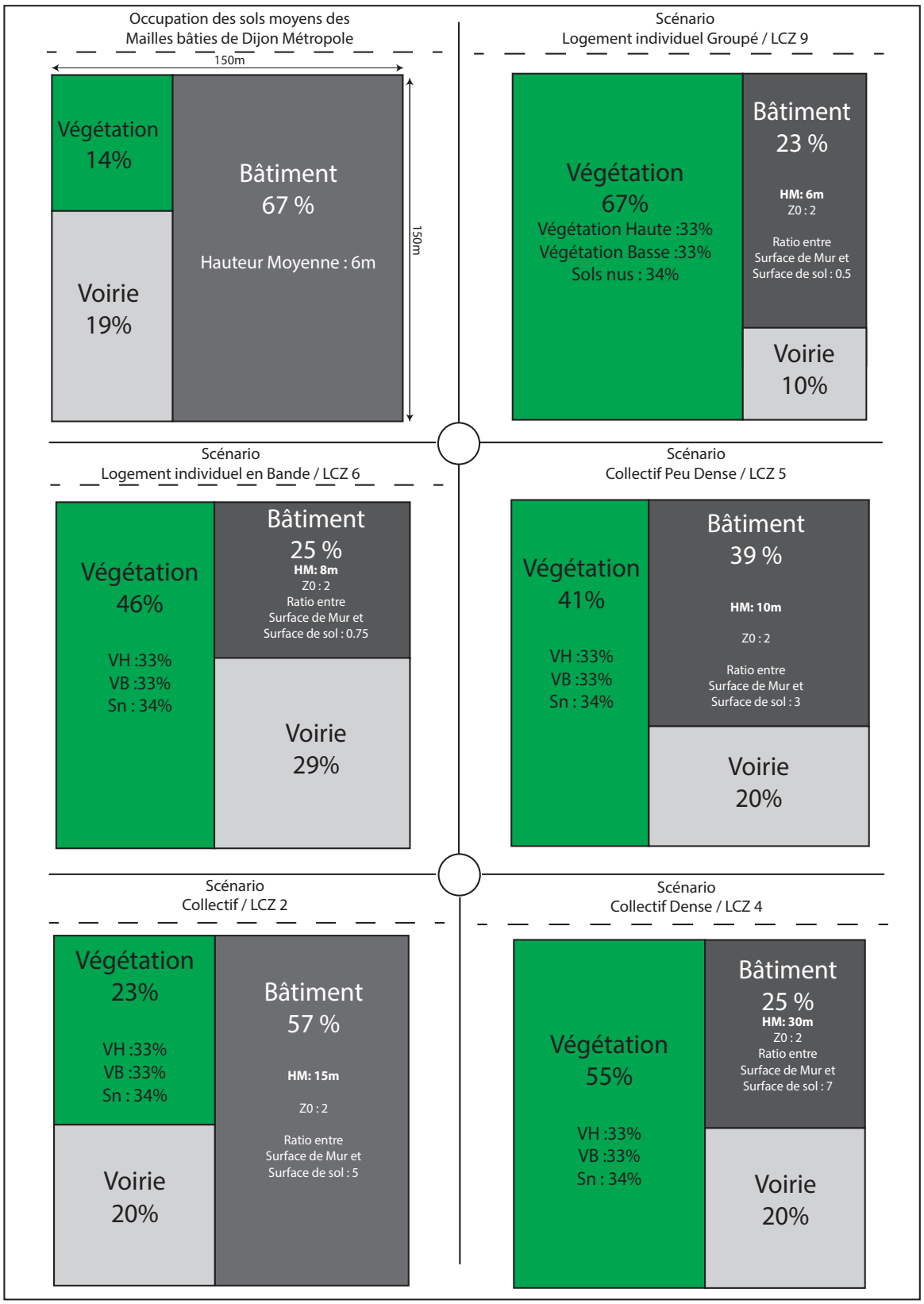


FIGURE 8.54 – Formes urbaines de chaque scénario de croissance urbaine.

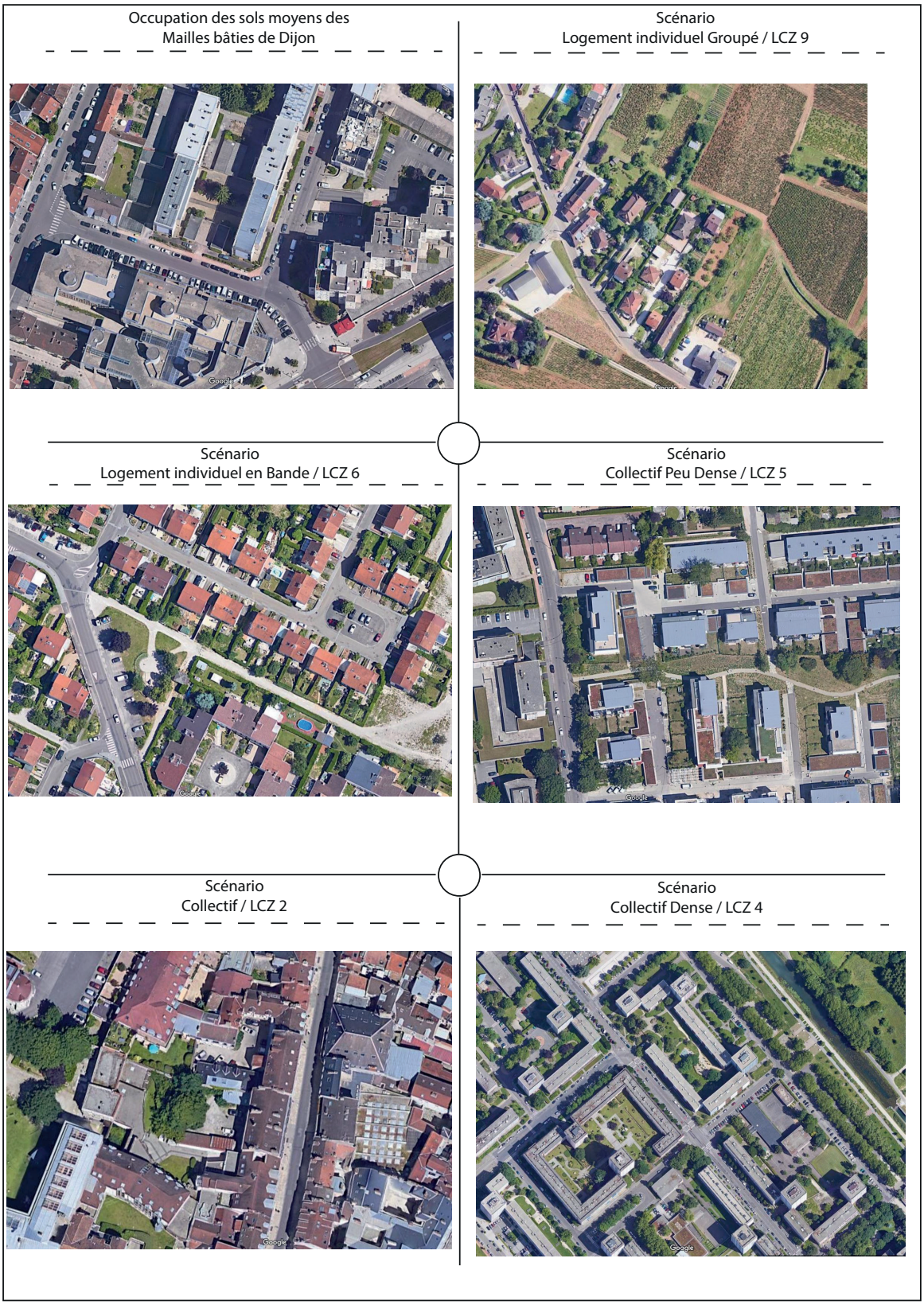


FIGURE 8.55 – Formes urbaines correspondantes à chaque scénario de croissance urbaine.

Maintenant que des formes urbaines sont attribuées à chaque scénario, il est nécessaire d'estimer l'em-

prise spatiale de chaque forme urbaine afin de pouvoir simuler la croissance urbaine. Un nombre de logements moyens par hectare par scénario est identifié en fonction de l'étude du bâti de la métropole ainsi que sur le référentiel de densité de l'IDF. Cela permet d'estimer un nombre de mailles de 2.25 ha [57] à urbaniser pour les 35 054 logements à construire. Il s'agit donc d'une approximation, d'une moyenne de logements par hectare pour différents types d'habitat (Tab. 8.56). Ensuite, afin d'éviter une superposition des mailles scénarisées et des éléments déjà bâtis, 5% du total des mailles estimées pour chaque scénario est ajouté. Cela permettra par la suite de compenser les nouvelles mailles scénarisées qui se superposent avec les mailles bâties déjà existantes.

		Nombre de logements moyen par hectare	Nombre de mailles de 2.25 ha à urbaniser pour 35 054 logements	Nombre de mailles de qui seront urbanisées dans le modèle MUP-City (5% supplémentaires)	Nombre total d'hectares imperméabilisés (bâti et voirie)
Logements Individuels	Logements Individuels Groupés	7	2 336	2 452	1 728
	Logements Individuels en Bandes	25	614	644	775
Logements Collectifs	Logements Collectifs peu Denses	40	389	409	454
	Logements Collectifs	80	233	245	403
	Logements Collectifs Denses	120	134	141	135

FIGURE 8.56 – Estimation du nombre de logements pour 2.25 ha par scénario et du nombre total de mailles à urbaniser.

La figure 8.57 présente l'évolution de la surface (en nombre de mailles de 150m de résolution) de Dijon Métropole pour chaque scénario. Dans le cas du scénario de croissance urbaine avec logements individuels groupés, la surface de la métropole double (105% d'augmentation). Dans le cas du scénario de croissance urbaine le plus dense, la surface de la métropole n'augmente que d'environ 5%.

57. Pour rappel, le Domaine 3 de notre modèle est en point de grille de 150m de résolution.

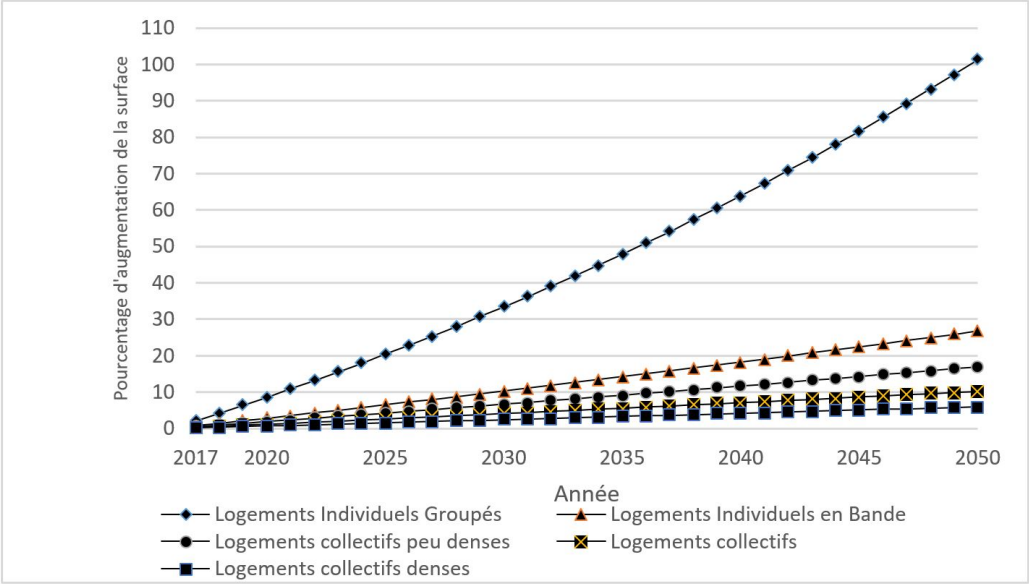


FIGURE 8.57 – Étalement urbain de Dijon Métropole selon différents scénarios de croissance urbaine

8.3.3 INTÉGRATION DES SCÉNARIOS DANS LE LOGICIEL MUP-CITY

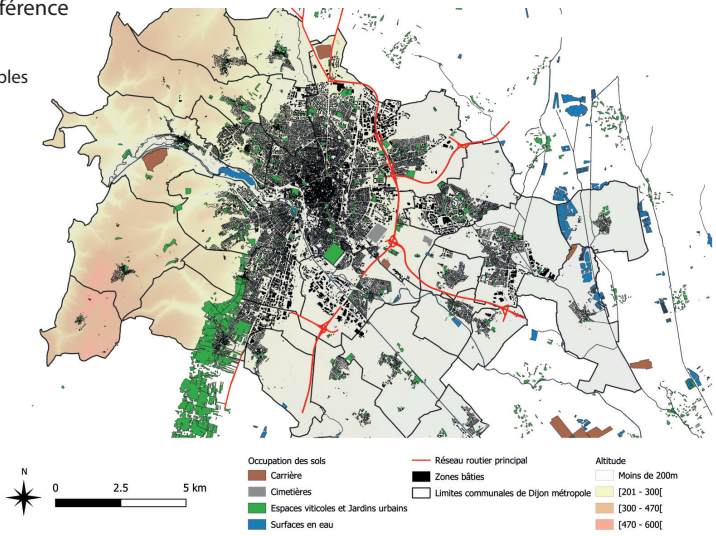
Les différents scénarios de croissance urbaine qualifiés et quantifiés, il est nécessaire de les spatialiser à l'aide du modèle de croissance urbaine MUP-City dont les différentes étapes de simulations sont présentées dans la figure 8.58.

Dans un premier temps, les couches de références en format shapefile sont ajoutées dans le logiciel, dans notre cas, les bâtiments, le réseau routier principal et les zones inconstructibles (Fig. 8.58. A et B). Il est à préciser qu'une zone inconstructible de 50 mètres est appliquée aux axes de communication afin d'éviter une superposition des couches (en particulier dans les zones d'échangeurs autoroutiers).

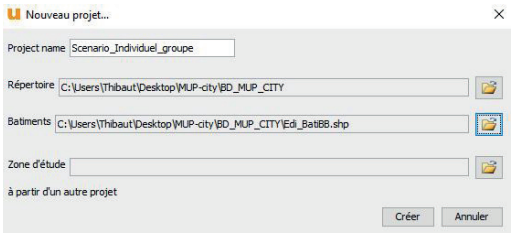
Il est ensuite nécessaire de sélectionner une taille de maille. Pour notre étude, trois domaines, de résolutions respectives 1350m, 450m et 150m, sont emboités. Seul le domaine 3 est modifié à l'aide d'une nouvelle base de données d'occupations des sols. Ainsi la taille de la maille du modèle MUP-City correspond au domaine 3 de notre étude, d'une résolution 150m (Fig. 8.58.C). Le seuil de densité pour une cellule bâtie est fixé à 0. Ce paramètre peut être modifié si l'utilisateur souhaite avoir une occupation des sols minimale en plus de la localisation.

La dernière étape consiste à renseigner le nombre de mailles à urbaniser puis les critères de croissance urbaine (Fig. 8.58.D). Divers paramètres peuvent être activés tels que la distance au centre-ville ou à certaines aménités (transports en commun, commerce,...). Pour notre étude, seule la distance à la route ainsi qu'aux bâtiments existants est sélectionnée comme paramètre de croissance urbaine.

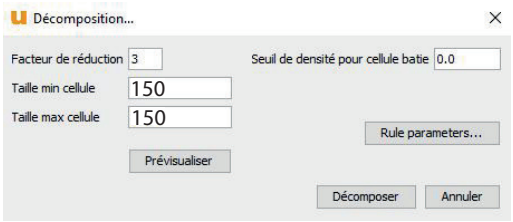
A) Couches de référence
- Voirie
- Bâtiments
- Zones inconstructibles



B) Création du projet et ajout des couches de référence au modèle



C) Résolution des mailles de simulation



D) Nombre de mailles à urbaniser

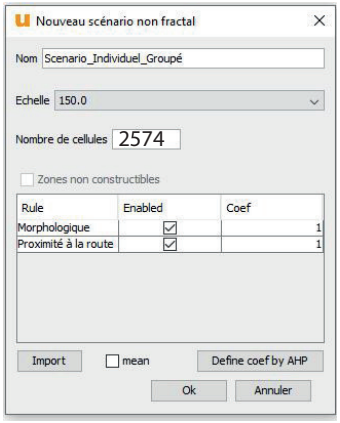


FIGURE 8.58 – Présentation des étapes de simulations du logiciel MUP-City. Exemple du scénario de croissance urbaine avec logements individuels groupés.

8.4 RÉSULTATS DES SIMULATIONS DE CROISSANCE URBAINE POUR DIJON MÉTROPOLE

Pour rappel, cinq scénarios de croissance urbaine reposant sur des concepts clés (démographie, ...) sont quantifiés à l'aide des LCZs. La spatialisation des scénarios ainsi que la construction des bases de données au format adéquat constituent les dernières étapes à effectuer pour les aménageurs (Fig. 5.37) avant d'intégrer les bases de données dans le modèle de climat urbain.

Dans le cas de la simulation de croissance urbaine avec habitat individuel groupé (LCZ 9), la croissance résidentielle est continue et d'environ 750m de part et d'autre des axes de circulation principaux (Fig. 8.59). La distance moyenne au centre de l'agglomération est d'environ 5.8km et maximale de 8 km environ. Elle se situe majoritairement dans la partie Nord, Nord-Est et Est de l'agglomération.

Pour la simulation de croissance urbaine d'habitat individuel en bande (LCZ 6), la croissance urbaine est discontinue dans sa partie Nord et la distance moyenne de part et d'autre des axes de circulation est de 550 m environ (Fig. 8.60). La distance moyenne au centre de l'agglomération est de 4.2 et maximale de 6.6km. L'emprise spatiale de la croissance urbaine est moindre, comparé au scénario précédant, au Nord, Nord-Est et à l'Est. L'artificialisation dans la partie Sud de l'agglomération est aussi présente mais dans une moindre mesure.

Dans les trois scénarios d'habitat collectif (Fig. 8.61, 8.62 et 8.63)le morcellement des zones résidentielles se poursuit, notamment au Sud et au Sud-Est. On constate que le développement d'habitats collectifs peu denses (Fig. 8.61) est morcelé (Nord, Nord-Est et Sud-Est) et la distance moyenne du développement résidentiel de part et d'autre des axes n'est plus que de 450 m. Le Nord et le Sud de l'agglomération sont les zones ou le développement résidentiel a le moins augmenté par rapport à l'étalement du scénario de croissance urbaine avec habitats individuels groupés. Pour les scénarios de logements collectifs (Fig. 8.62) et collectifs denses (Fig. 8.63), le morcellement est présent dans la partie Est de l'agglomération. Le scénario de développement résidentiel d'habitats collectifs denses (Fig. 8.63) présente le maximum de morcellement spatial, la continuité du bâti le long des axes principaux ayant presque disparue avec une moyenne de développement spatial de 100m de part et d'autre des axes.

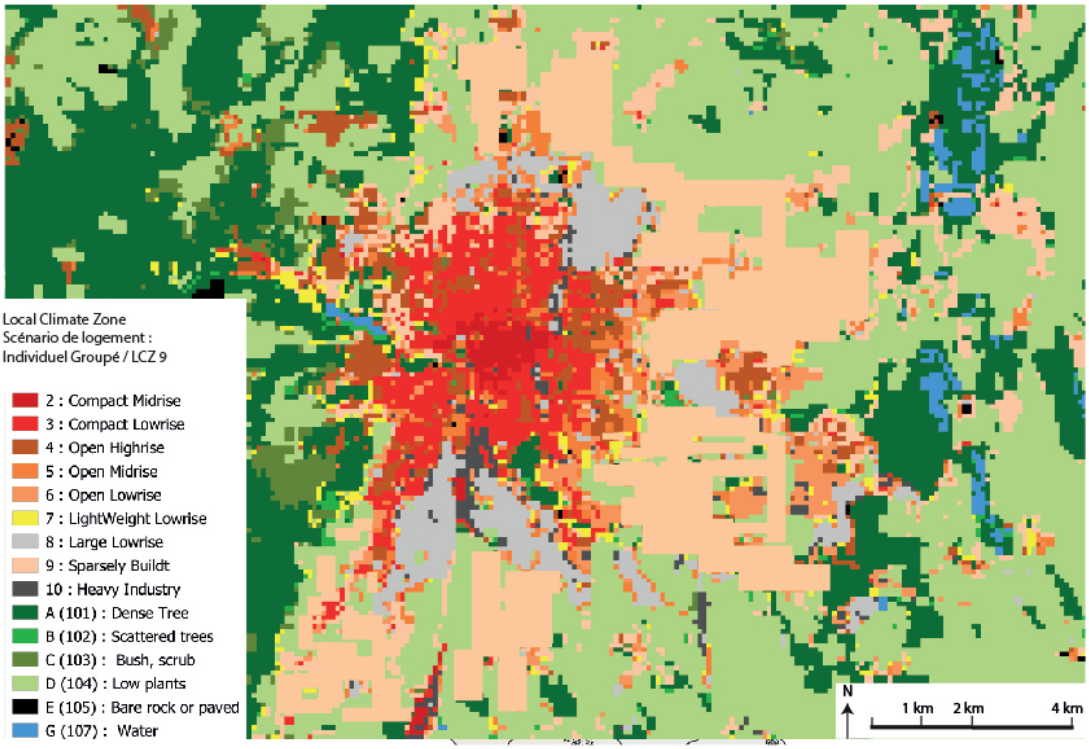


FIGURE 8.59 – Résultat des simulations de croissance urbaine pour les scénarios de logements individuels groupés (LCZ 9)

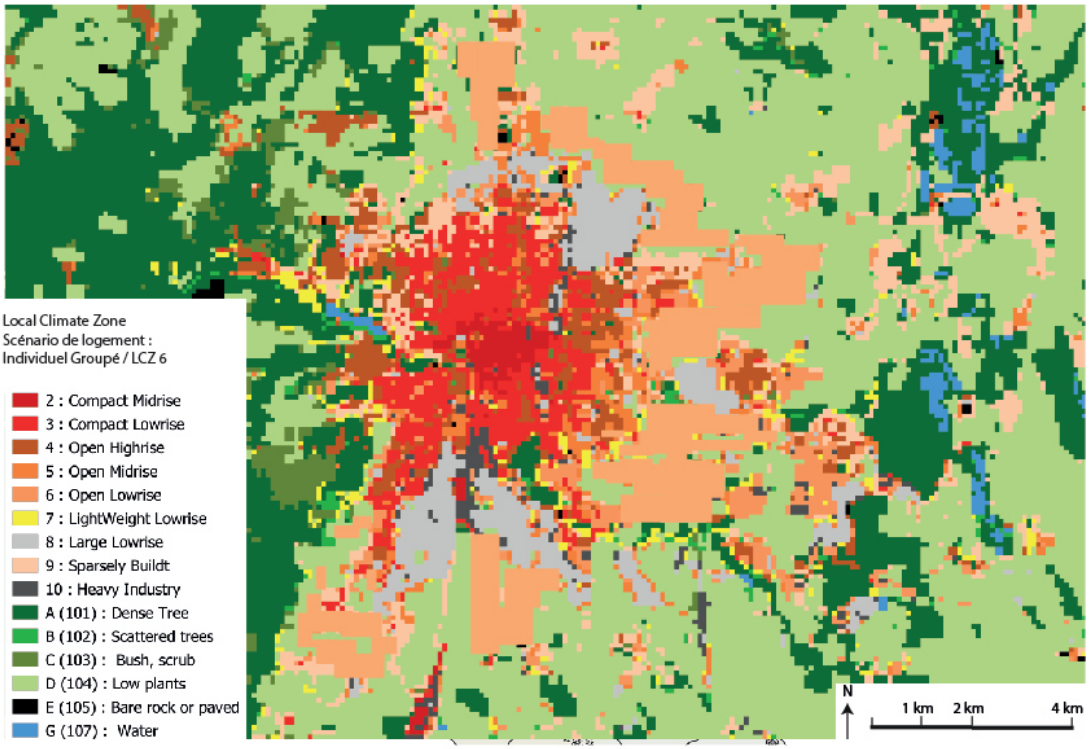


FIGURE 8.60 – Résultat des simulations de croissance urbaine pour les scénarios de logements individuels en bandes (LCZ 6)

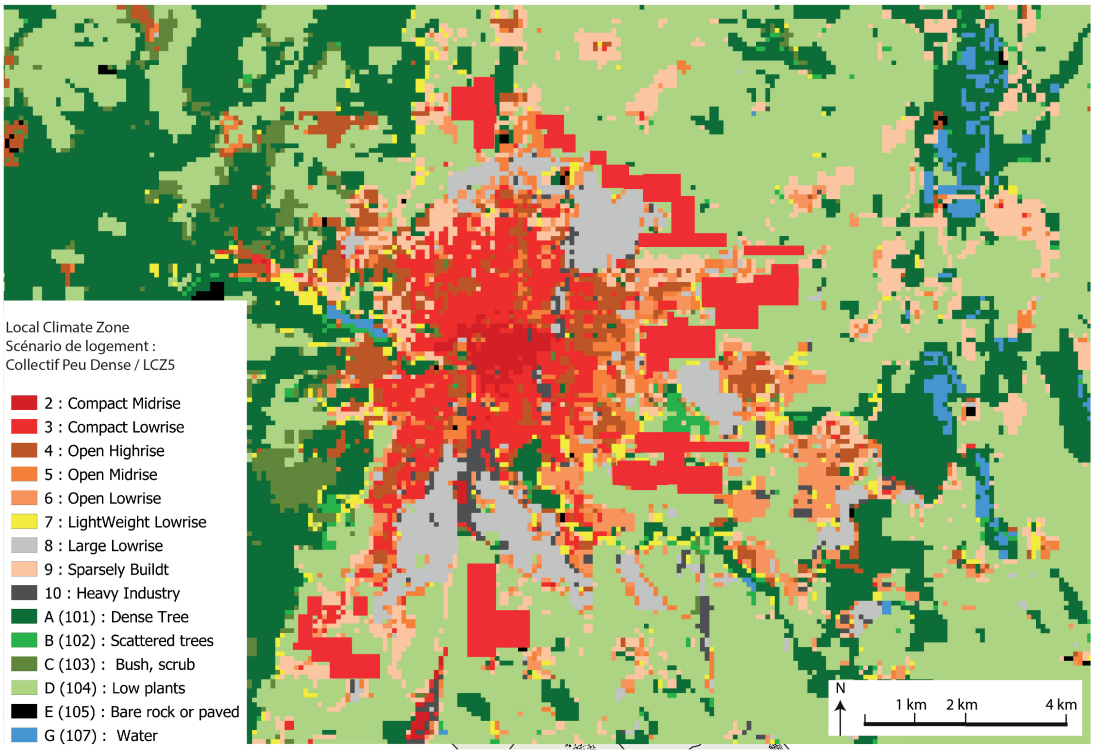


FIGURE 8.61 – Résultat des simulations de croissance urbaine pour les scénarios de logements collectifs peu denses (LCZ 3)

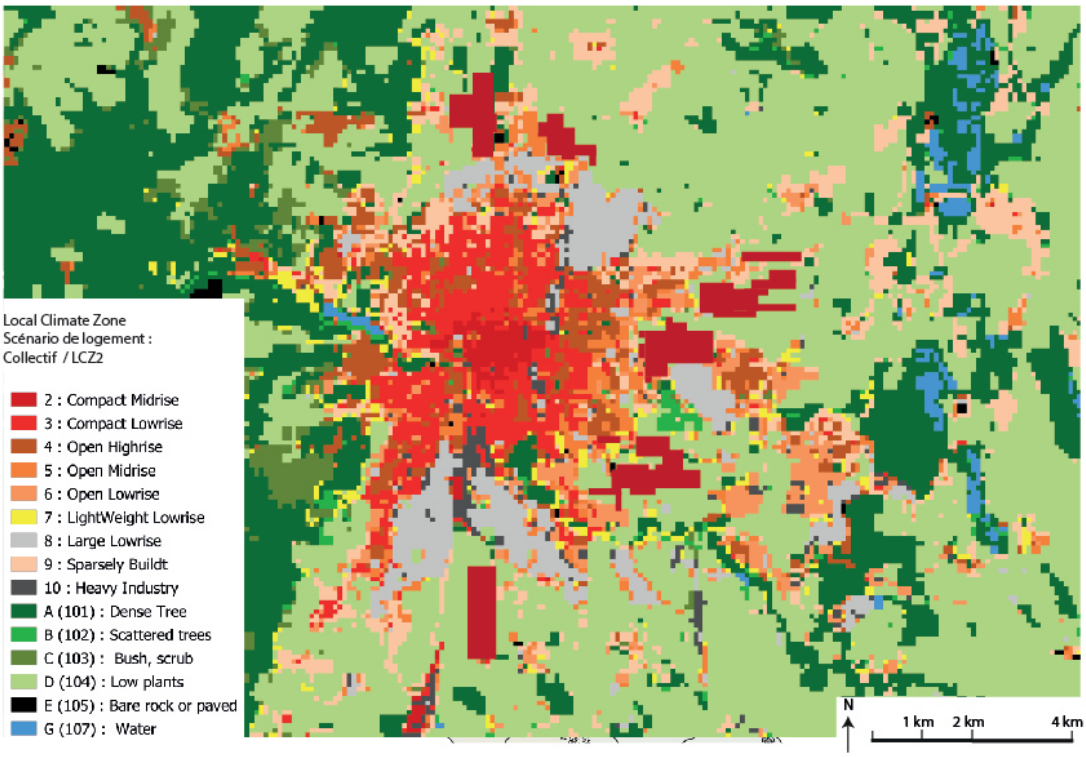


FIGURE 8.62 – Résultat des simulations de croissance urbaine pour les scénarios de logements collectifs (LCZ 2)

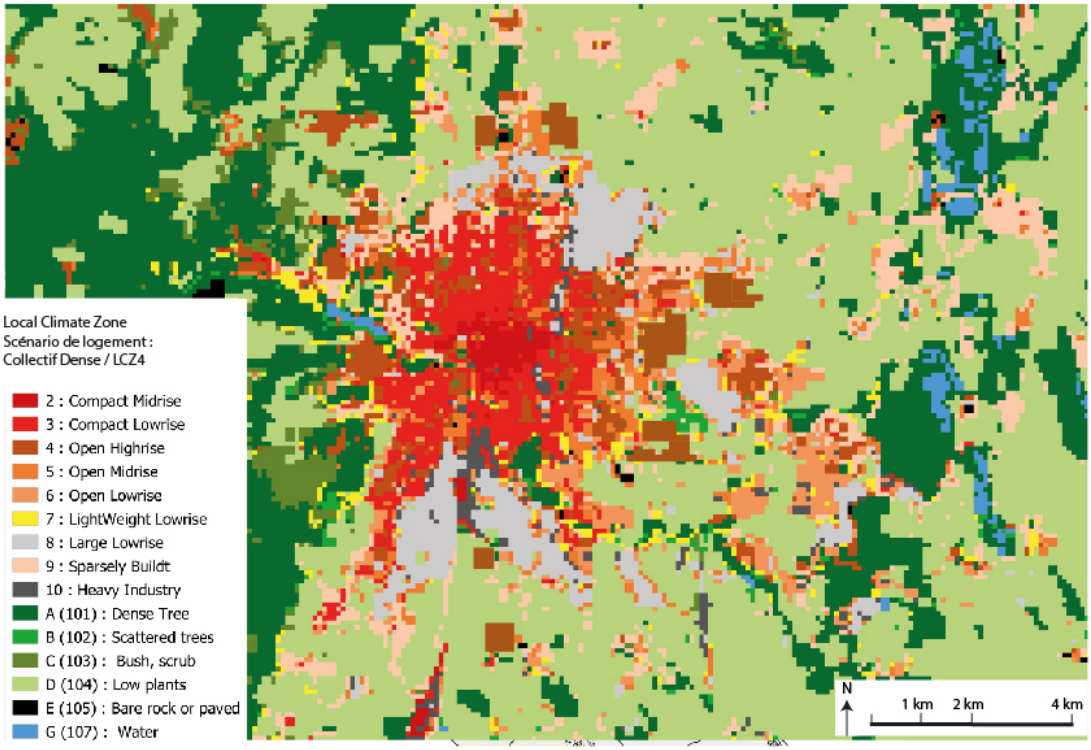


FIGURE 8.63 – Résultat des simulations de croissance urbaine pour les scénarios de logements collectifs denses (LCZ 4)

Maintenant que les mailles nouvellement bâties pour chaque scénario sont connues et mises au format adéquat (Latitude, Longitude, Valeur), la paramétrisation du modèle Meso-NH ainsi que l'intégration des scénarios de croissance urbaine peuvent être effectuées.

