



HAL
open science

L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise

Xavier Foissard

► **To cite this version:**

Xavier Foissard. L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise. Géographie. Université Rennes 2, 2015. Français. NNT : 2015REN20027 . tel-01381999

HAL Id: tel-01381999

<https://theses.hal.science/tel-01381999v1>

Submitted on 15 Oct 2016

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.



THESE / UNIVERSITE RENNES 2 HAUTE-BRETAGNE

sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE EUROPEENNE DE BRETAGNE

Mention : Géographie

Ecole doctorale Sciences Humaines et Sociales

présentée par

Xavier FOISSARD

Préparée à l'Unité Mixte de Recherche 6554 CNRS

LETG Rennes COSTEL

Université Rennes 2 Haute-Bretagne

L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise

Thèse soutenue le 14 octobre 2015

devant le jury composé de :

Gilles Drogue

Maître de conférences HDR, Université de Metz / *rapporteur*

Valéry Masson

Chercheur IPEF HDR, CNRM Météo-France Toulouse / *rapporteur*

Pierre Carrega

Professeur, Université de Nice / *examineur*

Jãoo Lima Sant'Anna Neto

Professeur, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente / *examineur*

Christelle Leproust

Responsable du Service Environnement Energie, Rennes Métropole / *référente*

Hervé Quéno

Directeur de recherche CNRS, Université Rennes 2 / *co-directeur de thèse*

Vincent Dubreuil

Professeur, Université Rennes 2 / *directeur de thèse*

Remerciements

J'adresse mes premiers remerciements à mes directeurs de thèse Vincent Dubreuil et Hervé Quénol. Sans eux, ce projet de thèse n'aurait pas pu voir le jour. Je vous remercie d'avoir accepté d'encadrer cette thèse et surtout de m'avoir apporté vos conseils éclairés pour mener à bien ce travail. J'en suis reconnaissant car vous avez toujours cru en mon travail et vous avez su le valoriser. Vous m'avez encouragé à présenter mon travail dans de nombreux colloques et séminaires, ce qui m'a permis de rencontrer et d'échanger avec un grand nombre de chercheurs en France et à l'étranger. Je tiens à vous remercier pour votre patience et vos encouragements pour franchir toutes les étapes. Vincent, merci beaucoup pour ta rigueur et tes remarques qui ne manquent jamais leur but. J'ai apprécié nos échanges, ils m'ont beaucoup apporté et, notamment, de nouvelles perspectives. Hervé, merci pour ton dynamisme ; tu as su m'encadrer pour mener ce travail de thèse vers des questions nouvelles et enrichissantes. Tu m'as toujours soutenu et tu as toujours de la ressource pour réaliser chaque nouveau projet.

Mes remerciements vont à Christelle Leproust et Roland Gicquel pour m'avoir accueilli, guidé et encouragé tout au long de cette thèse, au sein de Rennes Métropole. Vous avez su interagir et donner une dimension appliquée à mon travail. Les développements de ma thèse ont pu trouver un écho à Rennes Métropole grâce à vous.

Je tiens à remercier Valéry Masson, Gilles Drogue, Pierre Carrega, Wilfried Endlicher, João Lima Sant'Anna Neto et Christelle Leproust d'avoir accepté d'évaluer mon travail et d'être membre de mon jury de thèse.

Je remercie évidemment Rennes Métropole et le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche d'avoir rendu possible et financé cette thèse. Je remercie également le laboratoire LETG-COSTEL, l'Ecole Doctorale SHS de l'Université Rennes 2 et la Région Bretagne d'avoir financé mes déplacements et ma participation aux colloques nationaux et internationaux.

Je poursuis mes remerciements à l'ensemble des membres du laboratoire COSTEL avec qui j'ai passé d'excellents moments sur le plan professionnel et personnel. Ces remerciements s'adressent à l'équipe administrative, aux permanents, aux intermittents et aux ingénieurs. Je remercie nécessairement les doctorants-docteurs-ingénieurs qui m'ont entouré et avec qui j'ai tissé des liens d'amitiés aux cours de ces années : Abdou, Adeline, Alban, Amit, Chloé, Clémence, Cyril, Julie, Edwige, Emilie, Etienne, Fernanda, Florian, Gong Xing, Haya, Heloisa, Igor, Janique, Jean, Karel, Lucelma, Marianne, Maxime, Mercedes, Pascal, Perrine, Pierre, Renan, Sébastien, Solen, Soazig et Véronique.

Mes remerciements vont au service environnement énergie et aux services associés de Rennes Métropole qui m'ont accueilli chaleureusement, aiguillé et conseillé durant ma thèse. Je tiens à remercier Brendan, Nathalie, Hélène, Bénédicte, Armelle et Laurence. J'en profite pour

remercier l'ensemble des personnes que j'ai pu rencontrer à Rennes Métropole et qui m'ont accordé du temps et de leur attention.

D'une manière générale, je remercie tous ceux qui ont contribué de loin ou près à cette thèse, j'espère qu'ils se reconnaîtront. Ces remerciements s'adressent à tous ceux que j'ai pu rencontrer pendant mes nombreuses heures de terrain : à tous ceux qui ont accepté d'héberger un capteur ou une station météorologique contre un peu de leur temps, à celui qui m'a laissé un mystérieux message dans une station pour me souhaiter un joyeux Noël, aux personnes qui ont accepté de me prêter les outils manquants puis un pansement, au nid-de-mulots-surprise dans une station météo, à m#!-un-PV, au paf-chauffard-constat-ouf, etc...

Je remercie mes amis, qui malgré leur distance de Rennes sont toujours présents pour les meilleurs moments. Je remercie les « anciens du Corbu », que j'ai toujours le plus grand plaisir de retrouver : Gus, Chinese, Pit, Med, Tanguy, Nico, Clem, Sonia, Marion, Xavier, Chabou, Carole, Cyr, Elsie. Un grand merci à ceux qui sont toujours présents avec le sourire, qui ne manquent jamais de partager ces instants de bonheur (et ils se multiplient...) : Anthony, Carole, Sylvain, Amélie, Jonathan, Virginie, Emilie, Alex et Anne-Claude. C'est avec plaisir que je retourne mes remerciements à mes infailibles compagnons Nicolas et Fabien. Et une pensée m'accompagne pour Thomas (TS), Guillaume & Amandine (Bitolski !) et Paola.

J'adresse mes derniers remerciements à ma famille qui a toujours été présente pour moi. Je remercie avec émotion mes parents, mon oncle et mon frère qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans tout ce que j'entreprends. Je remercie mes grands-parents qui sont toujours présents malgré tout. Je remercie chaleureusement Joël, Chantal et Arnaud sur qui je peux compter. Et enfin, je peux te répondre, à toi qui : « De cire ou de son, elles te feront un blanc manteau. Je le suis déjà à moitié, je suis né au quartier latin ». Oui, toi, qui m'a accompagné et encouragé jusqu'au bout et pour la suite... Merci !



Sommaire

Introduction générale.....	1
PARTIE I : CONTEXTE ET METHODE DE MESURES SUR LE TERRITOIRE DE RENNES METROPOLE	
Chapitre 1 : L'îlot de chaleur urbain.....	9
Chapitre 2 : Le territoire rennais et le changement climatique	25
Chapitre 3 : Les réseaux de mesures : de l'échelle de l'agglomération à l'échelle des quartiers	39
PARTIE II : ANALYSES SPATIALES ET MODELISATIONS DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN	
Chapitre 4 : Spatialisation de l'îlot de chaleur urbain à Rennes Métropole par analyses multicritères	73
Chapitre 5 : Cartographie de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle de l'agglomération	95
Chapitre 6 : L'îlot de chaleur urbain à l'échelle des quartiers : spatialisation et limites scalaires	123
PARTIE III : LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LES MOYENS D'ADAPTATION EN VILLE	
Chapitre 7 : Occurrence de l'îlot de chaleur urbain rennais et types de temps	151
Chapitre 8 : Le changement climatique à Rennes : analyse et application des sorties de modèles	171
Chapitre 9 : Les outils d'adaptation du territoire rennais à l'îlot de chaleur urbain	183
Conclusion générale	203
Bibliographie	207
Annexes	221
Liste des figures.....	229
Liste des tables.....	233

Introduction générale

Au cours du XXème siècle la population mondiale a très fortement augmenté. En 1910, elle est estimée à 1,75 milliards d'habitants, puis en 1950 à 2,5 milliards et, actuellement à plus de 7 milliards d'habitants. Dans le même temps, les villes connaissent une croissance spectaculaire : en 1950, 30% de la population mondiale vivait dans les villes, puis en 2008 le seuil de 50% de la population urbaine est franchi et en 2012, la proportion de citadins dans le monde est de 54%. Cette tendance se poursuit, les projections indiquent 6,3 milliards d'habitants dans les villes en 2050 (United Nations 2013).

En France, dès les années 50, la moitié de la population vit en ville et depuis l'exode rural s'est poursuivi. Ainsi, en 2014, la France compte 64,6 millions d'habitants pour 79,3% d'habitants en ville. Les projections pour 2050 estiment la proportion à 86,3%, soient 63,1 millions de citadins (United Nations 2013).

Ces éléments mettent en évidence l'augmentation du nombre de personnes soumises aux climats urbains. « Les » climats urbains (au pluriel) car les villes sont différentes par leurs formes, leurs dimensions et leur contexte climatique, ce qui engendre une multitude de particularités ; cependant des traits communs apparaissent et permettent d'établir des phénomènes propres aux villes, tel que l'îlot de chaleur urbain (ICU).

L'ICU est la manifestation la plus remarquable de la ville sur le climat. Il est vécu et observé depuis l'expansion des villes, notamment à partir du XIXème siècle. Ainsi, Guy de Maupassant relate ses effets à Paris dans plusieurs nouvelles, par exemple dans *Bel-Ami* (1885) : « *C'était une de ces soirées d'été où l'air manque dans Paris. La ville, chaude comme une étuve, paraissait suer dans la nuit étouffante. Les égouts soufflaient par leurs bouches de granit leurs haleines empestées, et les cuisines souterraines jetaient à la rue, par leurs fenêtres basses, les miasmes infâmes des eaux de vaisselle et des vieilles sauces.* ». Ce phénomène d'ICU est vécu par des citadins de plus en plus nombreux ; c'est à Londres (Royaume-Uni) en 1818 que Howard L réalise la première description précise de l'ICU et des facteurs associés (Howard 1818). En 1840, Renou E. décrit des gradients de température suite à des relevés la nuit à Paris, ils correspondent au phénomène d'ICU (Renou 1855a).

A partir de la seconde moitié du XXème siècle, les publications scientifiques s'accroissent progressivement. Les mécanismes de l'ICU et de leurs caractéristiques sont mis en évidence. Il apparaît que l'urbanisation croissante accentue le phénomène. En 1967, Oke T.R. mesure et établit une relation entre le nombre d'habitants d'une ville et l'intensité maximum de l'ICU qui en résulte (Oke 1973). L'accroissement des villes et conjointement l'augmentation de la population citadine aggravent l'exposition des personnes aux vagues de chaleur par l'intensification de l'ICU.

Parallèlement les rapports du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, *IPCC* en anglais) indiquent une élévation de la température de surface à l'échelle mondiale de +0,85°C [0,65°C ; 1,06°C] entre 1880 et 2012 (Hartmann et al. 2013). En Europe, les modèles projettent une augmentation des vagues de chaleur à court terme et à long terme. Ces vagues de chaleur extrêmes sont évaluées avec une incidence sur les populations et leur bien-être (Pachauri et al. 2014). La canicule de 2003 illustre les graves conséquences sanitaires de vagues de chaleur longues et intenses en Europe de l'ouest et particulièrement en France. Dans le même temps, plusieurs travaux ont mis en évidence la surmortalité en ville et la contribution de l'ICU (Stéphan et al. 2005; Rousseau 2005; Gabriel and Endlicher 2011).

A terme, l'augmentation des vagues de chaleurs liées au changement climatique et l'urbanisation amplifient la sensibilité à l'ICU par les habitants en ville. L'exposition des citoyens peut se traduire par un inconfort voire une surmortalité. Ainsi, lors de la canicule de 2003, les populations les plus vulnérables recensées sont essentiellement des personnes âgées de plus de 75 ans, bien que l'ensemble des tranches d'âge soit concerné (Hémon et al. 2003). Le vieillissement de la population française projeté par l'INSEE augmente donc potentiellement le nombre d'habitants exposés aux vagues de chaleurs : en 2050, le nombre d'habitants de plus de 60 ans serait compris entre 20,8 et 22,7 millions en France (contre 12,6 millions en 2005) (Robert-Bobée 2007). Ces multiples facteurs (démographiques, géographiques, climatiques...) convergent vers une hypersensibilité au climat urbain où l'ICU joue un rôle prédominant.

A travers le monde, de nombreux travaux et publications sur l'ICU portent sur des grandes villes ou de grandes métropoles (Memon et al. 2009; Bowler et al. 2010; Jochner and Menzel 2015). L'ICU n'en demeure pas moins présent sur des villes aux dimensions intermédiaires (Oke 1973). Ainsi au début des années 2000, le programme ECORURB (Ecologie du rural vers l'urbain) est initié, afin d'établir l'influence de la ville sur le climat et la biodiversité. Ce programme pluridisciplinaire est mise en place sur deux villes de taille moyenne (à l'échelle de la France) : Rennes et Angers. Lors de ce programme de recherche, un réseau de 16 stations météorologiques est déployé. Les premiers résultats de l'étude climatique urbaine établissent la présence d'un ICU à Rennes.

L'ICU est un des phénomènes identifié comme à atténuer dans le contexte du changement climatique. Les collectivités en France de plus de 50 000 habitants établissent des objectifs, pour d'une part réduire les émissions de gaz à effet de serre, et d'autre part réduire les impacts attendus du changement climatique sur leur territoire. Ces objectifs et leur mise en œuvre sont rédigés sous la forme d'un PCET (Plan Climat Energie Territorial) comprenant deux volets : atténuation et adaptation. C'est dans ce cadre que cette thèse est réalisée et financée pour moitié par Rennes Métropole sous la forme d'une CIFRE¹.

Le contexte démographique de Rennes Métropole apparaît favorable à l'intensification de l'ICU. Le territoire rennais connaît une des dynamiques démographiques des plus importantes en France. Entre 2008 et 2013, l'agglomération rennaise a accueilli près de 3000 habitants par année selon l'AUDIAR (Agence d'Urbanisme et de Développement Intercommunal de l'Agglomération Rennaise). Les objectifs fixés par le PLH (programme local de l'habitat) annoncent la construction de 3800 à 4600 logements par an. Ces objectifs sont établis par les projections du gain annuel de populations, soit 97 000 habitants supplémentaires d'ici 30 ans selon l'AUDIAR. Dans le même temps, le SCOT (Schéma de Cohérence Territoriale) définit un objectif de réduction de consommation des espaces périurbains, ce qui signifie une densification de l'espace urbain préexistant pour subvenir au besoin en logement. A l'heure actuelle, 20% du

¹ La CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche) est un dispositif où l'ANRT (Allocation Nationale de la Recherche et de la Technologie) finance la moitié du projet de thèse pendant 3 années.

territoire de Rennes Métropole est urbanisé. L'enjeu est d'adapter conjointement la densité en ville et d'atténuer le phénomène d'ICU.

Le moyen d'atténuation le plus rapide des effets indésirables de l'ICU lors des vagues de chaleur est actuellement la climatisation. Il figure parmi les moyens préconisés pour les personnes vulnérables lors des vagues de chaleurs selon l'INPES (Institut National de Prévention et d'Education pour la Santé). Dans le contexte du changement climatique, les besoins en climatisation augmentent d'une part par l'augmentation des vagues de chaleur et d'autre part par la présence de l'ICU (de Munck et al. 2012). L'usage de la climatisation généralisée en ville engendre une rétroaction par l'augmentation de l'intensité de l'ICU, de plus, il est incompatible avec les objectifs de réduction de consommation d'énergie de la ville fixés par le PCET. La présence de la végétation en ville permet de réduire l'ICU localement et de générer des îlots de fraîcheur à proximité des parcs. La végétation en ville est un des moyens d'aménagement de la ville pour réduire le phénomène d'ICU (Mcpherson 1994; Upmanis et al. 1998; Shashua-bar and Hoffman 2000; Ng et al. 2012; Cameron et al. 2014; Doick et al. 2014).

Le climat urbain d'une ville est spécifique à celle-ci, il dépend de sa forme urbaine et de son contexte topographique et climatique. Par conséquent, l'ICU possède une variabilité spatiale propre à chaque ville, l'ICU à Rennes est à établir ainsi que son occurrence. L'ICU correspond à l'écart de température relatif entre le milieu urbain et le milieu périurbain (rural) (Oke 1987). La définition de l'ICU est à adapter selon le contexte de la ville et cela implique de définir l'ICU sur le territoire de Rennes Métropole.

L'adaptation du territoire au changement climatique nécessite la connaissance préalable du climat passé et des spécificités géographiques. L'analyse du climat permet d'évaluer l'exposition actuelle aux vagues de chaleurs et d'établir, à partir des modèles du changement climatique, les scénarios envisagés sur le territoire. L'évolution des conditions météorologiques influence la présence de l'ICU, le changement climatique par la modification des types de temps produirait une modification de l'ICU. Les types de temps rencontrés seront-ils plus favorables à la mise en place de l'ICU ?

Dans le même temps, l'urbanisation engendrent une modification locale du climat et la présence de l'ICU. Les choix des aménagements actuels et à venir sont décisifs pour l'ICU futur. Les stratégies à opérer sont d'autant plus déterminant que l'échelle de temps de l'aménagement est comprise entre 20 ans (l'échelle du SCOT) et 70 ans (durée de vie moyen d'un bâtiment) (Theys and Vidalenc 2013) ; cette échelle temporelle indique que les bâtiments, les boisements et les projets actuels seront confrontés au changement climatique. Les études et les préconisations pour l'atténuation de l'ICU sont peu nombreuses et peu adaptés aux villes dans leur ensemble. L'élaboration d'outils d'aide à la décision est à réaliser afin de les intégrer aux documents d'urbanisme de Rennes Métropole.

L'évaluation de l'ICU rennais est le premier objectif de la thèse. La variabilité spatio-temporelle de l'ICU implique des échelles emboîtées dont leur compréhension est nécessaire pour l'étude de l'ICU (Yoshino 1975; Carrega 1992; Oke 2006). L'intensité et l'occurrence de l'ICU requiert la mise en place d'un réseau de mesures adapté à ces échelles : des échelles locales à microlocales. La question de la représentativité du point de mesures doit être posée afin d'établir un réseau homogène et cohérent vis-à-vis du phénomène observé. Le second objectif de la thèse est de construire des modèles de spatialisation de l'ICU, ainsi que de la variabilité de l'ICU en fonction des types de temps. Enfin, le dernier objectif concerne l'élaboration de moyens d'interventions afin de limiter l'intensité de l'ICU à Rennes.

La première partie de la thèse porte sur l'étude des spécificités du climat urbain et des mécanismes de formation de l'ICU est réalisée. Le phénomène d'ICU est présenté à partir des

études précédentes (chapitre 1). Puis, le contexte de la topographie et de l'aménagement du bassin rennais est exposé afin de comprendre la dynamique spatiale du territoire urbain et de son évolution envisagée. Le contexte climatique rennais est détaillé par la variabilité des types de temps, des canicules passées et l'évolution des vagues de chaleurs. Ce dernier point est approfondi par la distinction des différents modèles du changement climatique actuels et leur méthode régionalisation. Ces méthodologies sont présentées et détaillées dans ce chapitre 2. Un réseau de mesures adapté à la variabilité spatio-temporelle de l'ICU est mis en place. La notion d'échelle est essentielle pour l'étude de l'ICU, c'est pourquoi trois réseaux de mesures sont organisés de l'échelle de l'agglomération à l'échelle du quartier. La méthodologie de mesures en ville répond à des critères spécifiques qui sont abordés dans ce chapitre (chapitre 3).

La seconde partie de la thèse correspond l'analyse spatiale de l'ICU et à la construction de modèles de spatialisation. A partir des réseaux de mesures déployés dans l'agglomération rennais, l'analyse de l'occupation du sol et de l'ICU observé est réalisée afin d'établir leur relation. Cette analyse s'ouvre sur la construction d'une méthode de spatialisation des gradients de température relatifs à l'ICU (chapitre 4). L'application du modèle de spatialisation est réalisée sur le réseau de stations météorologiques à l'échelle de l'agglomération ; à partir des cartes produites la structure de l'ICU est observé pour différent pas de temps : annuel, saisonnier et quotidien (chapitre 5). Puis, l'analyse de la variabilité spatiale de l'ICU est effectuée à l'échelle des quartiers. Les travaux sont menés à l'échelle locale et jusqu'au seuil de l'échelle microlocale (au sein d'une cour de résidence, dans un parc...). Une étude comparative des quartiers étudiés et de l'ICU observé est réalisée à l'aide deux types de mesures spécifiques : mesures mobiles par transects et mesures fixes au sein d'un même quartier. La cartographie à échelle intra-urbaine de l'ICU est construite à partir d'une campagne de mesures ponctuelles. Dans un premier temps le modèle est discuté, puis l'ICU est analysé pour plusieurs intervalles de temps : mensuel à horaire (chapitre 6).

La troisième partie concerne la variabilité temporelle de l'ICU et l'évaluation du changement climatique sur l'espace urbain rennais. La variabilité temporelle de l'ICU est observée par l'analyse des facteurs météorologiques influents sur l'ICU quotidien. Puis un modèle de prévision de l'ICU quotidien est construit (chapitre 6). A partir du modèle de prévision de l'ICU quotidien en fonction des types de temps, l'ICU est projeté à l'horizon moyen (2040-2069) et à l'horizon lointain (2070-2100). Les projections sont réalisées à partir des sorties de modèles du changement climatique régionalisé par le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique) (chapitre 7). Pour le dernier chapitre, une synthèse des travaux sur l'ICU appliqué à l'aménagement en ville est réalisée dans un premier temps. Puis des outils d'aide à la décision sont proposés par l'application des modèles de spatialisation développée et des analyses spatiales correspondantes. Dans le même temps, l'exposition à l'ICU des villes de l'agglomération rennais et de ses quartiers est discutée. Les sorties régionalisées de modèles du changement climatique par le laboratoire CNRM/GAME (Centre National de Recherches Météorologiques) sont utilisées et adaptées à Rennes afin de projeter l'exposition du territoire au changement climatique, notamment au regard des vagues de chaleur (chapitre 9). L'organisation en trois parties et neuf chapitres de la thèse est récapitulée et schématisée en figure 1.

Etat de l'art et contexte général

Chapitre 1 - L'îlot de chaleur urbain

Chapitre 2 - Le territoire rennais et le changement climatique observé

Mise en place des protocoles de mesures

- Un réseau de mesures à l'échelle de l'agglomération : 22 stations météorologiques
- Un réseau de mesures à l'échelle intra-urbaine : 20 capteurs de températures
- Trois réseaux de mesures à l'échelle des quartiers (n points de mesures) : Les Longs Champs (5), Beaugard (4) et Vezin-le-Coquet (8)
- Trois transects mobiles de température

2 stations :
« ville »
« campagne »

Chapitre 3 - Un réseau de mesures : de l'échelle de l'agglomération à l'échelle des quartiers

La variabilité spatiale de l'ICU

Méthode de spatialisation et constitution de la base de données d'occupation du sol
Chapitre 4 - Spatialisation de l'îlot de chaleur urbain à Rennes Métropole par analyse multicritère de l'occupation du sol

Détermination des variables d'occupation du sol pertinentes et application de la méthode de spatialisation (année, saisons, journaliers)
Chapitre 5 - Cartographie de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle de l'agglomération

Détermination des nouvelles variables d'occupation du sol pertinentes et application de la méthode de spatialisation (journaliers, horaires)
Chapitre 6 - L'îlot de chaleur urbain à l'échelle des quartiers: spatialisation et limites scalaires

La variabilité temporelle de l'ICU

Analyse de l'ICU et des facteurs météorologiques de 2007-2010-2011
Mise en place du modèle de l'ICU quotidien selon les variables météorologiques
Chapitre 7 - Occurrence de l'îlot de chaleur urbain rennais et types de temps

Sélection des *modèles régionalisés* du changement climatique
Projection de l'ICU quotidien à horizon moyen (2040-2069) et lointain (2070-2099)
Chapitre 8 - Le changement climatique à Rennes : analyse et application des sorties de modèles

Les outils d'adaptation du territoire à l'îlot de chaleur urbain

Indices de seuils d'occupation du sol et de formes en ville
Projection du territoire aux besoins d'énergie, aux canicules à l'aide de *modèles régionalisés*
Exposition du territoire aux îlots de chaleurs
Chapitre 9 - De la modélisation aux outils d'adaptation du territoire rennais à l'îlot de chaleur urbain

→ : Données mobilisées des réseaux de mesures mobilisées

modèles régionalisés : sorties de modèles produites par le CERFACS et le CNRM/GAME

Figure 1, schéma récapitulatif du plan de thèse

Les travaux sont réalisés sur le territoire de Rennes Métropole, néanmoins les problématiques de l'ICU concernent en premier lieu les espaces les plus urbanisés. L'intégralité des communes de l'agglomération n'est pas évoquée, même si elles sont incluses dans les traitements et modèles. Les cartes réalisées suivent le découpage de la communauté d'agglomération de Rennes Métropole en 2011.

Cette thèse est réalisée au sein du laboratoire LETG Rennes COSTEL (UMR 6554), à l'Université Rennes 2. Le réseau de mesures et les travaux associés ont intégré en 2011, la Zone Atelier Armorique.

- PARTIE I -

CONTEXTE ET METHODE DE MESURES SUR LE TERRITOIRE DE RENNES METROPOLE

Cette première partie introduit les notions propres à la climatologie urbaine et plus particulièrement au phénomène d'ICU. L'objectif est d'évaluer le contexte de l'agglomération rennaise afin de déterminer son influence sur l'ICU. La topographie dans laquelle s'insère Rennes Métropole est décrite, puis la dynamique démographique du territoire est exposée. L'exposition du territoire au changement climatique passe par l'étude préalable du climat observé à Rennes. Les normales climatiques des principaux facteurs météorologiques caractérisant les types de temps sont décrites. Puis, deux méthodes de régionalisation des modèles globaux du changement climatiques sont introduites afin d'établir leurs avantages, leurs limites et leurs incertitudes.

L'étude de l'ICU sur le territoire de Rennes Métropole est réalisée à partir de trois réseaux de mesures selon trois échelles d'observations : l'échelle de l'agglomération, l'échelle intra-urbaine et l'échelle du quartier. L'objectif est d'établir ces réseaux selon les trois échelles emboîtées correspondant à la variabilité spatio-temporelle de l'ICU. Le premier réseau de mesures est constitué de 22 stations météorologiques sur l'ensemble de l'agglomération. La campagne de mesures de l'été 2013 correspond au second réseau de capteurs de température. Ce réseau est déployé à l'échelle des quartiers. Enfin, le troisième réseau est établi afin d'observer la variabilité de l'ICU au sein d'un même quartier. Cette échelle est intermédiaire entre l'échelle locale et l'échelle microlocale.

Chapitre 1 : L'îlot de chaleur urbain

La question de l'ICU est liée au développement des villes. Les premiers travaux coïncident avec la fondation des cités. Dans ce chapitre, un résumé non-exhaustif de l'histoire de la climatologie urbaine est présenté dans un premier temps. Puis, nous nous intéresserons plus particulièrement au déroulement historique des travaux portant sur l'ICU. L'émergence des études de l'ICU a conduit à la formulation de ses principes et de ses mécanismes. Les spécificités du climat urbain sont détaillées, du bilan radiatif au bilan énergétique, afin de dégager les principaux facteurs. A partir de ces éléments, la variabilité spatio-temporelle de l'ICU est définie ainsi que les échelles associées.

1.1. La climatologie urbaine, une préoccupation ancienne et une discipline récente

1.1.1. *La climatologie urbaine*

L'étude du climat urbain est paradoxalement une problématique ancienne mais dont les champs de recherche n'ont été explorés que récemment. Le sujet est abordé différemment selon la discipline de recherche : architecture, géographie, climatologie, médecine, physique de l'atmosphère, sociologie... L'ensemble de ces approches indique les multiples problématiques relatives à l'étude du climat urbain et il révèle son caractère pluridisciplinaire. Néanmoins, la ville est un espace partagé dont les particularités climatiques qu'elle engendre sont très certainement observées depuis la fondation des premières cités.

Selon Yoshino N., le point de départ correspond aux écrits de Vitruvius M. P. (75-26 avant J.C.). Cet ingénieur et architecte Romain rapporte l'élaboration d'une ville prenant en compte les facteurs climatiques environnants. A travers son expérience, il préconise l'édification d'une cité en hauteur pour éviter les brumes, les fortes chaleurs et les grands froids. L'orientation du vent lui apparaît un facteur responsable de certaines maladies. Il souligne l'importance de prendre en considération les vents dominants avant l'édification de la cité afin de préserver la santé de ses habitants. Il est intéressant de constater qu'il préconise une méthodologie pour la mesure des vents et la planification des rues en fonction de leurs orientations (Vitruvius et al. 1859; Yoshino 1990).

En France, Cotte L. décrit les écarts de température constatées et ressenties à Paris dans le *Traité de Météorologie*, en 1774. Il y formule des interrogations sur les écarts de température associées aux dimensions des rues lors des fortes chaleurs et de l'adaptation des villes telles que Le Caire (Egypte) avec ses ruelles étroites. Il décrit l'inconfort à Paris lors de températures élevées : « *L'air à Paris nous paroît fort chaud quand la liqueur se trouve à 24 degrés* ». Il constate également que la température relevée et la température ressentie ne concorde pas nécessairement : « *Sa propre température dépend d'un trop grand nombre de circonstances variées et compliquées, pour que nous puissions avoir des idées justes du froid et du chaud* ;

l'éducation, l'habitude que nous avons contractée de jeunesse peut mettre notre corps à l'épreuve de très-grands degrés de chaleur ou de froid, fans qu'il paroisse en souffrir » (Cotte 1774). Ces considérations révèlent dès le siècle des Lumières la contribution de la mesure à l'émergence de la climatologie urbaine au XIXème siècle (Colombert et al. 2012).

Les nombreux moyens d'adaptation mise en œuvre à travers les villes dans le monde indiquent l'intemporalité des problématiques liées aux climats urbains. Escourrou G. présente plusieurs particularités architecturales et d'aménagement dans le bassin méditerranéen ou dans les pays tropicaux permettant de réduire l'inconfort lié à la chaleur. Sous les latitudes moyennes, le climat océanique y étant plus tempéré, il n'apparaît pas comme un facteur déterminant de l'aménagement. Des exemples d'adaptations locales existent, mais ce sont surtout les considérations politiques, économiques ou stratégiques qui structurent les villes (Escourrou 1991). Après la Seconde Guerre Mondiale, la négligence des spécificités climatiques régionales et locales dans l'aménagement des villes est notamment liée au recours à l'énergie à faible coût. Cependant les objectifs actuels de baisser la consommation d'énergie imposent de revoir cette stratégie d'adaptation au climat de la ville. Les préoccupations relatives au climat urbain ne sont pas uniquement liées aux conditions météorologiques (mal) vécues (température, précipitation, vent, ensoleillement...), la pollution atmosphérique est également une des problématiques imposant à l'étude climatique urbaine.

1.1.2. *L'îlot de chaleur urbain*

Le phénomène d'ICU est un des phénomènes composant le climat urbain. Il est mesuré, décrit et rapporté pour la première fois par Howard L. à Londres (Howard 1818). L'ouvrage *The Climate of London* constitue un point de départ de l'étude de l'ICU, car il détaille les facteurs responsables des écarts de températures observées entre le centre de Londres et la campagne avoisinante (Mills 2008; Stewart 2011).

En France, les travaux de Renou E. figurent comme les premiers relevés de température relatant un écart entre la ville et la campagne. Ainsi, les observations tri-horaires menées à Paris sur l'Île Saint-Louis et à l'Observatoire de Paris sur une année (1839-1840) ont mis en évidence des écarts de température selon les heures du jour et de la nuit. Malgré les lacunes des relevés, Renou E. indique : « *On remarque immédiatement que les différences varient beaucoup, suivant les heures ; les courbes diurnes ne sont donc pas parallèles. De plus, nous retrouvons ce fait sur lequel j'ai déjà appelé l'attention, à savoir, que les températures de 9 heures du matin, à l'Observatoire, sont trop hautes, et celles de 9 heures du soir beaucoup plus basses ; il est à croire que la nuit les différences iraient en augmentant.* » D'autres travaux mis en évidence les écarts de températures en ville et selon le contexte topoclimatique. Ces multiples relevés de température dans le centre de Paris lui apparaissent comme des erreurs dont il faut s'affranchir, bien qu'il considère le jardin comme le meilleur emplacement à l'intérieur d'une ville (Renou 1855b). Ces remarques montrent que ces expérimentations poursuivaient l'objectif de déterminer le meilleur site pour qualifier le climat à l'échelle mésoclimatique ; les observations menées par Renou E. sont réalisées dans le but de préserver les relevés de température de l'effet de l'ICU.

A partir de 1860 jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, de nombreuses études sur l'observation de l'ICU sont menées en Europe, au Japon, en Amérique Centrale et en Amérique du Nord. Elles sont souvent réalisées par deux ou trois stations météorologiques ponctuellement. L'étude de l'ICU évolue au cours du XXème siècle avec l'apparition de nouveaux moyens techniques. Les premiers transects de température sur automobile sont réalisés en mai 1927 par Schmidt W. à Vienne (Autriche) (Landsberg 1981). Les transects mettent en évidence la dimension spatiale de l'ICU avec un gradient suivant les contours de la ville, jusqu'alors les stations sont associées uniquement à leur environnement immédiat (Stewart 2011).

A partir des années 70, les travaux de Oke T.R. marquent le début de la période actuelle des études sur l'ICU. Ces travaux portent sur l'origine et la compréhension des mécanismes en œuvre pour la formation de l'ICU (Oke and Maxwell 1975; Oke 1976, 1982, 1987). Ils mettent en avant l'aspect multiscalair de l'ICU et l'importance qu'il faut y accorder (Arnfield 2003). Le nombre de publications portant sur le climat urbain augmente largement durant des années 70 et, dans le même temps, celles traitant de l'ICU (Oke 1990). Plusieurs revues d'articles synthétisant l'état de l'art rendent compte de l'évolution des approches selon les disciplines et de la multiplication des travaux à travers le monde (Kratzer 1956; Landsberg 1981; Yoshino 1990; Arnfield 2003; Stewart 2011). En France, les travaux sur l'ICU sont plus tardifs que dans les autres pays européens, la première thèse sur ce sujet est réalisée sur Paris (Cantat 1989). Quelques autres grandes villes en France ont fait l'objet de plusieurs études sur l'ICU par la suite (Charabi 2001; Pigeon 2007) ; les travaux sur l'ICU dans les villes de tailles moyennes sont encore plus rares (Ringebach 2009; Kastendeuch et al. 2010). A partir des années 90, les travaux en milieux tropicaux et subtropicaux connaissent à leur tour un essor (Jáuregui 1996), notamment plusieurs de ces travaux précurseurs Brésiliens sont à relever (Lombardo 1985; Mendonça 1995; Amorim 2000).

L'étude de l'ICU est liée à l'évolution des moyens d'observation. L'apparition des capteurs de température plus performants et de stations météorologiques automatiques autorisent l'enregistrement de données simultanées sur plusieurs sites. La mise en place d'un réseau de mesures des villes et les quartiers constituent un moyen d'observer l'ICU à différentes échelles (Carrega 1992; Alcoforado and Andrade 2005; Kim and Baik 2005; Unger 2009; Wong et al. 2011; Suomi et al. 2012). Les moyens informatiques rendent possibles la réalisation de campagne de mesures mais également de traitements fastidieux. L'usage de scènes satellites et la thermographie (aérienne ou au sol) permettent d'évaluer la température de surface et indirectement la formation de l'ICU (Chesnais et al. 1992; Mendonça and Dubreuil 2002; Dousset and Gourmelon 2003; Hartz et al. 2006; Goldreich 2006; Coutts and Harris 2012; Kubiak and Stach 2014; Baldinelli et al. 2015).