8.5 SYNTHÈSE

La figure 8.64 rassemble l'intégralité des éléments présentés jusqu'alors. Les bases des données d'entrées du modèle atmosphérique Meso-NH et du modèle de croissance urbaine MUP-City sont exposées lors de la partie précédente (8.64. C). Ce chapitre s'est focalisé sur la construction de la scénarisation et la construction d'une base de données pour les modèles atmosphériques et de croissance urbaine (8.64. A et B). L'étude synchronique et diachronique de Dijon Métropole, réalisée lors du chapitre IV, permet d'établir un scénario exploratoire tendanciel de nombre de logements. Sur les bases de l'évolution démographique et du "point mort", 35 054 nouveaux logements sont établis à l'horizon 2050. L'ensemble des calculs présentés dans ce chapitre est reproductible quel que soit le terrain d'étude. Les bases de données (Bâti, voirie et zones inconstructibles,) peuvent être mobilisées par les acteurs. La base de données MApUCE, disponible en libre accès, permet à toute communauté urbaine de disposer des données nécessaires pour réaliser cette étude. Les cinq scénarios élaborés dans cette thèse ne sont que des représentations possibles de la croissance urbaine de Dijon Métropole selon plusieurs variables sélectionnées, connues et maîtrisées. L'attribution de formes urbaines aux scénarios peut, du fait qu'il n'existe pas de relation entre la forme urbaine et le nombre de logements, se révéler complexe. L'utilisation des LCZs sur Dijon Métropole (EMERY et al. 2017 ; RICHARD et al. 2018), ainsi qu'une étude urbaine préalable du milieu urbain à modéliser permet de construire des formes urbaines réalistes. Pour cette étude, les scénarios sont volontairement contrastés afin de constater des différences lors de l'étude du climat urbain. La construction de scénarios est un exercice complexe car il est nécessaire de garder une cohérence d'ensemble et de rester le plus réaliste possible.

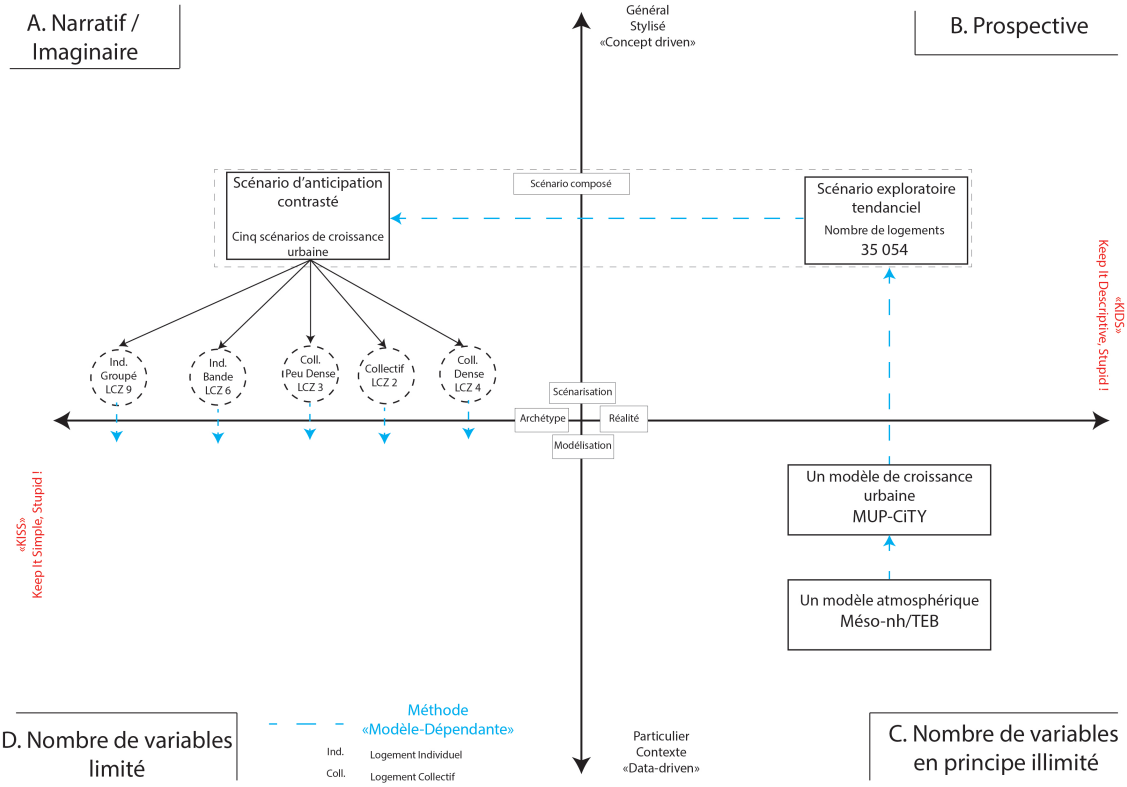


FIGURE 8.64 – Construction de la méthode 'modèle-dépendante" à travers l'approche KISS/KIDS. Adaptée de BANOS et SANDERS 2012

CHAPITRE IX : SIMULATION CLIMATIQUE : PARAMÉTRISATION ET ANALYSE DES BIAIS

Ce chapitre a pour vocation de présenter l'intégration des scénarios de croissance urbaine dans le modèle atmosphérique, la confrontation de la simulation de contrôle aux températures mesurées par le réseau *in situ* MUSTARDijon ainsi que les résultats de l'impact des scénarios d'urbanisation sur ls températures. L'utilisation même de modèle pour simuler la réalité par la simplification des processus la composant introduit des biais, autrement dit, des différences entre la simulation et l'observation. Caractériser ces différences est primordial pour connaître les forces et faiblesses de la chaîne de modélisation pour simuler différents processus. Cette nouvelle étape permettra d'analyser l'impact des différents scénarios de croissance urbaine sur les températures. La confrontation de la simulation aux observations peut être effectuée car le réseau MUSTARDijon est présent sur notre terrain d'étude. Ainsi, ce chapitre a un double objectif. Le premier est consacré à une analyse des scénarios de croissance urbaine et à la présentation des différentes étapes de simulation. Le second objectif vise à caractériser les biais de températures, temporels et spatiaux, à 2m et potentielles lors du couplage des modèles Meso-NH et TEB aux résolutions de 450m et 150m. La paramétrisation du modèle MUP-City a été présentée dans un précédent chapitre. Les scénarios sont établis ainsi que leur LCZ respectif. Ceux-ci vont être intégrés dans le modèle atmosphérique Meso-NH dont les différentes étapes seront présentées. L'analyse présente systématiquement une confrontation entre la température simulée par Meso-NH avec la ville actuelle (simulation de contrôle) et la température observée (réseau MUSTARDijon). Afin de caractériser cette différence, on parle alors de biais. L'ensemble de la période d'étude (du 22 Juillet minuit au 26 Juillet 2018 à 6h [58]) est analysée à travers trois filtres. Le premier avec les différences spatiales entre la simulation et les températures du réseau MUSTARDijon, le second est temporel et le troisième est une analyse des températures simulées potentielles et à 2m par LCZ. Enfin, les résultats des simulations climatiques pour chaque scénario seront présentés.

À travers la construction d'une méthode permettant de concilier croissance urbaine et étude climatique

58. une durée totale de 126h

en milieu urbain, cinq scénarios de croissance urbaine sont élaborées, chacun reposant sur une LCZ. Ceux-ci sont spatialisés à l'aide du logiciel de croissance urbaine MUP-City. La simulation de contrôle et sa confrontation au réseau MUSTARDijon a montré que les températures simulées la nuit en milieu rural étaient supérieures à l'observation, réduisant l'intensité de l'ICU de plusieurs degrés. *Dans quelles mesures les scénarios de croissance urbaine, associés à différentes formes urbaines, impactent-ils les températures en milieu urbain ?* Au travers de ce questionnement, la sensibilité du modèle atmosphérique Meso-NH à différentes formes urbaines est abordée. L'analyse est menée sur les différences entre les températures simulées selon les cinq scénarios de croissance urbaine et la température issue de la simulation de contrôle. Toutes les comparaisons sont effectuées selon trois critères : l'ensemble de l'espace de Dijon Métropole, l'étude de l'ICU et les secteurs clés car dotés d'une sonde MUSTARDijon et bâtis ou non selon le scénario.

9.1 INTÉGRATION DES SCÉNARIOS DE CROISSANCE URBAINE

La configuration du modèle de simulation climatique Meso-NH se réalise en trois étapes successives présentées dans la figure 9.65. Cette étape de paramétrisation du modèle de climat urbain est le principal obstacle à l'intégration de l'étude du climat dans les collectivités ou dans les textes législatifs car celle-ci est complexe. Une synthèse de l'ensemble des fichiers d'entrées pour chaque étape de simulation est présente en Annexe 9.4. Pour notre étude, l'étape préalable est de disposer de fichier de sortie AROME toutes les 3 heures du 22 Juillet 2018 au 27 Juillet 2018 à minuit, soit un total de 144 fichiers. Le modèle AROME, de 1.3km de résolution, est utilisé pour forcer le modèle Meso-NH aux bornes (Fig. 9.65. Pré requis).

Lors de la première étape (Fig. 9.65. Etape 1), la projection, la résolution horizontale et la taille des domaines sont définies. Pour ce travail, les modèles TEB (MASSON 2000), TEB_Garden (LEMONSU et al. 2012) et ISBA (NOILHAN et PLANTON 1989) sont les modèles de surface utilisés avec les bases de données ECOCLIMAP (domaine 1 et domaine 2) ou MApUCE (domaine 3). Pour rappel, afin d'assurer une descente d'échelle continue, le Domaine 1 a une résolution de 1350m, le domaine 2 : 450m et enfin le domaine 3 : 150m. Par ailleurs, c'est lors de cette étape que de nouveaux fichiers d'occupation des sols peuvent être fournis à la place d'ECOCLIMAP (dans notre étude, les fichiers MApUCE avec les scénarios de croissance urbaine). Les données MApUCE sont à une résolution de 100m tandis que notre domaine d'étude des températures urbaines possède une résolution de 150m. Il est nécessaire d'utiliser un système d'information géographique (SIG) afin d'agréger les données MApUCE à la résolution souhaitée de 150m. En géographie, l'agrégation spatiale est un champs de recherche majeur (OPENSHAW 1981 ; UNWIN 1993 ; STEWART FOTHERINGHAM et ROGERSON 2009). La méthode d'agrégation spatiale est une démarche "*bottom-up*" qui consiste à restituer au sein d'un maillage (ou d'un espace) une ou plusieurs entités (ainsi que leurs attributs) qui seront représentatives des caractéristiques de la zone. Si deux entités de MApUCE (ou plus) peuvent être agrégées dans une maille de 150m, alors les attributs de la maille de 150m seront égaux à la moyenne des attributs des entités MApUCE. Lorsque les fichiers sont au format adéquat et géoréférencés correctement, le reste des étapes de paramétrisations peut être effectué. Le module CANOPY de TEB est activé au sein du domaine 3. Ce module permet de détailler la couche

limite de surface à l'intérieur et au-dessus de la canopée urbaine et ainsi d'améliorer les prévisions des différentes variables à l'intérieur du canyon urbain (HAMDI et MASSON 2008 ; MASSON et SEITY 2009). La température de l'eau des lacs de Dijon Métropole est fixé à 293 Kelvin, soit 19.85°C, afin de simplifier les données d'entrées nécessaires pour le modèle [59].

Sur les bases de la première étape, la seconde consiste à l'interpolation verticale et horizontale des fichiers atmosphériques au sein et entre les domaines de simulation (Fig. 9.65. Etape 2).

La dernière étape consiste en la sélection des paramètres du lancement de la simulation (Fig. 9.65. Etape 3). L'idée est ici de présenter sommairement une liste des principaux éléments de paramétrisation du lancement d'une simulation Meso-NH. La durée de la période simulée doit être renseignée (en seconde). Il est à préciser que les simulations sont effectuées jour par jour (un fichier de sortie par jour simulé). Ainsi la durée d'un segment de simulation est égale à une journée [60], un restart est effectué à partir du dernier fichier de sortie du jour précédant. Le pas de temps de calcul du domaine 1 est fixé à 20 secondes, le pas de temps du domaine 2 est de 4 secondes et le pas de temps de calcul du domaine 3 est de 1 seconde. Le rapport de parentalité est établi entre chaque domaine. Le mode de communication *1-way* entre chaque domaine est sélectionné pour ce travail.

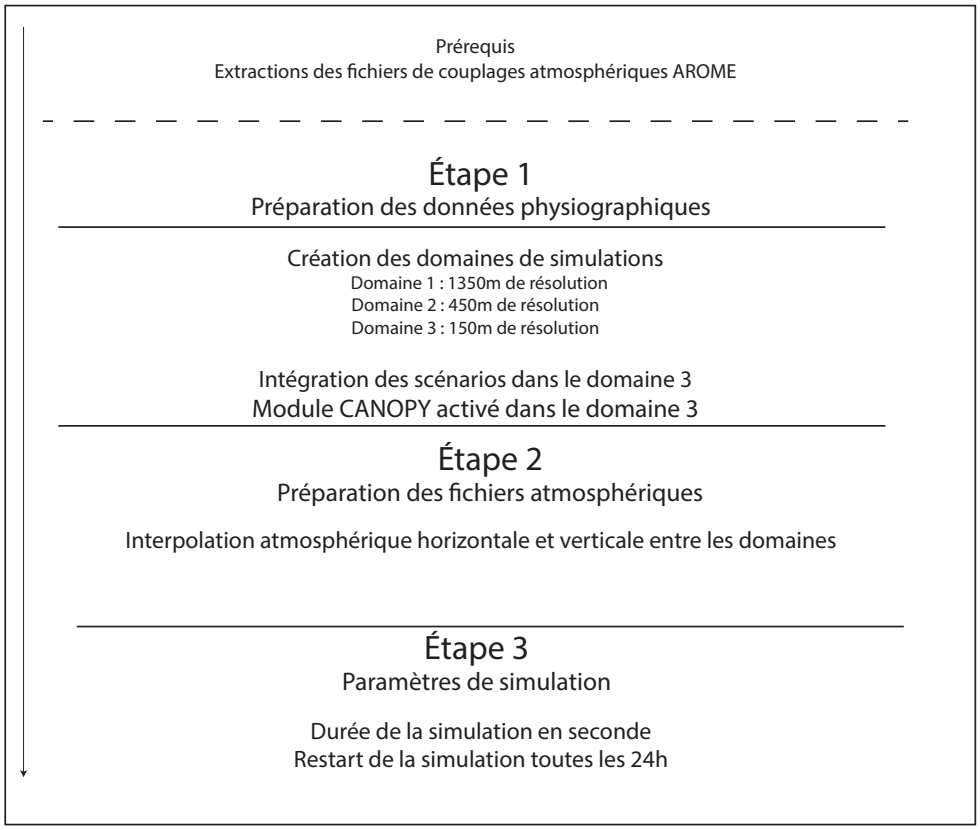


FIGURE 9.65 – Tableau synthétique des étapes de simulation de Meso-NH pour 3 domaines de simulations

59. NAM_PREP_WATFLUX XTS_WATER_UNIF = 293.0
60. XSEGLEN= 86 400 (secondes)

9.2 CARACTÉRISATION DES BIAIS DE LA SIMULATION DE CONTRÔLE

Cette section a pour vocation d'identifier les variables, les zones et les temporalités où la simulation de contrôle présente des biais peu importants. Pour ce faire, il s'agit de comparer spatialement et temporellement, à l'aide d'indice thermique (ICU), les températures potentielles et à 2m avec les données observées. La comparaison porte sur les domaines 2 et 3 et sur l'ensemble de la période d'étude. Concernant la température simulée par Meso-NH, deux champs seront analysés : la température à 2m et la température potentielle (5 mètres) du premier niveau sigma dont la hauteur est de 10 m. Par ailleurs, comme le domaine 3 est compris dans le domaine 2 et que le modèle est paramétré en "*1-way*", l'étude des températures à 2m et potentielles du domaine 2 permet d'étudier la cohérence d'ensemble. La présentation des températures simulées, à 2m et potentielles, sur l'ensemble de la période rendra compte des biais temporels. L'analyse par LCZ permettra, quant à elle, de sélectionner la température, potentielle ou à 2m, pour étudier la sensibilité des températures aux différentes formes urbaines des scénarios établis lors du chapitre précédent.

9.2.1 CHAMPS THERMIQUES OBSERVÉS ET SIMULÉS

Confronter les résultats de la simulation de contrôle aux observations du réseau MUSTARDijon est une étape nécessaire afin de prendre connaissance des biais, temporels et spatiaux des températures. Lac (et al., 2018) expliquent que le modèle TEB présente des biais positifs et que les températures modélisées sont fortement dépendantes des conditions de surfaces(LAC et al. 2018). Dans ses travaux, Daniel (2017) utilise le modèle TEB couplé avec le modèle AROME à 1.3 et 2.5 km de résolution sur l'agglomération toulousaine de février 2004 à février 2005 (DANIEL 2017). Des tests de sensibilité sont réalisés sur les différentes versions de TEB, ceux-ci n'apportent pas d'amélioration par rapport à la version historique voire dégradent les résultats. Ces travaux mettent aussi en avant "*la forte sensibilité des performances du modèle à la qualité des simulations atmosphériques AROME et à la précision des données de surface*". La qualité des données d'entrées est fondamentale pour effectuer des simulations climatiques urbaines viables. La base d'occupation des sols MApUCE est construite dans l'optique d'être utilisée dans des études climatiques en milieu urbain. Pour l'agglomération de Dijon, la présence du réseau MUSTARDijon permet d'étudier finement, tant en termes d'amplitude que spatialement, les biais de modélisation.

Les figures 9.66 et 9.67 présentent la cartographie des températures à partir de l'interpolation spatiale des données observées du réseau MUSTARDijon ainsi que la cartographie des températures simulées à 2m pour les journées du 24 (Fig. 9.66. A1 et B1) et 25 Juillet 2018 (Fig. 9.66. B1 et B2) ainsi que les nuits du 24 au 25 (Fig. 9.67. A1 et B1) et du 25 au 26 Juillet (Fig. 9.67 A2 et B2). Ces périodes d'analyses sont sélectionnées car elles sont représentatives de principales différences entre l'observation et la simulation. La méthode géostatistique du kriegage a été utilisée afin d'obtenir, à partir de données dispersées (sonde du réseau MUSTARDijon), une représentation homogène des informations étudiées (températures). La méthode du kriegage permet donc, à l'aide des mesures de température obtenues en stations, d'estimer les températures sur l'ensemble de Dijon Métropole. La méthode du krigeage se base sur l'auto-corrélation

spatiale des données. Ainsi, deux données spatialement proches tendent à posséder des caractéristiques similaires (ARNAUD et EMERY. 2000).

Les températures interpolées sur l'ensemble de l'agglomération et les simulations présentent des similitudes. Les températures au sein du milieu urbain sont supérieures aux températures des zones rurales adjacentes (9.66). Pour les deux journées, les températures simulées (Fig. 9.66. B1 et B2) semblent supérieures aux températures interpolées (Fig. 9.66. A1 et A2). Pour la journée du 24 Juillet, les températures simulées (Fig. 9.66. B.1) au sud de l'agglomération [61] semblent supérieures aux températures observées (Fig. 9.66. A.1)

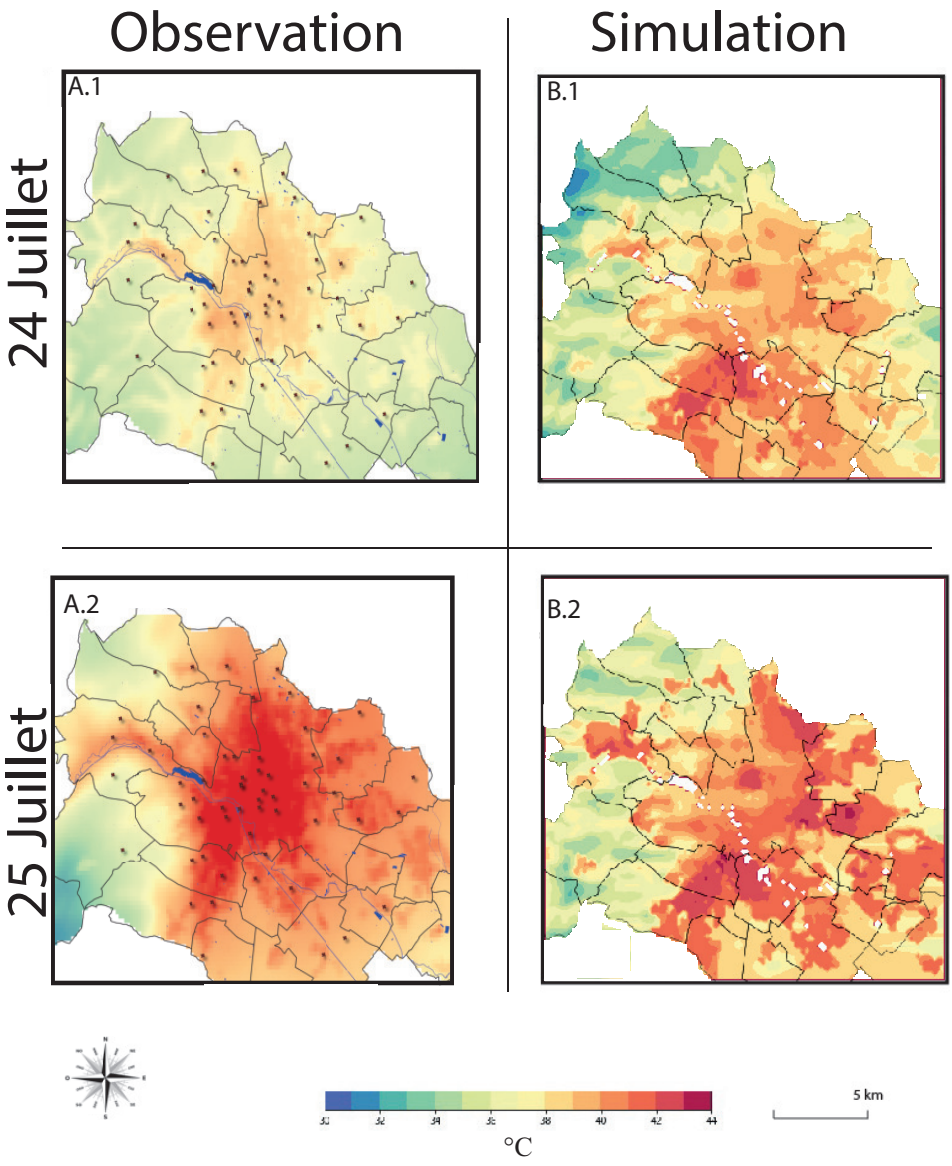


FIGURE 9.66 – Températures interpolées à partir des données MUSTARDijon (A) et simulée à 2m (B) pour les journées du 24 (1) et du 25 (2) Juillet 2018 de 12h à 18h (LT)

61. Communes de Chenôve et Marsannay-la-côte

La figure 9.67 présente la cartographie des températures à partir de l'interpolation spatiale des données observées du réseau MUSTARDijon ainsi que la cartographie des températures simulées à 2m pour les nuits du 24 au 25 (Fig. 9.67. A1 et B1) et du 25 au 26 Juillet (Fig. 9.67. B1 et B2) de 23h à 05h (LT).

Dans la vallée de l'ouche située à l'Ouest de la métropole, une inversion thermique [62] est présente dans le cas des températures interpolées (Fig. 9.67. A1 et A2). Les températures en fond de vallée et dans la plaine sont inférieures aux températures plus en altitude (Sud-Ouest de l'agglomération avec le Mont Afrique). Pour les températures simulées, les températures en zones rurales sont égales ou supérieures aux températures de la zone urbaine. Deux facteurs peuvent être avancés pour expliquer cela. Les flux de chaleur latents en milieu rural tout comme l'inversion thermique peuvent être insuffisamment représentés ou considérés lors du processus de modélisation (Fig. 9.67. B1 et B2).

62. Normalement la température de l'air décroit en fonction de l'altitude. On parle d'inversion thermique quand une masse d'air froide est au-dessous d'une masse d'air chaud

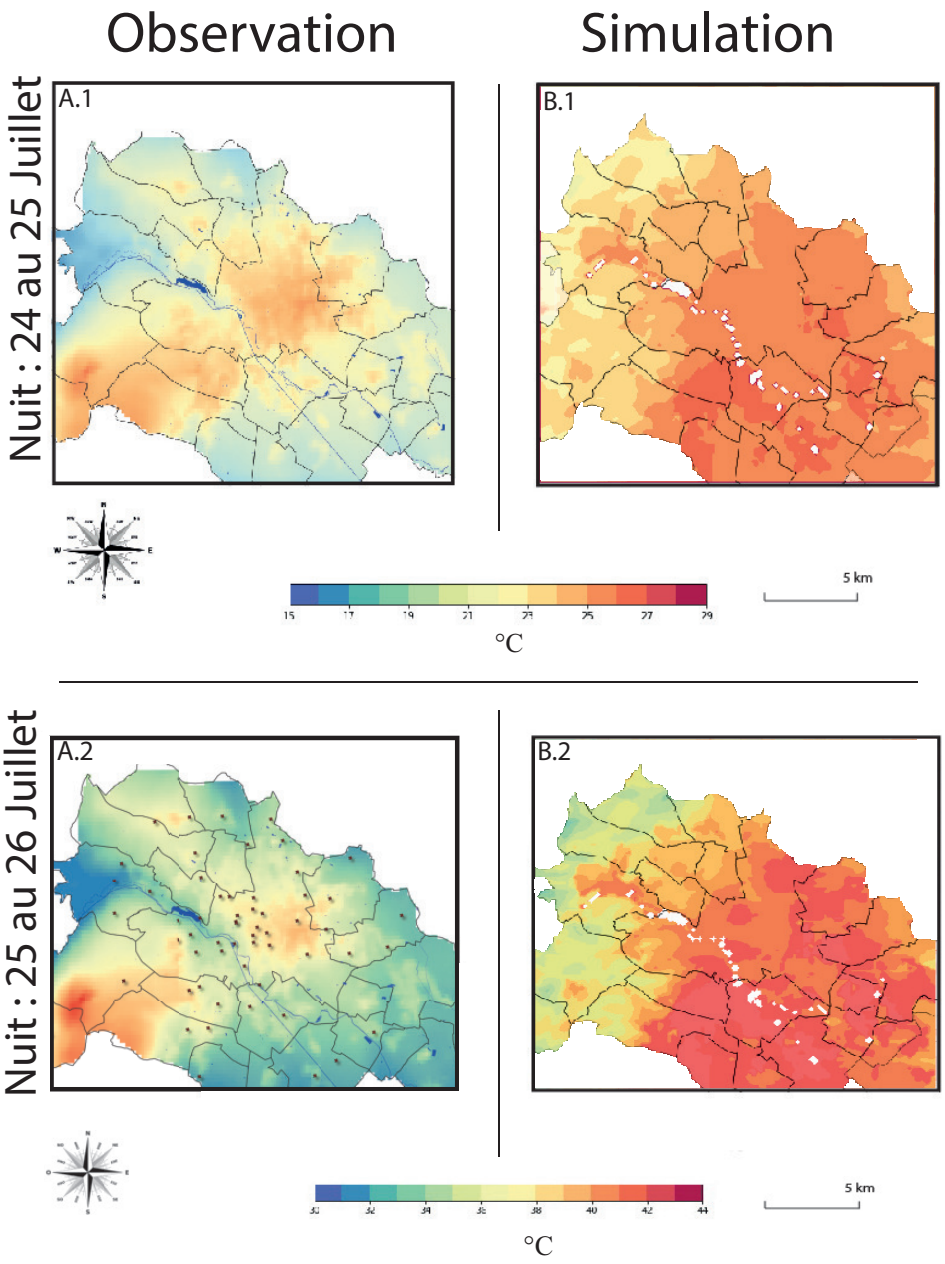


FIGURE 9.67 – Température interpolée à partir des données MUSTARDijon (A) et simulée à 2m (B) pour les nuits du 24 au 25 (1) et du 25 au 26 (2) Juillet 20148 de 23h à 05h (LT)

9.2.2 ANALYSE SPATIALE DES TEMPÉRATURES DU 22 AU 26 JUILLET 2018

Les moyennes des températures à 2 mètres et potentielles simulées de la simulation de contrôle au sein du domaine 2 (450m de résolution) et 3 (150m de résolution) sont comparées avec les températures moyennes mesurées du réseau *in situ* MUSTARDijon pour l'ensemble des heures (de minuit à minuit, Fig. 9.68), des nuits (de 23h à 5h, Fig. 9.70) et des après-midi (de 12h à 18h, Fig. 9.69).

La figure 9.68 présente les moyennes spatialisées des températures simulées à 2m, potentielles et relevées

pour chaque journée de la période d'étude. Les températures augmentent au cours de la période simulée, ce qui correspond à l'augmentation des températures au cours de la période étudiée montrée en chapitre IV.

Les températures simulées à l'Ouest de l'agglomération (sur le plateau) sont inférieures à celles relevées dans l'agglomération. Pour les domaines 2 et 3, les températures minimales potentielles sont supérieures aux températures minimales à 2m (sauf la journée du 22), mais les températures maximales potentielles sont inférieures aux températures maximales à 2m. Ainsi, les amplitudes des températures à 2m au sein des deux domaines sont supérieures à l'amplitude des températures potentielles. Cet écart de température s'explique par des températures relevées à 2m en milieu urbain supérieures aux températures potentielles en milieu urbain. Un écart de température à 2m important est présent entre les mailles urbaines et végétalisées, notamment pour les températures simulées à 2m du 23 Juillet. Cet effet "seuil" s'explique par le fait que, dans les simulations, les températures à 2 mètres sont fortement dépendantes de l'occupation des sols.

L'analyse de la figure 9.68 renforce les résultats de l'analyse temporelles des températures à 2m et potentielles menée précédemment. Les températures à 2m sont plus chaudes que les températures observées, notamment en milieu urbain. Les températures potentielles sont légèrement inférieures à l'observation mais aucune différence notable de température potentielle n'est visible entre le milieu urbain et le milieu rural.