La modélisation de l'ICU est réalisée selon deux méthodes : numérique et statistique (*cf.* Chapitre 4.1.1). Les modèles numériques sont conçus selon l'approche déductive, c'est-à-dire à partir des principes de la physique de l'atmosphère. Par exemple en France, le modèle TEB (Town Energy Balance) développé par Météo-France est construit selon cette approche (CNRM) (Masson et al. 2002). Les modèles statistiques sont définis par l'approche inductive. Leur élaboration est issue des observations réalisées sur le terrain et de leur relation statistique avec l'occupation du sol. La robustesse du modèle statistique dépend du nombre de points de mesures disponibles (Eliasson and Svensson 2003; Unger et al. 2011; Lee and Baik 2010). Pour ces deux approches, l'émergence de nouveaux outils informatiques et d'importantes puissances de calculs ont contribué à l'émergence de la modélisation de l'ICU.

La grande diversité des études portant sur l'ICU correspond à ses multiples impacts en ville sur : la pollution de l'air, les consommations d'énergie des bâtiments, la consommation en eau, la biodiversité, confort et la surmortalité... Ces recherches développent de nouvelles perspectives et de nouvelles applications pour les villes. Elles mettent en évidence les besoins grandissant en expertise et en maîtrise du territoire urbain par les municipalités dès la fin du XXème siècle. Ces besoins coïncident avec l'émergence du concept du développement durable.

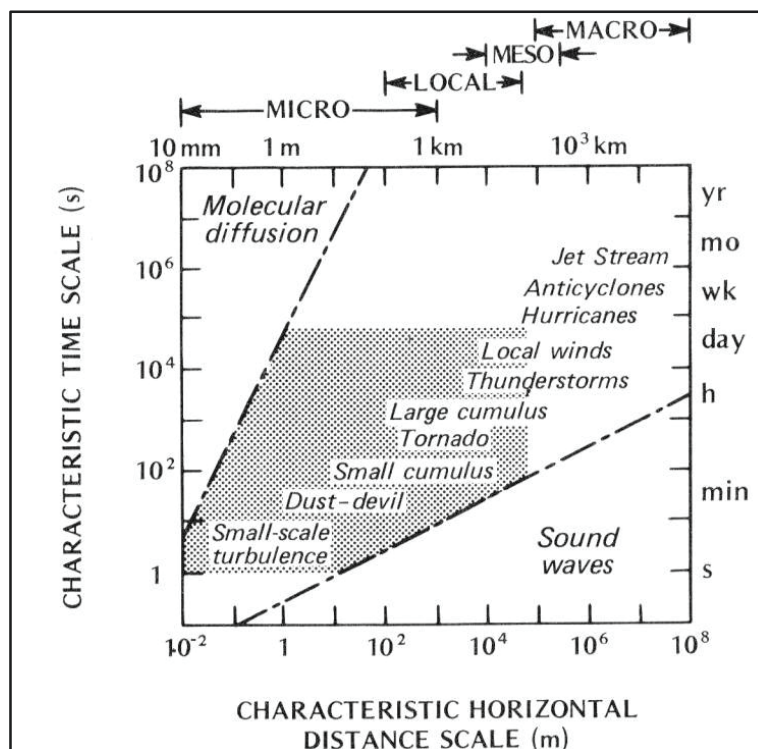


Figure 2, les échelles spatio-temporelles des phénomènes dans la couche limite atmosphérique (en grisés). D'après Oke T.R. (1987).

1.2. Principes et mécanismes de l'îlot de chaleur urbain

L'ICU est un phénomène où plusieurs échelles imbriquées sont concernées : microlocale, locale et méso-échelle. Ces trois échelles spatio-temporelles correspondent aux phénomènes intervenant dans la couche limite atmosphérique (CLA), nommée en anglais *Boundary Layer*. La CLA correspond à la fraction de l'atmosphère sous l'influence directe de la surface terrestre (et océanique). Quelques phénomènes compris dans la CLA illustrent la combinaison des dimensions spatio-temporelles en figure 2 (Oke 1987). Dans le cas de l'ICU, l'intervention de ces échelles peut être montrée par les exemples suivants : l'échauffement de l'air au contact d'un mur à l'échelle microlocale, la température observée dans différents quartiers au sein de la ville ou l'influence de l'îlot de chaleur sur la circulation de brises en périphérie. Les phénomènes associés à l'ICU sont circonscrits dans ces deux intervalles spatio-temporels, cela implique l'analyse et la mise en place d'un réseau de mesures adapté à ceux-ci.

La définition de l'ICU est l'écart de température observé entre la ville et la campagne. Cette définition correspond à la température relevée par deux stations météorologiques à un pas de temps horaire (voir en figure 3). La première est installée en ville, la seconde dans la campagne avoisinante. La différence de température entre les deux stations apparaît dès la fin de l'après-midi, lorsque le soleil décline. L'écart de température augmente progressivement jusqu'au milieu de la nuit où il atteint l'écart maximum autour de minuit (à l'heure solaire). Pendant cette période la diminution de la température est plus importante à la campagne qu'en ville, puis l'écart se réduit légèrement. Enfin, au lever du soleil la température augmente plus rapidement à la campagne pour atteindre des températures similaires vers midi. La température est légèrement inférieure en ville pendant cette période (jusqu'à 1°C environ). Lors de l'enregistrement de la température maximale (environ 3h après le midi solaire), la température enregistrée peut être

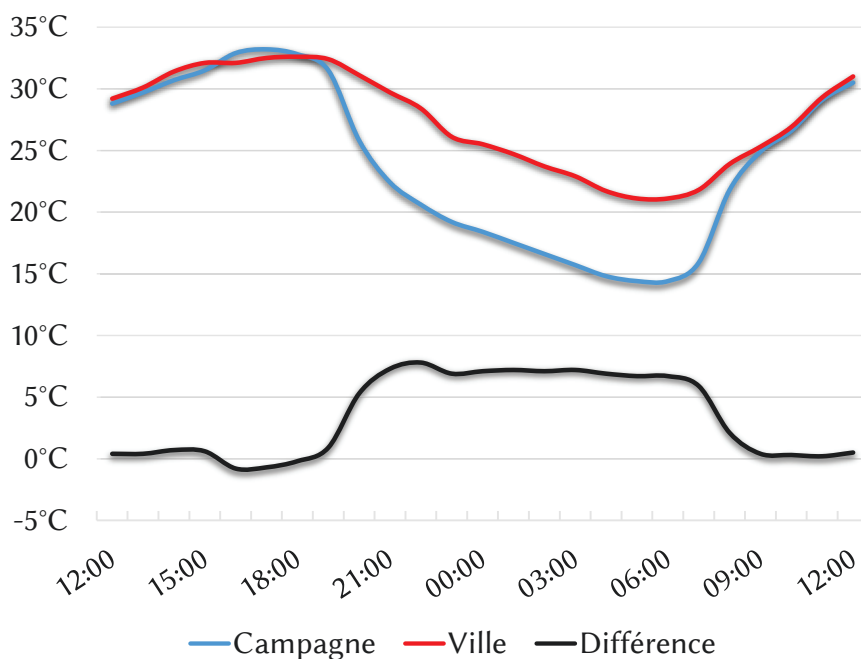


Figure 3, écarts et différence de température observés entre la ville et la campagne pendant 24h en condition idéalisée d'observation de l'ICU. Adaptée de Oke T.R. (1987).

plus faible en ville, cet écart est inférieur à 1°C. Cette observation préalable indique que l'ICU est un phénomène exclusivement nocturne.

1.2.1. Structure de l'atmosphère urbaine

a) Profils thermiques

Le milieu urbain modifie non seulement la température en formant l'ICU mais également la structure verticale de l'atmosphère ; ces éléments caractérisent le climat urbain. Ainsi, la ville influence la CLA. Cette couche est identifiée comme *Urban Boundary Layer*, c'est-à-dire la couche limite urbaine (CLU). Par opposition à la CLU, la CLA peut être définie comme la couche limite rurale (CLR). L'évolution et la structure de ces couches selon le jour et la nuit sont illustrées par la figure 4. La détermination de ces couches est réalisée par des profils thermiques, ceux-ci sont exprimés par la température potentielle (Θ). Le profil idéalisé permet de délimiter les couches selon le changement d'atmosphère (stable, neutre ou instable). Les conditions météorologiques en présence sont anticycloniques et radiatives, ce qui correspond à des situations optimales d'observations de l'ICU et des contrastes climatiques locaux.

L'ICU est absent la journée, cependant un « dôme de chaleur » se forme au-dessus de la ville. Ce dôme correspond à l'élévation de la couche de surface en ville par rapport à celle présente en campagne (Escourrou 1991). La surélévation est liée à la présence de flux verticaux de chaleur et d'humidité plus important en ville. La couche de surface instable est surmontée d'une couche de mélange, l'ensemble forme la CLU. En ville, la couche de mélange reçoit l'ensemble des flux de la couche de surface mais également les polluants. Ces flux engendrent une dilatation de la CLU, ainsi elle peut atteindre selon la taille de la ville jusqu'à 1 km (Yoshino 1975; Hufty 1997). La présence d'un vent faible peut décaler la CLU et surplomber la CLR par un panache issue de la couche de mélange urbaine (Clarke 1969; Oke 1987).

La nuit, les couches limites et les couches de mélanges sont moins élevées et les deux couches limites (CLU et CLR) sont surmontés d'une couche neutre : la couche résiduelle. A la

campagne, l'inversion thermique est importante dans la couche de surface, celle-ci est devenue stable. En ville, la couche de surface est instable, la présence de flux verticaux est moins importante mais continue à transférer de la chaleur vers la couche supérieure stable. Seuls les parcs n'observent pas ces turbulences en constituant des îlots de fraîcheurs au sol. La nuit, cette couche stable urbaine est plus fine et concentre ainsi les polluants. Le vent faible advecte l'air chaud de la couche stable urbaine vers la campagne et surmontant la CLR (Hufty 1997).

A l'échelle locale dans la couche de surface urbaine, l'ICU se caractérise par un gradient de température horizontale dans la canopée urbaine. La canopée urbaine est une couche délimitée par la hauteur des bâtiments et la cime des arbres. L'ICU observé et modélisé dans cette thèse correspond à l'ICU circonscrit dans cette couche.

b) Influence de l'ICU sur les brises et les précipitations

Les profils de vent observés en ville permettent d'indiquer la turbulence de l'air et l'influence du vent synoptique sur la CLU et CLR. L'observation du vent peut être réalisée par un SODAR. Cet instrument fonctionne par émission et réception de salves acoustiques, à partir desquelles sont analysés les changements selon l'effet Doppler. Les turbulences sont observées dans la CLU pour le jour et la nuit, ce qui correspond à l'instabilité décrite précédemment. De même à la campagne les turbulences sont présentes en journées et disparaissent la nuit (Emeis 2010). Ces éléments permettent d'évaluer la structure de l'ICU verticale et son influence sur les couches supérieures.

Lorsque le vent synoptique est absent et l'ICU est marqué, des brises thermiques peuvent circuler de la périphérie vers le centre de la ville. L'ICU associé à la CLU plus épaisse (que la CLR) engendre localement une dépression provoquant la mise en circulation de ces brises. Selon le contexte de la ville, ces brises peuvent s'annuler ou s'additionner à d'autres brises liées au contexte topoclimatique de la ville (brises de mer, brises de pente...). A Paris, ces brises sont observées toute l'année, cependant elles sont plus longues en hiver où les nuits sont plus longues. La mise en place de brises convergentes dans le centre-ville favorise la circulation et la concentration des polluants au cœur de la ville (Escourrou 1991; Carrega 1992; Cantat 2004).

La présence de la CLU la journée pourrait jouer un rôle dans la distribution des précipitations dans certaines situations. Le passage d'un front orageux (instable) au-dessus de la CLU est favorable aux précipitations. Lors de situations avec des masses d'air instables, les précipitations sont plus fréquentes en ville à l'échelle de l'agglomération parisienne (Escourrou 1991; Cantat 2004). A Hambourg, les précipitations observées sont plus importantes dans les espaces sous le vent, au nord (jusqu'à 30 km) et au sud-est de la ville avec une augmentation de +5 à 20% (Schlünzen et al. 2010).

Le climat urbain et l'ICU dans les grandes villes (supérieures à 1 millions d'habitants) peuvent influencer suffisamment la couche limite pour modifier à l'échelle locale et régionale les types de temps. Ces modifications peuvent contribuer à accroître par exemple l'exposition aux polluants en ville.

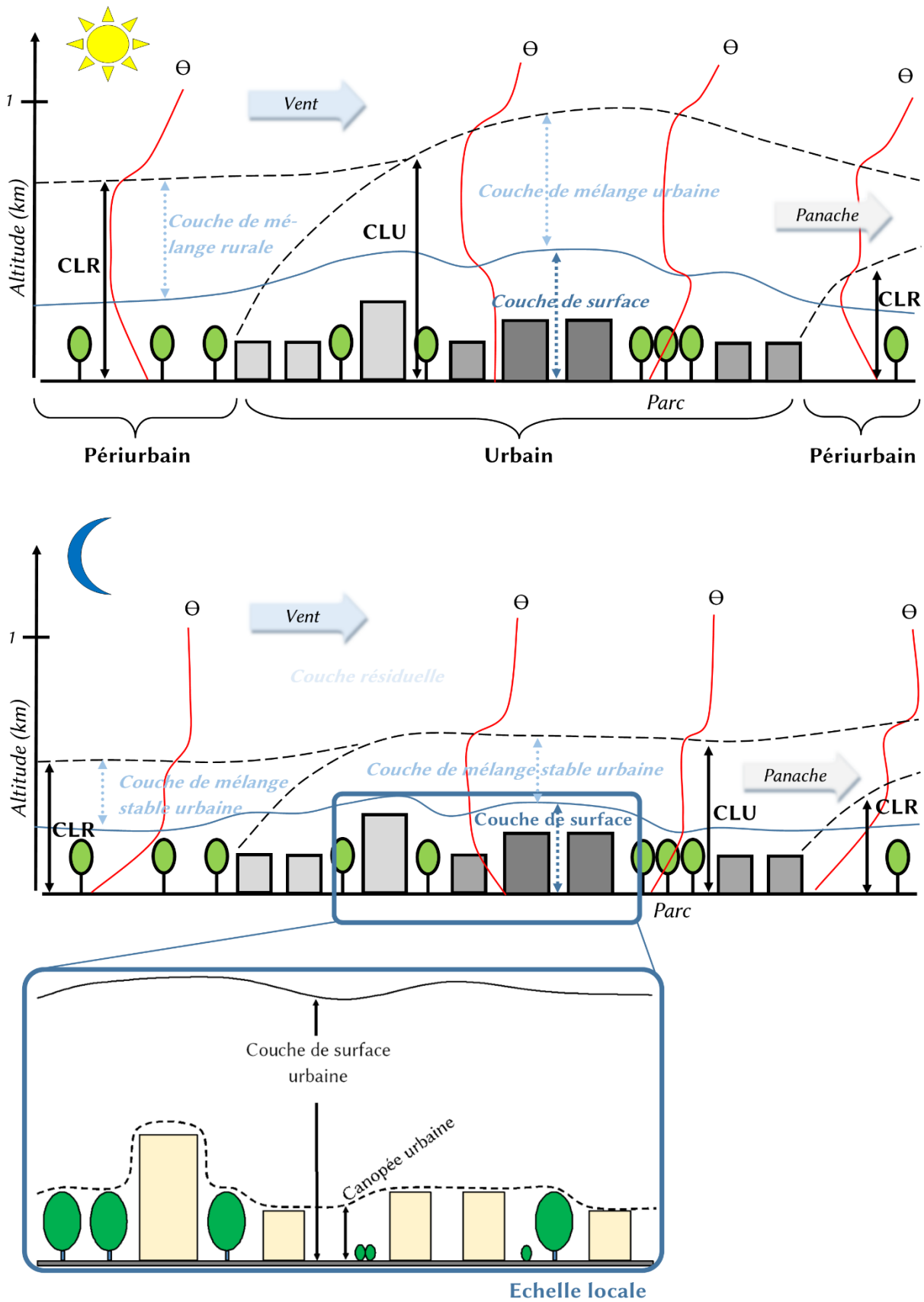


Figure 4, structure de la couche limite urbaine et rurale de jour et de nuit en conditions favorables à la mise en place de l'ICU. Adaptée de Oke T.R. (1987) et Hufty A. (1997).

1.2.2. Le bilan énergétique en ville

a) A l'origine : un bilan radiatif modifié

La température dépend du bilan énergétique du milieu, c'est-à-dire des apports, des pertes et des transferts d'énergie. Elle résulte de la conversion d'une partie des flux énergétiques issue du rayonnement net (R_{net}). Dans un premier temps, nous nous intéresserons au rayonnement net et à la modification de celui-ci dans le milieu urbain. Dans un second temps, les transferts d'énergie issus de ce rayonnement seront abordés.

Le rayonnement global résulte du rayonnement solaire après le passage dans l'ensemble des couches atmosphériques terrestres. L'atmosphère possède des propriétés variables selon sa composition et le type de temps en présence (ciel clair, nuageux, brumeux...). A partir de ces éléments, le rayonnement net est défini par cette équation :

$$R_{net} = (R_{Direct} + R_{diffus})(1 - a) - (T - A)$$

où $R_{net} = R_{global} + R_{infrarouge}$;

avec $R_{solaire} = (R_{Direct} + R_{diffus})(1 - a)$;

et $R_{infrarouge} = T - A$

R_{net} : Rayonnement net

R_{global} : Rayonnement global

$R_{infrarouge}$: Rayonnement infrarouge

R_{Direct} : Rayonnement direct

R_{diffus} : Rayonnement diffus

a : albédo du sol

T : rayonnement terrestre

A : rayonnement atmosphérique

On distingue deux types de rayonnement : le rayonnement global et le rayonnement infrarouge (IR). Le premier correspond au rayonnement directement émis par le soleil (R_{Direct}) et du rayonnement réémis par la diffusion atmosphérique (R_{diffus}) au niveau du sol. L'albédo est la fraction de rayonnement global réfléchi par un objet, il est soustrait au rayonnement reçu (d'où le terme négatif). Concernant les composantes du rayonnement IR, le rayonnement atmosphérique (A) correspond au rayonnement réfléchi par l'atmosphère. Ce phénomène est un apport d'énergie, plus exactement une diminution des pertes radiatives. A l'inverse, le rayonnement terrestre (T) est la perte sous forme radiative de l'énergie produite par la Terre. A partir de cette équation, on peut décrire ce mécanisme dans un contexte urbain, où les termes sont adaptés à ce milieu (Oke 1987; Beltrando and Chémery 1995; Bessemoulin 2000).