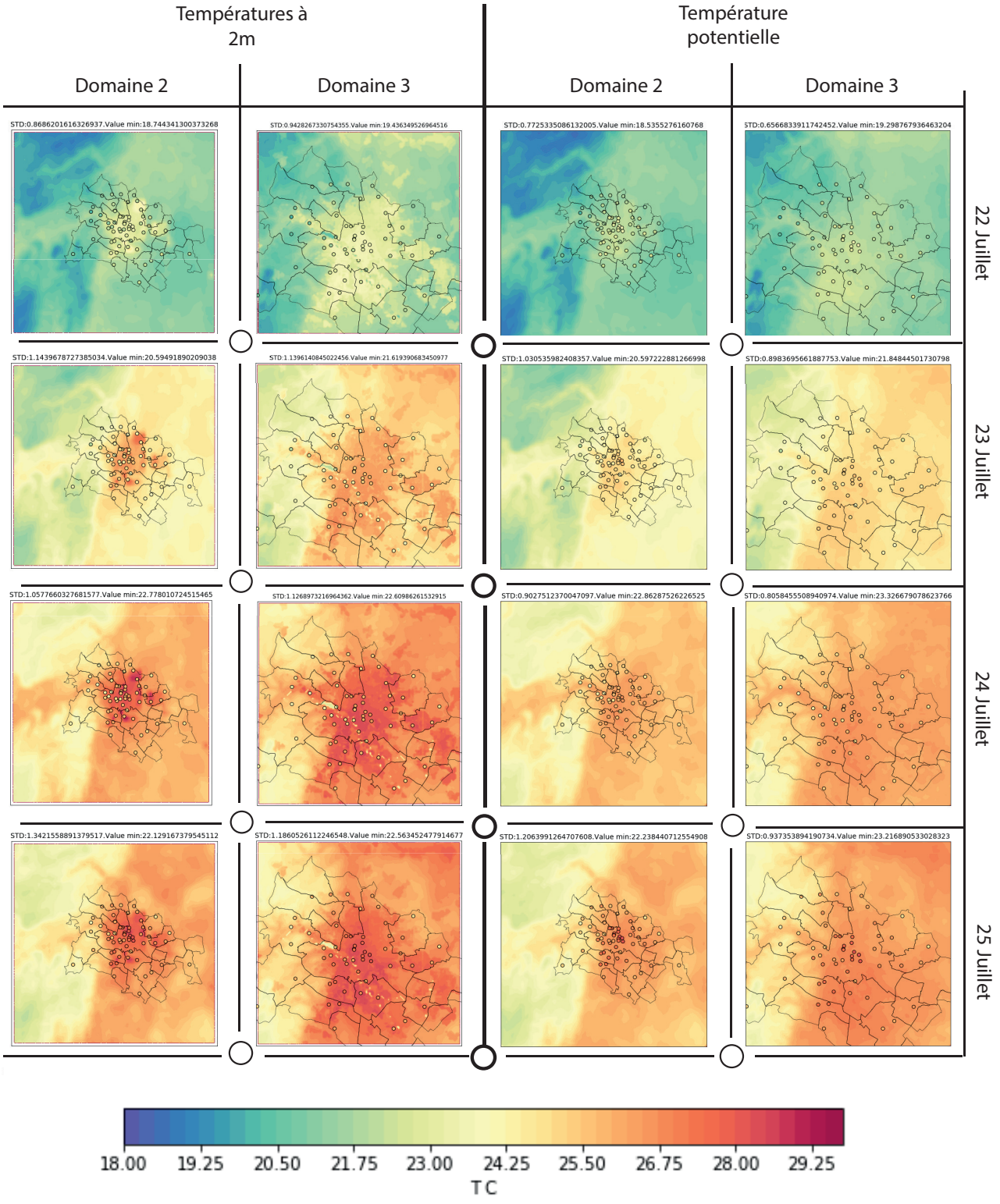


FIGURE 9.68 – Moyenne des températures à 2m et potentielles journalières simulées et mesurées pour les domaines 2 et 3.

9.2.3 ANALYSE SPATIALE DES TEMPÉRATURES SIMULÉES NOCTURNES ET DIURNES

Les figures 9.69 et 9.70 présentent respectivement les moyennes spatialisées des températures simulées à 2m, potentielles et relevées de 12h à 18h (LT) et de 23 à 05h (LT) pour chaque journée.

L'analyse de la figure 9.69 met en avant des différences marquées de température à 2m pour le domaine 3 entre le milieu urbain et rural. Cela confirme les résultats de l'analyse temporelle des températures à 2m et potentielles de 12h à 18h menée précédemment (Fig.9.71). Les températures à 2m simulées sont plus chaudes que les températures observées, notamment en milieu urbain mais les températures à 2m et potentielles en milieu rural sont supérieures (de 1°C maximum) ou égales aux observations. Cela rejoint l'analyse de l'ICU (Fig.9.72) qui mettait en avant un ICU simulé présent durant la journée mais qui n'est pas observé. L'analyse de la figure 9.70 confirme, elle aussi, les résultats de l'analyse temporelle des températures à 2m et potentielles de 23h à 05h menée précédemment (Fig.9.71).

En milieu urbain, des températures à 2m sont plus chaudes que les températures observées, mais des températures à 2m et potentielles rurales sont plus élevées que celles observées. Les différences de température potentielle du domaine 3 entre le milieu urbain et rural ne sont pas marquées. Pour les domaines 2 et 3, les températures minimales potentielles sont supérieures aux températures minimales à 2m (sauf la journée du 22), mais les températures maximales potentielles sont inférieures aux températures maximales à 2m. Ainsi, les amplitudes des températures à 2m au sein des deux domaines sont supérieures à l'amplitude des températures potentielles. Cet écart de température s'explique par des températures à 2m en milieu urbain supérieures aux températures potentielles en milieu urbain. La différence de température entre milieu urbain et rural à 2m pour sur l'ensemble des journées (Fig. 9.69) est supérieure à celle des nuits (Fig. 9.70). Dans la simulation, l'ICU est plus marqué en journée que dans la nuit.

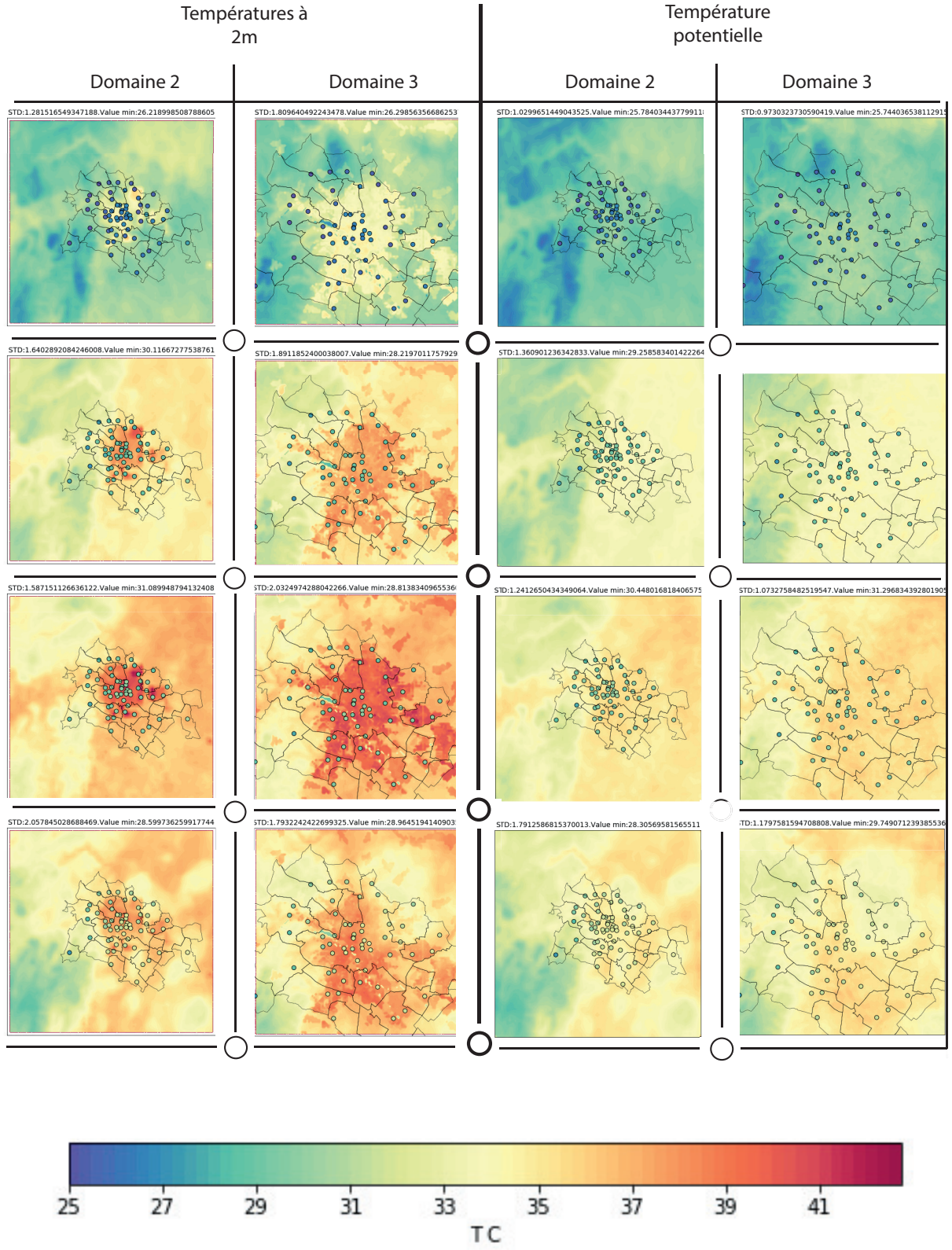


FIGURE 9.69 – Moyenne des températures à 2m et potentielles de 12 h à 18h simulées et mesurées pour les domaines 2 et 3.

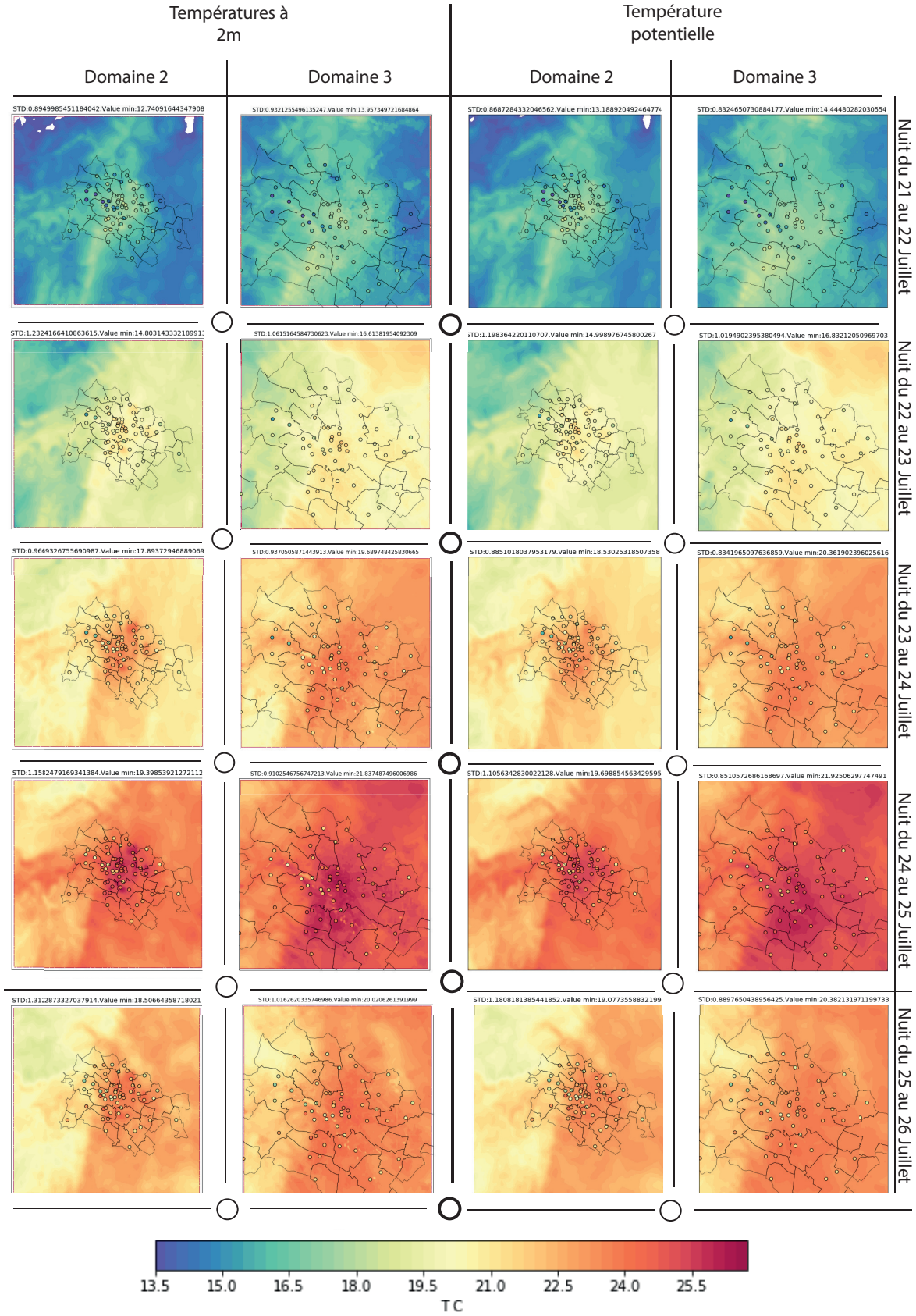


FIGURE 9.70 – Moyenne des températures à 2m et potentielles de 23h à 5h simulées et mesurées pour les domaines 2 et 3.

9.2.4 ANALYSES TEMPORELLES

9.2.4.1 Température à 2 mètres

Les figures 9.71 et 9.73 présentent respectivement les températures à 2m et potentielles pour la localisation de quatre sondes urbaines et rurales. Leur comparaison avec les températures observées du réseau MUSTARDijon met en avant que le cycle diurne est correctement modélisé ainsi qu'une augmentation des températures simulées au cours de la période, ce qui est cohérent avec les températures observées (Fig. 9.71 et Fig. 9.73). Pour rappel, la température à 2m est calculée en fonction de l'occupation des sols et de la température potentielle du voxel.

Les températures simulées en milieu urbain sont, durant les journées du 22, 23 et 24 (12h à 18h), supérieures de 2.2°C (3.8°C maximal le 24 Juillet) aux températures observées en milieu urbain. Pour les matinées (6h - 11h), les températures simulées et observées en milieu urbain sont similaires avec un écart moyen inférieur à 0.27°C. Lors des nuits du 21 au 22 et 22 au 23, les températures observées sont supérieures aux températures simulées. Cette tendance s'inverse pour les nuits suivantes avec des températures modélisées supérieures de 1°C en moyenne (2°C maximal la nuit du 25 au 26) aux températures observées. Par ailleurs, durant la journée du 25 Juillet, les températures simulées en milieu urbain sont inférieures de 2.7 °aux températures observées (Fig. 9.71).

Les températures simulées en milieu rural sont, durant les journées du 22, 23 et 24 (12h à 18h), supérieures de 0.7°C (1.0°C maximal le 24 Juillet) aux températures observées en milieu rural. Pour les matinées (6h - 11h), les températures simulées et observées en milieu rural sont similaires avec un écart moyen inférieur à 0.25°C. Nous pouvons aussi noter que pour la journée du 24, les températures simulées en milieu rural sont supérieures aux températures observées en milieu urbain. En revanche, pour les températures simulées en milieu rural pour les nuits, les écarts de températures avec les valeurs observées sont importantes avec des températures simulées supérieures de 2.5°C en moyenne et de 5°C maximal pour la nuit du 25 au 26 (Fig. 9.71).

Globalement, les températures à 2m simulées en milieu urbain et rural sont plus chaudes que les températures observées tant pour les journées que pour les nuits. Ainsi, les températures urbaines et rurales en journée ont tendances à être surestimées par le modèle tandis que le refroidissement nocturne en milieu rural est sous-estimé (Fig. 9.71).

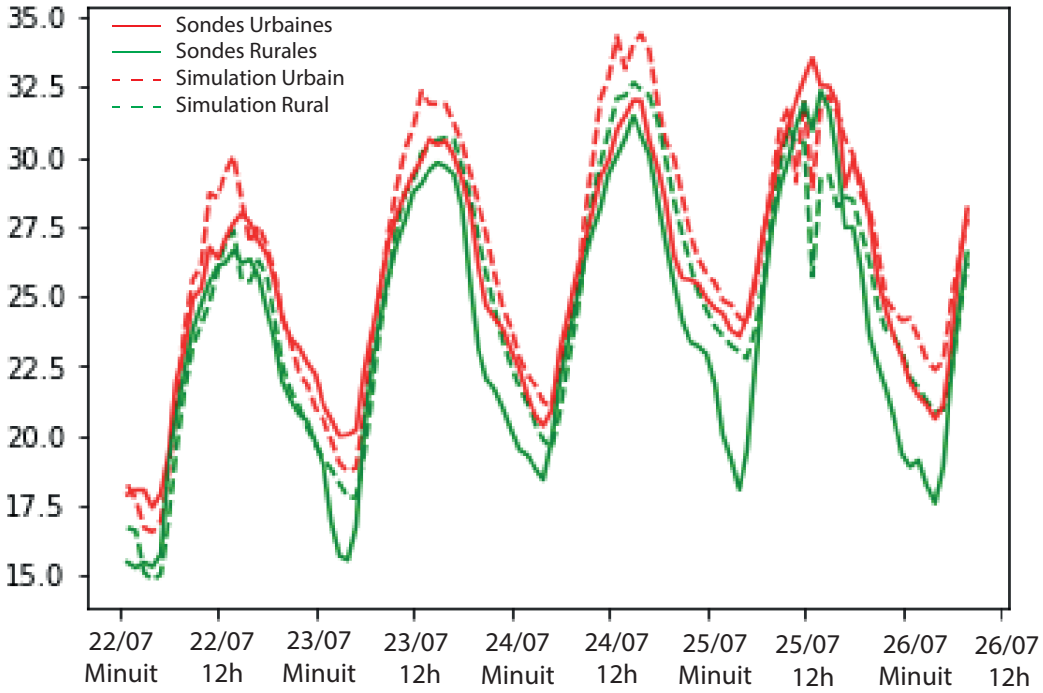


FIGURE 9.71 – Température à 2m horaire des indices urbains et ruraux

La figure 9.72 présente l'ICU à 2m modélisé et observé pour l'ensemble de la période. Durant les journées, l'ICU simulé à 2m est supérieur de 1°C (maximum 3.8°C d'écart pour la journée du 22 Juillet) à celui observé. En revanche, pour les nuits, du fait du moindre refroidissement des zones rurales, l'intensité de l'ICU simulé est moindre que l'observation. Cela se traduit pour le 22 Juillet par un ICU simulé de 1.3°C et mesuré de 2.8°C, soit une intensité de l'ICU simulé deux fois moindre. Le biais est présent et se renforce au cours des nuits suivantes. Pour la nuit de 22 au 23 Juillet, l'ICU simulé est de 1.6 °C contre 4.5°C environ pour l'observation. Pour la nuit de 23 au 24 Juillet, l'ICU simulé est de 1.2 °C contre 2.8°C pour l'observation. La nuit du 24 au 25 présente la plus forte différence entre l'ICU simulé et observé (1.2°C simulé et 5.5 °C observé, soit un facteur 4.6 environ) Enfin, la nuit du 25 au 26 présente un ICU simulé de 1.8°C contre 4°C observé.

La tendance, mise en avant avec la figure précédant (Fig. 9.71), se confirme. La journée, le modèle surestime les températures à 2m en milieu urbain et rural, la nuit le modèle surestime les températures à 2m en milieu rural uniquement. Cela a pour effet de limiter l'apparition du phénomène d'ICU.

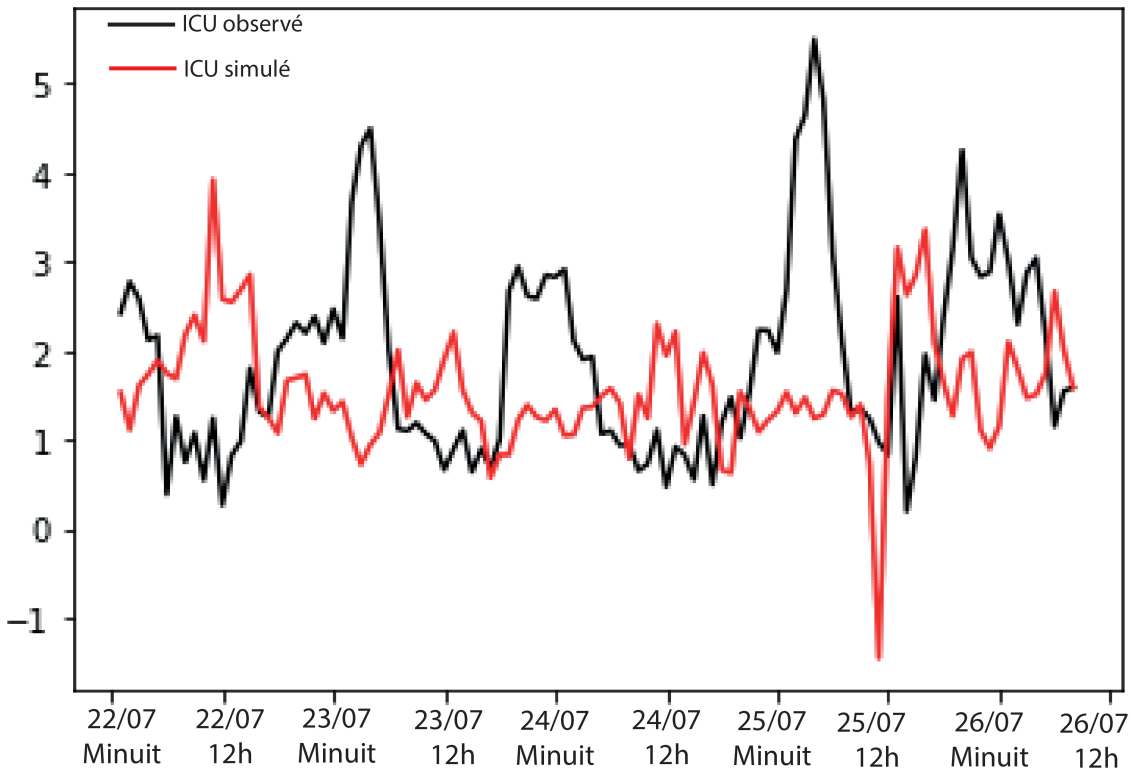


FIGURE 9.72 – Comparaison entre l'ICU simulé (températures à 2m) et l'ICU observé

9.2.4.2 Températures potentielles

Tout comme les températures simulées à 2m, les températures potentielles simulées présentent un cycle diurne ainsi qu'une augmentation des températures au cours de la période (Fig. 9.73). Pour rappel, la température potentielle est calculée au centre du voxel.

Les températures potentielles simulées en milieu urbain sont, pour l'ensemble de la période, inférieures de 0.6°C en moyenne (4.1°C maximal le 25 à 12h) aux températures observées en milieu urbain. Pour les matinées (6h - 11h), les températures simulées et observées en milieu urbain sont similaires avec un écart moyen inférieur à 0.21°C. À l'instar des températures simulées à 2m, lors des nuits du 21 au 22 et 22 au 23, les températures observées sont supérieures aux températures simulées (1.8°C). Là encore, cette tendance s'inverse pour les nuits suivantes avec des températures modélisées supérieures de 0.5°C en moyenne (1.5°C maximal la nuit du 25 au 26) aux températures observées. Par ailleurs, durant la journée du 25 Juillet, les températures observées en milieu urbain sont supérieures de 5°C aux températures simulées.

Les températures potentielles simulées en milieu rural sont, durant les journées du 22, 23, 24 et 25 (12h à 18h), inférieures de 1°C en moyenne (5.8°C maximal le 25 Juillet) aux températures observées en milieu rural. Pour les matinées (6h - 11h), les températures simulées et observées en milieu rural sont proches avec un écart moyen inférieur à 0.13°C. Pour les températures potentielles simulées en milieu rural pour les nuits (23h - 5h), les écarts de températures avec les valeurs observées sont importants avec

des températures simulées supérieures de 2.6°C en moyenne (de 4.7°C maximum pour la nuit du 25 au 26).

Ainsi, les températures potentielles urbaines et rurales, en journée, ont tendance à être sous-estimées par le modèle alors que températures potentielles, la nuit en milieu rural sont, comme les températures à 2m, surestimée.

Les températures potentielles simulées en milieu urbain et rural sont davantage représentatives de la réalité pour les températures de la journée que les températures simulées à 2m. Cependant, pour les températures simulées pendant les nuits, les écarts de température à 2m et potentielles avec les observations sont similaires.

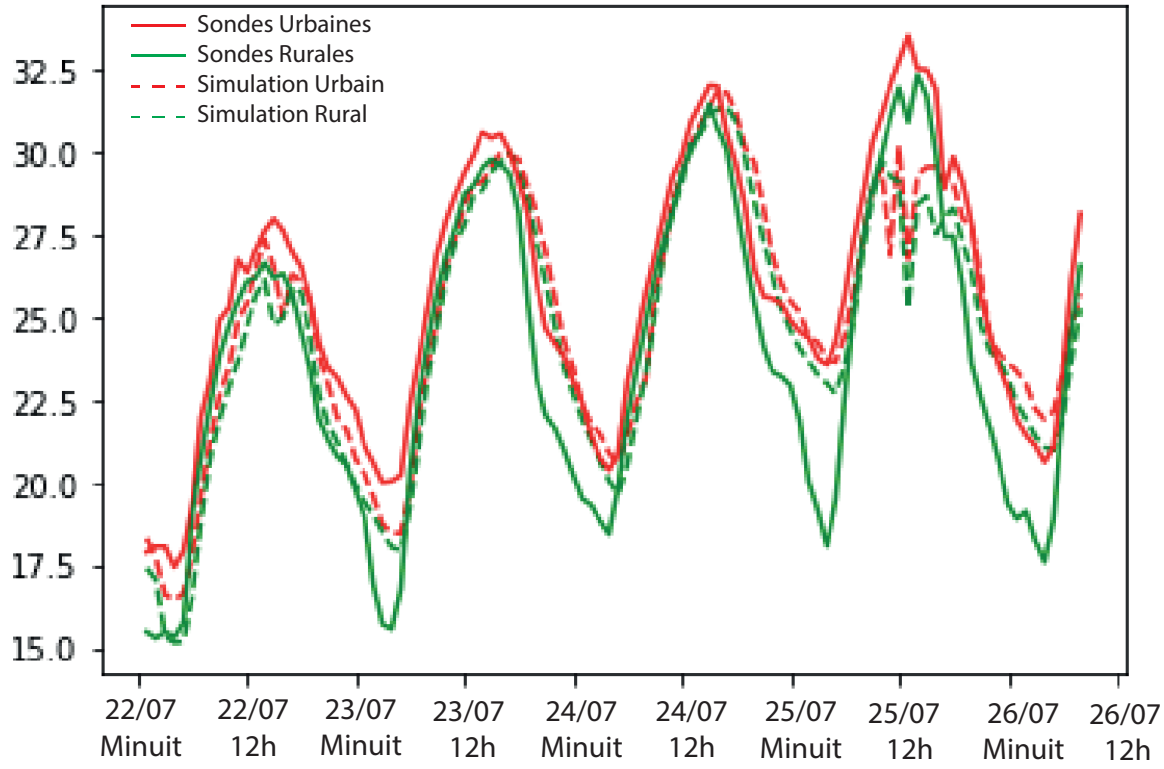


FIGURE 9.73 – Moyennes des températures potentielles simulées et observées des quatre sondes urbaines et rurales pour l'ensemble de la période

La figure 9.74 présente l'ICU [63] potentiel modélisé et observé. Pour l'ensemble de la période, l'ICU simulé est inférieur à celui observé. Ainsi, pendant les journées, l'ICU simulé est inférieur de 0.5°C en moyenne (maximum -2°C d'écart pour la journée du 25 Juillet) à celui observé. Pour les nuits, l'intensité de l'ICU simulé est moindre que l'observation. Cela se traduit pour le 22 Juillet avec un ICU mesuré de 2.8°C et simulé de 0.9°C environ, soit une intensité de l'ICU trois fois moindre. Là encore, la tendance est présente et se renforce au cours des nuits suivantes. Pour la nuit de 22 au 23 Juillet, l'ICU observé est de 4.5°C environ contre 1.0 °C pour la simulation. Pour la nuit de 23 au 24 Juillet, l'ICU observé est de 2.8°C environ contre 0.9 °C pour la simulation. La nuit du 24 au 25 présente la plus forte différence entre l'ICU mesuré et observée (5.5 °C observé contre 0.8°C simulé, soit un facteur 6.8 environ. Enfin, la nuit

63. Différence entre les températures simulées et observées, urbaines et rurales

du 25 au 26 présente un ICU observé de 4°C maximum et simulé de 0.4°C maximum. L'ICU nocturne des températures potentielles est de 1°C.

La tendance d'une intensité d'ICU moindre causée par des températures nocturnes rurales trop élevées mis en avant avec les températures à 2m (Fig. 9.71) est davantage présente pour les températures potentielles.

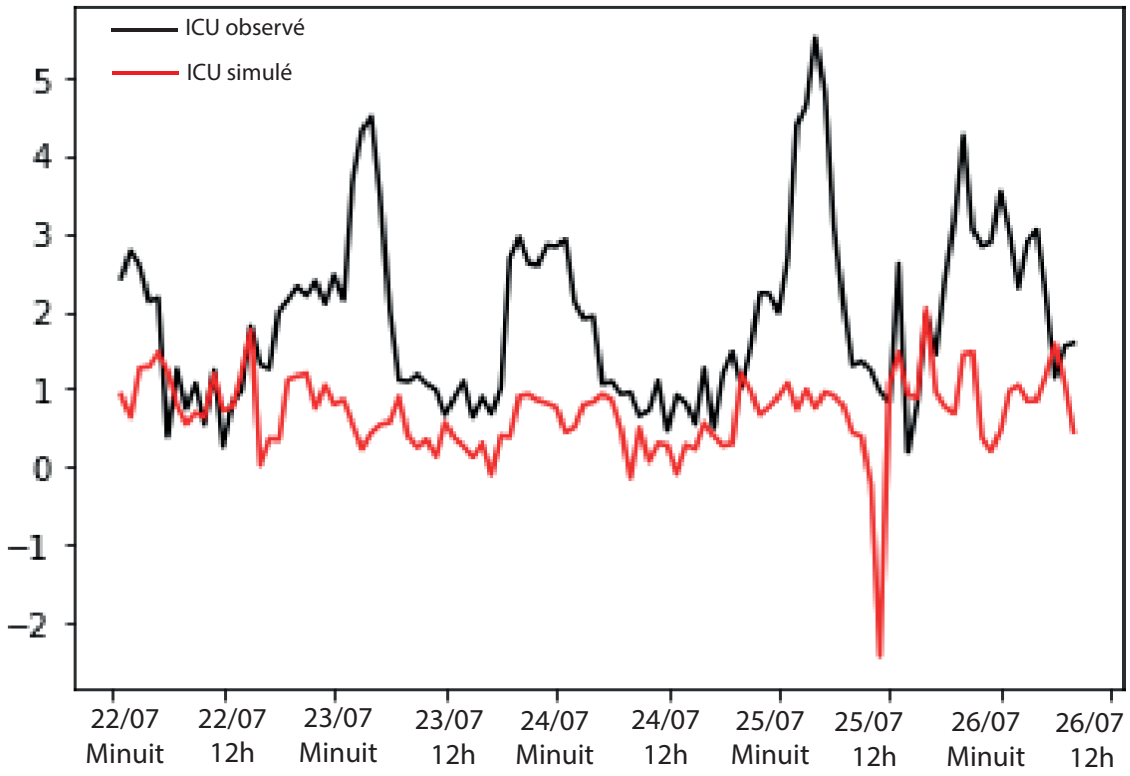


FIGURE 9.74 – Comparaison entre l'ICU simulé (températures potentielles) et l'ICU observé

Les températures nocturnes simulées en milieu rural, potentielles et à 2m, sont supérieures à l'observation. Dans le modèle, le refroidissement nocturne en milieu rural et périurbain est sous-estimé. Cet effet a pour conséquence de limiter l'intensité de l'ICU simulé, jusqu'à un facteur 4 comparé aux observations. Les journées, de 12h à 18h, la différence de température à 2m entre urbain et rural est plus présente. Cela se traduit par des ICU qui n'apparaissent pas la nuit mais en journée. Pour les températures à 2m, la présence de biais chaud en milieu urbain accentue la différence de température, et donc l'intensité de l'ICU, avec le milieu rural. Cela même si un biais chaud est aussi présent en milieu rural. Pour les températures potentielles, le biais chaud en milieu urbain est moins marqué, réduisant la différence de température, mais aussi l'intensité de l'ICU, avec le milieu rural. Les résultats des analyses temporelles (Fig.9.71 et 9.73) tendent à démontrer que les températures potentielles présentent, certes des biais importants, mais sont plus proches des observations que les températures à 2m. L'analyse par LCZ permettra d'affiner ce premier résultat.

9.2.5 ANALYSE PAR LCZS DES TEMPÉRATURES SIMULÉES

L'analyse des températures par LCZ permet de sélectionner les températures, à 2m ou potentielles, qui seront retenues pour étudier l'impact des scénarios sur le climat urbain. La comparaison entre ces deux températures se fera sur le domaine 3 d'une résolution de 150m.

La moyenne diurne des températures à 2m et potentielles est calculée sur l'ensemble de la période d'étude pour chaque LCZ (Fig.9.75). Comparées aux observations par LCZs, le cycle diurne des températures simulées est cohérent. Les températures simulées et observées des LCZs 2 et 3 sont supérieures aux températures des LCZs des zones périurbaines (Fig.9.75. LCZs 4, 5, 6 et 9). De même, les températures observées et simulées pour les LCZs urbaines et périurbaines (Fig.9.75. LCZs 2, 3, 4, 5, 6 et 9) sont supérieures aux températures des LCZs non urbaines (9.75. LCZs 101. 103, 104 et 107). Si l'on compare les températures observées aux températures simulées sur l'ensemble de la période et chacune des LCZs, les températures à 2m (Fig.9.75) présentent, par rapport à l'observation, des biais plus importants que les températures potentielles. Les nuits, les différences de températures entre l'observation et la simulation (Fig.9.75) par LCZs urbaines (LCZs 2, 3, 4 et 5) sont peu marquées. Pour les températures nocturnes simulées des LCZs en zones péri-urbaines (LCZs 7 et 8), des biais sont présents, notamment pour les températures à 2m et la LCZ 7. Pour les températures simulées nocturnes des LCZs rurales (101, 103, 104 et 107), les biais sont plus importants pour les températures à 2m que potentielles. Il peut être remarqué que plus les LCZs font références à des zones periurbaines et (LCZs 7 et 8) et rurales (LCZs 101, 103, 104 et 107), plus les écarts de températures entre l'observation et la simulation sont importants, notamment pour les températures nocturnes et à 2m. L'étude des températures par LCZ permet de sélectionner les températures potentielles pour étudier l'impact des scénarios d'urbanisation sur les températures.

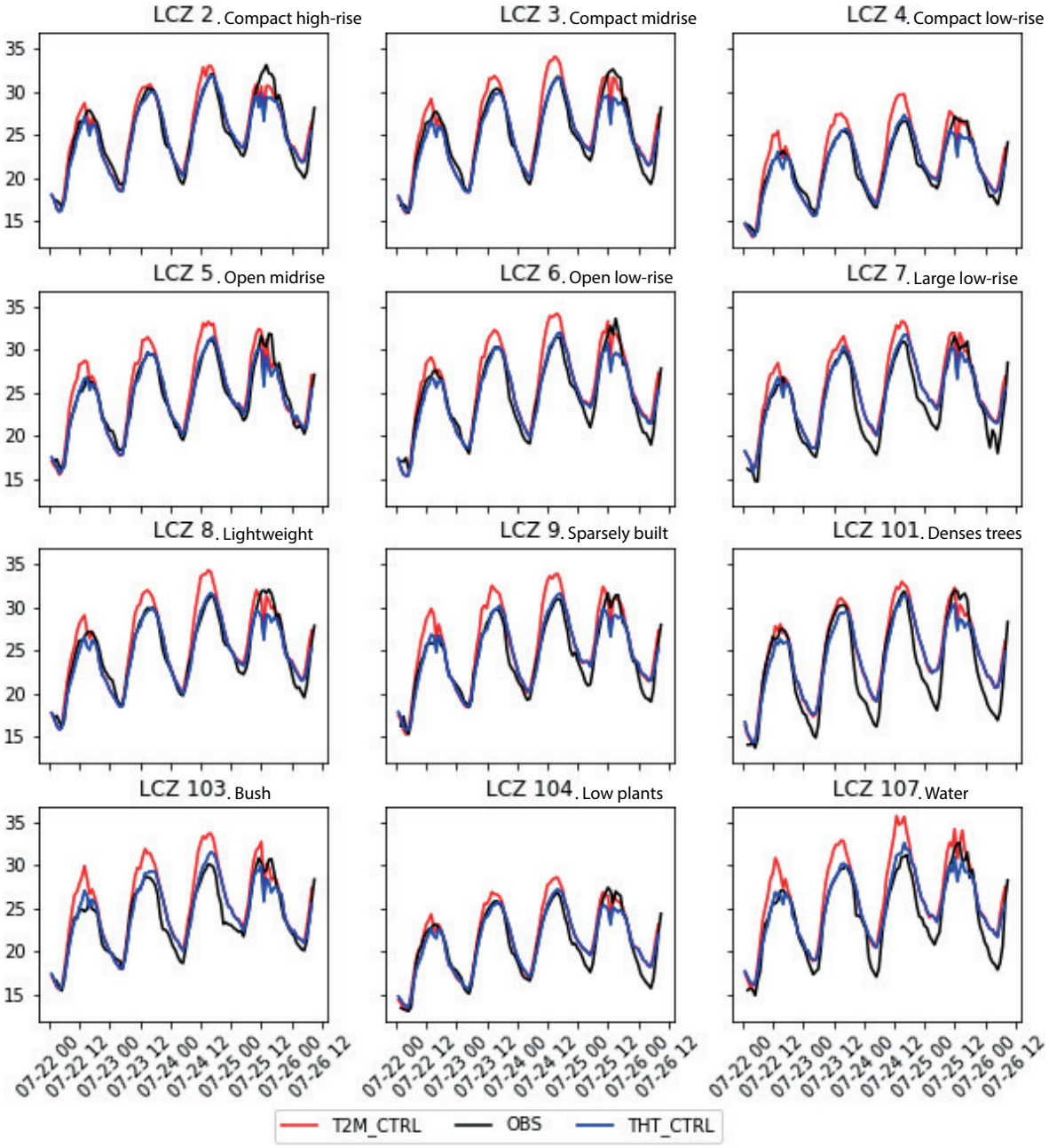


FIGURE 9.75 – Comparaison des observations et des températures potentielles de la simulation de contrôle pour les LCZs pour l'ensemble de la période d'étude. En bleu : les températures potentielles. En rouge : les températures observées

9.3 SENSIBILITÉ DE LA TEMPÉRATURE AUX FORMES URBAINES

9.3.1 ANALYSE JOURNALIÈRE DES TEMPÉRATURES DES SCÉNARIOS DE CROISSANCE URBAINE

Les figures 9.76 présentent les températures moyennes potentielles entre chaque scénario simulé avec la simulation de contrôle pour les journées de 12 à 18h (heure locale). Les différences de températures sont

maximales au cours de ces heures (1.5°C d'amplitude).

Les différences de températures potentielles, pour les deux scénarios de logements individuels avec la simulation de contrôle, montrent des températures potentielles supérieures (entre 1°C et 1.25°C) en fin de période (25 Juillet) pour l'Est de l'agglomération (Fig. 9.76). Pour le scénario Individuels en Bandes (LCZ 6), des températures potentielles inférieures, dans la partie Ouest de l'agglomération, sont visibles le 25 Juillet alors que ces zones n'ont pas été modifiées dans les scénarios.

Dans le cas des scénarios Collectifs Peu denses (LCZ 3) et Collectifs (LCZ 2), les températures potentielles varient peu au sein des zones scénarisées (Fig. 9.76). Pour la journée du 22 juillet, les températures dans le Nord de l'agglomération, zones bâties dans ces scénarios, est supérieure de 1°C environ à la simulation de contrôle. Pour le 23 Juillet, les températures du scénario de logements collectifs peu denses (LCZ 3) sont plus fraîches de 1.25°C que la simulation de contrôle dans la partie Nord-Est (Fig. 9.76). Pour la journée du 25 Juillet, la partie Est de l'agglomération, bâtie dans ces scénarios, est plus chaude de 1.5°C environ par rapport à la simulation de contrôle (Fig. 9.76). Pour le centre de l'agglomération, les températures sont supérieures de 1.25°C à 1.5°C à la simulation de contrôle. Pour rappel, le centre de l'agglomération n'a pas été modifié dans les scénarios de croissance. Cela pose donc la question de la portée du réchauffement des zones périphériques nouvellement construites sur le bâti déjà existant.

Enfin, le scénario de croissance urbaine avec des logements Collectifs Denses présente des températures potentielles moyennes (1.1°C) et maximales (1.5°C) inférieures aux températures des autres scénarios (Fig. 9.76). Lors de la journée du 25 Juillet, les températures simulées potentielles au centre de l'agglomération sont supérieures de 1.0°C environ à la simulation de contrôle. À l'Ouest, les températures potentielles sont inférieures à la simulation de contrôle (-1.5°C à -0.75°C environ).

A la vue de ces résultats, les scénarios qui ont l'impact le plus faible sur les températures, tant en termes d'amplitude des températures que spatialement, sont les scénarios de logements individuels groupés et en bandes ainsi que le scénario de logements denses. Les parts de végétation urbaine pour ces trois scénarios sont les plus importantes de l'ensemble des scénarios avec, respectivement, 67%, 46% et 55% de végétation.

La présence de nuages peut expliquer les zones plus froides à l'Ouest et au Nord des simulations le 25 Juillet (Fig. 9.76). En effet, lors du choix de la période d'étude, il a été avancé qu'aucun nuage n'est présent pour la journée du 25 Juillet. Or, pour les simulations des scénarios de logements individuels groupés (LCZ 6), collectifs peu denses (LCZ 3) et collectifs denses (LCZ 2), une couverture nuageuse inférieure à 1 octa est présente entre 6 000 et 7 500m d'altitude au dessus des zones froides que la simulation de contrôle à l'Ouest et au Nord de l'agglomération. Pour les scénarios de logements collectifs et individuels groupés, la présence de nuages (inférieur à 1 octa) entre 6 000 et 7 500m est moindre, mais est plus importante à 10 000m. En revanche, le 23 Juillet pour le scénario de logements collectifs peu denses (LCZ 3), aucun nuage n'est simulé alors que l'on note la présence d'une zone plus froide que la simulation de contrôle au Nord-Est de l'agglomération.

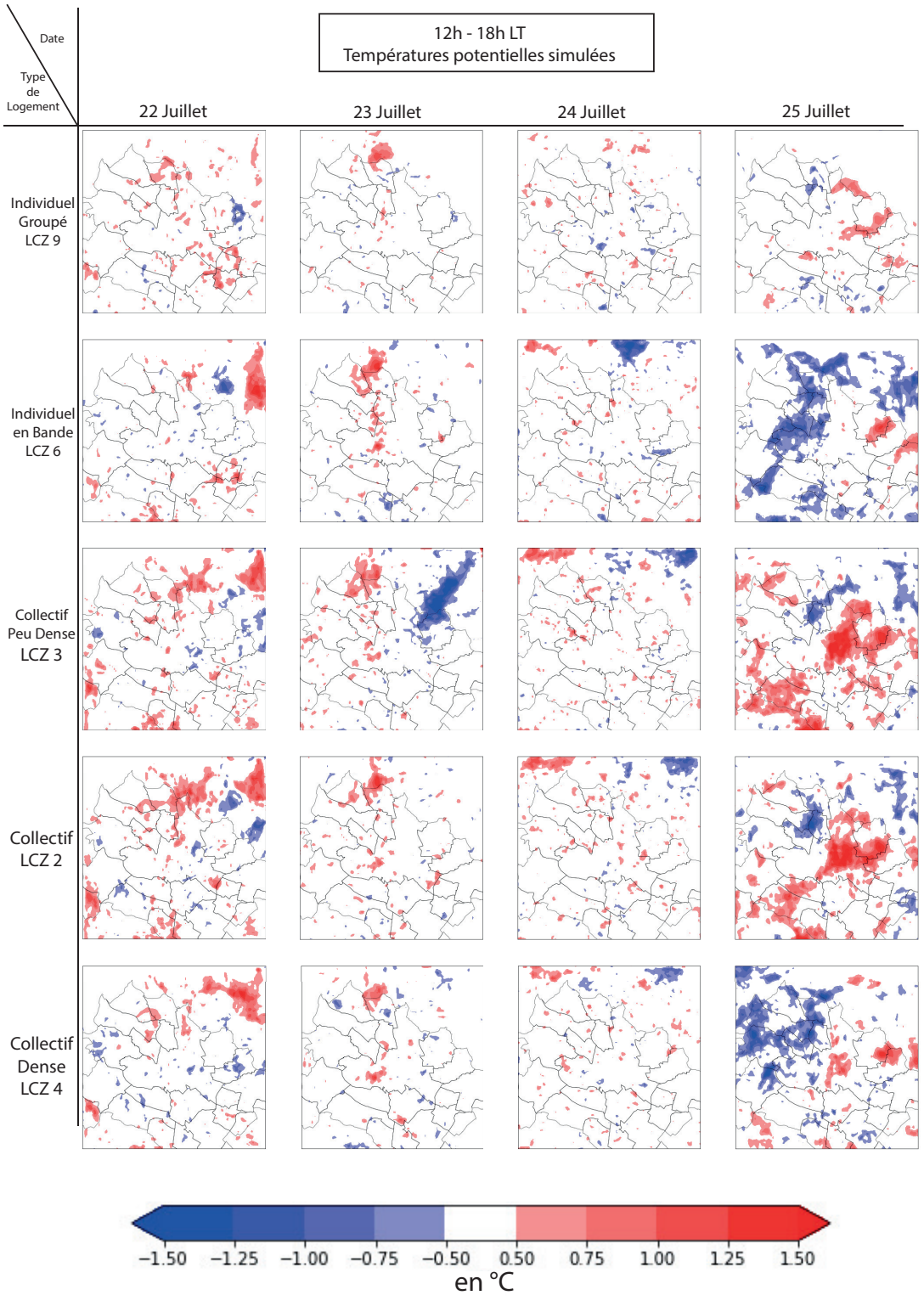


FIGURE 9.76 – Carte des différences de températures potentielles entre chacun des scénarios et la simulation de contrôle pour chaque journée de 12h à 18h (heure locale).

9.3.2 IMPACT DES FORMES URBAINES SUR QUELQUES SECTEURS CLÉS

Selon le scénario, l'emprise spatiale de la croissance urbaine varie. Dans cette rubrique l'attention est portée sur des secteurs clés, dotés d'une sonde MUSTARDijon. Selon le scénario, ces secteurs seront ou ne seront pas bâtis.

9.3.2.1 Secteur de la sonde 54 - LCZ D (route de Couternon)

L'emplacement de la sonde 54 (Route de Couternon, actuellement LCZ - Low plants) a comme spécificité de n'être urbanisée que dans le cas du scénario de logement individuels groupés (LCZ 9). La figure 4.26) présente les différences moyennes des températures potentielles pour la journée (12h - 18h) pour la position de la sonde 54 (Route de couternon) avec la simulation de contrôle.

Une différence de 1°C en moyenne et 3°C maximale avec la simulation de contrôle est présente pour le scénario de logements individuels groupés (LCZ 9). Les températures des autres scénarios varient peu en moyenne. Ainsi, la croissance urbaine et le passage d'une LCZ végétalisée à une LCZ urbaine (LCZ 9) impacte les températures. Aucune différence significative de température moyenne à potentielle n'est présente pour cette maille, malgré la présence des scénarios.

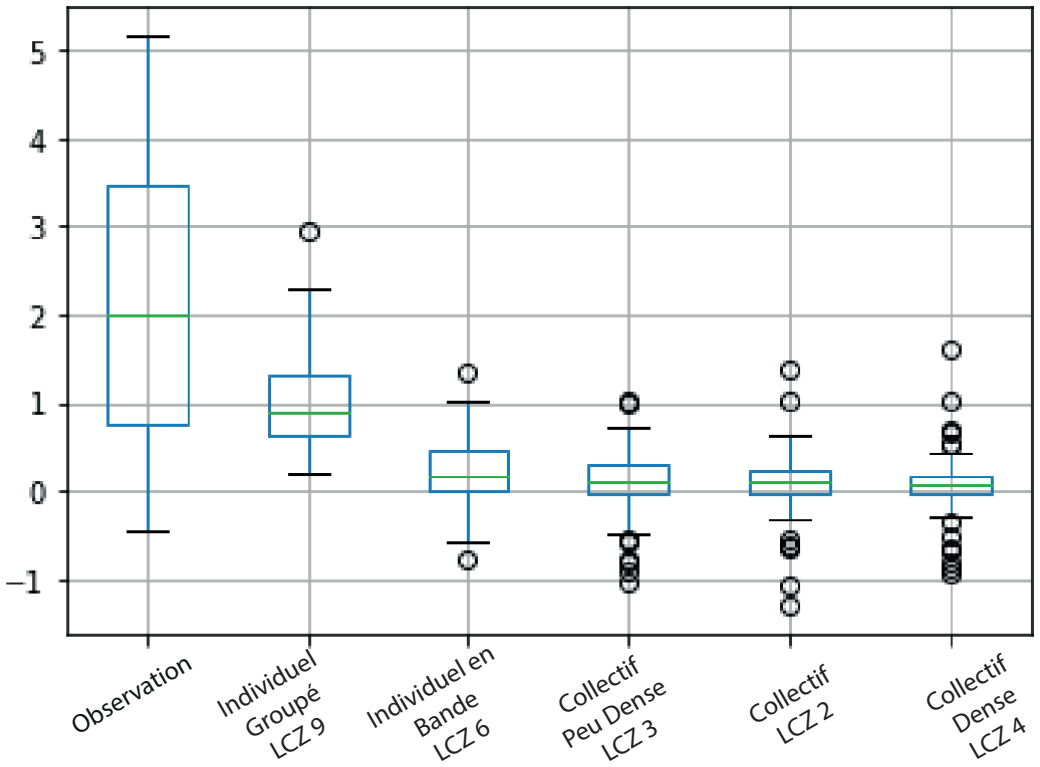


FIGURE 9.77 – Boxplot des différences moyennes des températures potentielles pour la journée (12h - 18h) pour la position de la sonde 54 (Route de couternon) avec la simulation de contrôle

9.3.2.2 Secteur de la sonde 53 - LCZ D (Chemin de Cromois)

L'emplacement de la sonde 53, située sur le chemin de Cromois, actuellement LCZ 6 - Open Low rise, a pour particularité d'être modifiée dans chaque scénario (Fig. 4.26 et 9.76). La figure 9.78 présente les différences des températures potentielles pour la journée (12h - 18h) avec la simulation de contrôle pour la moyenne des températures de la position de la sonde 53 (Chemin de Cromois) pour l'observation et les scénarios.

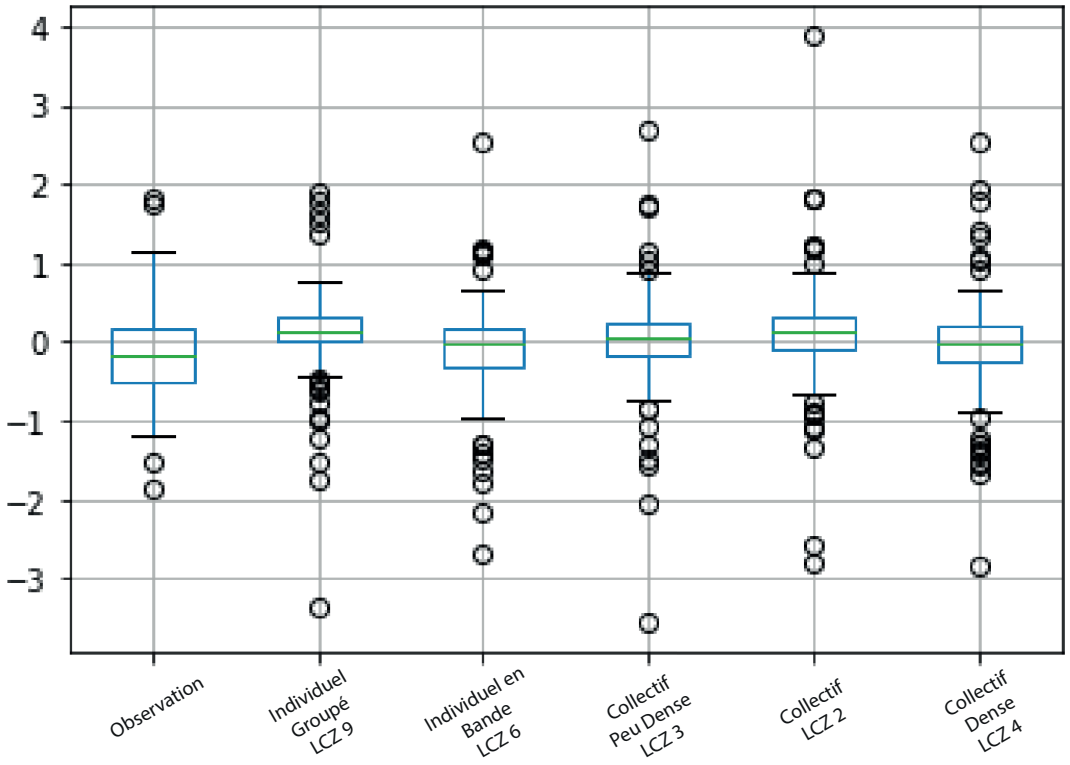


FIGURE 9.78 – Boxplot des différences moyennes des températures potentielles pour la journée (12h - 18h) de la position de la sonde 53 (Chemin de Cromois) avec la simulation de contrôle

9.4 SYNTHÈSE

Les principaux paramètres de modélisation sont présentés, à savoir des mailles du domaine 3 (150m de résolution) d'une hauteur de 10m. Le modèle est configuré en 1-way et le modèle TEB-Canopy est utilisé afin d'améliorer les résultats. Le lancement de simulations atmosphériques nécessite des pré-requis importants, à savoir, un objectif de simulation clairement identifié afin de sélectionner et paramétrer de façon optimale le modèle, ainsi que l'accès à un centre de calcul et à des techniciens compétents. Ces pré-requis majeurs sont les principaux obstacles à l'intégration et l'utilisation des simulations climatiques urbaines dans les documents d'urbanisme. La présence du réseau MUSTARDijon à Dijon Métropole permet de comparer la simulation de contrôle à des observations. La confrontation de la simulation de contrôle avec l'observation permet de conclure que les températures simulées, potentielles et à 2m, sont spatialement et temporellement cohérentes. En effet, les températures simulées en milieu urbain sont globalement supérieures à celles du milieu rural. De même que le cycle diurne, nocturne ainsi que les maximums et minimums de températures sont, temporellement, cohérents. Néanmoins, la comparaison entre la simulation de contrôle et les observations *in situ* du réseau MUSTARDijon, montre que les températures simulées, à 2m et potentielles, présentent des différences avec les mesures observées, notamment pour les températures nocturnes en milieu rural. L'analyse par LCZ des températures à 2m et potentielles a permis de déterminer que les températures potentielles sont, en journée, plus proches de l'observation que les températures à 2m.

Pour chaque scénario, les températures potentielles sont sensiblement plus chaudes sur certaines zones de croissance urbaine, notamment pour les scénarios de logements collectifs peu denses (LCZ 3) et collectifs (LCZ 2). Les températures des zones adjacentes sont, hormis pour ces deux scénarios, peu modifiées. Les températures simulées des cinq scénarios sont, temporellement cohérentes, les maximums et minimums de températures coïncident avec la simulation de contrôle. En termes d'intensité des températures simulées, celles-ci sont cohérentes malgré des ICU simulés de moindre intensité du fait du refroidissement nocturne moins important du milieu rural. Pour les journées (12h à 18h), les zones scénarisées avec les LCZs 3 et 2 présentent des températures plus chaudes que les zones scénarisées avec les LCZs 9 et 6. Les scénarios pour lesquels le pourcentage de bâti est le plus faible présentent des augmentations de températures les moins importantes. Pour les scénarios logements individuels groupés (LCZ 9), en bandes (LCZ 6) Collectifs Denses (LCZ 4), il semble que les températures simulées des zones scénarisées soient moins élevées que les températures simulées des scénarios de logements collectifs (LCZ 3 et 2).

SYNTHÈSE PARTIE IV : SIMULER LE CLIMAT URBAIN, UN OUTIL PROSPECTIF URBAIN MAJEUR

La présentation du protocole d'expérimentation est l'objectif de cette dernière partie à travers la construction de scénarios, leur spatialisation et l'étude de leur impact sur le climat urbain. Au cours du chapitre VIII, des scénarios de croissance sont élaborés puis quantifiés. Ainsi, l'implantation de 35 054 logements est estimée à l'horizon 2050 d'après l'évolution démographique et la méthode du "point-mort". Cette méthode de calcul est reproductible et généralisable sur d'autres agglomérations. Cette étape nécessite une étude synchronique et diachronique du milieu urbain étudié. Le nombre de mailles de 2.25ha, nouvellement construites pour chaque scénario quantifié, a servi de base de données d'entrées pour le modèle de croissance urbaine MUP-City. Les simulations de croissance urbaine des cinq scénarios élaborés précédemment sont spatialisées avec le logiciel MUP-City puis intégrées dans le modèle de simulation atmosphérique Meso-NH. Ces étapes nécessitent des compétences et des ressources (super calculateur,...) qui ne sont actuellement pas mobilisables par des acteurs et des collectivités. Trois domaines d'études sont emboîtés, selon des résolutions décroissantes (1350m, 450m, 150m). Les comparaisons entre la simulation de contrôle et les observations *in situ* du réseau MUSTARDijon montrent une surestimation des températures nocturnes simulées en milieu rural, potentielles et à 2m. La nuit, les températures simulées restent élevées, sous-estimant le refroidissement nocturne en milieu rural et périurbain. Cet effet a pour conséquence de limiter l'intensité de l'ICU simulé. Pendant les journées, de 12h à 18h, la différence de température à 2m et potentielle entre le milieu urbain et le milieu rural est plus présente. Cela se traduit par des ICU qui n'apparaissent pas la nuit mais en journée. Plusieurs conclusions peuvent être tirées des simulations climatiques des scénarios de croissance urbaine. Les températures simulées supérieures à la simulation de contrôle sont plus étendues spatialement pour les LCZs 2 et 3, notamment pour la journée du 25 Juillet. Les scénarios pour lesquels le pourcentage de végétation est le plus important présentent des augmentations de températures, tant spatialement qu'en intensité, les moins importantes. Enfin, il semblerait que construire, quelle que soit la forme urbaine, en périphérie des zones bâties déjà existantes, impacte peu la température de celles-ci.

L'ensemble des éléments avancés dans cette partie nous questionne sur le caractère prospectif du couplage

du climat urbain et de la croissance urbaine. Le caractère pédagogique et de prise de conscience de l'impact des scénarios prospectifs urbains sur le climat urbain ne peut qu'être qu'encourageant pour intégrer davantage le climat urbain dans l'aménagement urbain.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux effectués au cours de cette thèse ont pour objectif d'étudier l'impact de différentes formes urbaines sur l'intensité et la localisation du phénomène d'ICU sur Dijon Métropole. Pour atteindre cet objectif, différents scénarios de croissance urbaine sont intégrés dans un modèle atmosphérique. Quatre étapes majeures ont jalonné ce travail. La première porte sur la connaissance du phénomène d'ICU, son contexte, son évolution, ainsi que ses facteurs de formation. La seconde est l'étude des documents de planification permettant d'intégrer l'ICU dans les pratiques d'aménagement, ainsi que la présentation de Dijon Métropole comme terrain d'étude. La troisième étape est la construction d'un protocole d'étude à travers une démarche "modèle-dépendante", avec construction de scénarios de croissance urbaine en fonction des données d'entrées des modèles (urbain et de climat). Enfin, la dernière étape reconstitue le protocole méthodologique mis en œuvre pendant cette thèse, en partant de la construction de la base de données, jusqu'à la présentation des résultats des simulations climatiques.

En première partie, le double contexte, à la fois de changement climatique et d'urbanisation croissante, pose l'ICU comme une problématique complexe. Si la notion de "Forme Urbaine" permet l'accès à l'ensemble des échelles, son caractère polysémique rend difficile la proposition d'une définition simple et précise. Pour ce travail, les LCZs constituent une interface *ad hoc* qui facilite le transfert entre forme urbaine et climat. Celles-ci pourraient permettre à terme, d'inscrire avec clarté, des actions de réduction du phénomène d'ICU dans les documents d'urbanisme. Par ailleurs, le manque de recherche portant sur l'influence de différentes formes urbaines sur l'ICU est préjudiciable, notamment dans le contexte de changement climatique. Ainsi, des travaux sont nécessaires afin d'identifier l'influence des différentes échelles sur l'ICU.

La seconde partie est consacrée au phénomène d'ICU vu par les collectivités. À cet égard, Dijon Métropole a fait l'objet d'une présentation géographique et institutionnelle. L'ICU, à travers ses différents aspects, est un levier d'adaptation pertinent au changement climatique, cela par l'atténuation de l'ICU. La forme urbaine est un levier d'action pour effectuer des adaptations sans regrets du milieu urbain. Le document d'orientation et d'objectifs du SCoT présente les meilleurs aspects pour intégrer la problématique de l'ICU dans les documents d'urbanisme grâce aux LCZs. L'étude des différents SCoT d'agglomé-

tions françaises, nous montre que la connaissance de la problématique de l'ICU par celles-ci est encore trop partielle. De même, peu d'actions concrètes sont entreprises dans l'optique de réduire l'intensité de l'ICU, contrairement à des problématiques, par exemple la qualité de l'air, qui elles, bénéficient d'objectifs concrets. La construction de scénarios de croissance urbaine est une approche pertinente pour étudier l'impact de différentes formes urbaines sur l'ICU. La base de données développée lors du projet MApUCE permet l'accès pour toute collectivité, à une base de données fiables pour l'étude de son climat. Or, actuellement, il n'existe aucune méthode permettant d'intégrer l'étude de l'ICU dans les documents décisionnels. Le projet PÆNDORA est une possibilité pour intégrer, à terme, l'étude de l'ICU dans les pratiques d'aménagements. Dijon Métropole se prête particulièrement bien à l'étude du climat urbain. L'étude diachronique et synchronique de son développement urbain permet d'établir que sa croissance urbaine s'effectue dans sa partie Est (plaine de Saône) et suivant un développement de type TOD. C'est aussi une collectivité qui a développé une connaissance de l'ICU en participant à la construction du réseau de mesure MUSTARDijon en partenariat avec l'ADEME et des laboratoires et structures de recherche (CRC-Biogéosciences, TheMA, MSH). Dans cette thèse, la période d'étude a été établie du 22 Juillet 2018 à minuit (UTC) au 26 Juillet 2018 à 8h00 (UTC). Cette période correspond au début ainsi qu'au milieu d'une période de canicule.