Le bilan radiatif urbain est réalisé sur un objet ou une surface en ville. Comme précédemment, il est composé du rayonnement global et du rayonnement IR. L'équation est établie par :

$$Q^* = (K \downarrow - K \uparrow) + (L \downarrow - L \uparrow)$$

où $R_{global} = K \downarrow - K \uparrow$;

et $R_{infrarouge} = L \downarrow - L \uparrow$

Q^* : Rayonnement net

$K\downarrow$: Rayonnement absorbé

$K\uparrow$: Rayonnement réfléchi (en relation avec l'albédo)

$L\downarrow$: Rayonnement atmosphérique

$L\uparrow$: Rayonnement terrestre (perte augmentée par l'écart de la température surface/air et la géométrie des bâtiments)

Cette relation permet de déterminer les apports énergétiques par rayonnement, comme illustré par la figure 6. On distingue le rayonnement directement absorbé ($K\downarrow$) et converti en chaleur, et le rayonnement atmosphérique ($L\downarrow$). L'effet de serre en ville peut être associé à la présence de polluants. L'albédo ($K\uparrow$) dépend de la couleur des surfaces, par exemple il est plus faible pour un parking ($a=0,06$) contre 0,25 pour une prairie (Landsberg and Maisel 1972). Plus l'albédo est faible, moins le rayonnement réfléchi ($K\uparrow$) sera élevé. L'albédo en moyenne plus faible en ville modifie les flux et la balance énergétique. Enfin, le rayonnement terrestre ($L\uparrow$) correspond à l'émission IR de l'objet (selon la loi de Wien) lorsque celui-ci est plus chaud que l'air ambiant. L'augmentation de la température et de sa surface d'exposition de l'objet augmente ce rayonnement, selon la loi de Stephan-Boltzmann (Oke 1987).

b) Le bilan énergétique en ville

A partir du bilan radiatif urbain, on peut établir les transferts énergétiques et définir leur nature et leur répartition. Ce bilan décrit les éléments responsables de la variabilité de la température entre les différents sites. Le bilan radiatif en ville est établi selon cette équation :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S$$

Q^* : Flux du rayonnement net

Q_F : Flux de chaleur anthropique (lié à la combustion)

Q_H : Flux de chaleur sensible

Q_E : Flux de chaleur latent

ΔQ_S : Flux de chaleur stockée

Les termes de gauche sont les apports énergétiques, comprenant celui issu du rayonnement net (Q^*). L'énergie d'origine anthropique est apportée par la combustion et l'ensemble des activités humaines constituant un apport énergétique. Ces deux flux sont convertis en chaleur, répartis en trois types :

- Le flux de chaleur sensible (Q_H) définit la température de l'air, ce flux correspond donc à la chaleur mesurée par les stations météorologiques.
- Le flux de chaleur latente (Q_E) : il s'agit de l'énergie consommée par l'évaporation de l'eau. 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.
- Le flux de chaleur stockée (ΔQ_S) est lié au stockage de l'énergie par les objets et le sol.

Afin d'illustrer ce bilan, les mesures des flux sont réalisées dans le milieu suburbain et le milieu rural (Oke 1987) (en figure 5). Ces deux graphiques permettent de comparer les densités de flux d'énergie pendant 24h et de justifier les écarts de température liés à l'ICU. Le signe des termes indique le sens du flux vertical : quand il est positif il se déplace de haut en bas et à l'inverse lorsqu'il est négatif, il se déplace de bas en haut.

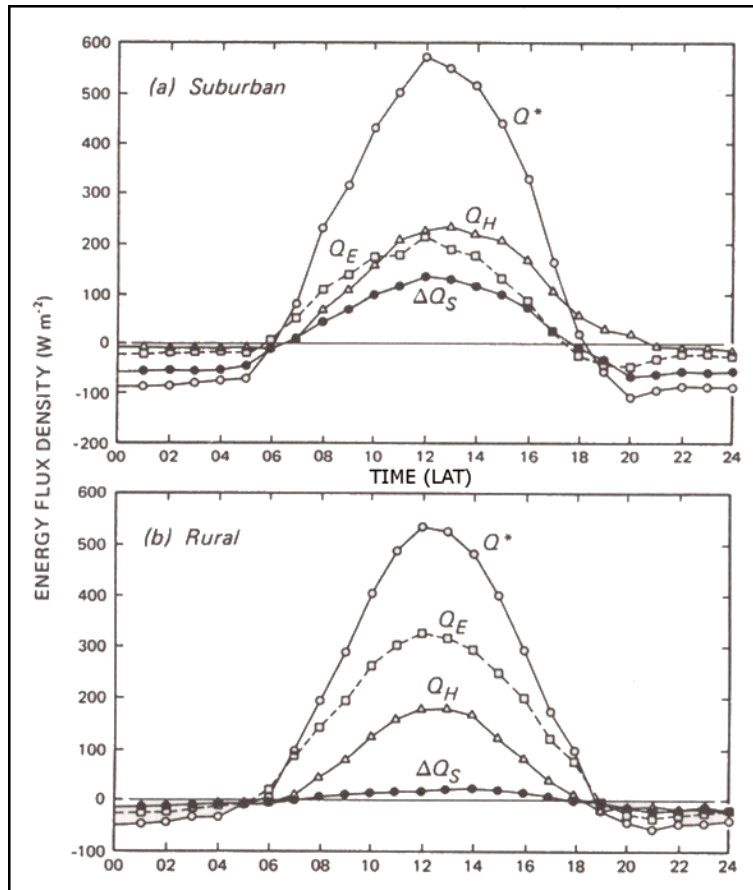


Figure 5, comparaison du bilan énergétique moyen entre la ville ("suburban") et la campagne ("rural") sur 24h, réparti selon les flux suivants : le rayonnement net (Q^*), le flux de chaleur sensible (Q_H), le flux de chaleur latente (Q_E) et le flux de chaleur stockée (ΔQ_S). D'après Oke T.R., 1987).

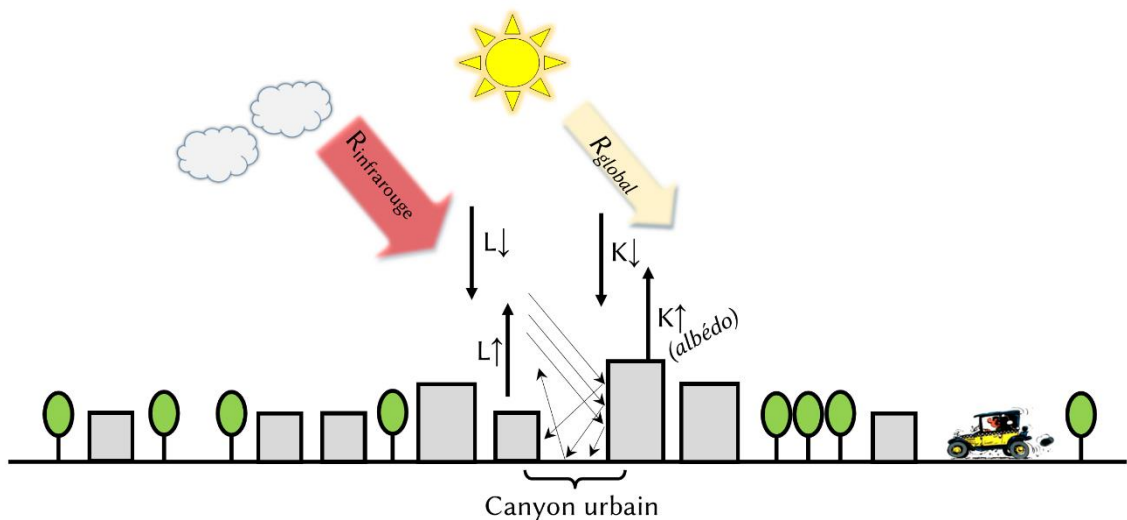


Figure 6, les rayonnements en ville : global (absorbé K_{\downarrow} et réfléchi K_{\uparrow}) et infrarouge atmosphérique L_{\downarrow} et terrestre L_{\uparrow}). D'après Oke T.R. (1987) et adaptée de Ringenbach N. (2009).

c) Le bilan énergétique diurne

Pendant la journée, le flux du rayonnement net (Q^*) correspond à la somme des autres flux présents. Q^* est quasiment identique sur les deux sites, mais sa répartition est différente. L'énergie stockée (ΔQ_s) est très faible dans le milieu rural, car elle est convertie en partie en chaleur latente (Q_E) (voir la figure 7). Cette conversion a lieu par évapotranspiration, la végétation stocke et déstocke de l'eau en grande partie pour la transpiration. Ce phénomène entraîne une diffusion régulière de l'eau dans l'atmosphère, contrairement à un milieu sec comme une surface bétonnée où l'évaporation n'a lieu qu'après une averse. La quantité d'eau disponible explique la répartition des flux dans l'atmosphère sous la forme Q_E pendant la journée. Les surfaces imperméabilisées (parkings, voirie...) et les bâtiments, stockent plus d'énergie (ΔQ_s) pendant la journée. Les raisons de ce stockage plus important sont liées à la morphologie des rues en ville. La proximité des bâtiments forme un « canyon urbain » et ils piègent en partie le rayonnement Q^* et IR avant d'être redirigé vers le ciel. L'albédo (présenté précédemment) joue également un rôle dans le stockage de l'énergie (ΔQ_s) plus important en ville, mais il est secondaire en comparaison à l'effet de canyon urbain. La différence entre l'albédo mesuré en ville et à la campagne est en moyenne de -16% (Cantat 1989).

d) Le bilan énergétique nocturne

Dès la fin de l'après-midi, la balance énergétique des flux observés est modifiée. Q^* est plus important en ville car les matériaux ayant accumulé de l'énergie la restituent, ΔQ_s est alors plus élevé. Ce flux ΔQ_s se traduit par l'inertie de Q_H en ville après le coucher du soleil. L'écart de Q_H entre le milieu urbain et rural se manifeste par la diminution plus lente des températures en ville, ce qui engendre un écart de température correspondant à l'ICU. Ces éléments révèlent l'importance du stockage de l'énergie (ΔQ_s) pour la mise en place de l'ICU. L'effet de canyon et l'albédo sont les facteurs influant sur ΔQ_s , ils apparaissent donc comme pertinent pour définir l'ICU. La végétation intervient la journée par la conversion d'une partie de l'énergie en Q_E , ce qui réduit la part de l'énergie disponible pour le stockage (ΔQ_s).

e) Bilan général en ville

Pour récapituler, l'analyse de l'évolution de le bilan énergétique au cours de la journée entre la ville et la campagne permet d'extraire les principaux facteurs influant sur l'ICU (Oke 1982; Stewart and Oke 2012) :

1. Les façades verticales (murs, bâtiments) ont une géométrie favorable à la réception et à absorption de l'énergie issue du rayonnement global (R_g).
2. Dans le même temps, l'effet de « canyon urbain » piège le rayonnement infra-rouge plus efficacement, ce qui contribue au stockage de l'énergie reçu par rayonnement la journée.
3. Le confinement des rues dans ces canyons urbains réduit la circulation du vent et des brises permettant d'adveciter la chaleur. L'advection est négligée dans l'équation du bilan énergétique car les sites sont considérés dans un environnement homogène en condition météorologique favorable à l'ICU.
4. Les surfaces perméables à l'eau et la végétation réduisent localement la température. Une partie de l'énergie est convertie en chaleur latente (Q_E) à la place de la chaleur sensible (Q_E).

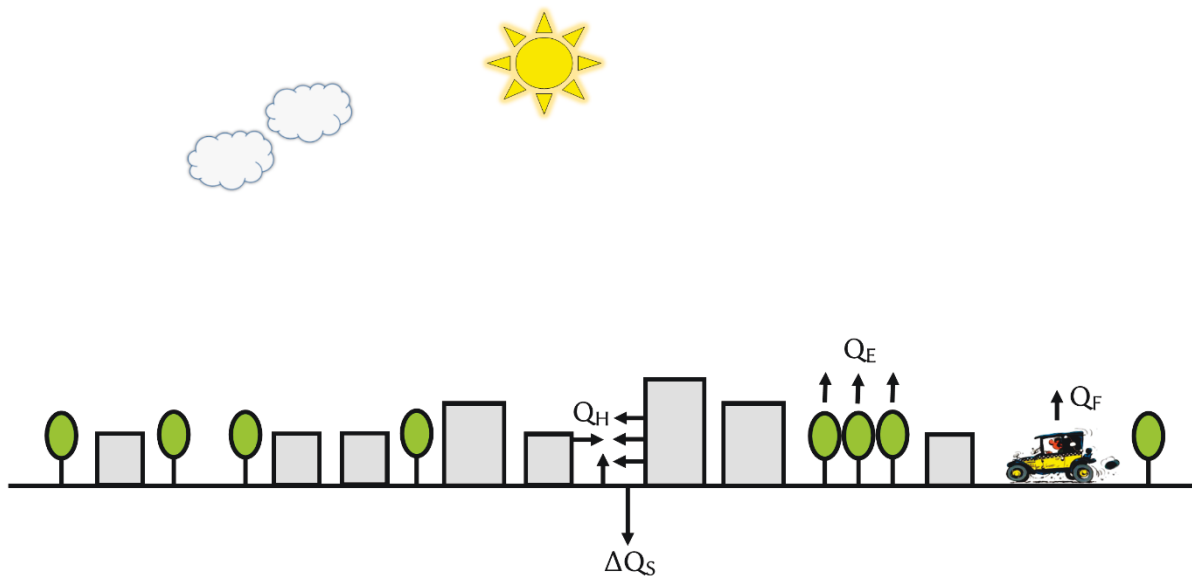


Figure 7, les flux de chaleurs en ville : Q_H : chaleur sensible ; Q_E : chaleur latente ; Q_F : chaleur anthropique ; ΔQ_S : chaleur stockée. Selon Oke, T.R. (1987) et adaptée de Ringenbach N. (2009).

5. La contribution de l'activité anthropique (Q_F) n'est pas le principal facteur de la présence de l'ICU. Sa part est certaine mais elle reste difficile à déterminer.

A partir de ces facteurs microlocaux, l'analyse de l'occupation du sol et de la morphologie urbaine apparaît pertinente pour expliquer la variabilité spatiale de l'ICU. Cependant, plusieurs échelles emboîtées interviennent dans le phénomène d'ICU : l'échelle du quartier (microlocale), l'échelle intra-urbaine et de l'agglomération (locale).

1.2.3. La variabilité spatio-temporelle de l'ICU

Le bilan radiatif et le bilan énergétique permettent d'établir les différents facteurs influant sur la variabilité spatiale de l'ICU à l'échelle microlocale et locale : la présence de bâtiments hauts, la proximité d'un parc, un quartier végétalisé environnant... Cependant, le contexte dans lequel est insérée la ville influence également l'ICU. A méso-échelle, la proximité de la mer s'accompagne parfois de la mise en place de brises de terre atténuant l'ICU. A une échelle bien plus large, le biome intervient également sur l'ICU. Par exemple, la typologie de la campagne avoisinante diffère sous un climat semi-aride, elle peut-être est définie par une steppe. L'ICU n'est pas déconnecté du contexte géographique de la ville, l'analyse spatiale de l'ICU requiert une connaissance préalable de la situation de la ville.

La variabilité temporelle de l'ICU est liée à des facteurs dont les effets fluctuent de l'échelle microlocale (quelques secondes) à une mésoéchelle (de quelques jours à plusieurs mois). Ces principaux facteurs sont l'alternance du jour et de la nuit et la succession des types de temps (Morris and Simmonds 2001; Eliasson and Svensson 2003; Cantat 2004; Lee and Baik 2010). Les autres paramètres interviennent par l'intermédiaire de ces deux facteurs (par exemple variabilité saisonnière).

La modification du bilan radiatif par ces facteurs est à l'origine de la variabilité temporelle de l'ICU. L'alternance du jour et de la nuit détermine la durée de l'ICU. La durée de l'ICU correspond à la phase de stockage et à la phase de libération de l'énergie en ville (ΔQ_S). Cette alternance quotidienne est à combiner aux types de temps rencontrés. Les types de temps s'expriment localement par des facteurs météorologiques influant sur l'ICU :

- La nébulosité et l'état du ciel réduisent le rayonnement net (Q^*), ce qui diminue le flux d'énergie stockée en ville (ΔQ_s) la journée. L'influence de la nébulosité est également importante la nuit par l'augmentation du rayonnement infrarouge atmosphérique ($K\downarrow$), les écarts de Q^* entre la ville et la campagne sont alors réduits.
- La pluie modifie le bilan énergétique en ville en augmentant la part de Q_E au détriment du Q_H en ville la journée et également la nuit. La neige influence également le bilan énergétique par son albédo élevé, compris entre 0,5 et 0,9 selon l'état de la neige. La dégradation plus rapide de la neige en ville, réduit l'albédo et accroît l'écart de température entre la ville et la campagne. En campagne, une grande partie du rayonnement (infrarouge $L\uparrow$ et visible $L\uparrow$) est réémise et réduit le rayonnement net à la campagne. Ce déficit énergétique dans la campagne enneigée se traduit par une accentuation de l'ICU.
- Le vent engendre un phénomène d'advection équilibrant les flux de chaleur entre la ville et la campagne. Cet équilibre atténue les écarts de température observés la nuit correspondant à l'ICU.

A partir de ces facteurs météorologiques, la variabilité temporelle de l'ICU peut être estimée. Les types de temps correspondent à des combinaisons de ces facteurs météorologiques dont résulte l'intensité de l'ICU. L'occurrence des types de temps rencontrés varie selon les saisons, par exemple les types de temps les plus favorables à l'ICU sont plus fréquents en été qu'en hiver. L'ICU est donc soumis également à une variabilité saisonnière, ce qui indique que la mésoéchelle est importante pour décrire la variabilité de l'ICU.

L'ICU dépend de facteurs associés à plusieurs échelles spatio-temporelles. Les ordres de grandeurs de mesures de l'ICU doivent donc être adaptés à l'échelle envisagée. L'ensemble des facteurs impliqués et l'échelle correspondante sont récapitulés par la figure 8.

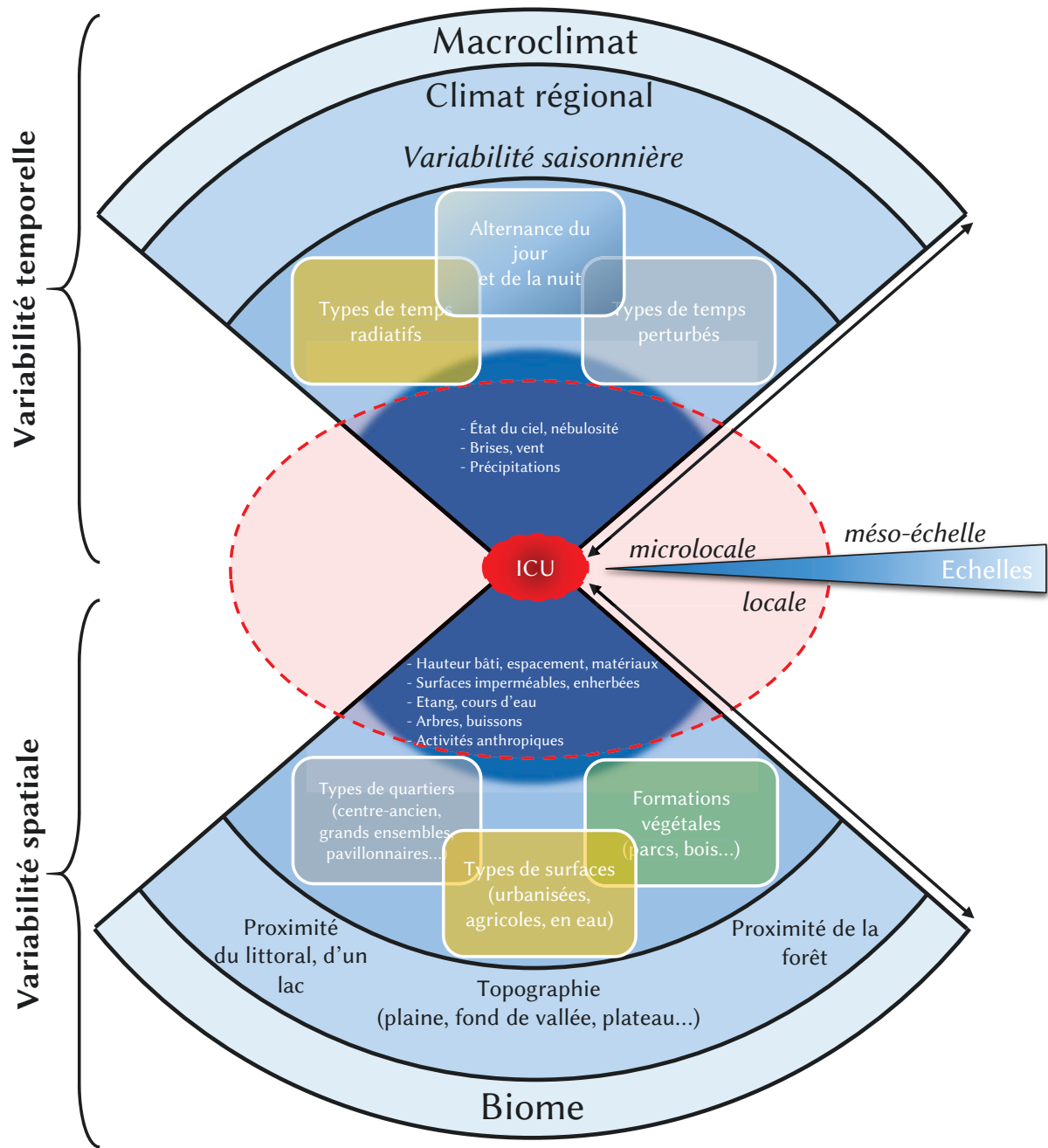


Figure 8, les facteurs spatio-temporels intervenant sur l'ICU et les échelles impliquées. Adaptée de QUENOL H. (2006).

Conclusion du chapitre 1

L'ICU est un objet de recherche récent, malgré l'observation de celui-ci dès la fondation des villes. En 1818, la première publication sur l'ICU et les facteurs impliqués est recensée. Depuis les travaux suivants portent essentiellement sur son observation. A partir des années 70, les mécanismes de l'ICU sont identifiés et la mesure de l'ICU a progressé conjointement avec l'évolution des appareils de mesures. Les travaux de Oke T.R. marquent le début de la période actuelle des études sur l'ICU. L'observation de l'ICU est réalisée dans un grand nombre de ville à travers le monde. Les études étaient d'abord essentiellement en Europe et en Amérique du Nord, puis en milieu tropical. En France, les travaux sur l'ICU portent essentiellement sur les plus grandes agglomérations. L'ICU des villes de taille intermédiaire reste peu étudié, malgré la présence potentielle de celui-ci.

Le milieu urbain influence localement le climat par la modification du bilan énergétique. Les formes urbaines (notamment les « canyons urbains ») et la faible présence de la végétation en ville agissent sur le bilan radiatif et énergétique. Ainsi, ils sont identifiés comme les principaux facteurs de la variabilité spatiale de l'ICU. Puis, la variabilité temporelle de l'ICU est établie selon deux facteurs principaux : l'alternance du jour et de la nuit, et des types de temps. Ces éléments permettent d'établir les échelles associées à la variabilité de l'ICU : l'échelle microlocale, l'échelle locale, la méso-échelle. La variabilité spatio-temporelle de l'ICU requiert une approche méthodologique par échelles emboîtées. Cependant, l'analyse du contexte doit être réalisée préalablement, afin d'établir son influence sur l'ICU.

Chapitre 2 : Le territoire rennais et le changement climatique

Cette thèse est réalisée sur le territoire de Rennes Métropole. La variabilité spatio-temporelle de l'ICU et des échelles associées nécessite la connaissance du contexte duquel s'insère ce territoire. Plusieurs aspects du territoire sont abordés : la topographie, la dynamique démographique, le climat. Ces caractéristiques sont essentielles pour évaluer leurs influences sur l'ICU présent et à venir. Le climat est abordé selon deux approches : la première s'intéresse aux facteurs climatiques liés aux types de temps, la seconde concerne le climat passé à travers les vagues de chaleurs.

L'étude du climat futur à Rennes requiert des outils adaptés à l'échelle du territoire. Les modèles du changement climatique sont présentés, notamment deux méthodes de régionalisation. Les capacités et les limites de ces méthodes sont abordées.

2.1. Le contexte géographique et climatique de Rennes Métropole

2.1.1. *Les 43 communes de Rennes Métropole : situation générale et dynamiques urbaines*

a) Les découpages territoriaux

L'étude de l'ICU est menée au sein de la communauté d'agglomération de Rennes Métropole (voir la figure 9). Cette communauté d'agglomération se situe à l'est de la région Bretagne dans le département de l'Ille-et-Vilaine, dont la ville de Rennes est le Chef-lieu. La communauté d'agglomération comprend 43 communes, dont 7 communes de plus de 10 000 habitants : Rennes, Bruz, Cesson-Sévigné, Saint-Jacques-de-la-Lande, Pacé, Betton et Chantepie. Entre 2010 et 2014, 6 communes ont rejoint Rennes Métropole.

Au total, la communauté d'agglomération comptabilise 420 707 habitants en 2012, dont 209 860 habitants à Rennes. La ville de Rennes est la 11^{ème} ville de France la plus peuplée. L'unité urbaine de Rennes comprend 13 communes répondant à la définition : le tissu urbain est composé de bâtiments distants de moins de 200 m d'au moins 2 000 habitants. L'unité urbaine de Rennes est la 20^{ème} de France avec 318 127 habitants.

Rennes Métropole est une communauté d'agglomération intégrée dans le Pays de Rennes. Le Pays de Rennes correspond à l'échelle d'intervention du SCOT (schéma de cohérence territoriale), lequel est composé de 5 EPCI (établissement public de coopération intercommunal). Ces EPCI sont des communautés de communes situées en périphérie au nord et à l'est de Rennes Métropole. Le Pays de Rennes compte 483 694 habitants répartis sur 129 500 ha dont 12,4% sont

compris dans la tache urbaine (*cf.* SCOT du Pays de Rennes, 2014). L'aire urbaine de Rennes s'étend au-delà du Pays de Rennes et elle correspond à l'aire d'influence du pôle rennais. Elle traduit la dispersion de la population et elle mesure indirectement l'étalement urbain associé. A ce titre, l'aire urbaine rennaise comptabilise 679 866 habitants en 2010 sur 3 747 km² (*cf.* l'INSEE).

b) Le contexte topographique

Le territoire de Rennes Métropole est compris dans une vaste cuvette peu accentuée, le bassin rennais. Au nord et au sud de Rennes Métropole, les reliefs les plus élevés culminent à une centaine de mètres. Cette cuvette est relativement plane avec une altitude d'environ 40 m. Les reliefs sont structurés par un vaste réseau hydrographique composé de cours d'eau de débits très variables, voire intermittents. Parmi ce réseau, on peut distinguer cinq rivières se jetant dans la Vilaine : la Chèvre (à Acigné), la Flume (près de Vezin-le-Coquet), l'Ille (au centre de Rennes), le Meu et la Seiche (à proximité de Bruz). Au sud de Rennes, la Vilaine est jalonnée par un ensemble d'étang formant une vaste zone humide. Une autre zone humide importante est présente près du centre-ville de Rennes, elle correspond au parc des Prairies Saint Martin, le long de l'Ille.

Le principal espace boisé est situé au nord-ouest de Rennes : la forêt de Rennes s'étend ainsi sur 2 915 ha dont une grande partie est située sur les reliefs les plus hauts du bassin rennais. D'autres formations boisées sont réparties sur le territoire de Rennes Métropole, mais leur surface n'excède pas les 250 ha. La campagne environnante de Rennes se caractérise par une trame bocagère plus ou moins dégradée.

c) La gestion de la dynamique démographique de l'aire urbaine rennaise : de l'étalement urbain à la densification des extensions urbaines

L'agglomération rennaise possède un modèle d'étalement urbain polycentrique discontinu, c'est-à-dire un noyau urbain dense avec de faibles polarités périphériques (voir la figure 10). L'urbanisation s'organise le long des axes routiers (« en doigt de gant »), alternant la ville et la campagne selon le modèle de la « ville-archipel » (Allain 2004). Ce modèle d'urbanisation répond à des choix encadrés par des documents d'urbanismes précis (Guégan-Roué 1994; Aguejdad 2009).

Le noyau urbain est structuré par quatre unités urbaines. Le centre historique est entouré par une couronne pavillonnaire composée de maisons de ville avec des jardins en arrière-cour. Puis plus en périphérie, des opérations d'aménagement ont été menées ; les formes urbaines dominantes sont les grands ensembles (barres et tours d'immeubles), mais également des quartiers pavillonnaires. Les zones industrielles sont situées aux abords de ce noyau urbain. La métropole rennaise présente la particularité de ne pas avoir de banlieue, les quartiers issus des opérations d'urbanisme des années 60 et 70 jouxtent directement la campagne environnante. (Bariou et al. 1988).

Autour de ce noyau urbain, l'urbanisation connaît une dynamique importante (voir la figure 10). Depuis 1982, la part de surfaces artificialisées a doublé. Elle atteint 20% du territoire actuellement (en 2010), avec 71,1 km² dans l'agglomération dont 50,4 km² à Rennes. A partir des années 80, le mouvement de périurbanisation est important et il se poursuit jusqu'à la fin des années 2000, avec une forte croissance de l'aire urbaine (Amorim et al. 2009; Aguejdad 2009). Actuellement, le gain de population est redistribué dans le cœur de métropole (+0,6%) et dans l'agglomération rennaise (2,1%). Le Pays de Rennes connaît pour la période 2008-2013 une diminution du gain de population de +1,9% à +1,7%, mais également de l'aire urbaine de +2,5%

à +1,3% (*cf.* SCOT du Pays de Rennes 2014). Cette redistribution du gain de la population vers la métropole et vers l'unité urbaine rennaise est une tendance récente observée sur la période 2008-2013.

Ce retour de la population vers le cœur d'agglomération correspond à une volonté de diminuer la consommation des espaces agricoles. Le SCOT préconise ainsi la densification des extensions urbaines. Depuis 2005, la construction de logements est comprise entre environ 3 000 et 4 000 logements par an à Rennes Métropole. Afin d'illustrer ces chiffres, la ZAC Baud-Chardonnet (présentée dans le chapitre 9.1.2) totalisera à terme 2 580 logements sur 35 ha. La volonté de réduire l'étalement urbain implique d'y répondre par la densification.

Les projections démographiques indiquent que cette dynamique de besoin en logements se poursuit. Selon l'AUDIAR, le pays de Rennes accueillerait en moyenne +5200 habitants par an d'ici 30 ans selon le scénario « haut », pour un total d'environ 97 000 habitants supplémentaires. Pour répondre aux besoins actuels et futurs, le PLH (programme local de l'habitat) fixe l'objectif progressif de 3 800 à 4 600 logements par an sur le territoire de Rennes Métropole. Ces objectifs d'aménagements doublés de préconisations de densification impliquent des modifications du tissu urbain. La densification selon le choix de la morphologie entraîne une augmentation de l'ICU plus ou moins importante (Oke 1973). Les décisions prises pour les aménagements futurs auront donc une conséquence directe sur la modification du climat urbain.

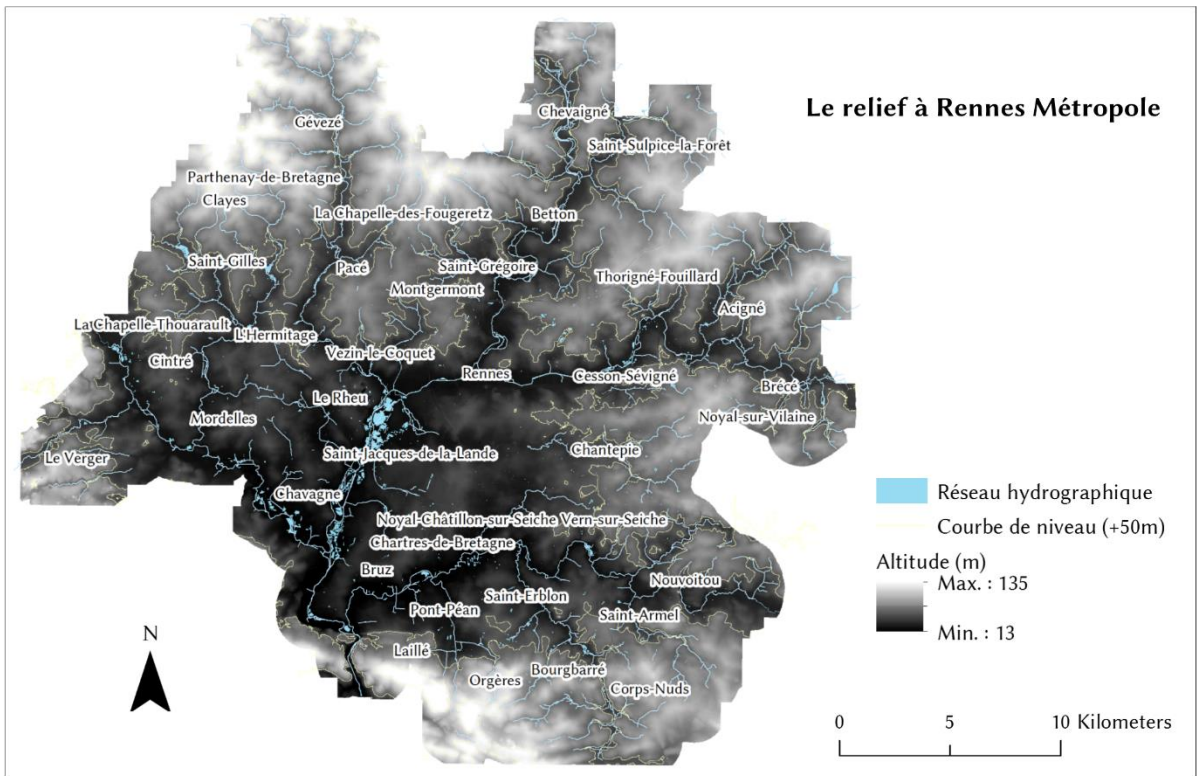
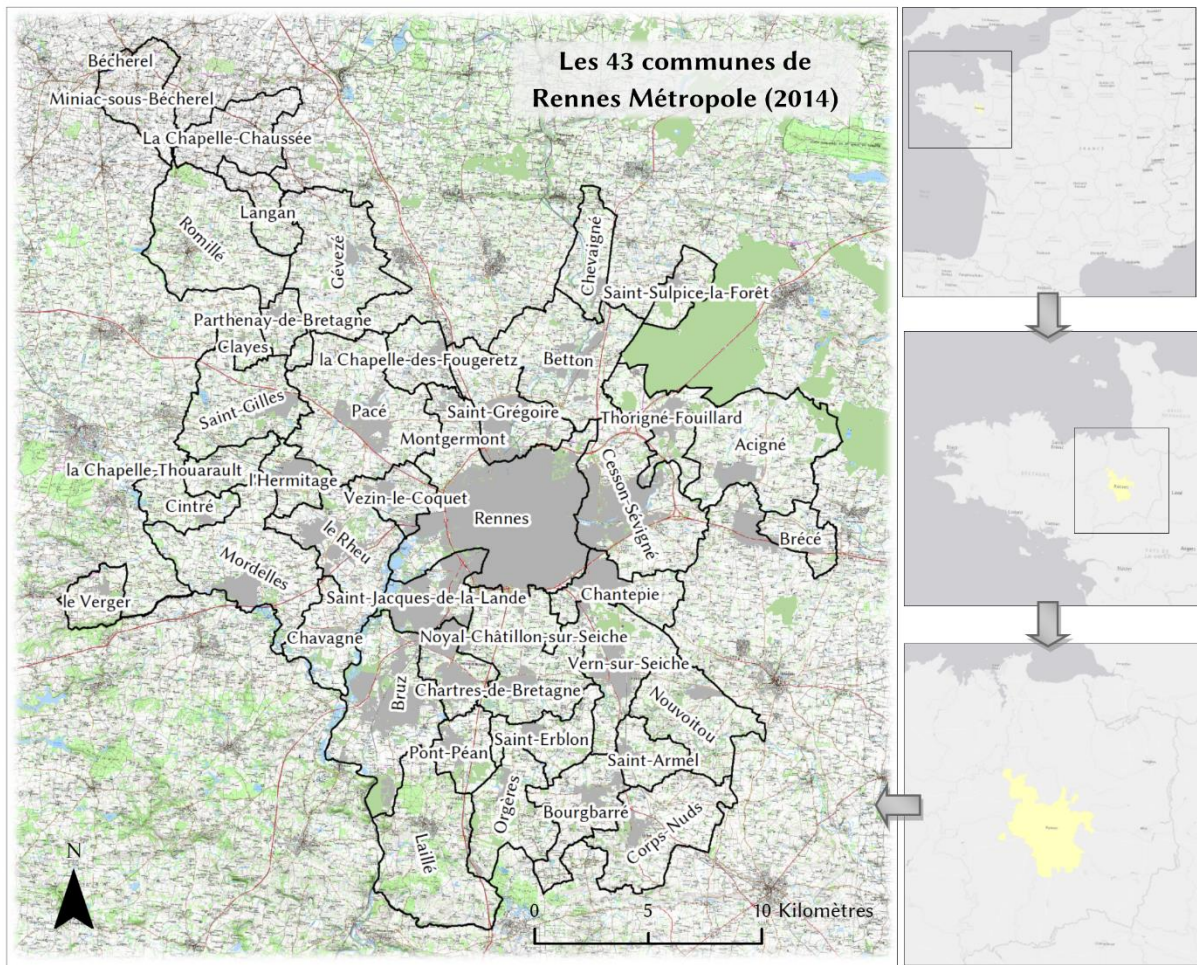


Figure 9, le contexte topographique de Rennes Métropole. Sources : IGN, service SIG Rennes Métropole (2011).