En troisième partie, l'utilisation de modèles de simulation est présentée comme indispensable pour étudier la complexité des systèmes urbains et climatiques afin d'analyser l'influence de la forme urbaine sur l'ICU. Les recherches sur l'influence de la croissance urbaine sur le climat urbain sont, dans le contexte actuel, à multiplier et à renforcer. L'utilisation d'un modèle de croissance urbaine accessible et permettant de créer des ruptures fortes avec les tendances passées est un prérequis indispensable pour la construction d'une méthode généralisable. À travers le concept de géosimuation, la simulation par AC a été préférée aux SMA pour simuler la croissance urbaine de Dijon métropole. Le modèle de croissance urbaine MUP-City a été étudié, conjointement au modèle SLEUTH, et a été sélectionné pour simuler les scénarios de croissance urbaine. Sa capacité à simuler une croissance urbaine en rupture avec les tendances passées et le long des axes de communications (TOD, ...) a motivé ce choix. La complexité des modèles de climat est un frein important pour considérer l'ICU dans les processus décisionnels. L'étude du climat urbain nécessite des ressources humaines et techniques qui ne sont mobilisables que par des laboratoires de recherches spécialisés dans l'étude du climat urbain. L'utilisation du modèle atmosphérique Meso-NH, du modèle de surface (SURFEX) ainsi que du modèle de climat urbain (TEB) a nécessité d'en présenter les données d'entrées et le fonctionnement général. Actuellement, il n'existe pas de méthode d'intégration de l'ICU dans les textes juridiques. Le nombre de compétences, d'acteurs et de ressources étant important pour étudier l'ICU sous différentes configurations urbaines, rend complexe la construction d'une méthode généralisable, simple et accessible. La chaîne de modélisation consiste à intégrer un modèle de croissance urbaine dans un modèle de climat. La figure 9.79 synthétise et explicite l'ensemble des étapes ainsi que le cheminement méthodologique pour la mise en place de la méthode "modèle-dépendante". L'étude des données d'entrées des modèles de simulation, ainsi que la construction de scénarios repose sur la méthodologie des LCZs. Nous avons volontairement choisi un nombre de variables limité, afin de construire des scénarios de croissance urbaine qui peuvent être utilisés pour étudier le climat urbain sous différentes formes urbaines. Le modèle atmosphérique Meso-NH doit être couplé avec le modèle atmosphérique AROME. Pour simuler le climat urbain, le module de couplage surface/atmosphère SURFEX

et le modèle de climat urbain TEB sont utilisés. Le modèle MUP-City est utilisé pour simuler différentes croissances urbaines (Fig. 9.79. C).

Enfin, la quatrième partie s'attelle à la mise en place de la méthode "modèle-dépendante". Le calcul d'un nombre de logements fixe à l'horizon 2050 (afin que les scénarios de croissance soient contrastés) permet, à terme, de comparer les différents scénarios entre eux. La méthode de calcul du nombre de logements pour Dijon Métropole à l'horizon 2050 est donnée par le CEREMA et repose sur le "point mort", ainsi que l'évolution démographique. Le résultat de 35 054 logements concorde avec les tendances établies dans le SCoT (Fig. 9.79. B). À partir de ce nombre fixe de logements, cinq scénarios sont établis en fonction de neuf variables. Ceux-ci diffèrent, d'une part, par l'emprise spatiale des différents types de logements (Logements Individuels Groupés et en Bandes, Collectifs, Collectifs Peu Denses et Collectifs Denses) et d'autre part, leur forme urbaine (Fig. 9.79. A). Ces différents scénarios sont ensuite spatialisés avec le logiciel de simulation de croissance urbaine et doivent ensuite être intégrés dans le modèle de climat (Fig. 9.79. D).

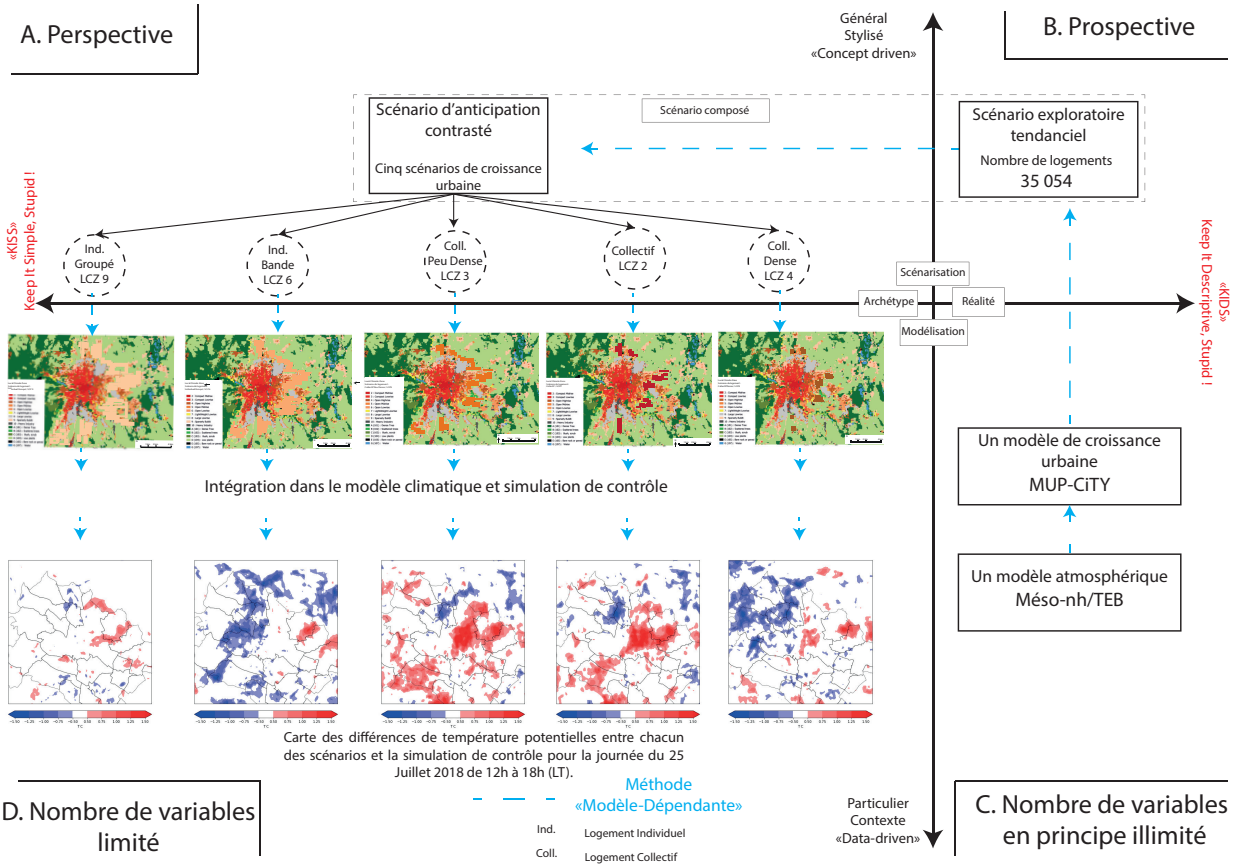


FIGURE 9.79 – Schéma de compréhension de l'approche "modèle-dépendante". Adaptée de BANOS et SANDERS 2012

À la vue de la comparaison entre la simulation de contrôle et les observations *in situ* du réseau MUSTAR-Dijon, nous constatons que les températures simulées, à 2m et potentielles, reproduisent correctement le cycle diurne, le gradient de température entre milieux ruraux et milieux urbains ainsi que des températures

différentes pour chaque scénario. Néanmoins, elles présentent un biais chaud notamment pour les températures nocturnes en milieu rural. Cet effet a pour conséquence de limiter l'intensité de l'ICU simulé, jusqu'à un facteur 4 comparé à l'ICU calculé à partir des observations du réseau MUSTARDijon. La comparaison entre l'observation et les températures simulées, à 2m et potentielles, par LCZ nous montre que les températures simulées en milieu urbain (LCZ 2 et 3) sont, en terme d'amplitude et temporellement, proches de l'observation. En revanche, pour les LCZs périurbaines (LCZs 4, 5, 6 et 9) et rurales (LCZs 101. 103, 104 et 107), les températures simulées présentent, pour les nuits, des écarts importants à l'observation, notamment pour les températures à 2m.

Les températures simulées des cinq scénarios sont, temporellement cohérentes, les maximums et minimums de températures coïncident avec la simulation de contrôle. En termes d'intensité des températures simulées, celles-ci sont cohérentes malgré des ICU simulés de moindre intensité du fait du refroidissement nocturne moins important du milieu rural. Comparées à une simulation de contrôle, pour les journées (12h à 18h), les zones scénarisées avec les LCZs 3 et 2 présentent des températures plus chaudes que les zones scénarisées avec les LCZs 9 et 6. Pour les scénarios logements individuels groupés (LCZ 9), en bandes (LCZ 6) Collectifs Denses (LCZ 4), il semble que les températures simulées des zones scénarisées soient moins élevées que les températures simulées des scénarios de logements collectifs (LCZ 3 et 2). Les scénarios pour lesquels le pourcentage de bâti est le plus faible présentent des augmentations de températures les moins importantes. Enfin, il semblerait que construire, quelle que soit la forme urbaine, en périphérie des zones bâties déjà existantes, impacte peu la température de celles-ci.

ALORS DOCTEUR, QUE FAIRE ?

Pour ce travail, dans l'optique d'améliorer les relations entre aménageurs, décideurs et chercheurs, une simplification des relations entre l'urbain et son climat à travers quatre échelles urbaines est proposée (structure, forme, design et architecture). Cette simplification a mis en avant, au-delà des échelles et définitions différentes, l'utilisation des LCZs, comme étant actuellement, le meilleur moyen de faire le lien entre aménageurs et climatologues. L'approche KIDS to KISS, adoptée pour cette thèse, met en avant la possibilité de simplifier les études mêlant croissance et climat urbain. Cela, même si l'exercice de modélisation du climat urbain nécessite du temps ainsi que des ressources qui ne sont actuellement pas mobilisables par les collectivités territoriales. L'ensemble des éléments avancés dans cette thèse (approche "modèle-dépendante", scénarisation, simulation climatique, ...) positionne les scénarios avec le pourcentage de végétation les plus important (LCZ 4, 6 et 9) comme ceux qui impactent le moins les températures, tant spatialement qu'en terme d'intensité.

Par ailleurs, il faut comprendre que dans des systèmes aussi complexes que sont le climat et la ville, aucune entité (individuelle ou collectivité) ne détient, à elle seule, les clés de compréhension, d'analyse et d'action pour répondre aux enjeux du climat urbain. Malgré la présence d'experts, de simulations et de réseau de mesure, le phénomène d'ICU reste encore trop partiellement considéré. En termes de climatologie urbaine, un long chemin reste à parcourir, qu'il s'agisse de la sensibilisation des personnes ou des techniciens capables de faire fonctionner un modèle de climat. L'apport de la modélisation et de la simulation, tant climatique qu'urbaine, à la planification urbaine a été une question sous-jacente de ce travail. Du point de vue de l'urbanisme prospectif, leurs apports sont indéniables. La modélisation et la

simulation conjointe de croissance et de climat urbain sont des outils puissants, certes difficilement mobilisables, pour permettre de mieux appréhender le futur de la ville sous différents aspects. La mobilisation de ces outils (modélisation et simulation) apporte aux aménageurs et aux décideurs une nouvelle vision des futurs enjeux climatiques. En revanche, l'apport prescriptif de ces simulations de croissance et de climat urbain semble, actuellement, limité.

La prise de conscience du changement climatique, la mise en place des villes connectées (*smart cities*), la transition socio-écologique, les projets tels que MApUCE ou PÆNDORA, l'accroissement des puissances de calcul et la présence de *data center* sur l'ensemble du territoire, sont autant d'éléments encourageants pour de futures recherches.

Pour conclure, à la vue des connaissances empiriques décrites et apportées lors de ce travail, il peut être avancé que les recherches portant sur l'ICU doivent désormais davantage se tourner sur l'opérationnalité, l'aide à la décision ainsi que sur la communication. Pour approfondir ce travail, il serait intéressant, d'une part, d'élaborer des scénarios de croissance urbaine qui mélangent différentes LCZs, et d'autre part, de construire des scénarios de requalification ou de décroissance urbaine qui s'insèreraient dans la droite ligne de cette thèse. Ce travail ne porte que sur l'ICU, or la question des îlots de fraicheur, leur préservation, leur localisation, la portée de leur refroidissement ou encore leur création dans les nouvelles aires à urbaniser sont des problématiques importantes. Enfin, comme nous l'avons vu tout au long de ce travail, le système urbain est complexe et ne peut pas être pleinement étudié par le prisme d'une seule variable (par exemple la température). Il serait intéressant de chercher les scénarios de croissance urbaine les plus vertueux en général (emplacement et préservation d'îlots de fraîcheur urbain, l'irrigation urbaine ou encore les déplacements urbains) et non pas uniquement climatiques.

BIBLIOGRAPHIE

Ackerman, B., Changnon, S., Dzurisin, G., 1978. Summary of METROMEX, volume 2 : Causes of Precipitation Anomalies. Ill. State Water Surv. 63.

ADEME, Consortium BazarUrbain, Burgeap, Conseil général de l'Hérault, Tekhnê, Université Aix-Marseille-2014. Observation de la recherche sur la prise en compte de l'adaptation aux changements climatiques dans l'urbanisme – Rapport final. ADEME. 75 pages

Aguejdad, R., Hidalgo, J., Doukari, O., Masson, V., Houet, T., 2012. Assessing the influence of long-term urban growth scenarios on urban climate. Int. Environ. Model. Softw. Soc.

Aguejdad, R., Doukari O., Houet T., Avner P., Viguié V., 2016. Etalement urbain et géoprospective : apports et limites des modèles de spatialisation. Application aux modèles SLEUTH, LCM et NEDUM-2D. Cybergéo. 782.

Aguilera, F., Valenzuela, L.M., Botequilha-Leitão, A., 2011. Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns : A case study in a Spanish metropolitan area. Landsc. Urban Plan. 99, 226–238.

Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H., 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. Sol. Energy, Urban Environment 70, 295–310.

Akbari, H., Kurn, D.M., Bretz, S.E., Handford, J.W., 1997. Peak power and cooling energy savings of shade trees. Energy Build. 25, 139–148.

Akbari, H., Rose, L.S., 2001. Characterizing the fabric of the urban environment : A case study of Metropolitan Chicago, Illinois and Executive Summary. LBNC.

Alberti, M., Marzluff, J.M., Shulenberger, E., Bradley, G., Ryan, C., Zumbrunnen, C., 2003. Integrating Humans into Ecology : Opportunities and Challenges for Studying Urban Ecosystems. BioScience 53, 1169–1179.

Alcamo J., 2008. Environnemental Futures. The practice of environnemental scenario analysis. Developments in Integrated Environmental Assessment 2 :123-150

Alcoforado, M.J., 2006. Planning procedures towards high climatic quality cities, Exemple refering to lisbon. Finisterra 41, 49–64.

Alcoforado, M.J., Andrade, H., 2008. Global Warming and the Urban Heat Island, in : Marzluff, J.M., Shulenberger, E., Endlicher, W., Alberti, M., Bradley, G., Ryan, C., Simon, U., ZumBrunnen, C. (Eds.), Urban Ecology : An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature. Springer US, Boston, MA, pp. 249–262.

Alcoforado, M.J., Andrade, H., Lopes, A., Vasconselos, J., 2009. Application of climatic guidelines to urban planning : The example of Lisbon (Portugal). Landsc. Urban Plan. 90, 56–65.

Ali-Toudert, F., 2005. Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate. Freiburg.

Alobaydi, D., Bakarman, M.A., Obeidat, B., 2016. The Impact of Urban Form Configuration on the Urban Heat Island : The Case Study of Baghdad, Iraq. Procedia Eng., ICSDEC 2016 – Integrating Data Science, Construction and Sustainability 145, 820–827.

Alonso, W., 1964. Location and Land Use. Toward a General Theory of Land Rent. Harvard University Press, Cambrodge, Massachussets.

Alterre Bourgogne, 2010. La Nature Urbaine, ressources pour une ville durable. Rev. Repères 28.

Amblard, F., Phan, D., 2006. Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société : une introduction.

Anas, A., Arnott, R., Small, K.A., 1998. Urban Spatial Structure. JEL 36, 1426–1464.

Antoni, J.-P., 2013. L'étalement urbain. Fr. En Villes, Ellipses 164–176.

Antoni, J.-P., Morency, C., Cambien, A., Vuidel, G., Nguyen-Luong, D., Nicolas, J.-P., Piron, V., Delons, J., Bonnafous, A., Crozet, Y., Mercier, A., Ovtracht, N., Péguy, P.-Y., Puech, F., Banos, A., Boffet-Mas, A., Chardonnel, S., Lang, C., Nicolas, M., Thevenin, T., Routhier, J.-L., Toilier, F., Hirtzel, J., Joannès, P., Frankhauser, P., Tannier, C., Houot, H., Lemoy, R., Raux, C., Jensen, P., Caruso, G., Cavailhès, J., Peeters, D., Thomas, I., Gacogne, V., Brun, G., 2011. Modéliser la ville. Economica.

APUR, 2003. Densités vécues et formes urbaines : Etude de quatre quartiers parisiens.

Arnaud, M., Emery, X., 2000. Estimation et interpolation spatiale. Hermes, Paris, France. 222p.

Arnfield, A.J., 1990. Street design and urban canyon solar access. Energy Build. 14, 117–131.

Arnfield,J, 2003. Two decades of urban climate research : A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. Int. J. Climatol. 23, 1–26.

Ashton, T.S., 1997. The Industrial Revolution 1760-1830. Oxford University Press.

Atkinson, B.., 1971. The effect of an urban area on the precipitation from a moving thunderstorm. J. Appl. Meteorol. 10, 47–55.

Aymonino, C., 1970. Lo Studio dei fenomeni urbani. La città di Padova, Centro studi di storia urbanistica. Rome.

Badariotti, D., Weber, C., 2002. La mobilité résidentielle en ville. Modélisation par automates cellulaires

et système multi-agents à Bogota. L'Espace Géographique, tome 31, 97–108

Banos, A., Boffet-Mas, A., Chardonnel, S., Lang, S., Marilleau, N., Thévenin, T., 2010. Simuler la mobilité urbaine quotidienne : le projet MIRO. MURT.

Banos A., Sanders L., 2012, Vers une cartographie sémantique des modèles urbains : des individus aux systèmes de villes. In HEGRON G., La modélisation de la ville, du modèle au projet urbain, Commissariat général au développement durable,Paris, pp.50 - 63

Banos, A., 2013. Pour des pratiques de modèlisation et de simulation libérées en géographie et SHS (Géographie). Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, Paris.

Barles, S. (2017). Écologie territoriale et métabolisme urbain : quelques enjeux de la transition socioécologique. Revue d'Économie Régionale et Urbaine, décembre(5), 819-836.

Barra, T. de la, 2005. Integrated Land Use and Transport Modelling : Decision Chains and Hierarchies. Camb. Univ. Press.

Batty, M., Besussi, E., Chin, N., 2003. Traffic, urban growth and suburban sprawl. CASA 70.

Batty, M., 2007. Cities and Complexity : Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models and fractals. The MIT Press.

Bauer, N., Calvin, K., Emmerling, J., Fricko, O., Fujimori, S., Hilaire, J., Eom, J., Krey, V., Kriegler, E., Mouratiadou, I., Sytze de Boer, H., van den Berg, M., Carrara, S., Daioglou, V., Drouet, L., Edmonds, J.E., Gernaat, D., Havlik, P., Johnson, N., Klein, D., Kyle, P., Marangoni, G., Masui, T., Pietzcker, R.C., Strubegger, M., Wise, M., Riahi, K., van Vuuren, D.P., 2017. Shared Socio-Economic Pathways of the Energy Sector – Quantifying the Narratives. Glob. Environ. Change 42, 316–330.

Bavoux, J.-J., Beaucire, F., Chapelon, L., Zembri, P., 2005. Géographie des transports. Armand Colin, Paris.

Bavoux, J.-J., Chapelon, L., 2014. Dictionnaire d'analyse spatiale. Armand Colin, Paris.

Bechtel, B., Alexander, P.J., Beck, C., Böhner, J., Brousse, O., Ching, J., Demuzere, M., Fonte, C., Gál, T., Hidalgo, J., Hoffmann, P., Middel, A., Mills, G., Ren, C., See, L., Sismanidis, P., Verdonck, M.-L., Xu, G., Xu, Y., 2019. Generating WUDAPT Level 0 data – Current status of production and evaluation. Urban Climate 27, 24–45.

Benenson, I., Torrens, P.M., 2004. Geosimulation : object-based modeling of urban phenomena. Comput. Environ. Urban Syst. 28, 1–8.

Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woth, K., 2007. Future extreme events in European climate : an exploration of regional climate model projections. Clim. Change 81, 71–95.

Benzerzour, M., Masson, V., Groleau, D., Lemonsu, A., 2011. Simulation of the urban climate variations in connection with the transformations of the city of Nantes since the 17th century. Build. Environ. 46, 1545–1557.

Bernatzky, A., 1982. The contribution of tress and green spaces to a town climate. Energy Build. - ENERG BLDG 5, 1–10.

Besancenot, J.-P., Havard, S., Cassagne, É., 2006. L'été meurtrier de 2003 en Bourgogne. Rev. Géographique Est 46.

Bessy-Pietri, 2000. Les formes récentes de la croissance urbaine. Econ. Stat. 336, 35–52.

Bigorgne J., Alba D., Blancot C., 2012. Les îlots de chaleur urbains à Paris. Cahier 1

Bitan, A., 1988. The methodology of applied climatology in planning and building. Energy Build. 11, 1–10.

Bitan, A., 1992. The high climatic quality city of the future. Atmos. Environ. 26, 313 – 329.

Blazejczyk, K., Okoniewska, M., Wieclaw, M., 2006. Urban heat island in large and small cities.

Bocher, E., Petit, G., Bernad, J., Palominos, S., 2018. A geoprocessing framework to compute urban indicators : The MApUCE tools chain. Urban Clim. 153–174.

Bonard, Y., Matthey, L., 2010. Les éco-quartiers : laboratoires de la ville durable. Cybergeo Eur. J. Geogr.

Bonhomme, M., Masson, V., Adolphe, L., Faraut, S., 2013. GENIUS : A tool for multi-disciplinary and multi-scalar databases. AGU Fall Meet. Abstr.

Bornstein, R.D., 1968. Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City. J Appl Meteor 7, 575–582.

Bornstein, R., Lin, Q., 2000. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta : three case studies. Atmos. Environ. 34, 507–516.

Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., Pullin, A.S., 2010. Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence. Landsc. Urban Plan. 97, 147–155.

Bramley, G., Power, S., 2009. Urban Form and Social Sustainability : The Role of Density and Housing Type, Urban Form and Social Sustainability : The Role of Density and Housing Type. Environ. Plan. B Plan. Des. 36, 30–48.

Breheny, M., 1997. Urban compaction : feasible and acceptable ? Cities, Sustainable Urban Development 14, 209–217.

Brisepierre G., 2011. Les conditions sociales et organisationnelles du changement des pratiques de consommation d'énergie dans l'habitat collectif. Paris Sorbonne. These de sociologie. 847p

Brundtland, G., 1987. Notre avenir à tous. (Rapport technique), Rapport de la commission mondiale sur l'Environnement et le Développement. Paris.

Bueno B., Pigeon G., Norford L. K., Zibouche K., Marchadier C., 2011. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme, Geosci. Model Dev., 5, 433–448,

Bura, S., Guérin-Pace, F., Mathian, H., Pumain, D., Sanders, L., 1996. Multi-agents systems and the dynamics of a settlement system. Geo Anal. 28.

Burgel, G., 1993. La Ville aujourd'hui, Paris, Hachette.

Cameron, R.W.F., Taylor, J.E., Emmett, M.R., 2014. What's 'cool' in the world of green façades ? How plant choice influences the cooling properties of green walls. Build. Environ. 73, 198–207.

Canouï-Poitrine, F., Cadot, E., Spira, A., Spira, A., 2006. Excess deaths during the August 2003 heat wave in Paris, France. Rev. DÉpidémiologie Santé Publique 54, 127–135.

Cantat, O., 2004. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. Norois 75–102.

Cantat, O., Savouret, E., Abdelkrim, B., 2012. La régionalisation des types de temps en France métropolitaine. pp. 165–170.

Castel, J.-C., 2010. Ville Dense, Ville Diffuse : Les Deux Faces de L'urbanisation. Etudes Foncières 14–20.

Castex, J., 2014. Saverio Muratori (1910-1973). La ville comme seul modèle. Rech. Archit. Urbaine 13–35.

Cavaillhès, J., Joly, D., Hilal, M., Brossard, T., Wavresky, P., 2014. Économie urbaine et comportement du consommateur face au climat. Effet sur les prix hédonistes et sur l'étalement urbain. Rev. Econ. 65, 591–619.

Cervero, R., 2004. Transit-oriented development in the United States : Experiences, challenges, and prospects (Vol. 102). Transportation Research Board.

Champion, A.G., 2001. A Changing Demographic Regime and Evolving Poly Centric Urban Regions : Consequences for the Size, Composition and Distribution of City Populations. Urban Stud. 38, 657–677.

Chandler, T.J., Mondiale, O.M., 1976. Urban climatology and its relevance to urban design.

Changnon, S.A., Kunkel, K.E., Reinke, B.C., 1996. Impacts and Responses to the 1995 Heat Wave : A Call to Action. Bull Amer Meteor Soc 77, 1497–1506.

Chatelet, A., Fernandez, P., Lavigne, P., 1998. Architecture climatique : une contribution au développement durable, Arch. climatique. Edisud, Aix-en-Provence.

Chauvin, F., Denvil, S., 2007. Changes in severe indices as simulated by two French coupled global climate models. Glob. Planet. Change, Extreme Climatic Events 57, 96–117.

Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., He, Z., 2012. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong : a GIS-based simulation approach. Int J Clim. 32, 121–136.

Choay, F., Merlin, P., 1988. Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement, 1er édition. ed, L'Information Grammaticale. Puf, Paris.

Choay, F., 1994. Penser la non-ville et la non-campagne de demain. Fr. Au-Delà Siècle, de l'Aube 23–30.

Chow, W.T.L., Roth, M., 2006. Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. Int J Clim. 26, 2243–2260.

Chrysoulakis, N., Lopes, M., García, R., Grimmond, C., Jones, M., Magliulo, V., Klostermann, J., Synnefa, A., Mitraka, Z., Castro, E., González, A., Vogt, R., Vesala, T., Spano, D., Pigeon, G., Freer-Smith, P., Staszewski, T., Hodges, N., Mills, G., 2013. Sustainable urban metabolism as a link between bio-physical sciences and urban planning : The BRIDGE project. Landscape and Urban Planning. 112.

Churkina, G., Kuik, F., Bonn, B., Lauer, A., Tomiak, K., Butler, T., 2017. Effect of VOC Emissions from

Vegetation on Air Quality in Berlin during a Heatwave. Environ. Sci. Technol. 21.

Ciattoni, A., Beucher, S., Reghezza, M., 2005. La Géographie : pourquoi ? comment ? Objets et démarches de la géographie d'aujourd'hui., Initial. Hatier.

Clark, C., 1951. Urban Population Densitie. J. R. Stat. Soc. 114, 490–496.

Clarke K.C., Gaydos. J.L., 1998. Loose-Coupling a Cellular Automaton Model and GIS. Long-Term Urban Growth Prediction for San Francisco, Washington and Baltimore. 12(7). In international journal of geographical information science. 699-714.

Clarke K.C., 2008. A decade of cellulare urban modeling with SLEUTH : unresolved issues and problems. Planning support systems for cities and region. 47 - 60

Cline, W.R., 1992. The economics of global warming. Econ. Glob. Warm.

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Friedllingstein, P., Gao, X., Gutowski, W., Johns, G., Krinner, M., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.., Wehner, M., 2013. Chapter 12 - Long-term climate change : Projections, commitments and irreversibility. pp. 1029–1136.

Colomb, M., Brasebin, M., Perret, J., Tannier, C., (2017). Couplage de deux modèles de simulation (MUP-City et SimPLU) pour évaluer l'articulation entre différentes échelles de documents d'urbanisme. Conference : 13e rencontres de Théo Quant

Colombert, M., Boudes, P., 2012. Adaptation aux changements climatiques en milieu urbain et approche globale des trames vertes. VertiGo - Rev. Électronique En Sci. Environ. 12.

Colombert, M., Boudes P., 2012. Adaptation aux changements climatiques en milieu urbain et approche globale des trames vertes. VertigO. Hors-série 12

Cotte, L., 1774. Traité de météorologie, contenant 1°. L'histoire des observations météorologiques. Impr. Royale, Paris.

Daniel, M., Lemonsu, A., Viguié, V., 2018. Role of watering practices in large-scale urban planning strategies to face the heat-wave risk in uture climate. Urban Clim. 23, 308.

Darwin C., 1859. On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the in the Struggle for Life.

Daudé, E., 2005. Systèmes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une Géographie Artificielle. Modélisation En Géographie Déterm. Complexités 353–380.

De Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., Poeuf, P., Marchadier, C., 2013. How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France ? Int J Clim. 33, 210–227.

Delay E., 2015. Réflexions géographiques sur l'usage des systèmes multi agents dans la compréhension des processus d'évolution des territoires viticoles de fortes pentes : le cas de la Côte Vermeille et du Val di Cembra. Limoges. These de Géographie. 435p

Dellink, R., Chateau, J., Lanzi, E., Magné, B., 2017. Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways. Glob. Environ. Change 42, 200–214.

Delorme, M., 1998. An introduction to cellular automata (No. 98–37). LIP, ENS-Lyon.

Dempsey, N., Bramley, G., Power, S., Brown, C., 2011. The social dimension of sustainable development : Defining urban social sustainability. Sustain. Dev. 19, 289–300.

DePaul, F.T., Sheih, C.M., 1986. Measurements of wind velocities in a street canyon. Atmospheric Environ. 1967 20, 455–459.

Deschenes, O., Greenstone, M., 2007. The economic impacts of climate change : evidence from agricultural output and random fluctuations in weather. Am. Econ. Rev. 97, 354–385.

Dieztel C., Clarke K.C., 2007. Toward optimal calibration of the SLEUTH lande use change model. Transactions in GIC. 11.1. 29 - 45.

Dimoudi, A., Nikolopoulou, M., 2003. Vegetation in the urban environment : microclimatic analysis and benefits. Energy Build. 35, 69–76.

Dittmar, H., Ohland, G., 2012. The new transit town : Best practices in transit-oriented development. Island Press.

Doukari, O., Aguejdad, R., Houet, T., 2013. SLEUTH, a scenario-based version of SLEUTH for simulating breaking trends urban sprawl futures. Comput Env. Urban Syst.

Dubos-Paillard, E., Guermond, Y., Langlois, P., 2003. Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire. Le modèle SpaCelle. L'Espace Géographique. 357–378.

Duby, G., 1980. Histoire de la France urbaine, L'univers historique. Seuil.

Duchene-Marullaz, P., 1980. Recherche exploratoire en climatologie urbaine, CSTB.

Dupont, S., 2001. Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine, réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO. Université de Nantes, Nantes.

Eliasson, I., 1996. Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. Atmos. Environ., Conference on the Urban Thermal Environment Studies in Tohwa 30, 379–392.

Eliasson, I., 2000. The use of climate knowledge in urban planning. Landsc. Urban Plan. 48, 31–44.

Ellefsen, R., 1990. Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities. Energy Build. 15–16, 1025–1049.

Emery, J., 2015. La vile sous éléctrode, de la mesure à l'évaluation de la pollution atmosphérique automobile. Vers une simulation multi-agents du trafic routier en milieu urbain. (Géographie). Université de Bourgogne, Dijon.

Emsellem, K., Liziard, S., Scarella, F., 2012. La géoprospective, l'émergence d'un nouveau champ de recherche ? LEspace Geogr. Tome 41, 154–168.

Enault, C., 2012. Simulation de l'étalement urbain de Dijon en 2030, approche systémique de la dynamique gravitaire ville-transport. Cybergeo Eur. J. Geogr.