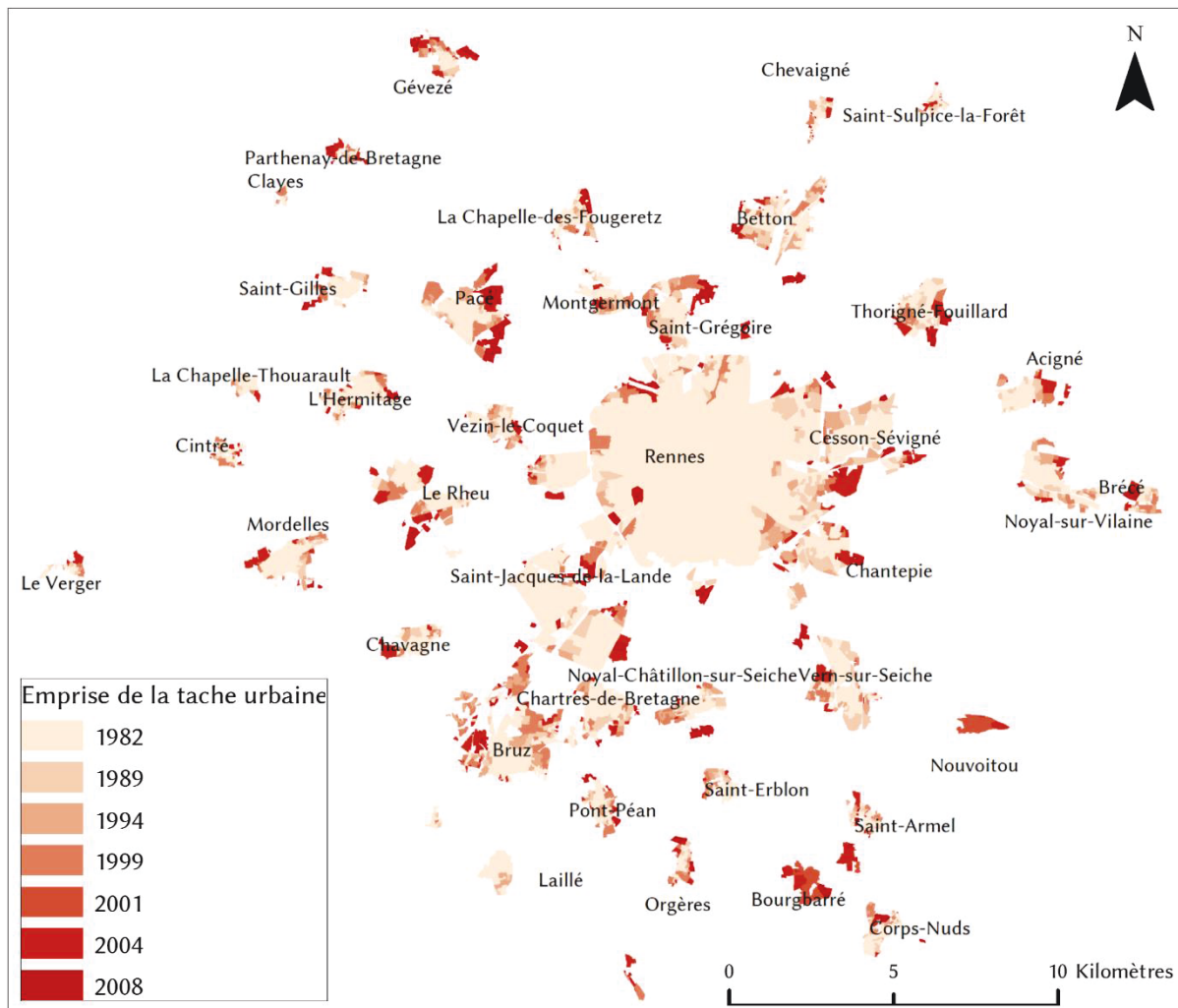


Figure 10, évolution de la tache urbaine à Rennes Métropole de 1982 à 2008. Source : LETG Rennes COSTEL, AUDIAR (2009).

2.1.2. Normales climatiques et types de temps à Rennes

Le bassin rennais est soumis à un climat tempéré océanique altéré (Péguy 1970; Mounier 1980; Dubreuil 1994, 1996; Joly et al. 2012), avec les températures moyennes annuelles associées : $T_m=12,1^{\circ}\text{C}$, $T_n=7,9^{\circ}\text{C}$ et $T_x=16,4^{\circ}\text{C}$ (observées sur la période 1981-2010). L'influence océanique engendre des hivers doux, avec une température moyenne de $6,1^{\circ}\text{C}$ en hiver et moins de 40 jours de gel par an ($T_n \leq 0^{\circ}\text{C}$). Les précipitations sous la forme de neige sont rares avec seulement 9 jours concernés en moyenne par an. La température extrême minimale enregistrée à Rennes est de -15°C en 1985. Le brouillard est plus fréquent l'hiver avec en moyenne 6 jours par mois contre 2 jours par mois en été. L'été est frais comparativement aux climats de latitude similaire avec une température maximale moyenne de $23,7^{\circ}\text{C}$. Néanmoins, on dénombre en moyenne près de 40 jours où la T_x est supérieure à 25°C et 8 jours où la T_x franchit 30°C . Ces températures tempérées traduisent la prédominance du climat océanique à Rennes. Cependant à l'échelle de la Bretagne, la station météorologique de Rennes (située à l'aéroport de St-Jacques de la Lande) révèle déjà une légère dégradation de l'influence océanique.

Les précipitations sont réparties sur l'ensemble de l'année et leur cumul est de 700 mm [1981-2010], cependant elles sont un peu plus abondantes en hiver avec 28% des précipitations annuelles, contre 19% des précipitations annuelles en été (figure 11). La situation abritée du

bassin rennais à l'intérieur des terres, comparativement au reste de la région de Bretagne, se traduit par des précipitations moins importantes.

Le climat océanique se caractérise par la succession des types de temps très variables par l'alternance de précipitations, d'éclaircies, de ciels dégagés, etc... L'ensoleillement moyen annuel cumulé est de 1717,1 h, avec un minimum de 68,6 h en décembre et un maximum atteint en juin avec 217,3 h. Sur l'ensemble de l'année, les journées faiblement ensoleillées présentent une large part avec 2/5 des journées. Les 3/5 des journées restantes sont réparties équitablement entre des journées moyennement ensoleillées à fortement ensoleillées. Cette distribution des journées d'ensoleillement concorde avec la répartition des précipitations. Les précipitations sont réparties sur l'ensemble de l'année mais également sur un grand nombre de journées avec la moitié des journées où des précipitations sont observées. Cependant, les précipitations sont faibles ou absentes dans l'ensemble, car pour 7/10 des journées la hauteur d'eau mesurée est inférieure à 1mm. Les journées avec des précipitations marquées ($P > 10$ mm) ne concernent en moyenne que 20 jours par an (Dubreuil et al. 1995). Par ailleurs, ces précipitations modérées associées à des sols peu profonds peuvent engendrer des épisodes de sécheresses récurrents (Dubreuil 1994; Lamy 2014). Le vent moyen observé est réparti équitablement sur l'ensemble de l'année, les journées avec un vent très faible ($V < 2$ m/s) représentent 14% des situations et à l'inverse les journées les plus venteuses ($V > 5$ m/s) concernent 20% des observations. Les jours de tempêtes sont rares, ils concernent en moyenne 0,6 jours par an (la rafale maximum est supérieure ou égale à 28 m/s). Ces journées sont observées principalement à partir d'octobre jusqu'en janvier. Les jours de « coups de vents » sont plus fréquents (rafales ≥ 16 m/s) pour environ 40 jours par an et plus présents des mois d'octobre à avril.

Le bassin rennais est plutôt tempéré par son climat océanique de façade ouest. Cependant à l'échelle de la Bretagne, il possède quelques spécificités plus « continentales », telles que les températures plus élevées en été. La grande variabilité des types de temps suggère la complexité temporelle pour la mise en place de l'ICU. En effet, la combinaison entre un ciel clair et un vent faible permet la présence de l'ICU et elle n'est observé que pour 10% des situations potentiellement (Cantat et al. 2012; Foissard et al. 2012).

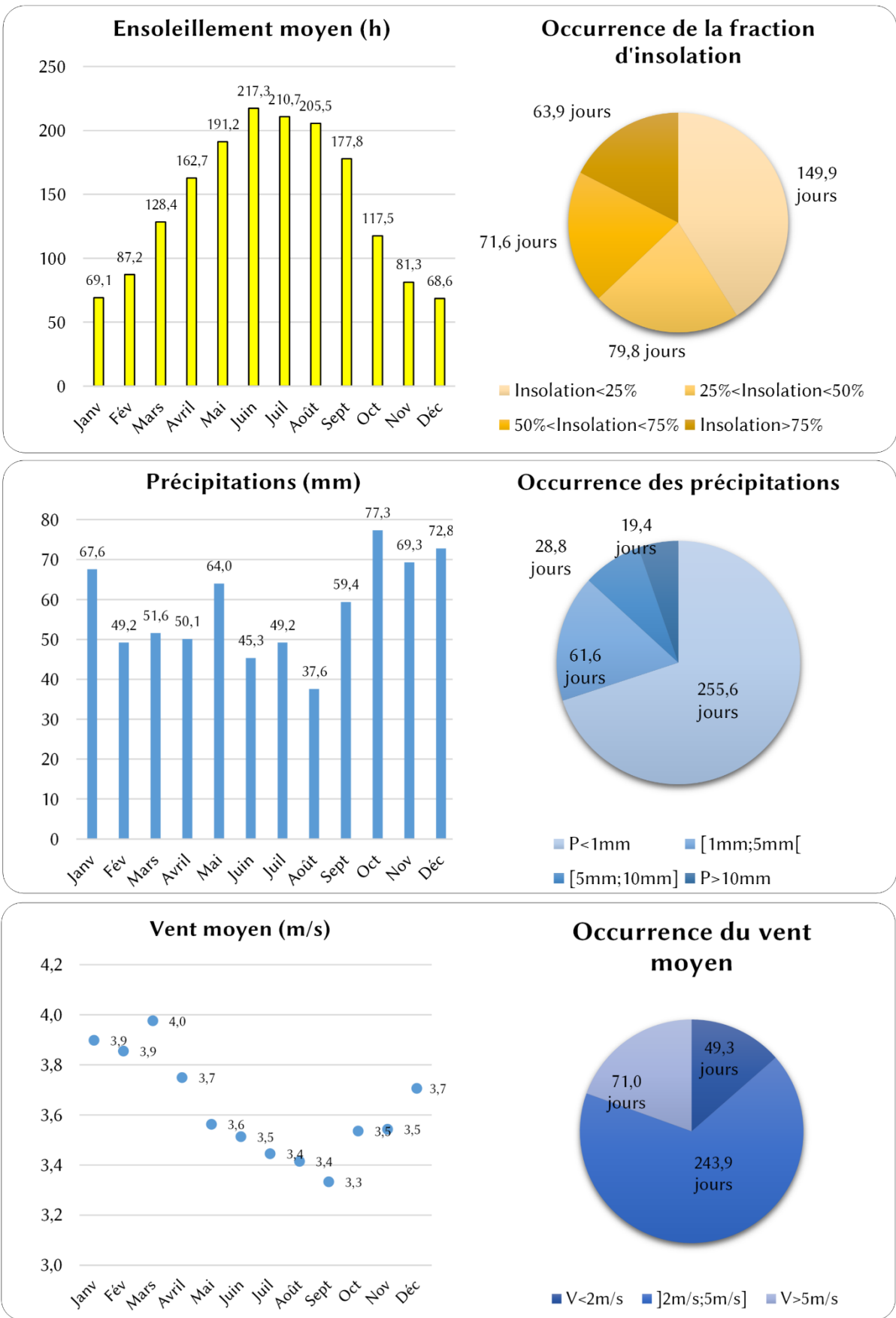


Figure 11, normales climatiques observées à la station Rennes St-Jacques [1981-2010]. Source : Météo-France, 2013. Réalisation : Foissard X., 2015.

2.1.3. *Le changement climatique mesuré à Rennes*

La station météorologique de St Jacques de la Lande (Météo-France) fait partie du réseau de stations homogénéisées centenaires (Moisselin et al. 2011). La série a été corrigée pour les données antérieures à 1945 afin de limiter les effets non-climatiques (lacunes, incertitudes liées à la mesure...). La chronique débute en 1879, ce qui permet d'avoir un recul important sur l'évolution des températures à Rennes (voir la figure 12). Cette série longue indique une augmentation de la température dès la fin du XIX^{ème} siècle, c'est-à-dire à lors de la seconde révolution industrielle.

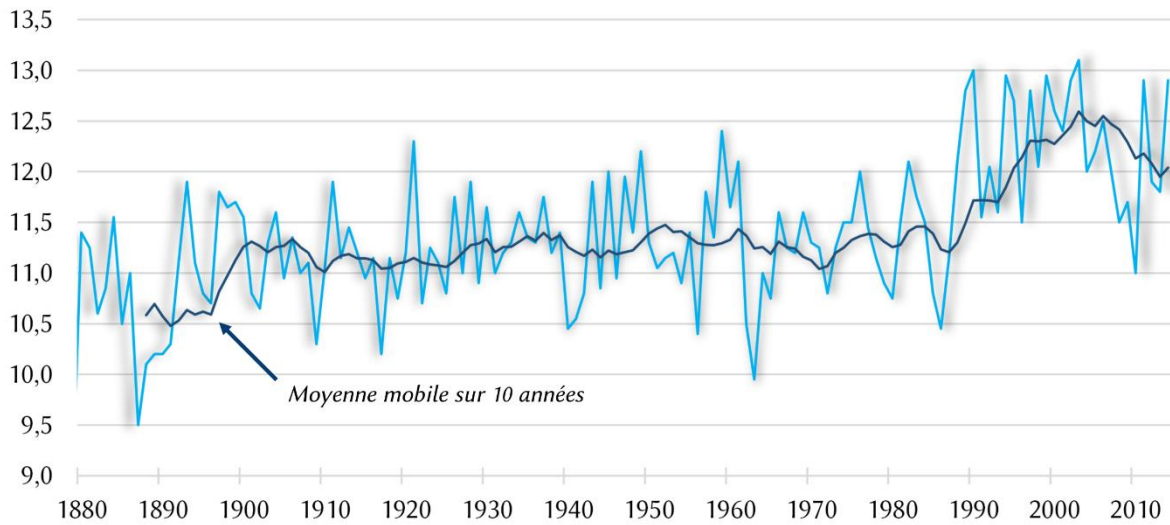
En moyenne, la température a augmenté de +0,9°C en un siècle à Rennes (+0,7°C en France) et de +1,0°C depuis le début de l'enregistrement. Ce réchauffement observé se traduit également par l'augmentation du nombre de journées où la température maximale est supérieure à 25°C. Entre 1950-1979 et 1981-2010, le nombre de ces journées a quasiment doublé de 26,7 jours à 38,7 jours. Dans le même temps, le nombre de jours de gel a diminué avec 35 jours actuellement, contre 46 jours dans les années 50. L'augmentation des températures n'est pas constante, de plus la variabilité interannuelle engendre des épisodes chauds et frais. Le test de Pettit indique une rupture significative sur cette série de température en 1987 (Pettitt 1979). Ainsi, la température moyenne avant 1987 et après 1987 augmente de +1,0°C entre les deux périodes. Ces résultats sont similaires à ceux observés par d'autres stations météorologiques dans le Grand Ouest (Dubreuil et al. 2012; Bonnefoy 2013).

La température moyenne estivale met également en évidence un réchauffement à Rennes et elle permet d'établir les étés les plus chauds et les plus frais par période. L'été 1899 se distingue avec 19,8°C, soit +2,4°C supérieur à la normale 1881-1910. Plusieurs récits de cette époque mentionnent ce mois d'août 1899 particulièrement chaud à Rennes, il coïncide avec le procès en révision de l'affaire Dreyfus qui se tient à Rennes dans l'actuel Lycée Emile-Zola (Cosnier and Hélaré 1999). La température moyenne des maximales en août 1899 atteint 27,7°C, soit le second mois d'août le plus chaud après août 2003 ($T_x=29,3^\circ\text{C}$). L'été 2006 enregistre également une température moyenne de 19,8°C. En revanche, elle n'est supérieure que +1,4°C à la normale 1981-2010. Cet été 2006 est marqué par une vague de chaleur en juillet, qui se traduit par des températures considérées comme caniculaire en France. A Rennes, ni surmortalité, ni franchissement du seuil biométéorologique (voir le chapitre 9.2.1) ne sont cependant observés pour cette période (INVS, 2006).

L'été de 1976 est le plus chaud du XX^{ème} siècle avec 20,2°C, soit +2,7°C au-dessus de la normale (1961-1990). Cette année est réputée pour l'importante sécheresse et la canicule mortifère observée. L'été 2003 apparaît distinctement comme le plus chaud depuis le début des enregistrements. La température moyenne observée durant l'été est de 21,2°C, soit +2,8°C au-dessus de la normale (1981-2010). Pour ce même été, le record de la température maximale absolu est enregistré à 39,5°C, mais également le record de la température moyenne mensuelle avec 29,3°C. Pour conclure, l'année 2003 est la plus chaude depuis le début des enregistrements, ce qui confirme son aspect exceptionnel avec 13,1°C.

L'analyse mensuelle de la température indique une augmentation plus importante pour les mois de mai à août avec environ +1°C entre 1950-1980 et 1991-2010 (Dubreuil et al. 2012). Les étés semblent se réchauffer plus rapidement que les hivers sur la seconde partie du XX^{ème} siècle. Concernant les précipitations annuelles, elles sont légèrement plus abondantes mais elles ne sont pas significatives à l'échelle du XX^{ème} siècle (Moisselin et al. 2011). Cependant l'analyse mensuelle à partir de 1950 révèle une diminution des précipitations pour les mois d'août (-31%), février (-18%) et de novembre (-11%). A l'inverse, une augmentation des précipitations est

Température moyenne de 1879 à 2014



Température moyenne en été à Rennes de 1879 à 2014

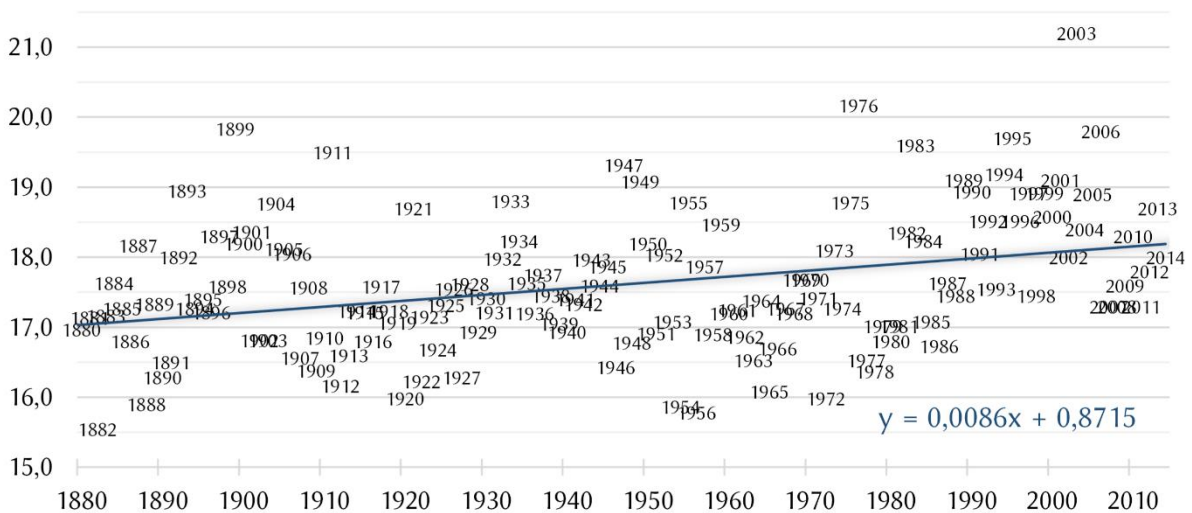


Figure 12, température observée à Rennes depuis 1879 (données homogénéisées).

constatée pour les mois de mai (+29%), juillet (+28%), d'octobre (+24%), d'avril (+19%), de janvier et décembre (+10%) (Dubreuil 1994; Dubreuil et al. 2012; Lamy 2014).

Le changement climatique à Rennes s'exprime en partie par une augmentation de la température en été, ce qui se traduit par des vagues de chaleurs plus fréquentes. Ces journées chaudes impliquent une augmentation du nombre de journées où l'ICU devient sensible pour les habitants.

2.2. Les modèles régionaux du changement climatique

Les modèles climatiques globaux permettent de simuler l'atmosphère à l'échelle planétaire. Leurs usages sont multiples, ils peuvent être employés à la prévision météorologiques à court terme ou pour la simulation du climat futur à long terme. Ils reposent sur les mêmes principes physiques des mécanismes atmosphériques. Ils sont structurés par un maillage horizontal et vertical à l'échelle du globe. Dans le cadre de la simulation du climat à long terme, les modèles sont forcés vers des valeurs climatiques observées afin de limiter leur dérive. Ces modèles atmosphériques sont également couplés à des modèles spécifiques adaptés à leur propre système : l'océan, les glaces polaires, la végétation, la composition chimique de l'atmosphère...

Le GIEC utilise plusieurs modèles climatiques globaux pour simuler le climat futur selon divers scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Le forçage radiatif traduit plusieurs évolutions des concentrations des gaz à effets de serre et l'injection de ceux-ci dans l'atmosphère est liée à l'activité anthropique. Les différents scénarios d'émission SRES (*Special Report for Emission Scenario*) proposés par le GIEC font face à plusieurs incertitudes : l'évolution socio-économique à l'échelle mondiale et l'estimation des gaz à effet de serre associés et l'incertitude des modèles à reproduire le climat et à assimiler ces forçages. Au total, le GIEC dans ses synthèses (AR3 en 2001 et AR4 en 2007) utilise quatre familles de scénarios d'émission afin de proposer plusieurs futurs probables malgré l'impossibilité de « prévoir » les orientations politiques et économiques prises à l'avenir (IPCC 2001, 2007). Dans cette thèse, les scénarios employés sont les scénarios A1B et A2, ils appartiennent respectivement aux familles A1 et A2. Depuis 2013, le GIEC a présenté de nouveaux scénarios *RCP/SSP*(AR5), ils sont détaillés dans la partie suivante chapitre 2.2.4.

- La famille A1 suggère un monde avec un développement économique rapide à l'échelle mondiale associé à l'introduction de nouvelles technologies respectueuses de l'environnement. La population mondiale atteint un maximum de 9 milliards vers 2050, puis elle décroît en 2100 atteignant 7 milliards. Ce développement rapide des technologies repose sur trois scénarios de sources d'énergie : A1FI pour les énergies fossiles, A1T pour les énergies autres que fossiles et A1B pour l'équilibre entre les sources. Ce dernier scénario est utilisé dans le cadre de cette thèse, il correspond à une augmentation de la température de +2,8°C à l'échelle du globe à la fin du XXIème siècle. La « fourchette probable » de ce scénario est comprise entre +1,7°C et +4,4°C. Le scénario A1B est considéré comme médian car il est optimiste vis-à-vis du scénario A2 et pessimiste au regard du scénario B1. Le scénario B1 (non utilisé) correspond à un développement global et à une conversion rapide des technologies. Il représente les intentions du développement durable (économique, social...).
- La famille A2 propose un développement régional, ce qui correspond à des évolutions des technologies inégales et plus lents que pour les autres scénarios (il est construit sur le schéma économique actuel). Dans ce monde hétérogène, la population augmente tout au long du XXIème siècle, chaque région suit son propre modèle démographique indépendamment pour atteindre 15 milliards d'habitants en 2100. Le scénario A2 est pessimiste en termes d'émission de gaz à effet et projette une augmentation de la température de +3,4°C à l'échelle mondiale avec une « fourchette probable » de +2,0°C à +5,4°C.

2.2.1. *La régionalisation statistique : la méthode par régime de temps*

Les modèles climatiques globaux simulent l'évolution du climat en intégrant les émissions de gaz à effets de serre en fonction du scénario retenu. Le modèle ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) est un modèle de circulation générale global développé par le laboratoire CNRM/GAME (Centre National de Recherches Météorologiques) (Déqué et al. 1994). Ce modèle est ordonné par une grille étirée, c'est-à-dire que la maille est plus fine en France (environ 50 km) et plus lâche (234 km) aux antipodes (à l'est de la Nouvelle-Zélande). Ce modèle intègre les différents scénarios du GIEC et il simule l'évolution du climat sur l'ensemble de la période à projeter (1950 à 2100). Cependant une grille de 50 km de résolution demeure insuffisante à destination d'études d'impacts du changement climatique, mais également dans le cadre de cette thèse. L'agglomération rennaise est circonscrite dans une maille de 30 km et l'aire d'étude est comprise dans une maille de 15 km. Le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique) a développé une méthode de désagrégation des données afin de produire des sorties de modèles à une résolution plus fine, à 8 km de résolution.

La méthodologie mise en place par le CERFACS repose sur la relation statistique entre la circulation atmosphérique à grande échelle et les variables météorologiques à l'échelle locale. L'analyse des circulations atmosphériques est réalisée à partir des ré-analyses NCEP (National Centers for Environmental Prediction) (de 250 km de résolution), où plusieurs groupes de types de circulations sont définis. Ces groupes possèdent chacun un centroïde correspondant à un champ de pression atmosphérique moyen. Au total, 9 groupes sont établis par saison (Pagé and Terray 2010; Pagé 2010a).

Les données d'observation à l'échelle locale sont issues de la grille SARFRAN (8 km) ; celle-ci résulte de l'interpolation du réseau de stations météorologiques synoptiques en France et des zones climatiquement homogènes (615) (Le Moigne 2002). Les prédicteurs employés sont les précipitations et, l'été, les prédicteurs utilisés sont les températures. Les modèles statistiques sont établis par régression linéaire multiple, où les régimes de temps (les centroïdes) sont les prédicteurs. Cette étape d'apprentissage permet d'établir pour chaque journée (champs de pluies observée) la distance du champ de pression associé à chaque centroïde. La température moyenne quotidienne à l'échelle de la France est également utilisée pour la classification. Cette étape d'apprentissage est réalisée sur 25 ans environ (Pagé 2010a).

A partir de cet apprentissage, pour un champ de pression et une température moyenne issus du modèle global de circulation (ARPEGE), l'algorithme propose une journée parmi les journées réalisables de SAFRAN. La journée proposée permet d'appliquer une correction des températures (si besoin) et d'ajuster le rayonnement et les précipitations associées. L'ensemble des journées dans la base d'apprentissage sont utilisées pour la période projetée en tenant compte de l'aspect stochastique (reproduire la variabilité journalière) (Pagé and Terray 2010).

Cette méthodologie s'appuie sur plusieurs hypothèses :

- la relation entre les prédicteurs, les prédicteurs et leur échelle respective est supposée pertinente ;
- le changement climatique demeure identique au cours du temps, les relations établies précédemment restent justes (hypothèse de stationnarité du climat) ;
- le signal du changement climatique est perçu par cette méthodologie et elle permet de le restituer.

Les résultats issus de cette méthode présentent l'avantage de couvrir des champs spatiaux cohérents et prennent en compte correctement les effets liés à la topographie. Cependant, des faiblesses apparaissent pour l'étude de phénomènes extrêmes. La méthode projette des journées issues de la période d'apprentissage avec une correction, par conséquent la méthode n'est pas adaptée aux indices par calculs de seuils.

2.2.2. *La régionalisation dynamique*

La méthodologie de la régionalisation dynamique repose sur la capacité du modèle climatique global à réduire la résolution de la grille sur une région particulière (ici, la France métropolitaine). En contrepartie, le modèle simule l'atmosphère uniquement sur une partie du globe, le modèle est qualifié « à aire limitée ». Cette méthode comparativement à la régionalisation statistique requiert une puissance de calcul supérieure, mais inférieure à celle des modèles globaux à grilles étirées.

La méthode proposée par le projet SCAMPEI est développée par le CNRM et appliquée au modèle Aladin. Ce modèle a une grille de 12 km auquel un ajustement est appliqué à partir de l'analyse SAFRAN (8 km). La grille SAFRAN sert également pour ce modèle de source de données de références (Radu et al. 2008; Piazza et al. 2011).

Les données de l'analyse SAFRAN sont classées selon quatre régimes de temps et pour les quatre saisons. La classification automatique est réalisée à partir des géo potentiels à 500 hPa. Puis, pour chaque maille de la grille, 103 bornes (quantiles) sont déterminés en fonction de chaque régime de temps. A partir de cette classification pour chaque journée simulée par Aladin, un régime de temps est associé et une borne de temps est établie parmi les 103. Cet ajustement maille par maille pour chaque variable est appelée la « correction quantile-quantile ». Elle présente l'avantage de réduire les biais du modèle, particulièrement pour les événements extrêmes et le décompte des dépassements de seuils (Radu et al. 2008; Piazza et al. 2011). Cette méthode apparait complémentaire à la méthode de régionalisation statistique précédente.

2.2.3. *Les incertitudes des modèles régionalisés*

Les incertitudes sont multiples, cependant la principale incertitude est liée aux modèles climatiques globaux eux-mêmes (Rowell 2006). Ils simulent approximativement certains phénomènes : les processus physiques liés à la convection et à la formation des nuages, la représentation partielle du couplage des processus chimiques dans l'atmosphère... Cette incertitude est qualifiée d'épistémique. L'incertitude peut être réflexive, elle est liée aux hypothèses d'émission de gaz à effet de serre et aux scénarios socio-économiques associés (sans oublier les événements géologiques majeurs). Cette incertitude montre l'importance d'utiliser plusieurs scénarios d'émission, sans considérer un des scénarios comme plus probable. L'aspect stochastique du climat engendre une incertitude liée à la variabilité intrinsèque du climat, elle apparait comme recherchée et requise pour les modèles. La dernière incertitude est liée aux choix méthodologiques de la descente d'échelle, elle s'ajoute aux précédentes. Des différences apparaissent entre les deux méthodes présentées : dynamiques et statistiques (Pagé and Terray 2010). Selon leur usage, elle présente des avantages et inconvénients à adapter en fonction de la problématique. Cette dernière incertitude regroupe l'ensemble des incertitudes précédentes selon une « cascade d'incertitudes ». A chaque étape de construction du modèle une incertitude s'ajoute. Ainsi à l'étape du modèle d'impact du changement climatique à l'échelle locale, l'ensemble des incertitudes s'accumule (Boé 2007).

La modélisation à long terme apporte nécessairement une simplification croissante de la réalité ce qui implique des phénomènes négligés. L'usage de ces modèles requiert un recul et une

réflexion vis-à-vis du phénomène étudié, afin de déterminer les limites et les capacités des modèles (Carrega 2008a). Une analyse préalable entre l'observation, le modèle et sa référence est nécessaire. La période de « contrôle » permet de distinguer la capacité du modèle à reproduire la variabilité et de déterminer si l'erreur est à attribuer au modèle ou à la référence (dans les cas présents, la grille SAFRAN). L'usage du modèle le plus proche du phénomène climatique observé ne permet pas de le qualifier de « juste » au regard des incertitudes énoncées précédemment. Cependant il peut témoigner d'un des champs des futurs envisageables.

2.2.4. *Les nouveaux scénarios d'émission de gaz à effet de serre*

A la publication du cinquième rapport du GIEC, de nouveaux scénarios sont proposés. Ces scénarios découplent les scénarios socio-économiques des scénarios d'émission. Les scénarios socio-économiques sont nommés SSP (*Shared Socioeconomic Pathway*). Ils reposent sur une approche selon deux axes : les besoins d'atténuation et adaptation au changement climatique. Au total, cinq scénarios gradués sont proposés. Ils sont répartis autour d'un scénario central qui est la poursuite de la tendance actuelle. Ces différents scénarios permettent d'établir une cohérence avec les profils d'émissions de gaz à effet de serre qui en résultent.

Les scénarios d'émission sont nommés RCP (*Representative Concentration Pathway*). Au total, ils sont quatre et définis en fonction du forçage radiatif additionnel en 2100. Le RCP 8,5 est le scénario extrême, il correspond à un forçage radiatif continu pour atteindre plus de $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ en 2100 (contre $2,84 \text{ W.m}^{-2}$ observé en 2011). Ce scénario est un peu supérieur au précédent scénario A2, il projette en moyenne la température à $+3,7^\circ\text{C}$ avec une plage probable comprise entre $+2,6^\circ\text{C}$ et $+4,8^\circ\text{C}$ (entre les périodes 1986-2005 et 2081-2100). Le RCP 6,0 peut être associé au scénario A1B, il projette en moyenne la température à $+2,2^\circ\text{C}$ avec une fourchette probable de $+1,4^\circ\text{C}$ à $+3,1^\circ\text{C}$. Le scénario RCP 4,5 est proche du scénario B1, la température est en moyenne projetée à $+1,8^\circ\text{C}$ avec une fourchette probable de $+1,1^\circ\text{C}$ à $2,6^\circ\text{C}$. Enfin, le RCP 2,6 correspond à un forçage stabilisé correspondant à un scénario strict d'atténuation, la moyenne des températures projetées est de $+1,0^\circ\text{C}$ avec une fourchette probable comprise entre $+0,3^\circ\text{C}$ et $+1,7^\circ\text{C}$ (Moss et al. 2010; Pachauri et al. 2014).

Ces scénarios ont réduit l'incertitude, néanmoins certaines rétroactions ne sont toujours pas prises en compte (par exemple la fonte du permafrost). Une autre innovation concerne la résolution spatiale de ces projections, elle correspond actuellement à une maille de $0,5^\circ$ et les modèles peuvent être projetées sur de plus longues échéances (200 à 300 ans). Cependant, les anciens scénarios restent encore utilisés et effectifs. La transition vers les nouveaux scénarios est progressive.

Conclusion du chapitre 2

Le contexte topoclimatique de Rennes Métropole semble potentiellement peu influent sur l'ICU. En revanche, la dynamique démographique du territoire indique des besoins importants en logement actuel et à venir. Pour répondre à ces besoins et réduire le phénomène d'étalement urbain, une politique de densification du cœur de métropole est menée. Les aménagements présents et futurs ont une incidence probable sur le climat urbain et plus spécifiquement sur l'ICU. Le climat passé à Rennes révèle la manifestation du changement climatique sur le territoire, notamment par l'augmentation des vagues de chaleur. En 50 ans, le nombre de journées où la température maximale est supérieure à 25°C a quasiment doublé.