Epstein, J.., 2006. Generative Social Science, Studies in Agent-Based Computational Modeling. Princet. Univ. Press.

Erell, E., Pearlmutter, D., Williamson, T., 2011. Urban Microclimate, Designing the Spaces Between

Buildings. Proc. Inst. Civ. Eng. 167, 39–39.

Ewing, R., 1997. Is Los Angeles-Style Sprawl Desirable ? J. Am. Plann. Assoc. 63, 107–126.

Fan, H., Sailor, D.J., 2005. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of philadelphia, a comparison of implementations in two PBL schemes Atmos. Atmos. Environ. 39, 73–84.

Foissard, X., Cantat, O., Dubreuil, V., Savouret, E., Quénol, H., Bensaïd, A., Planchon, O., 2012. Climat urbain, changement climatique et types de temps dans le Grand Ouest de la France. In Changement Climatique Dans l'Ouest. Presses Universitaires de Rennes, pp. 73–92.

Fouillet, A., Rey, G., Laurent, F., Pavillon, G., Bellec, S., Guihenneuc-Jouyaux, C., Clavel, J., Jougla, E., Hémon, D., 2006. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. Int. Arch. Occup. Environ. Health 80, 16–24.

Frankhauser, P., Tannier, C., Vuidel, G., Houot, H., 2010. Une approche multi-échelle pour le développement résidentiel des nouveaux espaces urbains. Méthode Approche 306–332.

Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D.L., Obersteiner, M., Pachauri, S., Rao, S., Schmid, E., Schoepp, W., Riahi, K., 2017. The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2 : A middle-of-the-road scenario for the 21st century. Glob. Environ. Change 42, 251–267.

Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M.R., Wolman, H., Coleman, S., Freihage, J., 2001. Wrestling Sprawl to the Ground : Defining and measuring an elusive concept. Hous. Policy Debate 12, 681–717.

Genestier, P., 1988. Formes urbaines... Formes urbaines ? Villes En Parallè 12, 9–18.

Gerland, P., Raftery, A.E., Ševčíková, H., Li, N., Gu, D., Spoorenberg, T., Alkema, L., Fosdick, B.K., Chunn, J., Lalic, N., Bay, G., Buettner, T., Heilig, G.K., Wilmoth, J., 2014. World population stabilization unlikely this century. Science 346, 234–237.

Geurs, K., van Wee, B., 2006. Ex-post evaluation of thirty years of compact urban development in the Netherlands. Urban Stud. 1, 139–160.

Giddings, B., Hopwood, B., O'Brien, G., 2002. Environment, economy and society : fitting them together into sustainable development. Sustain. Dev. 10, 187–196.

Giridharan, R., Lau, S.S.Y., Ganesan, S., Givoni, B., 2007. Urban design factors influencing heat island intensity on high-rise high-density environments on Hong-Kong. Build. Environ. 42, 3669–3684.

Givoni, B., 1998. Climate considerations in building and urban design.

Gléau, J.-P.L., Pumain, D., Saint-Julien, T., 1996. Villes d'Europe : à chaque pays sa définition. Econ. Stat. 294, 9–23.

Godet, M., 1983. Prospective, prévision et planification. Projet. 179 - 180.

Godet, M., Roubelat, F., 1996. Creating the future : The use and misuse of scenarios. Long Range Plann. 29, 164–171.

Godier, P., 2009. Fabrication de la ville contemporaine : processus et acteurs. Le cas de l'agglomération

bordelaise (Sociologie). Bordeaux II Victor Segalen, Bordeaux.

Golany, G.S., 1996. Urban design morphology and thermal performance. Atmos. Environ., Conference on the Urban Thermal Environment Studies in Tohwa 30, 455–465.

Goldsetin N., Dietzel C., Clarke K., 2005 Don't stop til you get enough. Sensitivity testing of Monte Carlo iterations for model calibration. 8th International conference of géocomputation.

Gomez, F., Gaja, E., Reig, A., 1998. Vegetation and climatic changes in a city. Ecol. Eng. 10, 355–360.

Gómez, F., Tamarit, N., Jabaloyes, J., 2001. Green zones, bioclimatics studies and human comfort in the future development of urban planning. Landsc. Urban Plan. 55, 151–161.

Gordon, P., Richardson, H.W., 1997. Are Compact Cities a Desirable Planning Goal ? J. Am. Plann. Assoc. 63, 95–106.

Grimmond, C.S.B., Oke, T.R., 1998. Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. Am. Meteorol. Soc. 38, 1262–1292.

Grimmond, C.S.., Oke, T.., 2002. Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas : Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS). J. Appl. Meteorol. 41, 792–810.

Gugler, J., 1996. The Urban Transformation of the Developing World. Oxford Univeristy Press.

Guivarch, C., Rozenberg, J., 2013. Les nouveaux scenarios socio-economiques pour la recherche sur le changement climatique. Pollut. Atmos. Clim. Santé Société 1–9.

Guo, G., Zhou, X., Wu, Z., Xiao, R., Chen, Y., 2016. Characterizing the impact of urban morphology heterogeneity on land surface temperature in Guangzhou, China. Environ. Model. Softw. 84, 427–439.

Guo, X., Fu, D., Wang, J., 2006. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City. Atmos. Environ. 82, 112–126.

Hagget, P., 1965. Locational analysis in human geography. Edward Arnorld, Londres.

Hamdi, R., Masson, V., 2008. Inclusion of a drag approach in the town energy balance (TEB) scheme : offline 1 -D evaluation in a street canyon. Appl Meteorol Clim. 47, 2627–2644.

Hamin, E.M., Gurran, N., 2009. Urban form and climate change : Balancing adaptation and mitigation in the U.S. and Australia. Habitat Int., Climate Change and Human Settlements 33, 238–245.

Hassid, S., Santamouris, M., Papanikolaou, N., Linardi, A., Klitsikas, N., Georgakis, C., Assimakopoulos, D.N., 2000. The effect of the Athens heat island on air conditioning load. Energy Build. 32, 131–141.

Haumont, A., 1974. Les relations entre ville et campagne : l'image de la campagne chez les citadins. Économie Rurale 103, 28–31.

Hendel, M., Colombert, M., Hu, Y., Royon, L., 2014. Improving a pavement-watering method on the basis of pavement surface temperature measurements. Urban Clim. 10, 189–200.

Hidalgo, J., Masson, V., Baklanov, A., Pigeon, G., Gimeno, L., 2008. Advances in Urban Climate Modeling. Trends and Directions in Climate Research. Ann. N. Y. Acad. Sci. 354 – 374.

Hidalgo, J., Masson, V., Gimeno, L., 2009. Scaling the Daytime Urban Heat Island and Urban-Breeze Circulation. J Appl Meteor Clim. 49, 889–901.

Hidalgo, J., Lemonsu, A., Masson, V., 2018. Between progress and obstacles on urban climate interdisciplinary studies and knowledge transfer to society 1436, 5–18.

Hinkel, K.M., Nelson, F.E., Klene, A.E., Bell, J.H., 2003. The urban heat island in winter at barrow alaska. Int. J. Climatol. 23, 1889 – 1905.

Hirtzel, J., 2015. Exploration prospective des mobilités résidentielles dans une agglomération urbaine au moyen d'un modèle de simulation multi-agents (Mobisim). Université de Franche-Comté

Hopwood, B., Mellor, M., O'Brien, G., 2005. Sustainable development : mapping different approaches. Sustain. Dev. 13, 38–52.

Houet, T., Gourmelon, F., 2014. La géoprospective – Apport de la dimension spatiale aux démarches prospectives. Cybergeo Eur. J. Geogr.

Houet, T., Moine, M.-P., Hidalgo, J., Masson, V., 2016. Combining narratives and modelling approaches to simulate fine scale and long-term urban growth scenarios for climate adaptation. Environ. Model. Softw. 86, 1–13.

Howard, L., 1820. The Climat of London.

Hu, Y., White, M., Ding, W., 2016. An Urban Form Experiment on Urban Heat Island Effect in High Density Area. Procedia Eng., Fourth International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island, 30-31 May and 1 June 2016 169, 166–174.

Huth, R., Kyselý, J., Pokorná, L., 2000. A GCM Simulation of Heat Waves, Dry Spells, and Their Relationships to Circulation. Clim. Change 46, 29–60.

IPCC, 2013. The physical science basic IPCC Working group 1 - Contribution to AR5.

Ivajnšič, D., Kaligarič, M., Žiberna, I., 2014. Geographically weighted regression of the urban heat island of a small city. Appl. Geogr. 53, 341–353.

Jaffal I., Ouldboukhitine S-E., Belarbi R., 2012. A compregensive study on the impact of green roofs on building ernegy performance. Renewable energy 43. 157 - 164.

Jantz C-A., Goetz S-J., Shelle M-K., 2003. Using the SLEUTh urban growth modele to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the baltimore / Washington metropolitan area. Envrionnement and planning B 31. 251 - 271.

Jantz C-A., Goetz S-J., 2005. Analysis of scale dependencies in an urban land use change model. International journal of geographical information science 19.2. 217 - 241.

Julien, P., Lamonde, P., Latouche, D., 1975. Scenarios in long-term planning. Actual. Économique 51, 253–281.

Katzschner, L., 1988. The urban climate as a parameter for urban development. Energy Build. 11, 1988.

Kenworthy, A.T., 1985. Wind as an influential factor in the orientation of the orthogonal street grid. Build. Environ. 20, 33–38.

Kergomard, C., Bigot, S., Charabi, Y., Leriche, P., 2002. Climat urbain et qualité de l'air : approches géographiques et collaborations pluridisciplinaires (Urban climate and air pollution : geographical ap-

proaches and pluridisciplinary collaborations). Bull. Assoc. Géographes Fr. 79, 462–473.

Kim, Y.-H., Baik, J.-J., 2002. Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul. J Appl Meteor 41, 651–659.

Kohler, M., Blond, N., Clappier, A., 2016. A city scale degree-day method to assess building space heating energy demands in Strasbourg Eurometropolis (France). Appl. Energy 184, 40–54.

Kopec, R.J., 1970. Further Observations of the Urban Heat Island in a Small City. Bull Amer Meteor Soc 51, 602–606.

Kousky, C., Schneider, S.H., 2003. Global climate policy : will cities lead the way ? Clim. Policy 3, 359–372.

Krajzwicz, D., Hertkorn, C., Rossel, C., 2002. Sumo (simulation of urban mobility) : an open-source traffic simulation. 4th Middle East Symp. Simul. Model. MESM2002.

Kuttler, W., Dutemeyer, D., Barlag, A.-B., Essen, 1998. Influence of regional and local winds on urban ventilation in Cologne, Germany. Meteorol. Z. 7, 77–87.

Kłysik, K., Fortuniak, K., 1999. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland. Atmos. Environ. 33, 3885–3895.

Lac, C., Chaboureau, J.-P., Masson, V., Pinty, J.-P., Tulet, P., Escobar, J., Leriche, M., Barthe, C., Aouizerats, B., Augros, C., Aumond, P., Auguste, F., Bechtold, P., Berthet, S., Bielli, S., Bosseur, F., Caumont, O., Cohard, J.-M., Colin, J., Couvreux, F., Cuxart, J., Delautier, G., Dauhut, T., Ducrocq, V., Filippi, J.-B., Gazen, D., Geoffroy, O., Gheusi, F., Honnert, R., Lafore, J.-P., Lebeaupin Brossier, C., Libois, Q., Lunet, T., Mari, C., Maric, T., Mascart, P., Mogé, M., Molinié, G., Nuissier, O., Pantillon, F., Peyrillé, P., Pergaud, J., Perraud, E., Pianezze, J., Redelsperger, J.-L., Ricard, D., Richard, E., Riette, S., Rodier, Q., Schoetter, R., Seyfried, L., Stein, J., Suhre, K., Taufour, M., Thouron, O., Turner, S., Verrelle, A., Vié, B., Visentin, F., Vionnet, V., Wautelet, P., 2018. Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. Geosci Model Dev 11, 1929–1969.

Lafore, J.P., Stein, J., Asencio, N., Bougeault, P., Ducrocq, V., Duron, J., Fisher, C., Héreil, P., Mascart, P., Masson, V., Pinty, J.P., Redelsperger, J.L., Richard, E., Vila-Guerau De Arellano. J, 1998. The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I : adiabatic formulation and control simulations. Ann. Geophys. 16, 90–109

Lambert-Habib, M.-L., Demazeux, C., Gallafrio, M., 2016. Climat urbain, energie et droit d'urbanisme - le SCoT (No. ANR-a13-VBDU-0004-06). Marseille.

Lambert-Habib, M.L., Hidalgo, J., Fedele, C., Lemonsu, A., Bernard, C., 2013. How is climatic adaptation taken into account by legal tools ? Introduction of water and vegetation by French town planning documents. Urban Clim. 4, 16–34.

Landsberg, H.E., 1973. The meteorologically utopian city. Bull. Am. Météorological Soc. 54, 89–89.

Langlois, A., Phipps, M., 1997. Automates Cellulaires - Application à la simulation urbaine.

Laroche, B., Thorette, J., Lacassin, J.-C., 2006. L'artificialisation des sols : pressions urbaines et inventaire des sols. Etude Gest. Sols 13, 223 – 235.

Laugier, R., 2012. L'étalement urbain en France.

Le Néchet, F., 2015. De la forme urbaine à la structure métropolitaine : une typologie de la configuration interne des densités pour les principales métropoles européennes de l'Audit Urbain. Cybergeo Eur. J. Geogr.

Lebeaupin, C., 2007. Etude du couplage océan-atmosphère associé aux épisodes de pluies intenses en région Méditerranéenne. Univ. P. Sabatier, Toulouse III.

Leconte, F., 2014. Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy. (phdthesis). Université de Lorraine.

Lefebvre, H., 1970. La révolution urbaine, "Idéesé. Gallimard, Paris.

Lehoczky, A., Sobrino, J., Skokovic, D., Aguilar, E., 2017. The Urban Heat Island Effect in the City of Valencia : A Case Study for Hot Summer Days. Clim. Change Impacts Adapt. Strateg. Urban Environ.

Lemonsu, A., Masson, V., 2002. Simulation of a Summer Urban Breeze Over Paris. Bound.-Layer Meteorol. 104, 463–490.

Lemonsu, A., Masson, V., Berthier, E., 2007. Improvement of the hydrological component of an urban soil–vegetation– atmosphere–transfer model. Hydrol. Process. 21, 2100–2111.

Lemonsu, A., 2010. Inclusion of vegetation in the TEB urban canopy model for improving urban microclimate modelling in residential areas (VURCA project).

Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., Pearlmutter, D., 2012. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. Geosci Model Dev 5, 1377–1393.

Lemonsu, A., Kounkou-Arnaud, R., Desplat, J., Salagnac, J.-L., Masson, V., 2013. Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate. Clim. Change 116, 679–692.

Lemonsu, A., Beaulant, A.L., Somot, S., Masson, V., 2014. Evolution of heat wave occurrence over the Paris basin (France) in the 21st century. Clim. Res. 61, 75–91.ty : Marseille. J. Appl. Meteorol. 43, 312–327.

Lemonsu, A., Viguié, V., Daniel, M., Masson, V., 2015. Vulnerability to heat waves : Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). Urban Clim. 14, Part 4, 586–605.

Lévi-strauss, C., 1955. Tristes tropiques, Terre humaine. Plon.

Lévy, A., 2006. Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine. Espac. Sociétés no 122, 25–48.

Li, D., Bou-Zeid, E., 2013. Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves : The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. J. Appl. Meteorol. Climatol. 52, 2051–2064.

Li, X-X, Norford, L, 2016. Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore. Urban climate 16, 59–74.

Li X., Zhou Y., Asrar GR., Imhoff M., Li X., 2017. The surface urban heat island response to urban expansion. A panel analysis for the conterminous United States. Sci Total Environ. 2017 Dec 15 ;605-606 :426-435

Lin, P., Lau, S.S.Y., Qin, H., Gou, Z., 2017. Effects of urban planning indicators on urban heat island : a

case study of pocket parks in high-rise high-density environment. Landsc. Urban Plan. 168, 48–60.

Liu, J., Niyogi, D. 2019. Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. Sci Rep 9, 7301

Lowry, L., 1998. Urban effects on precipitation amount. Prog. Phys. Geogr. 22, 477–520.

Macintyre, H., Heaviside, C., Taylor, J., Picetti, R., Symonds, P., Cai, X., Vardoulakis, S., 2017. Assessing urban population vulnerability and environmental risks across an urban area during heatwaves – Implications for health protection. Sci. Total Environ. 610–611, 678–690.

Maddison, D., 2003. The amenity value of the climate : the household production function approach. Resour. Energy Econ. 25, 155–175.

Maestripieri, N., Paegelow, M., 2013. Validation spatiale de deux modèles de simulation : l'exemple des plantations industrielles au Chili. Cybergeo Eur. J. Geogr.

Manin, A., 2007. Améliorer le climat urbain grâce aux petits espaces verts. Belletin Electron. Allem.

Marshall, S., 2012. Science, pseudo-science and urban design. Urban Des. Int. 17, 257–271.

Martilli, A., Clappier, A., Rotach, M.W., 2002. An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models. Bound.-Layer Meteorol. 104, 261–304.

Martilli, A., 2014. An idealized study of city structure, urban climate, energy cunsumption, and air quality. Urban Clim., Urban climate 10, 430–446.

Masson, V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. Bound.-Layer Meteorol. 357–397.

Masson, V., 2006. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. Theor. Appl. Climatol. 84, 35–45.

Masson, V., Seity, Y., 2009. Including Atmospheric Layers in Vegetation and Urban Offline Surface Schemes. J. Appl. Meteorol. Climatol. 48, 1377–1397.

Masson, V., Grimmond, C.S.B., Oke, T.R., 2002. Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities. J. Appl. Meteorol. 41, 1011–1026.

Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., Voldoire, A., 2013. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. Geosci Model Dev 6, 929–960.

Masson, V, Marchadier, C., Bretagne, G., Moine, M.-P., Houet, T., Bonhomme, M., 2013. Projet climat : adaptation aux changements climatiques de l'agglomération toulousaine. Theor. Appl. Climatol. 60.

Masson, V., Marchadier, C., Adolphe, L., Aguejdad, 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., Nolorgues, L., Pigeon, G., Salagnac, J.-L., Viguié, V., Zibouche, K., 2014. Adapting cities to climate change : A systemic modelling approach. Urban Clim., ICUC8 : The

8th International Conference on Urban Climate and the 10th Symposium on the Urban Environment 10, Part 2, 407–429.

Mathian, H., Sanders, L., 2014. Objets géographiques et processus de changement. Systèemes Inf. Géographique Intell. Territ.

Mathieu, N., 2012a. L'urbanisme touché par le développement durable ? Nat. Sci. Sociétés 14, 341–342.

Mathieu, N., 2012b. Pour une construction interdisciplinaire du concept de milieu urbain durable. Nat. Sci. Sociétés 14, 376–382.

Matteucci, S., Morello, J., 2009. Environmental consequences of exurban expansion in an agricultural area : the case of the Argentinian Pampas ecoregion. Urban Ecosyst. 12, 287–310.

Maurel, L. (2017). La végétalisation des villes et la tragi-comédie des communs. Vacarme, 81(4), 46-52.

Mccright, A.M., Dunlap, R.E., 2000. Challenging Global Warming as a Social Problem : An Analysis of the Conservative Movement's Counter-claims. Soc. Probl. 47, 499–522.

Mcpherson, E.G., Schroeder, H.W., Dwyer, J.F., Rowintree, R.A., 1992. Assessing the benefits and cots of the urban forest. Arbor 9.

Meehl, G.A., Tebaldi, C., 2004. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. Science 994–997.

Mendelshon, R., Nordhaus, W.., 1994. The impact of global warming on agriculture : a ricardian analysis. Am. Econ. Rev. 84, 753–769.

Mercier, G., Côté, M., 2012. Ville et campagne : deux concepts à l'épreuve de l'étalement urbain. Cah. Géographie Qué. 56, 125–152.

Mertiny, P., Guerrini, S., Hein, G., 2013. Le calcul des "besoins en logements". Panorama des méthodes. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, Direction territoriale Nord-Picardie.

Mestayer, P.G., Anquetin, S., 1994. In Diffusion and transport of pollutants in atmospheric mesoscale flow fields, Climatology of cities. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

Minsky, M., 1965. Matter, mind and models. Proc IFIP Congr. 45–49.

Mironov, D.., 2008. Parametrization of lakes in numerical weatherprediction. Description of a lake model. COSMO Tech. Rep.

Mitsova, D., Shuster, W., Wang, X., 2011. A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. Landsc. Urban Plan. 99, 141–153.

Moine, A., 2006. Le territoire comme un système complexe : un concept opératoire pour l'aménagement et la géographie. LEspace Geogr. Tome 35, 115–132.

Moreno, D., Badariotti, D., Banos, A., 2012. Un automate cellulaire pour expérimenter les effets de la proximité dans le processus d'étalement urbain : le modèle Raumulus. Cybergeo Eur. J. Geogr.

Morris, D., J., 1982. Self-reliant cities. Energy and the transformation of urban America. Sierra Club Book, San Francisco.

Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Vuuren, D.P. van, Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. ResearchGate 463, 747–56.

Moudon, A.-V., 1997. Urban morphology an an emerging interdisciplinary field. Urban Morphol. 1, 3–10.

Muratori, S., 1959. Studi per una operante storia di Venezia, Istituto Poligrafico dello Stato. Rome.

Nations, U., 2013. World population prospects. Departement of Economic and Social Affairs, New York.

Noilhan, J., Planton, S., 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. Mon. Weather Rev. 117, 536–549.

Nunez, M., Oke, T.R., 1977. The Energy Balance of an Urban Canyon. J. Appl. Meteorol. 16, 11–19.

Offerle, B., Grimmond, C.S.B., Fortuniak, K., 2005. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. Int J Clim. 25, 1405–1419.

Ohashi, Y., Genchi, Y., Kondo, H., Kikegawa, Y., Yoshikado, H., Hirano, Y., 2006. Influence of Air-Conditioning Waste Heat on Air Temperature in Tokyo during Summer : Numerical Experiments Using an Urban Canopy Model Coupled with a Building Energy Model. J. Appl. Meteorol. Climatol. 46, 66–81.

Oke, T.R., 1973. City size and the urban heat island. Atmospheric Environment 7, 769–779.

Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the UHI. Quaterly J. R. Meteorol. Soc. 108, 1–24.

Oke, T.R., 1984. Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. Energy Build. 7, 1 – 10.

Oke, T.R., 1987. Boundary layer Climates. Methuen and Co, London,.

Oke, T.R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. Energy Build. 11, 103–113.

Oke, T.R., Johnson, G.T., Steyn, D.G., Watson, I.D., 1991. Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night part 2 : Diagnosis of causation. Bound.-Layer Meteorol 56, 339–358.

Oke, T.R., 2004. Siting and exposure of meteorological instrument at urban sites. Int. Tech. Meet. Air Pollut. Model. Its Appl. 25–29.

Omer, A.M., 2008. Energy, environment and sustainable development. Renew. Sustain. Energy Rev. 12, 2265–2300.

ONU, 2014. Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes –. New York.

Openshaw, S., 1981. Le problème de l'agrégation spatiale en géographie. Espace Géographique 10, 15–24.

Ouzeau, G., Soubeyroux, J.-M., Schneider, M., Vautard, R., Planton, S., 2016. Heat waves analysis over France in present and future climate : Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. Clim. Serv. 4, 1–12.

Pandit, R., Labrand, B.N., 2010. Energy savings from tree shade. Ecol. Econ. 69, 1324–1329.

Panerai, P., Castex, J., Depaule, J.-C., 1977. Formes urbaines : de l'îlot à la barre. Dunod.

Parant, A., 1981. Les personnes âgées en France et leurs conditions d'habitat. Inst. Natl. Etudes Démographiques 36, 577–608.

Pascal, M., Bourdillon, F., Laaidi, K., Lagarrigue, R., Le Tertre, A., Denys, S., Randriamampianina, S., Quelet, S., Empereur-Bissonnet, P., Lapostolle, A., Iwatsubo, Y., Tabai, A., Camail, S., Debreyer, C., Lahaie, E., Magne, P., Pelletier, N., 2018. Bilan de la vague de chaleur du 24 juillet au 08 août 2018. Santé publique.

Pearce, D.W., Warford, J.J., 1993. World without end : economics, environment, and sustainable development. World End Econ. Environ. Sustain. Dev.

Peiser, R.B., 1989. Density and Urban Sprawl. Land Econ. 65, 193–204.

Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Ottle, C., Bréon, F.-M., Nan, H., Zhou, L., Myneni, R.B., 2012. Surface Urban Heat Island Across 419 Global Big Cities. Env. Sci Technol 46, 696–703.

Perben, D., 2008. Imaginer les métropoles d'avenir. Assemblée nationale, Paris.

Pigeon, G., Legain, D., Durand, P., Masson, V., 2007. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration. Int J Clim. 27, 1969–1981.

Pigeon, G., Lemonsu, A., Masson, V., Hidalgo, J., 2008. De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville 39–47.

Pinho, O.S., Orgaz, M.D.M., 2000. The urban heat island in a small city in coastal Portugal. Int J Biometeorol 44, 198–203.

Piringer, M., Grimmond, C.S.B., Joffre, S.M., Mestayer, P., Middleton, D.R., Rotach, M.W., Baklanov, A., De Ridder, K., Ferreira, J., Guilloteau, E., Karppinen, A., Martilli, A., Masson, V., Tombrou, M., 2002. Investigating the Surface Energy Balance in Urban Areas – Recent Advances and Future Needs. Water Air Soil Pollut. Focus 2, 1–16.

Pohl, B., Richard, Y., Kohler, M., Emery, J., Castel, T., Lapparent B., D., J, R., S, B., O, C.-H., F, D., Toussaint, H., A.-C, T., Thevenin, D., Thevenin, T., Pergaud, J., 2015. The Urban Heat Island of a middle-size French city as seen by high-resolution numerical experiments and in situ measurements the case of Dijon, Burgundy.

Pongracz, R., Bartholy, J., Dezso, Z., 2006. Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. Adv. Space Res., Atmospheric Remote Sensing : Earth's Surface, Troposphere, Stratosphere and Mesosphere - II 37, 2191–2196.

Pumain, D., 1997. Pour une théorie évolutive des villes 26, 119 – 134.

Pumain, D., Paquot, T., Kleinschmager, R., 2006. Dictionnaire : La Ville et l'Urbain, Villes. Paris.

Pumain, D., 2014. Une théorie géographique des villes. BSGLg.

Quinn, B., 2006. Transit-oriented development : Lessons from California, Built Environment, Vol. 32, N°3, p.311-322.

Rajkovich, N.., Larsen, L., 2016. A Bicycle-Based Field Measurement System for the Study of Thermal Exposure in Cuyahoga County,. Int J Env. Res Public Health 13.

Ramamurthy, P., Bou-Zeid, E., 2017. High-resolution simulation of heatwave events in New York City. J. Geophys. Res. 122, 168–178.

Raynaud, D., 1999. Forme urbaine : une notion exemplaire du point de vue de l'épistémologie des sciences sociales. L'Harmattan, pp. 93 – 120.

Rehdanz, K., Maddison, D., 2005. Climate and happiness. Ecol. Econ. 52, 111–125.

Richard, Y., Emery, J., Dudek, J., Pergaud, J., Chateau Smith, C., Zito, S., Rega, M., Vairet, T., Castel, T., Thevenin, T., Pohl, B., 2018. How relevant are Local Climate Zones and Urban Climate Zones for urban climate research ? Dijon (France) as a case study. Urban Clim. 258–274.

Richard, Y., Dudek, J., Emery, J., Granjon, L., Pillot, L., Rega, M., Vairet, T., Codet-Hache, O., Dodet, M.-F., Thevenin, T., Thevenin, D., Pohl, B., 2019. Les Local Climate Zones face à la canicule de 2018 à Dijon.

Ringenbach, N., 2004. Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation à strasbourg (Ecole nationale supérieure de physique de Strasbourg). Louis Paster, Strasbourg I.

Rizwan, A.., Leung, D.Y.., Liu, C., 2008. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. J. Environ. Sci. 20, 120 – 128.

Roback, J., 1982. Wages, rents, and the quality of life. J. Polit. Econ. 90, 1257–1278.

Roberts, S.M., Oke, T.R., Lemonsu, A., Grimmond, C., Jackson, P., 2004. Sensitivity of surface-atmosphere energy exchanges within urban areas derived from simulations, in : In : 84th AMS Annual Meeting : Symposium on Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone. Seatlle, EU.

Robine J-M., Cheung SL., Le Roy S., Van Oyen H., Griffiths C., Michel JP., Herrrmann FR., 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. Cr Biol 331. 171–175.

Robitu, M., 2005. Étude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Université de Nantes.

Rosenfeld, A.H., Akbari, H., Bretz, S.E., Fishman, B.L., Kurn, D.M., Sailor, D.J., Taha, H., 1995. Mitigation of urban heat islands : materials, utility programs, updates. Energy Build. 22, 255 – 265.

Rosenzweig, C., Solecki, W.., Parshall, L., Chopping, M., Pope, G., 2005. Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey. Glob. Environ. Change Part B Environ. Hazards 6, 51–52.

Rousseau, F., 2013. Vers une simulation de l'évolution des structures urbaines à partir d'agents.

Roux, J., 2014. L'Ilot de Chaleur Urbain à Dijon (Mémoire). Université de Bourgogne.

Rozoff, C., Cotton, X., Jimmy, O., Adegoke, R., 2003. Simulation of St. Louis, Missouri, Land Use Impacts on Thunderstorms. 42, 716–738.

Sacré, C., 1983. Le confort dans les espaces extérieurs : analyse microclimatique. 138.

Sanders, L. 2001. Modèles en analyse spatiale. Hermes Science Publications, Paris.

Sanders, L. 2005. Géosimulation. HyperGéo.

Sanders, M., 2013. Trois décennies de modélisation des systèmes de villes : sources d'inspiration, concepts, formalisations. Rev. DEconomie Reg. Urbaine décembre, 833–856.

Santamouris, M., 2007. Heat Island Research in Europe : The State of the Art. Adv. Build. Energy Res. 1, 123–150.

Sarrat, C., Lemonsu, A., Masson, V., Guedalia, D., 2006. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. Atmos. Environ. 40, 1743–1758.

Satterthwaite, D., 2009. The implications of population growth and urbanization for climate change. Environ. Urban. 21, 545–567.

Schatz, J., Kucharik, C.J., 2014. Seasonality of the Urban Heat Island Effect in Madison, Wisconsin. J Appl Meteor Clim. 53, 2371–2386.

Schatz, J., Kucharik, C., 2015. Urban climate effects on extreme temperatures in Madison, Wisconsin, USA. Environ. Res. Lett. 10.

Scherer, D., Fehrenbach, U., Beha, H.-D., Parlow, E., 1999. Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. Atmos. Environ. 33, 4185–4193.

Schlenker, W., Roberts, M.., 2006. Nonlinear effects of weather on corn yields. Rev. Agric. Econ. 28, 391–398.

Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M.A., Appenzeller, C., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature 427, 332.

Schwarz, N., 2010. Urban form revisited—Selecting indicators for characterising European cities. Landsc. Urban Plan. 96, 29–47.

Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., Masson, V., 2011. The AROME-France Convective-Scale Operational Model. Mon. Weather Rev. 139, 976–991.

Selmi, W., Weber, C., Medhi, L., 2013. Multifonctionnalité des espaces végétalisés urbains. VertigO - Rev. Électronique En Sci. Environ. 13.

Sénécal, G., 2007. Métaphores et modèles en géographie urbaine : le continuum de l'école de Chicago à celle de Los Angeles, Metaphors and models in urban geography : Continuum from the Chicago School to the L. A. School. Ann. Géographie 513–532.

Seto, K.C., Fragkias, M., Güneralp, B., Reilly, M.K., 2011. A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion. PLOS ONE 6, e23777.

Shaposhnikov, D., Revich, B., Bellander, T., Bedada, G., Bottai, M., Kharkova, T., Kvasha, E., Lezina, E., Lind, T., Semutnikov, E., Pershagen, G., 2014. Mortality related to air pollution with the moscow heat wave and wildfire of 2010. Epidemiology 25.

Shashua-Bar, L., Hoffman, M.E., 2000. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street : An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. Energy Build. 31, 221–235.

Shirazi, M., Falahat, S., 2012. Compact urban form, question or solution ? Examining the compact city in

the Middle Eastern context : challenges and opportunities. Int. J. Urban Sustain. Dev. 4, 246–259.

Shepherd, J. M. 2013. Impacts of Urbanization on Precipitation and Storms : Physical Insights and Vulnerabilities. In Climate Vulnerability, edited by Roger Pielke Sr., 109–125. Oxford : Academic Press

Simpson, J.R., Mcpheron, E.G., 1998. Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento. Atmos. Environ. 32, 69 – 74.

Skamarock, W., Dudhia, J., Kelmp, J.B., Gill, D., Barker, D., Duda, M., Huang, X., Wang, W., Powers, J., 2008. A description of the advanced research WRF version 3. 123.

Smit, B., Wandel, J., 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. Glob. Environ. Change 16, 282 – 292.

Sénécal G., 2007. Métaphores et modèles en géographie urbaine. Le continuum de l'école de Chicago à celle de Los Angeles. Annales de géographie, 657(5), 513-532.

Steves, F., Teytelboym, A., 2013. Political economy of climate change policy.

Stewart Fotheringham, A., Rogerson, P., 2009. The SAGE handbook of spatial analysis. Los Angeles ; London : SAGE Publications.

Stewart, I.D., 2011. Redefining the urban heat island (PhD Thesis). The university of British Colombia, Vancouver.

Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. Bull. Am. Meteorol. Soc. 93, 1879–1900.

Stone, B., Rodgers, M.O., 2001. Urban form and thermal effiency : how to design of cities influences the urban heat island. J. Am. Plann. Assoc. 67, 186–198.

Stone, B., Norman, J.M., 2006. Land use planning and surface heat island formation : A parcel-based radiation flux approach. Atmos. Environ. 40, 3561–3573.

Synnefa, A., Stathopoulou, M., Sakka, A., Katsiabani, K., Santamouris, M., Adaktylou, N., Cartalis, C., Chrysoulakis, N., 2010. Integrating sustainability aspects in urban planning : the case of Athens.

Taha, H., 1988. Nighttime temperature ans the sky factor ? A case study in San fracisco, CA. Lawrence Berkeley laboratory report No. 24009.WMO. 652. Genève.

Taha, H., 1996. Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. Atmos. Environ. 30, 3423–3430.

Tannier, C., Vuidel, G., Frankhauser, P., Houot, H., 2010. Simulation fractale d'urbanisation : MUP-City, un modèle multiéchelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles. Rev. Int. Géomat. 20, 303–329.

Tannier, C., Vuidel, G., Houot, H., Frankhauser, P., 2012. Spatial accessibility to amenities in fractal and nonfractal urban patterns. Environ. Plan. B Plan. Des. 801–819.

Tannier, C., 2017. Analyse et simulation de la concentration et de la dispersion des implantations humaines de l'échelle micro-locale à l'échelle régionale (Habilitation à Diriger des recherches). Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon.

Tham, H.P., et al., 1999. Conflicting interests of planners, politicians and scientists in urban climatology as exemplified by the city of freeburg 7.

Theeuwes, N.E., Steeneveld, G.J., Ronda, R.J., Heusinkveld, B.G., Holstag, A.A.M., 2012. Mitigation of the urban heat island effect using vegetation and water bodies. Int. Conférence Urban Clim. 3.

Toulemon, L., 2011. Individus, familles, ménages, logements : les compter, les décrire. Trav. Genre Sociétés n° 26, 47–66.

Toulemon, L., 2012. Évolution des situations familiales à travers les recensements français de 1962 à 2009. Population Vol. 67, 657–681.

Tran, H., Uchihama, D., Ochi, S., Yasuoka, Y., 2006. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation 8, 34–48.

Tsai, Y.-H., 2005. Quantifying Urban Form : Compactness Versus 'Sprawl.' Urban Stud. 42, 141–161.

United Nations, D. of E. and S.A., Population Division, 2018. The World's Cities in 2018.

Unwin, D., 1993. GIS, spatial analysis and spatial statistics. Hum. Geogr. 20, 540–551.

Urban Task Force, 1999. Towards an Urban Renaissance 328.

Vairet, T., 2016. Ilot de chaleur et forme urbaine : simulations et outils d'aide à la décision pour une ville durable.

Vardoulakis, E., Karamanis, D., Fotiadi, A., Mihalakakou, G., 2013. The urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and cooling energy demands. Sol. Energy 94, 128–144.

Varenne, F., 2008. Epistémologie des modèles et des simulations : Tour d'horizon et tendances.

Varenne, F., 2016. Histoire de la modélisation : quelques jalons. Presented at the Modélisation succès et limites, CNRS et Académie des technologies, Paris.

Viguié, V., Hallegatte, S., Rozenberg, J., 2014. Downscaling long term socio-economic scenarios at city scale : A case study on Paris. Technol. Forecast. Soc. Change 94, 359.

Vinet, J., 2000. Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs (Sciences de l'ingénieur). Université de Nantes, Nantes.

Vitrivius, M.., Perrault, C., Tardieu, E., 1859. Les dix livres d'architecture de Vitruve.

Vliet, M. Van., Kok, K., Veldkamp, T., 2010. Linking stakeholders and modellers in scenario studies : The use of Fuzzy Cognitive Maps as a communication and learning tool. Futures 42, 1–14.

Voiron, C., 2006. L'espace dans la modélisation des interactions nature-société. Actes Colloq. Int. Interact. Nat.-Société Anal. Modèles.

Vuuren, D. Van., Riahi, K., 2011. The relationship between short-term emissions and long-term concentration targets—a letter. Clim. Change 3–4, 793–801.

Wells, N.M., 2000. At Home with Nature : Effects of "Greenness" on Children's Cognitive Functioning. Environ. Behav. 32, 775–795.

Westphal, L., 2003. Urban greening and social benefits : A study of empowerment outcomes. J. Arboric. 29, 137–147.

Wilmers, F., 1988. Green for Amelioration of Urban Climate. Energy Build. 11, 289–299.

Wilson, E., Hurd, J., Civco, D., Prisloe, M., Arnold, C., 2003. Development of a geospatial model to quantify, describe and map urban growth. Remote Sens. Environ. 86, 275–285.

Wolf, P,. Raynaud, M,. 2012. Recherches universitaires du design urbain, approches théoriques. Observatoire du développement urbain et immobilier. Université de Montréal. 70p

Xu, H., Ding, F., Wen, X., 2004. Urban expansion and heat Island dynamics in the Quanzhou region, China. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs. Remote Sens. 2, 74–79.

Xu, T., Tong, Z and Xu, S., 2019.Integration of Microclimate into the Multi-Agent System Simulation in Urban Public Space.Smart Cities 2019, 2(3), 421-432.

Yamashita, S., Sekine, K., Shoda, M., Yamashita, K., Hara, Y., 1986. On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan. Atmospheric Environ. 1967, First International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality 20, 681–686.

Yap, D.H., 1975. Seasonal excess urban energy and the nocturnal heat island - Toronto. Arch. Meteorol Geophys Biolk B, 69–80.

Yoshino, M., 1975. Climate in a small area : an introduction to local meteorology.

Youssoufi, S., 2011. Satisfaction résidentielle et configurations spatiales en milieu périurbain (Thèse de doctorat). Univerité de Franche-Comté, Besançon.

Zhang, D.-L., Shou, Y.-X., Chen, F., 2011. Impact of Upstream Urbanization on the Urban Heat Island Effects along the Washington–Baltimore Corridor. J. Appl. Meteorol. Climatol. 50.

Zhang, K., Wang, R., Shen, C., Da, L., 2010. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai, China. Environ. Monit. Assess. 169, 101–112.

Zhao, M., Cai, H., Qiao, Z., Xu, X., 2016. Influence of urban expansion on the urban heat island effect in Shanghai. Int. J. Geogr. Inf. Sci. 30, 2421–2441.

Zhou, B., Rybski, D., Kropp, J.P., 2017. The role of city size and urban form in the surface urban heat island. Sci. Rep. 7, 4791.

Zhou, B., Lauwaet, D., Hooyberghs, H., De Ridder, K., Kropp, J.P., Rybski, D., 2015. Assessing Seasonality in the Surface Urban Heat Island of London. J Appl Meteor Clim. 55, 493–505.

Zito, S., Richard, Y., Pohl, B., Pergaud, J., Dodet, M.-F., Codet-Hache, O., Dumaitre, F., Jeanneret, M., Tissot, A.-C., Thevenin, D., Monteiro, S., Thévenin, T., Joly, D., 2016. Urban Heat Island and air quality, Dijon, winter 2014-2015., in : J.-M. Fallot, D.J. (Ed.), 29ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Association Internationale de Climatologie, Besançon, France, pp. 87–92.

ANNEXES

ANNEXE 1

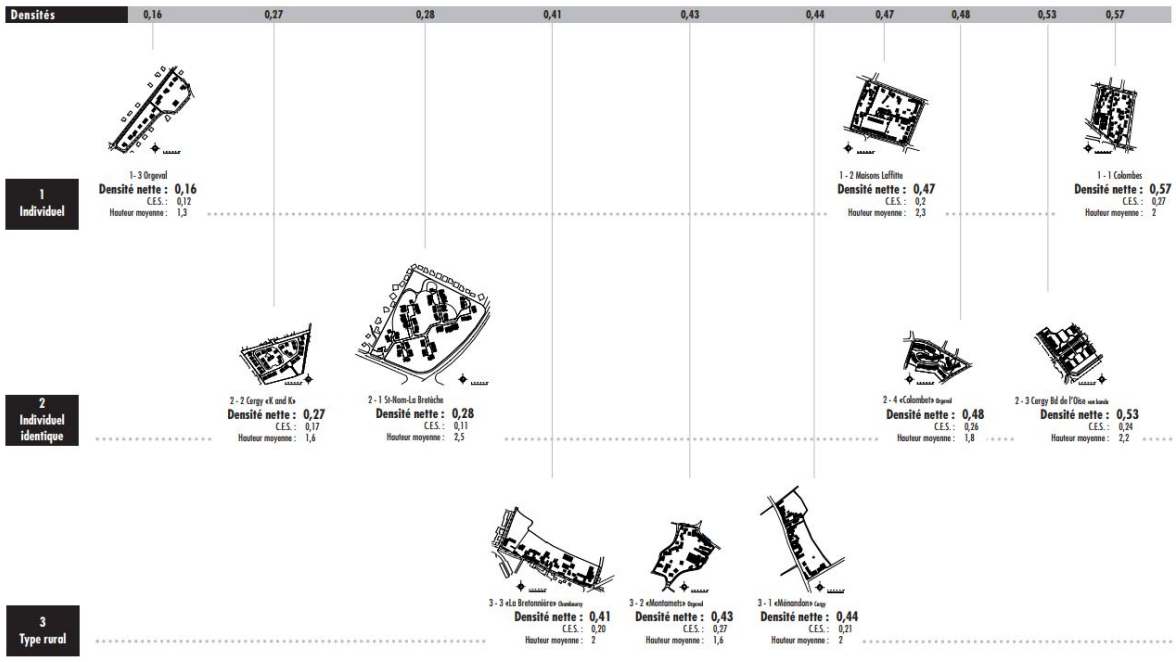


FIGURE 9.80 – Exemple de Forme urbaine pour les formes d'habitats collectives. D'après le référentiel de densité de l'IDF

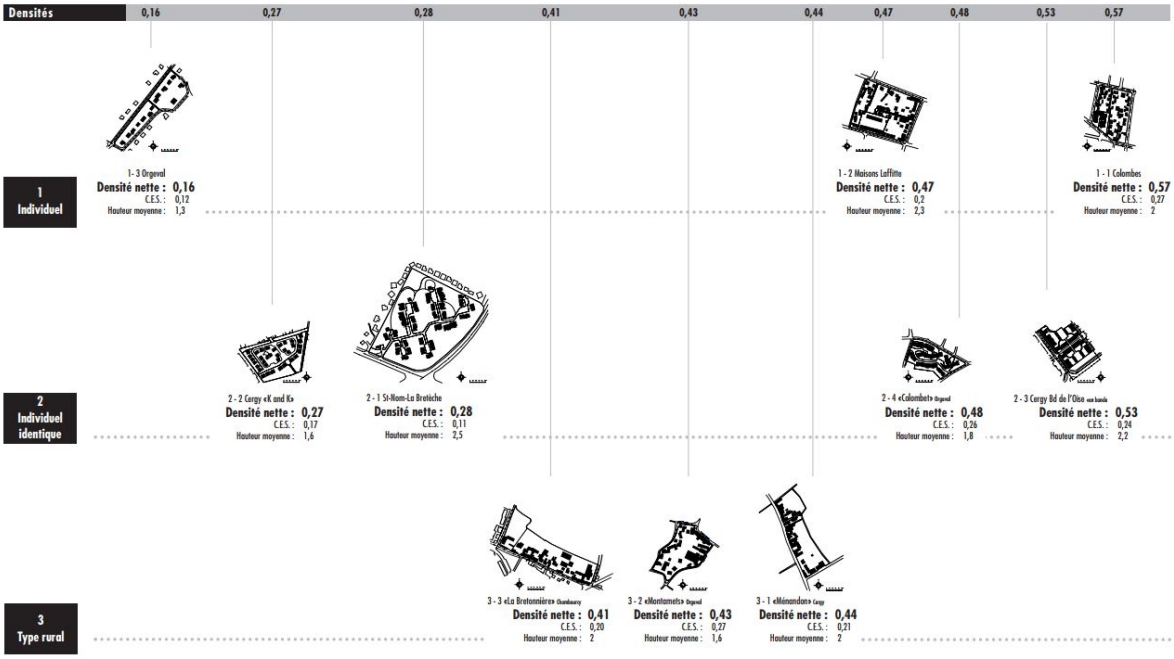


FIGURE 9.81 – Exemple de Forme urbaine pour les formes d'habitats collectives. D'après le référentiel de densité de l'IDF

ANNEXE 2

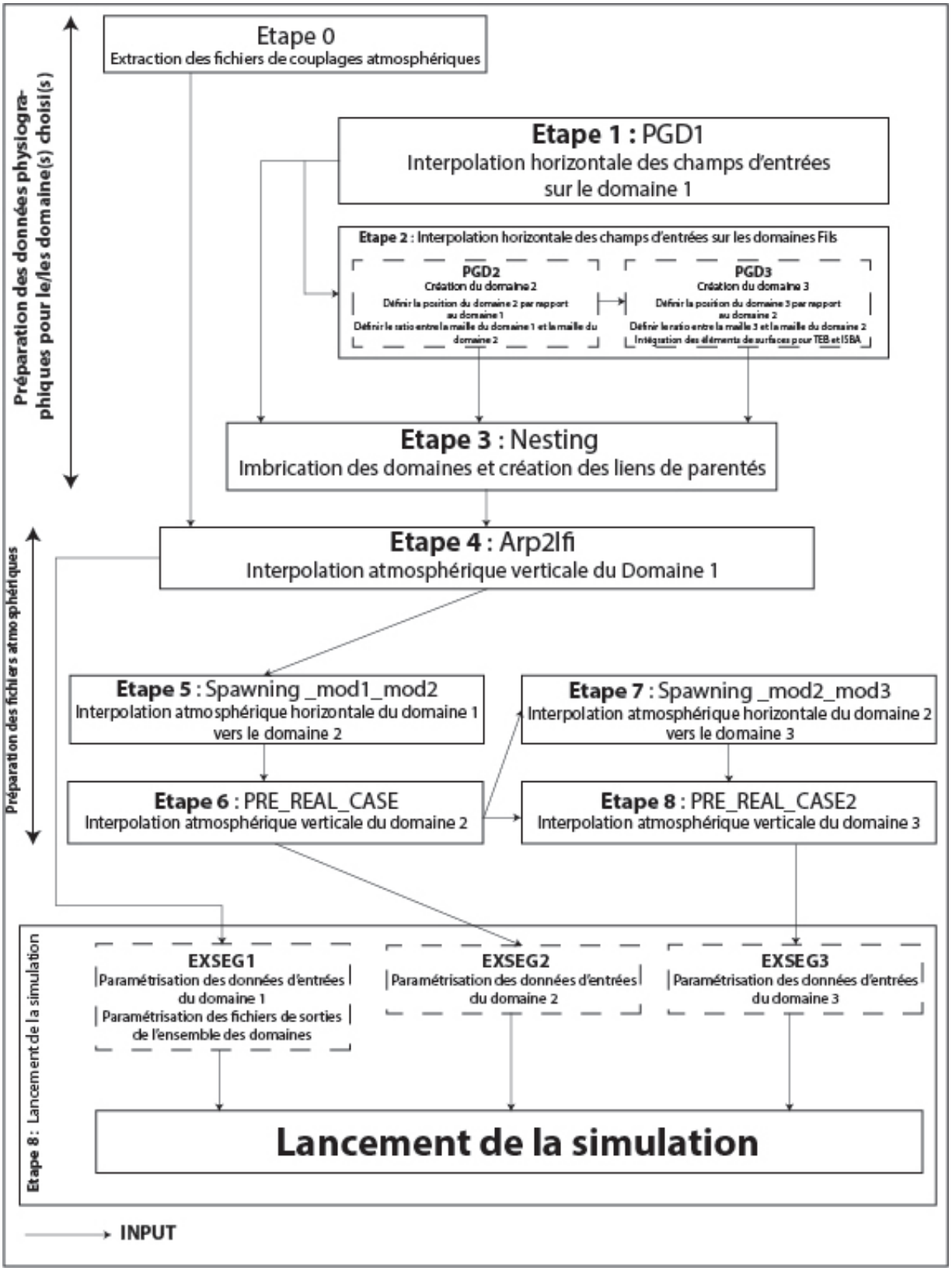


FIGURE 9.82 – Schéma complet des différentes étapes de simulation méso-nh pour 3 domaines

ANNEXE 3

UBFC UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ CRC ThéMA

ENQUÊTE SUR LA QUALITE ENVIRONNEMENTALE EN MILIEU URBAIN

Madame, Monsieur,

Nous sommes étudiants en licence de géographie à l'UB, et dans le cadre de nos travaux universitaires nous devons réaliser une enquête sur la façon dont les habitants de l'agglomération perçoivent la qualité environnementale à Dijon. Nous nous intéressons plus spécifiquement à la qualité de l'air, à la qualité sonore et à la qualité thermique de l'agglomération. Avez-vous 15 minutes à nous accorder ? Nous vous rappelons que ce questionnaire est strictement anonyme*.

**Conformément à la loi informatique et liberté n°78-17 du 6 janvier 1978, les réponses aux sondages n'étant pas obligatoire, vous avez le droit de ne pas répondre à tout, ou partie de ces questionnaires. Conformément à l'article 27 de la même loi, aucune information directement ou indirectement nominative ne sera communiquée.*

Est-ce que vous résidez dans l'agglomération ?

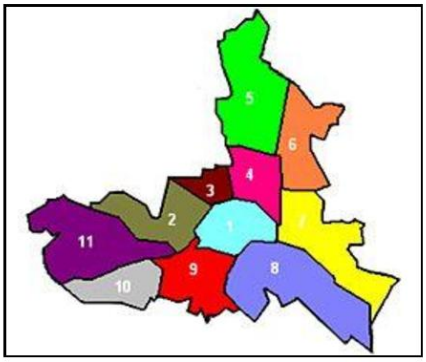
Identifiant enquêteur *(Initiales + Numéro)* :	Date de l'enquête :
Lieu d'enquête *(Numéro)* :	Heure :
Identifiant saisisseur *(Initiales + Numéro)* :	Meteo : ❑ Couvert ❑ Neige ❑ Pluie ❑ Ensoleillé ❑ Brouillard

PARTIE 1 : LIEU DE RESIDENCE ET SENSIBILITE ENVIRONNEMENTALE

1.1 : Ou résidez-vous dans l'agglomération dijonnaise ?

1.1.1 Si Dijon, quel quartier ?

1 : Centre-ville	2 : Gare	3 : Montchapet
4 : Maladière	5 : Toison d'or	
6 : Grésilles	7 : Montmuzard	
8 : Parc	9 : Port Du canal	
10 : Bourroches	11 : Fontaine d'Ouche	



Ou Rue *:* ……
……

1.1.2 Si autre commune, laquelle ?

1	❑ Ahuy	9	❑ Fénay	17	❑ Ouges
2	❑ Bressey-sur-Tille	10	❑ Flavignerot	18	❑ Perrigny-lès-Dijon
3	❑ Breteniere	11	❑ Fontaine-lès-Dijon	19	❑Plombières-lès-Dijon
4	❑ Chenôve	12	❑ Hauteville-lès-Dijon	20	❑ Quetigny
5	❑Chevigny-St Sauveur	13	❑ Longvic	21	❑ Saint-Apollinaire
6	❑ Corcelles-lès-Mont	14	❑ Magny-sur-Tille	22	❑ Sennecey-lès-Dijon
7	❑ Crimolois	15	❑ Marsannay-la-Côte	23	❑ Talant
8	❑ Daix	16	❑ Neuilly-lès-Dijon		

(a) Questionnaire sur la Qualité environnementale en milieu urbain. Page 1

1.2 : Depuis combien de temps résidez-vous dans l'agglomération dijonnaise ?

1 : Moins de 2 ans	2 : Entre 2 et 5 ans	3 : Entre 5 et 10 ans
4 : Entre 10 et 20 ans	5 : Plus de 20 ans	6 : Ne se prononce pas

1.3 : Quel type d'habitat occupez-vous ?

1 ❑ Habitat collectif 2 ❑ Maison de ville 3 ❑ Maison individuelle
4 ❑ Autre (précisez) : ……

1.4 Quel intérêt portez-vous aux problématiques environnementales ?

1 : Aucun intérêt	2 : Peu d'intérêt	3 : Intérêt modéré	4 : Beaucoup d'intérêt	5 : NSP

1.5 : Quelles-sont vos préoccupations environnementales majeures ?
*Plusieurs réponses possibles (**2 à 3 maxi**)*

1 ❑ Préservation de la biodiversité
2 ❑ Dégradation des milieux marins
3 ❑ Changement climatique
4 ❑ Alimentation
5 ❑ Pollution de l'air
6 ❑ Bruit
7 ❑ La gestion des déchets
8 ❑ La qualité de l'eau
9 ❑ La santé
10 ❑ L' énergie
11 ❑ Autre (précisez) : ……

PARTIE 2 : QUALITE DE L'AIR

« Evaluation de l'état de l'air ambiant en fonction du taux de concentration des polluants »

2.1 : Sur une échelle de 1 à 10, comment évaluez-vous la qualité de l'air à Dijon ?

2.2 : Depuis que vous résidez à Dijon, la qualité de l'air est :

1 ❑ Moins bonne 2 ❑ Egale 3 ❑ Meilleure 4 ❑ NSP

2.3 Selon vous, à quelle période de l'année la qualité de l'air est-elle la moins bonne à Dijon ? *Plusieurs réponses possibles*

1 ❑ Printemps 2 ❑ Eté 3 ❑ Automne 4 ❑ Hiver 5 ❑ NSP

2.4 : Selon vous, qu'est ce qui peut dégrader la qualité de l'air à Dijon ? *Plusieurs réponses possibles*

1 : Activités commerciales /Industrielles 2 : Chauffage urbain 3 : Climatisation
4 : Transports /trafic routier 5 : Les pratiques agricoles 6 : Les températures
7 : Autres : précisez ……

2.5 : Que faites-vous pour améliorer la qualité de l'air ? *Plusieurs réponses possibles*

1 : Voitures hybrides/ électriques
2 : Transports en commun/ MAP/ Vélo
3 : Réduction des déplacements
4 : Réduction du chauffage/ climatisation
5 : Rien
6 : NSP
7 : Autres : précisez ……..

(b) Questionnaire sur la Qualité environnementale en milieu urbain. Page 2

2.6: En période de qualité de l'air médiocre, adaptez-vous votre mode de vie ?

1 : Non	2 : TC, velo / MAP	3 : masque	4 : limite mes sorties	5 : visite de proche

6 : Autres : précisez ……..

2.7 : De manière générale quelles actions pourraient être menées pour améliorer la qualité de l'air en ville (à Dijon). *Plusieurs réponses possibles*

1 : Plus d'informations
2 : privilégier la mobilité douce
3 : Plus d'arbres, de végétation
4 : Réduire la circulation routière
5 : Transport public gratuit
6 : NSP
7 : Autres : précisez ……

2.8 : Qui doit/peut agir pour cela ? *Plusieurs réponses possibles*

1 : Collectivités locales 2 : Etat 3 : Europe 4 : Entreprises
5 : Individus/ménages 6 : ONG 7 : NSP 8 : Autres : précisez ……

PARTIE 3 : QUALITE SONORE

3.1 : Sur une échelle de 1 à 10, comment évaluez-vous la qualité sonore à Dijon ?

3.2 : Depuis que vous résidez à Dijon, la qualité sonore est :

1 ❑ Moins bonne 2 ❑ Egale 3 ❑ Meilleure 4 ❑ NSP

3.3 Selon vous, à quelle période de l'année la qualité sonore est-elle la moins bonne à Dijon ? *Plusieurs réponses possibles*

1 ❑ Printemps 2 ❑ Eté 3 ❑ Automne 4 ❑ Hiver 5 ❑ Pas de gêne
6 ❑ Hors vacances scolaires 7 ❑ Vacances scolaires 8 ❑ NSP
9 ❑ Autres : *précisez* ……

3.4 : Dans votre quotidien quels sont les bruits qui vous gênent le plus ? *Plusieurs réponses possibles*

1 : Le trafic routier (voitures) 2 : Les 2 roues 3 : Le transport ferroviaire /aérien
4 : Les transports collectifs 5 : Bars, restaurants fêtes 6 : Activités économiques
7 : Voisinage, animaux 8 : Travaux 9 : Ramassage des ordures
10 : Les avertisseurs sonores (klaxon, sirène) 11 : NSP
12 : Autres : précisez ……

3.5 : Où allez/iriez-vous pour fuir les gênes sonores en milieu urbain ?

1 : Un parc 2 : Le long d'un cours d'eau 3 : Centre-commercial
4 : Bibliothèque/Cinéma/Musée 5 : Chez soi / Nulle part
6 : Zone résidentielle 7 : Hors de la ville 9 : NSP
7 : Autres : précisez ……

3.6 : D'après-vous, qu'est-ce qui pourrait être fait pour réduire les nuisances sonores à Dijon ? *Plusieurs réponses possibles*

1 : Plus de sanctions
2 : privilégier la mobilité douce
3 : Isolation phonique des bâtiments
4 : Réduire la circulation routière
5 : Réduire la vitesse des véhicules
6 : Murs anti bruit, revêtements acoustiques
7 : Plus de véhicules électriques
8 : Eduquer et sensibiliser la population
9 : NSP
10 : Autres : précisez ……

3.7 : Qui doit/peut agir pour cela ? *Plusieurs réponses possibles*

1 : Collectivités locales 2 : Etat 3 : Europe 4 : Entreprises
5 : Individus/ménages 6 : ONG 7 : NSP 8 : Autres : précisez ……

PARTIE 4 : QUALITE THERMIQUE

« "C'est « l'aisance », « le confort » que vous ressentez durant les périodes de forte chaleur »

4.1 : Sur une échelle de 1 à 10, comment évaluez-vous la qualité thermique à Dijon l'été?

4.2 : Depuis que vous résidez à Dijon, la qualité thermique est :

1 ❑ Moins bonne 2 ❑ Egale 3 ❑ Meilleure 4 ❑ NSP

4.3 En période de canicule, êtes-vous plus gêné par la chaleur le jour ou la nuit ?

1 ❑ le jour 2 ❑ la nuit 3 ❑ les deux 4 ❑ Pas de gêne 5 ❑ NSP

4.4 : En période de canicule, modifiez-vous votre mode de vie ? *Plusieurs réponses possibles*

1 : Non 2 : Modification horaires sortie et/ou travail 3 : Fermer les volets
4 : Contact avec personnes fragiles de l'entourage 5 : Boire plus/manger moins
6 : Habits (casquette, vêtements blancs) 7 : Fréquentation lieux climatisés
8 : Achat ventilateur/clim 9 : Douche/piscine 9 : NSP
10 : Autres : précisez ……

4.5 : Connaissez-vous les démarches mise en place par la ville de Dijon pour minimiser l'impact de la chaleur sur la population ?

1 : Appel du CCAS aux personnes vulnérables 2 : Numéros d'urgences
3 : Plan canicule 4 : Fermeture des parcs plus tard 5 : Non
6 : Autres : précisez ……..

4.6: D'après-vous, qu'est-ce qui pourrait être fait pour réduire la chaleur en ville ?
Plusieurs réponses possibles

1 : Réduction de la circulation 2 : Plus de végétation 3 : Brumisateurs
4 : Renforcer isolation thermique des bâtiments 5 : Bâtiments et/ou sols blancs
6 : Plus de fontaine/ point d'eau 7 : Climatisation 8 : Rien 9 :NSP
9 : Autres : précisez ……..

4.7 : Qui doit/peut agir pour cela ? *Plusieurs réponses possibles*

1 : Collectivités locales 2 : Etat 3 : Europe 4 : Entreprises
5 : Individus/ménages 6 : ONG 7 : NSP 8 : Autres : précisez ……

(d) Questionnaire sur la Qualité environnementale en milieu urbain. Page 4

PARTIE 5 :EVALUATION GLOBALE ET SANTE

5.1: Selon vous par ordre d'importance quelle problématique faut-il traiter en priorité? A CLASSER

1 : Qualité de l'air 2 : Qualité sonore 3 : Qualité thermique 4 : NSP/aucune

5.2 : Avez-vous rencontré, vous ou l'un de vos proches, des problèmes récurrents de santé dus à l'une de ces qualités environnementales

❑ OUI : Qualité de l'air ❑ NON ❑ NSP
❑ OUI : Qualité sonore
❑ OUI : Qualité thermique

5.2.1 Si oui, quel âge avait cette (ces) personne(s) ?

1 : moins de 3 ans 2 : de 3 à 17 ans 3 : De 18 à 24 ans 4 : 25 à 39 ans
5 : 40 à 59 ans 6 : 60 à 75 ans 7 : Plus de 75 ans

PARTIE 6 : ILOT DE CHALEUR URBAIN

6.1 Connaissez-vous/avez-vous déjà entendu parler du phénomène d'Ilot de Chaleur Urbain ?

❑ OUI ❑ NON ❑ NSP

Expliquer qu'il s'agit de la ***différence de température entre la ville et sa campagne environnante*** *: la ville se refroidit moins vite la nuit.*

6.1.2 Si oui, où en avez-vous entendu parler ?

1 : Dans les médias 2 : Par mes proches 3 : Au travail
4 : Au cours de mes études 5 : Recherches personnelles 6 : NSP
7 : Autres : précisez ……..

6.2 D'après vous, quelle est la différence de température maximale la nuit entre la ville de Dijon et sa campagne en été ?

1 ❑ 0°C -2°C 2 ❑ 2°C -4°C 3 ❑ 4°C -6°C 4 ❑ Sup. à 6°C 5 ❑ NSP

6.3 : D'après-vous, quelles sont les causes principales de ce phénomène ? Plusieurs réponses possibles

1 : Pollution 2 : Changement climatique 3 : Taille et forme des bâtiments
4 : Couleur des bâtiments 5 : Mauvaise isolation 6 : Densité de bâtiment
7 : Densité d'activités 8 : Densité de population 9 : Les températures la veille
10 : Absence de vent 11 : Manque de végétation 12 : Sols imperméable
13 : Manque d'eau 14 : NSP 15 : Autres : précisez ……

6.4. Quelles sont, selon vous, les zones de l'agglomération de Dijon ou le phénomène d'ilot de chaleur urbain est le plus important ? Question OUVERTE

1 : Centre-ville 2 : Faubourg 3 : Zones commerciales 4 : Zones industrielles
5 : Quartier grand ensemble 6 : Zone pavillonnaire 7 : Proche axe de communication
8 : NSP 9 :Autres : précisez ……

(e) Questionnaire sur la Qualité environnementale en milieu urbain. Page 5

PARTIE 7 : CARACTERISTIQUES DES PERSONNES ENQUETEES

7.1 : Vous êtes : 1. ❑ femme 2.❑ homme 3.❑ Non réponse

7.2 : Quel âge avez-vous ?

1 : moins de 17 ans 2 : De 17 à 24 ans 3 : 25 à 39 ans 4 : 40 à 59 ans
5 : 60 à 75 ans 6 : Plus de 75 ans 7 : Non réponse

7.3 : Quelle est votre catégorie socio-professionnelle ?

1 : Agriculteurs exploitants
2 : Artisans, commerçants et chefs d'entreprise
3 : Cadres et professions intellectuelles supérieures
4 : Professions Intermédiaires
5 : Employés
6 : Ouvriers
7 : Retraité
8 : Sans activité professionnelle
9 : Demandeur d'emplois
10 : Etudiant / Elève
11 : Non réponse

Ou Profession : ……

Avez-vous des remarques complémentaires ?

MERCI POUR VOTRE PARTICIPATION !

(f) Questionnaire sur la Qualité environnementale en milieu urbain. Page 6

FIGURE 9.78 – Questionnaire sur la Qualité environnementale en milieu urbain

ANNEXE 4

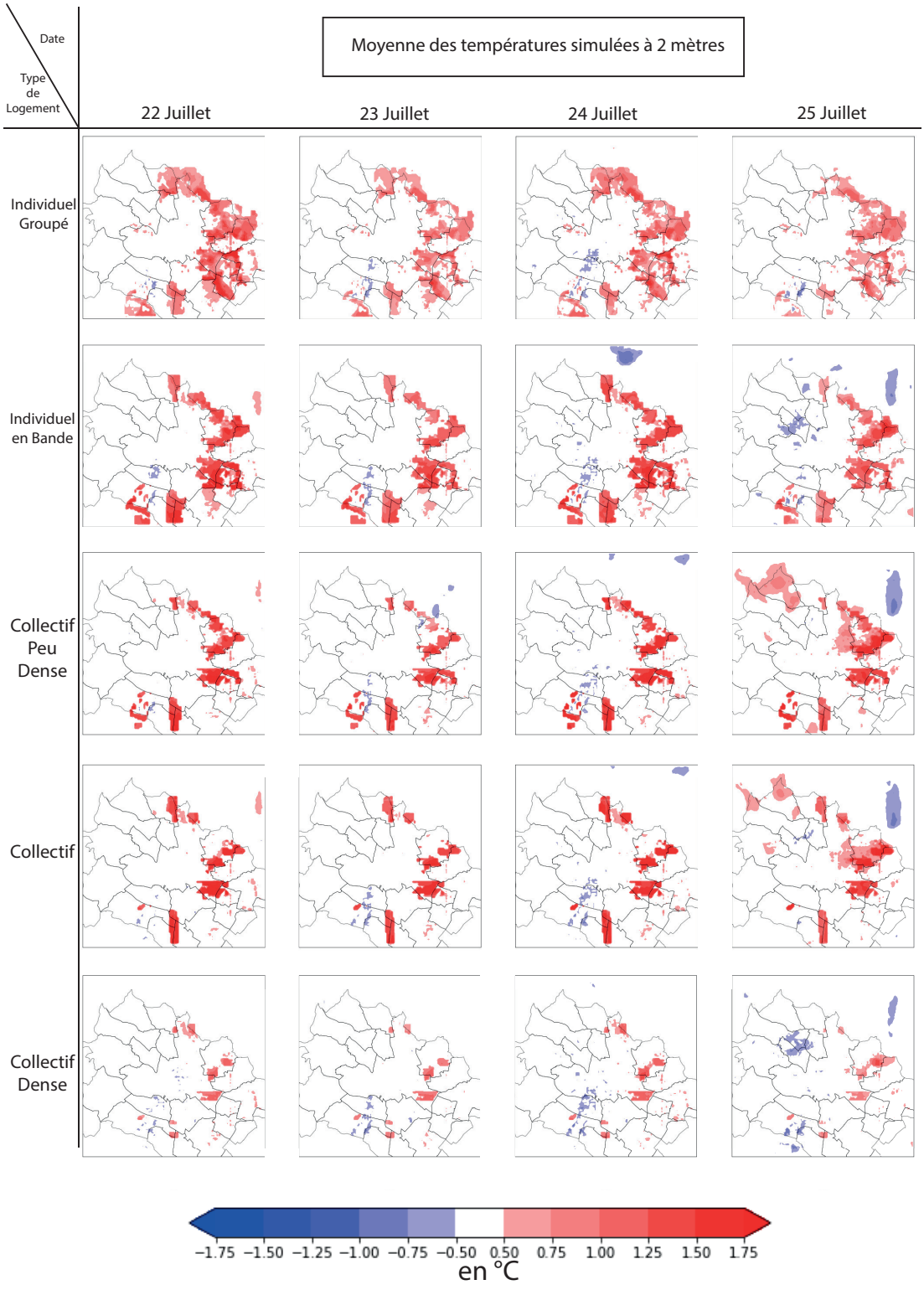


FIGURE 9.79 – Carte des différences de températures à 2 mètres entre chacun des scénarios et la simulation de contrôle pour chaque journée pour l'ensemble des heures.

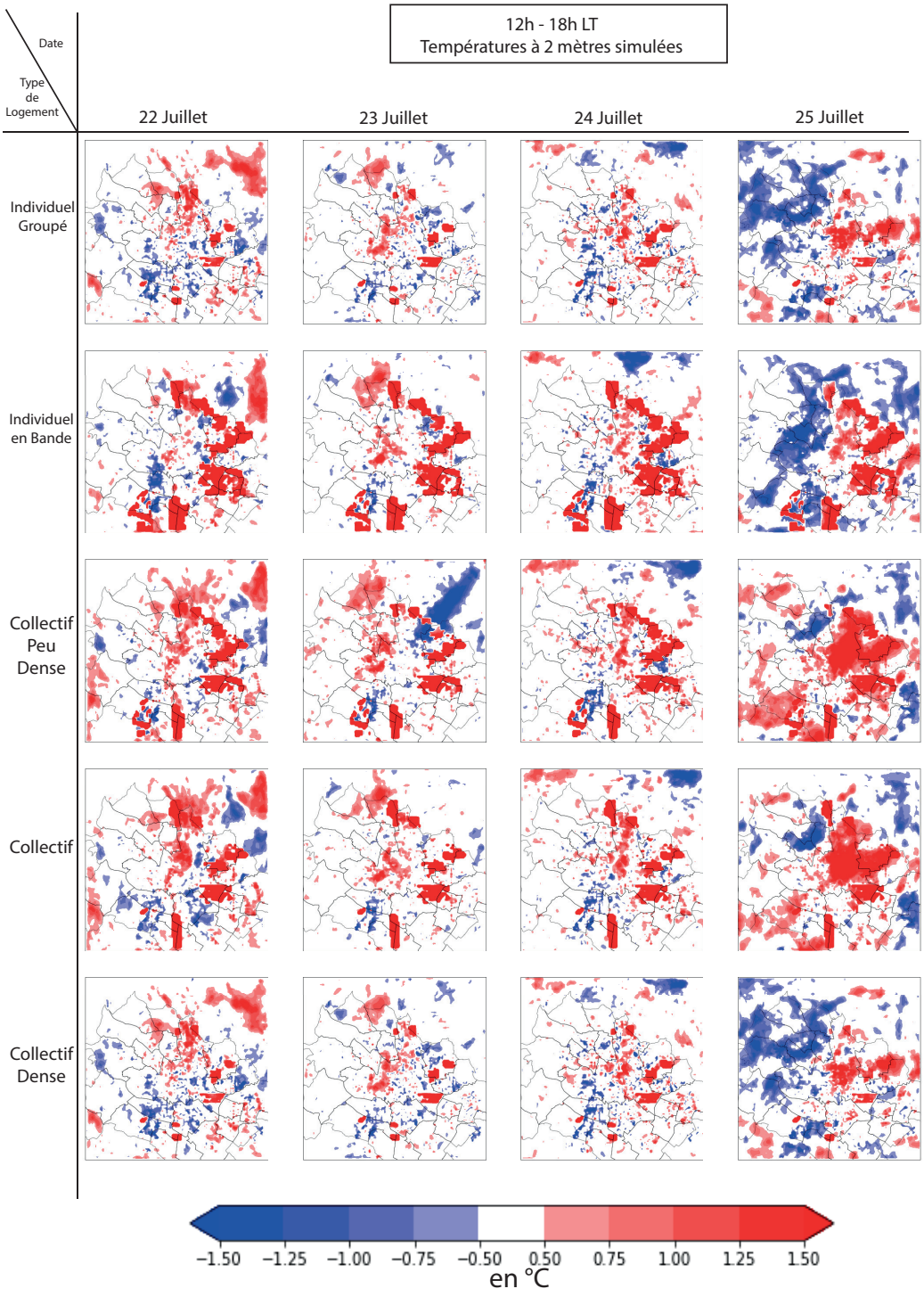


FIGURE 9.80 – Carte des différences de températures à 2 m entre chacun des scénarios et la simulation de contrôle pour chaque journée de 12h à 18h (heure locale).

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale **1**

Partie I. L'Ilot de Chaleur Urbain : un problème de société **5**

Chapitre I : L'ICU, un phénomène qui s'amplifie ? **6**

1.1 Contextes urbains et climatiques de la climatologie urbaine 7

1.1.1 Contextes urbains et climatiques mondiaux 7

1.1.2 Le climat urbain 11

1.2 Focus sur un composant du climat urbain : le phénomène d'Îlot de Chaleur Urbain . . . 14

1.3 L'ICU, une modification du bilan énergétique en milieu urbain 15

1.3.1 Ensoleillement 16

1.3.2 Vent 19

1.3.3 Nébulosité 19

1.4 Synthèse 21

Chapitre II. Lecture multiscalaire de l'urbain et son climat **22**

2.1 De la ville à l'urbain 23

2.2 Présentation des échelles urbaines 24

2.2.1 Structure urbaine : la ville en grand 24

2.2.2 La forme urbaine : des définitions aux multiples formes 28

2.2.3 Design urbain et architecture : des échelles vécues par les habitants 30

2.2.4 Conceptualisation des échelles urbaines 30
2.3 ... et leurs relations avec le climat urbain 33
2.3.1 La structure urbaine : l'échelle d'étude des ICU 33
2.3.2 L'utilisation des LCZs pour l'étude des relations entre forme urbaine et climat urbain. 34
2.3.3 Un design urbain et une architecture au service du réchauffement urbain 38
2.4 Synthèse 44

Synthèse Partie I : L'ICU un phénomène complexe **47**

Partie II : L'ICU, le grand oublié ? **50**

Chapitre III. Possibilités d'intégrations de l'ICU dans les documents d'urbanisme réglementaire **51**
3.1 L'atténuation du phénomène d'ICU comme adaptation au changement climatique 52
3.2 Le Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires et le Plan Climat Air Énergie Territoire 55
3.3 Le SCoT, le document adéquat pour intégrer la problématique de l'ICU 57
3.3.1 Focus sur le rapport de présentation du SCoT 57
3.3.2 Considération de l'ICU dans les SCoT français : exemples des programmes MApUCE et PÆNDORA 62
3.4 Synthèse 64

Chapitre IV : Étude de la croissance urbaine et de l'ICU de Dijon Métropole **65**
4.1 Développement passé et présent de Dijon Métropole 66
4.1.1 Une approche diachronique qui met en avant une structure monocentrique . . . 66
4.1.2 Un relief contraignant la structure urbaine de Dijon Métropole 68
4.2 Réseau MUSTARDijon et étude de l'ICU de Dijon Métropole 70
4.2.1 Réseau MUSTARDijon 70
4.2.2 Canicule et Mortalité à Dijon 73
4.3 Politique de croissance urbaine du Dijon Métropole 75
4.3.1 Politique et logement de Dijon Métropole : PADD du SCoT et PLUi 75
4.3.2 Choix de la période d'étude 79
4.4 Synthèse 83

Synthèse Partie II : La nécessité d'intégrer l'ICU dans l'aménagement urbain **84**

Partie III : L'ICU à la croisée des modèles **85**

Chapitre V : Quelle méthodologie pour l'étude de la croissance urbaine et du climat urbain ? **87**

5.1 Relations entre modèles de croissance urbaine et de climat urbain 87

5.2 Quelles méthodes pour évaluer l'impact de l'urbanisation sur l'ICU ? 88

5.2.1 L'étude d'impact, la méthode classique pour l'étude du climat urbain 88

5.2.2 Les méthodes "SAS" et "scénario-dépendant" pour une étude plus fine du climat urbain 90

5.3 Proposition d'une méthode pour l'évaluation de l'impact de la croissance urbaine sur les températures urbaines 93

5.4 Synthèse 97

Chapitre VI : Les modèles de climat **98**

6.1 Fonctionnement général des modèles de climat à Méso-échelle 98

6.2 Présentation du modèle de climat urbain SURFEX/TEB 101

6.2.1 SURFEX 101

6.2.2 Modélisation climatique urbaine et modèle TEB 104

6.3 Synthèse 109

Chapitre VII : Quel modèle de croissance urbaine pour être intégré dans un modèle de climat ? **111**

7.1 Système Multi-Agents ou Automates Cellulaires : quelle approche pour simuler la croissance urbaine ? 111

7.2 Le modèle SLEUTH : un système d'automate cellulaire adéquat pour l'approche "modèle-dépendante" ? 114

7.3 MUP-City : un modèle de croissance urbaine adéquat pour être intégré dans un modèle de climat 115

7.4 Synthèse 117

Synthèse Partie III : Une approche KIDS to KISS pour étudier le climat urbain **118**

Partie IV : Climat urbain et croissance urbaine : vers un urbanisme prospectif **121**

Chapitre VIII : Penser la croissance urbaine à travers les LCZs **122**

8.1 Méthodologie pour la construction de scénarios de croissance urbaine 122
8.2 Loger les habitants, une réalité intemporelle 124
8.2.1 Démographie et “Point mort” 124
8.3 Création des LCZs à partir des scénarios 128
8.3.1 Imaginer la ville de demain 128
8.3.2 Scénarisation : de la fiction à la réalité grâce aux LCZs 131
8.3.3 Intégration des scénarios dans le logiciel MUP-City 135
8.4 Résultats des simulations de croissance urbaine pour Dijon Métropole 137
8.5 Synthèse 141

Chapitre IX : Simulation climatique : paramétrisation et analyse des biais **143**
9.1 Intégration des scénarios de croissance urbaine 144
9.2 Caractérisation des biais de la simulation de contrôle 146
9.2.1 Champs thermiques observés et simulés 146
9.2.2 Analyse spatiale des températures du 22 au 26 juillet 2018 149
9.2.3 Analyse spatiale des températures simulées nocturnes et diurnes 152
9.2.4 Analyses temporelles 155
9.2.5 Analyse par LCZs des températures simulées 160
9.3 Sensibilité de la température aux formes urbaines 161
9.3.1 Analyse journalière des températures des scénarios de croissance urbaine . . . 161
9.3.2 Impact des formes urbaines sur quelques secteurs clés 164
9.4 Synthèse 166

Synthèse Partie IV : Simuler le climat urbain, un outil prospectif urbain majeur **167**

Conclusion générale **169**

Bibliographie **174**

Annexes **195**

LISTE DES FIGURES

1.1 Evolution de la population mondiale 1950 - 2050. (UNITED NATIONS 2018) 8

1.2 Scénarios d'émission du GIEC. Global Carbon Project 10

1.3 Échelles spatiales au sein de la couche limite urbaine (PIRINGER et al. 2002) 13

1.4 Phénomène d'îlot de chaleur urbain (U.S Global Change Research Program) 14

1.5 Températures observées en ville et à la campagne pendant 24h en condition idéalisée d'observation de l'ICU. Adaptée de Oke T.R. (1987) par Foissard (2015) 15

1.6 Comparaison du bilan énergétique moyen entre la ville ("suburban") et la campagne ("rural") sur 24h, réparti selon les flux suivants : le rayonnement net (Q*), le flux de chaleur sensible (QH), le flux de chaleur latente (QE) et le flux de chaleur stockée (Δ Qs). D'après OKE 1987 17

1.7 Schéma descriptif du bilan énergétique pour une zone urbaine (DUCHENE-MARULLAZ 1980 18

1.8 Profil de la vitesse du vent pour différentes surfaces (CHATELET, FERNANDEZ et LAVIGNE 1998). 19

2.9 Approche multidimensionnelle de la structure métropolitaine (LE NÉCHET 2015) 25

2.10 Différentes formes de croissance urbaine (GALSTER et al. 2001) 27

2.11 Schéma de compréhension des échelles urbaines et leur relation avec le climat. Pour des soucis de compréhension, la Forme urbaine, le Design urbain et l'Architecture sont représentés à la même échelle. 32

2.12 Tableau des valeurs des différents paramètres des LCZs. De STEWART et OKE 2012 . . . 35

2.13 Classification des Local Climate Zones (LCZ) 37

2.14 Schéma synthétique de l'impact de la végétation en milieu urbain. *ALTERRE* BOURGOGNE 2010 39

2.15 Effet d'un arbre sur son environnement en termes de chaleur a. et de rayonnement b. (BIGORGNE, ALBA et C 2012) 40

2.16 Nombre d'arbres ajoutés dans chaque zone métropolitaine et leurs effets simulés sur la réduction des températures ambiantes d'après (AKBARI et ROSE 2001). 41

2.17 Schéma de compréhension des échelles urbaines et leur relation avec le climat. Pour des soucis de compréhension, la Forme urbaine, le Design urbain et l'Architecture sont représentés à la même échelle. 45

2.18 Schéma de compréhension de la pluridisciplinarité transitive (urbanisme, géographie, aménagement et climatologie) pour l'étude du climat urbain. D'après MARSHALL 2012 . 48

3.19 Schéma des relations entre l'atténuation du phénomène d'ICU et l'adaptation au changement climatique. 54

3.20 Loi SRU : Loi de Solidarité et de Renouvellement Urbain. Source : Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales 57

3.21 Les composants du SCoT. Politiques publiques, aménagement urbanisme, habitat, construction et planification. D'après le Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales 60

3.22 A. Carte des villes françaises pour lesquelles les données MApUCE sont disponibles. B.Présentation du type de bâtiment majoritaire par îlot pour Dijon Métropole. Source : orbgis.fr 63

4.23 Année de construction moyenne du bâti Dijonnais par maille de 2.25 ha. D'après les données cadastrales de Dijon Métropole. 67

4.24 Présentation de Dijon Métropole à travers sa topographie, son bâti et son réseau de communication principal 69

4.25 Présentation du réseau de mesure MUSTARDijon. A. abris M-RSA contenant des sondes hygro-thermométriques. B. HOBO U23 Pro v2 sensor. C. Exemple de fixation sur candélabre à 3m de hauteur 70

4.26 Carte du terrain d'étude et du réseau MUSTARDijon avec ses LCZs correspondante (RICHARD et al. 2018) 71

4.27 Terrain d'étude de Dijon Métropole par : a) Local Climate Zones ; b) Urban Climate Zones (UCZs) ; avec n = le nombre de sonde MUSTARDijon par groupe. (RICHARD et al. 2018) 72

4.28 Profils thermiques diurnes moyens (24 Juillets au 8 Août 2018) des 60 sondes selon la LCZ (Heure UTC) (RICHARD et al. 2018) 73

4.29 Mortalité journalière en Bourgogne et température maximale moyenne de la région, du 25 mai au 31 août 2003 (BESANCENOT, HAVARD et CASSAGNE 2006) 74

4.30 La surmortalité du 1er au 18 août par unité urbaine en Côte-d'Or (BESANCENOT, HAVARD et CASSAGNE 2006) 75

4.31 Carte du SCoT Dijonnais et de ses 3 EPCI. Source SCoT Dijon 76

4.32 Caractéristiques de la canicule de juillet 2018 par rapport aux autres canicules survenues en France (Météo-France) 80

4.33 Evolution de la température moyenne quotidienne en France par rapport à la normale quotidienne du 1er Juin 2018 au 27 Août 2018 (Météo France) 81

4.34 Présentation de la période d'étude du 22 au 26 Juillet 2018 en heure UTC d'après le réseau de mesure MUSTARDijon et la station Météo-France. 82

5.35 Schéma conceptuel d'une "étude d'impact" 90

5.36 Schéma de l'approche "scénario-dépendante" de l'étude de MASSON et al. 2014, et *Storyline And Simulation* (ALCAMO 2008) 93

5.37 Schéma de l'approche "modèle-dépendante" proposée 96

6.38 Exemple du maillage artificiel permettant la mise en place des modèles et simulations climatiques. D'après Fairhead - CNRS 99

6.39 Fonctionnement schématique de l'imbrication de domaine (ici de facteur 3). D'après la documentation Meso-NH 100

6.40 Représentation schématique de la grille C d'arakawa et des interactions entre les modèles SURFEX et MNH 102

6.41 Schéma du fonctionnement de SURFEX et de son interaction avec le modèle atmosphérique. Source : CNRM 103

6.42 Représentation schématique de SURFEX et couplage avec un modèle de climat (MASSON et al. 2013b) 104

6.43 Schéma représentant le bilan d'énergie intégré dans TEB (MASSON 2000) 106

6.44 Approche de TEB-VEG pour calculer les flux de surfaces dans chaque maille (LEMONSU et al. 2012) 107

6.45 Présentation des données d'entrées sélectionnées du modèle TEB. D'après MASSON 2000. 108

6.46 Synthèse des étapes de simulations et de l'intégration des scénarios de croissance urbaine 110

7.47 Processus d'organisation et d'observation de deux approches de géosimulation : le système multi-agents(à droite) et l'automate cellulaire (à gauche). D'après EMERY 2015 . . 113

7.48 Schéma descriptif de MUP-City avec un exemple de résultat de simulation superposé à une photographie (COLOMB 2017) 115

7.49 Données d'entrées nécessaires au modèle de croissance urbaine MUP-City 116

7.50 Conceptualisation de la méthode "modèle-dépendante" à travers l'approche KIDS/KISS. D'après BANOS et SANDERS 2012 120

8.51 Schéma de la méthode de construction des scénarios. 124

8.52 Calcul du nombre de logements pour l'horizon 2050 à Dijon Métropole. 127

8.53 Scénarios de croissance urbaine. D'après les travaux de HOUET et al. 2016. 130

8.54 Formes urbaines de chaque scénario de croissance urbaine. 132

8.55 Formes urbaines correspondantes à chaque scénario de croissance urbaine. 133

8.56 Estimation du nombre de logements pour 2.25 ha par scénario et du nombre total de mailles à urbaniser. 134

8.57 Étalement urbain de Dijon Métropole selon différents scénarios de croissance urbaine . . 135

8.58 Présentation des étapes de simulations du logiciel MUP-City. Exemple du scénario de croissance urbaine avec logements individuels groupés. 136

8.59 Résultat des simulations de croissance urbaine pour les scénarios de logements individuels groupés (LCZ 9) 138

8.60 Résultat des simulations de croissance urbaine pour les scénarios de logements individuels en bandes (LCZ 6) 138

8.61 Résultat des simulations de croissance urbaine pour les scénarios de logements collectifs peu denses (LCZ 3) 139

8.62 Résultat des simulations de croissance urbaine pour les scénarios de logements collectifs (LCZ 2) 139

8.63 Résultat des simulations de croissance urbaine pour les scénarios de logements collectifs denses (LCZ 4) 140

8.64 Construction de la méthode 'modèle-dépendante" à travers l'approche KISS/KIDS. Adaptée de BANOS et SANDERS 2012 142

9.65 Tableau synthétique des étapes de simulation de Meso-NH pour 3 domaines de simulations 145

9.66 Températures interpolées à partir des données MUSTARDijon (A) et simulée à 2m (B) pour les journées du 24 (1) et du 25 (2) Juillet 2018 de 12h à 18h (LT) 147

9.67 Température interpolée à partir des données MUSTARDijon (A) et simulée à 2m (B) pour les nuits du 24 au 25 (1) et du 25 au 26 (2) Juillet 20148 de 23h à 05h (LT) 149

9.68 Moyenne des températures à 2m et potentielles journalières simulées et mesurées pour les domaines 2 et 3. 151

9.69 Moyenne des températures à 2m et potentielles de 12 h à 18h simulées et mesurées pour les domaines 2 et 3. 153

9.70 Moyenne des températures à 2m et potentielles de 23h à 5h simulées et mesurées pour les domaines 2 et 3. 154

9.71 Température à 2m horaire des indices urbains et ruraux 156

9.72 Comparaison entre l'ICU simulé (températures à 2m) et l'ICU observé 157

9.73 Moyennes des températures potentielles simulées et observées des quatre sondes urbaines et rurales pour l'ensemble de la période 158

9.74 Comparaison entre l'ICU simulé (températures potentielles) et l'ICU observé 159

9.75 Comparaison des observations et des températures potentielles de la simulation de contrôle pour les LCZs pour l'ensemble de la période d'étude. En bleu : les températures potentielles. En rouge : les températures observées 161

9.76 Carte des différences de températures potentielles entre chacun des scénarios et la simulation de contrôle pour chaque journée de 12h à 18h (heure locale). 163

9.77 Boxplot des différences moyennes des températures potentielles pour la journée (12h - 18h) pour la position de la sonde 54 (Route de couternon) avec la simulation de contrôle 164

9.78 Boxplot des différences moyennes des températures potentielles pour la journée (12h - 18h) de la position de la sonde 53 (Chemin de Cromois) avec la simulation de contrôle . 165

9.79 Schéma de compréhension de l'approche "modèle-dépendante". Adaptée de BANOS et SANDERS 2012 171

9.80 Exemple de Forme urbaine pour les formes d'habitats collectives. D'après le référentiel de densité de l'IDF 195

9.81 Exemple de Forme urbaine pour les formes d'habitats collectives. D'après le référentiel de densité de l'IDF 196

9.82 Schéma complet des différentes étapes de simulation méso-nh pour 3 domaines 197

9.78 Questionnaire sur la Qualité environnementale en milieu urbain 203

9.79 Carte des différences de températures à 2 mètres entre chacun des scénarios et la simulation de contrôle pour chaque journée pour l'ensemble des heures. 204

9.80 Carte des différences de températures à 2 m entre chacun des scénarios et la simulation de contrôle pour chaque journée de 12h à 18h (heure locale). 205

Résumé

Dans cette thèse, le milieu urbain est considéré comme un système complexe, situé au carrefour de deux dimensions aux temporalités différentes et multiples : le climat et la société. Le climat urbain est le fruit de la rencontre entre une des expressions les plus abouties de notre société, la ville, et le climat. Le climat urbain est une modification du climat, provoquée par la présence d'une ville qui peut se résumer par la notion d'Îlot de Chaleur Urbain (ICU).

Dans un contexte global de changement climatique combinant adaptation, atténuation et croissance urbaine, l'ICU tend à s'amplifier. Ses impacts sanitaires sur les populations deviennent préoccupants. Ce travail se situe dans une optique d'amélioration des connaissances de l'impact de la forme urbaine et de la croissance urbaine sur l'intensité de l'ICU à travers la mise en place d'une méthode permettant d'intégrer le climat urbain dans les processus décisionnels.

Pour ce faire, une approche "modèle-dépendante" est adoptée. Cinq scénarios de croissance urbaine reposent sur un nombre de logements identiques mais correspondent à des Local Climate Zones différentes (Logements individuels groupés - LCZ 9, Logements individuels en bandes - LCZ 6, Collectifs peu denses - LCZ 3, Collectifs - LCZ 2, Collectifs denses - LCZ 4). Ceux-ci sont élaborés, à l'horizon 2050, en fonction des données d'entrées des modèles de croissance (MUP-City) et de climat urbain (Meso-NH/TEB).

Afin d'évaluer la capacité de Meso-NH/TEB à reproduire les températures sur Dijon Métropole, une simulation de contrôle, portant sur la ville actuelle, est préalablement confrontée aux données du réseau MUSTARDijon pour la période caniculaire du 22 au 26 Juillet 2018. La comparaison des résultats avec le réseau *in situ* MUSTARDijon montre que les températures simulées sont spatialement et temporellement cohérentes avec les observations. Le cycle diurne est correctement modélisé ainsi que les milieux urbains et ruraux. Un biais important est présent les nuits en milieu rural où les températures restent élevées, limitant l'intensité de l'ICU simulé. Les températures simulées des cinq scénarios sont, temporellement cohérentes, les maximums et minimums de températures coïncident avec la simulation de contrôle. Comparées à la simulation de contrôle, pour les journées (12h à 18h), les zones scénarisées avec les LCZs 3 et 2 présentent des températures plus chaudes que les zones scénarisées avec les LCZs 9 et 6. Les scénarios pour lesquels le pourcentage de bâti est le plus faible présentent des augmentations de températures les moins importantes. Enfin, il semblerait que construire, quelle que soit la forme urbaine, en périphérie des zones bâties déjà existantes, impacte peu la température de celles-ci.

Mots-clés : Climatologie urbaine, îlot de chaleur urbain, modélisation, simulation, Meso-NH, TEB

Abstract

The urban environment is at the crossroads of two complex systems with different temporalities : climate and society. The urban climate is a modification of the climate caused by the presence of a city. The most successful expression of this climate change by the presence of the city is the phenomenon of Urban Heat Island (UHI).

In a global context of adaptation and mitigation to climate change and urban development, this phenomenon of ICU tends to increase, and its health impacts on populations to become more prominent. This work is aimed at improving the knowledge of the impact of urban form and urban development on the intensity of the UCI through the implementation of a decision support tool allowing to integrate urban climate into decision-making processes.

To do this, a " model-dependent " approach has been adopted. Five urban growth scenarios are based on the same number of housing but correspond to different Local Climate Zones (Grouped individual housing - LCZ 9, Individual group housing - LCZ 6, Low density collective - LCZ 3, Collective - LCZ 2, Dense collective - LCZ 4). These are developed by 2050, based on input data from growth models (MUP-City) and urban climate (Meso-NH / TEB).

In order to assess the ability of Meso-NH / TEB to reproduce temperatures in Dijon Métropole, a control simulation, relating to the current city, is previously compared with data from the MUSTARDijon network for the heat wave period from 22 to 26 July 2018. A comparison of the results with the MUSTARDijon textit in situ network shows that the simulated temperatures are spatially and temporally consistent with the observations. The diurnal cycle is correctly modeled as well as urban and rural environments. A significant bias is present at nights in rural areas where temperatures remain high, limiting the intensity of the simulated UI. Compared to the control simulation, for the days (12LT to 18LT), the scenario with LCZs 3 and 2 present warmer temperatures than the scenario with LCZs 9 and 6. The scenarios for which the building percentage is the smallest has the smallest temperature increases. Finally, it would seem that building, whatever the urban form, on the outskirts of already defined built-up areas, has little impact on their temperature.

Keywords : Urban climatology, urban heat island, modeling, simulation, Meso-NH, Town energy Balance.