Ces éléments montrent l'exposition potentiellement plus importante des populations urbaines à Rennes aux canicules. L'évaluation du territoire aux vagues de chaleurs et à l'ICU est envisagée à partir des modèles du changement climatique régionalisés adaptés à l'échelle du territoire.

Chapitre 3 : Les réseaux de mesures : de l'échelle de l'agglomération à l'échelle des quartiers

La variabilité spatio-temporelle de l'ICU requiert l'installation d'un réseau de mesures adapté aux différentes échelles de l'ICU. Cependant, le milieu urbain apparaît comme un espace hétérogène et il présente un grand nombre de contraintes au regard des préconisations de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM). Le protocole de mesures est à établir afin de garantir la qualité des données acquises et de leur représentativité. L'analyse du milieu et la connaissance des échelles impliquées sont requises pour la constitution des réseaux de mesures adéquates. L'objectif de ces mesures est l'analyse et la modélisation spatiale et temporelle de l'ICU.

3.1. Les mesures en milieu urbain

L'observation de l'ICU peut être réalisée par la mesure de la température en ville, notamment par la mise en place d'un réseau de stations météorologiques, de capteurs ou de mesures itinérantes. Ces mesures doivent tenir compte du contexte urbain, c'est-à-dire des différentes échelles (verticales et horizontales) en présence décrites et détaillées dans le chapitre 1 (Oke 2006).

Il existe plusieurs types de structures verticales en ville que nous avons précédemment détaillées dans le chapitre 1 ; ici, nous nous intéresserons plus particulièrement à la *canopée urbaine* (notée dans la littérature anglophone *Urban Canopy Layer, UCL*). La *couche de surface urbaine* est composite et elle comprend notamment la *canopée urbaine* dont la taille varie selon la hauteur des éléments environnants constituant la rugosité, tels que les bâtiments et les arbres (Bailey et al. 1997; Hufty 1997). Ainsi la couche de surface est une enveloppe comprise entre le sol et la hauteur des immeubles et des arbres dont la hauteur fluctue d'une dizaine de mètres (figure 13).

L'ensemble des mesures a été réalisé au niveau de *couche de surface* et plus précisément dans la *canopée urbaine*. Le déploiement des différents réseaux de mesures suivent les recommandations issues des travaux de T.R. Oke telles que la représentativité de la station et du choix de l'échelle de l'observation (Oke 2004). Les observations en ville réclament la prise en compte des contraintes pratiques, qui réduisent ainsi les emplacements idéaux.

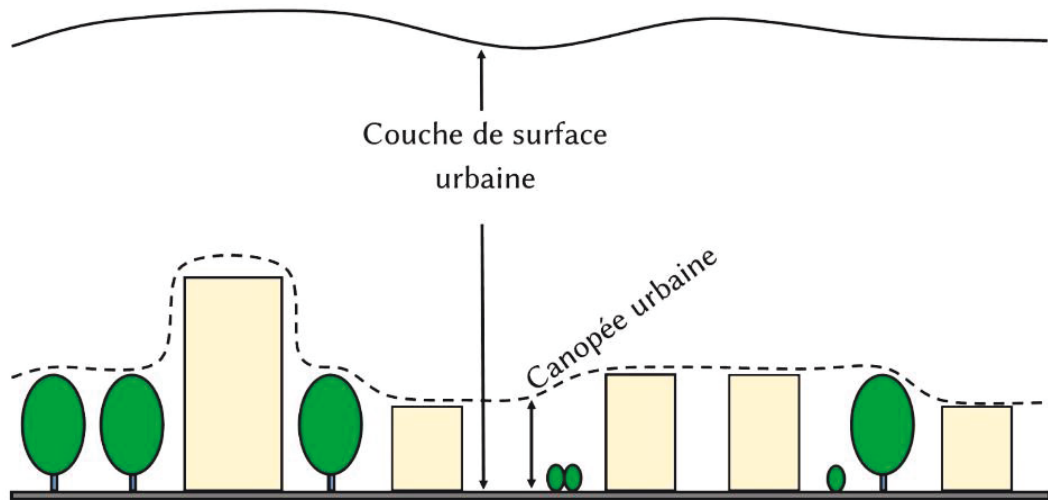


Figure 13, l'ensemble des mesures est réalisé dans la canopée urbaine, une des couches composant la couche de surface urbaine, adaptée de Oke T.R. (2006).

Les appareils de mesures utilisés ont été évalués et testés afin de prendre en compte de l'incertitude de la mesure et des limites de ceux-ci. Plusieurs types d'appareil de mesures ont été utilisés afin de mettre en évidence l'ICU selon différentes méthodes et à différentes échelles.

3.1.1. Guides et recommandations

L'installation d'un capteur de température ou d'une station météorologique doit répondre à une problématique précise et défini par un protocole. Le choix de la méthode (mesures fixes, itinérantes...) et de l'échelle de l'observation pose la question du pas de temps et de l'aspect qualitatif du jeu de données obtenu (discret ou continu). Bien évidemment, la variable mesurée est un élément essentiel concernant les précautions à prendre pour la mesure. Dans le cadre de cette thèse, l'attention a été portée pour la mesure de la température.

A partir des expériences passées de mesures menées en ville, T.R. Oke a réalisé un guide pratique afin de standardiser et d'homogénéiser les protocoles de mesures urbaines (Oke 2006). Les démarches à suivre peuvent résumées en 6 étapes :

- Le choix de l'échelle d'analyses : microclimatique, locale et mésoclimatique, incluant l'échelle verticale associée (Yoshino 1975). Dans le cadre de cette thèse, l'échelle de mesure correspond à celle des quartiers et d'une agglomération, à savoir l'échelle locale.
- Déterminer l'*empreinte* ou *footprints* des éléments environnant la station, c'est-à-dire l'origine du rayonnement et des flux turbulents influant la mesure. Un radiomètre mesure le rayonnement reçu directement dans son « champ de vision », dont l'aire d'influence sur le capteur a la forme d'un cercle concentrique dépendant de la hauteur à laquelle est installé celui-ci. Dans notre cas, la mesure est réalisée à l'aide d'un capteur de température pourvu d'un abri, diminuant ou bloquant intégralement le rayonnement direct (dans le meilleur des cas), la mesure dépend des flux turbulents transportés (incluant le « champ de vision » du capteur). L'aire représentative de la mesure correspond à une enveloppe dont la forme au sol est une ellipse variant selon le vent, la rugosité de l'environnement et de la hauteur du capteur (Schmid et al. 1991; Voogt et Oke 2003) (figure 14). Pour résumer, en milieu urbain le cercle d'influence environnant un capteur de

température placé à 2 m du sol possède un rayon d'environ 500 m variant selon la hauteur des bâtiments et de la situation synoptique.

- La variable météorologique mesurée : la température, l'humidité relative, le vent, le rayonnement, etc... La méthode la plus adaptée diffère selon le facteur à observer (un réseau de mesures ou un mât équipé). Les observations de la pluie et du vent sont complexes à réaliser en milieu urbain, les « effets de masque » sont nombreux par la présence des arbres et des bâtiments. De même, l'étude du rayonnement est plus pertinente par l'installation de capteurs sur le toit des immeubles.
- La description du site selon des critères qualitatifs (par exemple : le type d'occupation du sol des quartier) et quantitatifs (par exemple : la fraction d'occupation du sol) (Stewart et Oke 2012). Des *Local Climate Zones* (noté *LCZ*) ont été définies afin de classer climatiquement les différents quartiers observables. Cette classification *LCZ* tient compte de plusieurs paramètres tels que : la structure (hauteur des bâtiments et leur espacement), la couverture (fraction d'occupation du sol), la nature des matériaux (asphalte, béton...) et de l'activité anthropique.
- Le choix du lieu d'implantation du capteur afin qu'il représente au mieux le quartier dans lequel il est installé. Selon la couche atmosphérique urbaine où la mesure se situe (dans la *canopée urbaine* ou au-dessus), l'aire de représentativité de la station fluctue. Ainsi dans la *canopée urbaine*, la distance pour changer de classe *LCZ* peut varier de 500 m à 1 km.
- Le référencement et l'identification des sites de mesures retenues. Cette indexation peut être réalisée par des schémas, des photographies aériennes, des descriptions relatives aux activités présentes et aux modifications observées.

a) Quelle est la représentativité de la station ?

L'installation d'une station météorologique pose la question de la représentativité de celle-ci. Dans un premier temps, la station est installée en fonction d'un réseau dont l'objectif de celui-ci est d'établir la variabilité spatiale de l'aire d'étude. Le site retenu doit correspondre à un contexte défini, c'est-à-dire, à une typologie de quartier (ex : centre-ville ancien, zone activité commerciale...) ou à une caractéristique topoclimatique particulière (fond de vallée, à proximité d'un étang...). La station s'inscrit dans le réseau de mesures comme représentative d'un site particulier à l'échelle de l'étude.

Dans un second temps, il est nécessaire de s'intéresser à l'échelle microlocale de la station. A ce niveau, les phénomènes inhérents aux propriétés des matériaux apparaissent à proximité des surfaces. L'influence des facteurs sur la station doit être aussi minime que possible. Cet objectif se traduit par une distance minimale à respecter entre la station et l'élément influant. L'échelle microlocale est l'échelle de la réflexion lors de l'installation de la station, le choix du quartier à observer étant défini préalablement.

La figure 14 permet d'illustrer la complexité du milieu urbain et la représentativité d'un capteur de température sur celui-ci. Ce schéma montre l'exemple d'un capteur de température placé en ville. A l'échelle microlocale (figure 14 a)), les obstacles au premier plan du capteur apparaissent : les bâtiments, les arbres, les surfaces perméables et imperméables... Ces éléments au premier plan peuvent influencer le capteur à l'échelle microlocale, effets microlocaux que l'on souhaite aussi minimales que possible. L'influence des éléments à proximité du capteur doivent refléter l'influence des éléments environnants à l'échelle locale. Les ordres de grandeurs de ces

deux échelles urbaines horizontales emboîtées sont d'une dizaine de mètres pour l'échelle microlocale et de plusieurs centaines de mètres pour l'échelle locale (Yoshino 1975). L'effet convectif des éléments à proximité du capteur croissent lors de situation atmosphérique calme (situation favorable à la mise en place de l'ICU).

A l'échelle locale, par vent faible la représentativité de la station forme un disque concentrique dont le rayon varie d'une centaine de mètres à 1 km selon la densité des bâtiments (figure 14 b)). L'empreinte des éléments urbains sur le capteur fluctue sous le vent, la forme de l'empreinte s'étire et forme une ellipse (figure 14 c)). La représentativité du capteur est modifiée, cependant il est important de souligner que cette forme elliptique correspond à un instantané de la mesure. De manière générale l'empreinte mesurée a une structure spatiale plus compacte, d'où la forme circulaire de l'empreinte représentative de la mesure moyenne du capteur de température.

b) L'équilibre entre les contraintes du site et les variables mesurées

La principale variable mesurée et utilisée pour l'étude de l'ICU est la température, le réseau de mesures est donc déployé en privilégiant cette variable. Les stations météorologiques utilisées acquièrent plusieurs variables telles que la température, l'humidité relative, le vent et la pluie. Le choix de la variable observée requiert différentes précautions de mesures.

Dans le cas de la température, la distance à l'obstacle le plus proche est le premier paramètre à prendre en compte afin d'en réduire l'influence directe sur le capteur. La station est placée au centre d'un quartier dont la morphologie est homogène et respecte le ratio moyen observé : hauteur des bâtiments / espacement entre les bâtiments. L'ordre de grandeur selon T.R. Oke est de 5 à 10 m lorsque la hauteur des bâtiments oscille entre 20 m et 30 m (Oke 2006). Contrairement aux méthodes employées pour les stations synoptiques (souvent rurales), il n'est pas nécessaire de placer la station urbaine sur une surface enherbée dans un espace ouvert (Peterson 2003). Ces caractéristiques correspondent à des espaces particuliers en ville qui bien souvent sont des parcs, les spécificités urbaines de chaque quartier ne pouvant être représentées dans ces conditions (Dubreuil et al. 2011).

L'effet de masque des bâtiments et des arbres engendre une augmentation des écarts de températures par l'insolation moins importante localement. L'exposition de la station est préférable dans une rue orientée selon l'axe Nord-Sud plutôt que l'axe Est-Ouest. Ce choix permet de réduire la distorsion quotidienne du signal thermique en début et en fin de journée (Oke 2006).

L'installation sur les toits de bâtiment est déconseillée pour la mesure de la température car ils présentent une particularité microlocale, à savoir des températures plus élevées qu'au sol en journée et plus faibles la nuit. Pour réduire ce phénomène microlocal, la station doit être surélevée pour augmenter le brassage de l'air avec les couches inférieures (Oke 2006).

La mise en place d'une station en ville est un compromis entre le site idéal pour la mesure et l'emplacement pratique. La station est souvent hébergée à proximité d'un bâtiment public (une école, un cimetière, etc...) afin de bénéficier de l'alimentation électrique et d'un accès sécurisé. Bien souvent la participation d'un particulier ou d'un agent présent sur place permet d'assurer également le relevé. La distance au bâtiment le plus proche est bien souvent pondérée par l'usage du site qui ne permet pas de placer la station au milieu de l'espace. De même l'alimentation électrique de la station impose la proximité avec un bâtiment (distance inférieure à 50 m). Plusieurs stations ont été installées sur des toits, car malgré les inconvénients microclimatiques que présente ce dispositif, il permet d'assurer la sécurité à long terme du matériel du vol et des dégradations. La protection contre le vandalisme du matériel impose pour

l'installation des stations météorologiques et capteurs de température en ville impose une hauteur entre 2 m et 3 m.

La mesure de l'humidité relative nécessite les mêmes conditions de mesures que la température, ce qui correspond au protocole de mesures suivi. Cependant, la mesure de l'humidité exige un abri ventilé pour être exploitable. Concernant la pluie et le vent, ces variables sont difficilement exploitables et ne présentent qu'un intérêt restreint dans le cadre de l'étude. Seules quelques stations peuvent potentiellement apporter une information dont les résultats sont cohérents avec la station synoptique de Météo France.

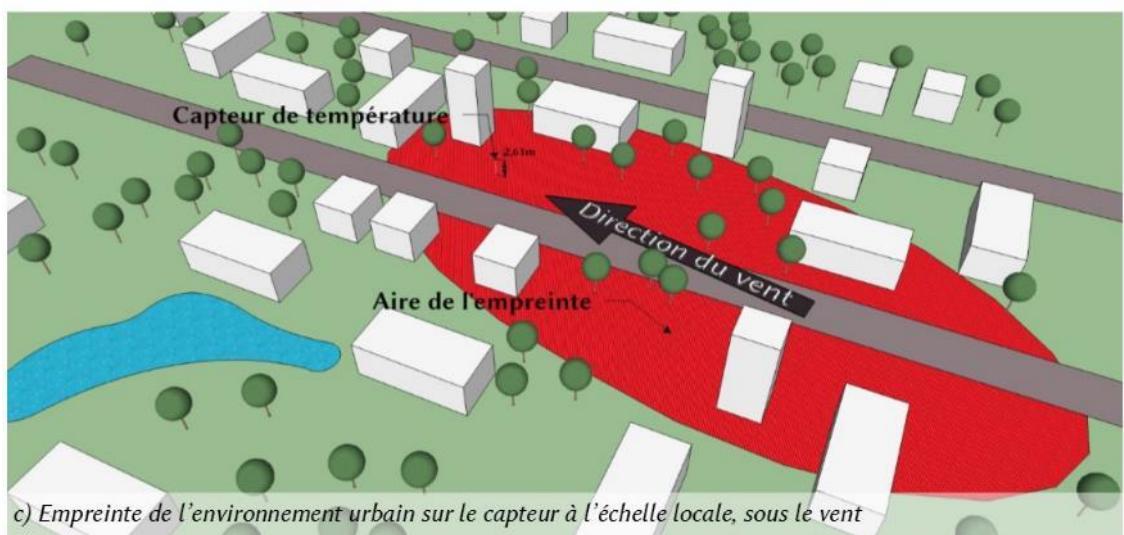
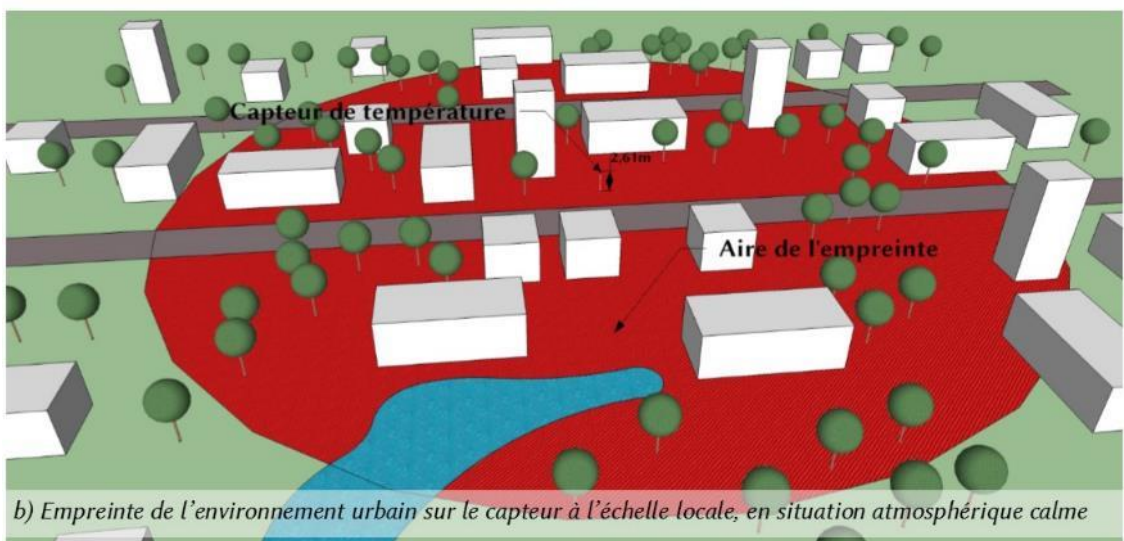
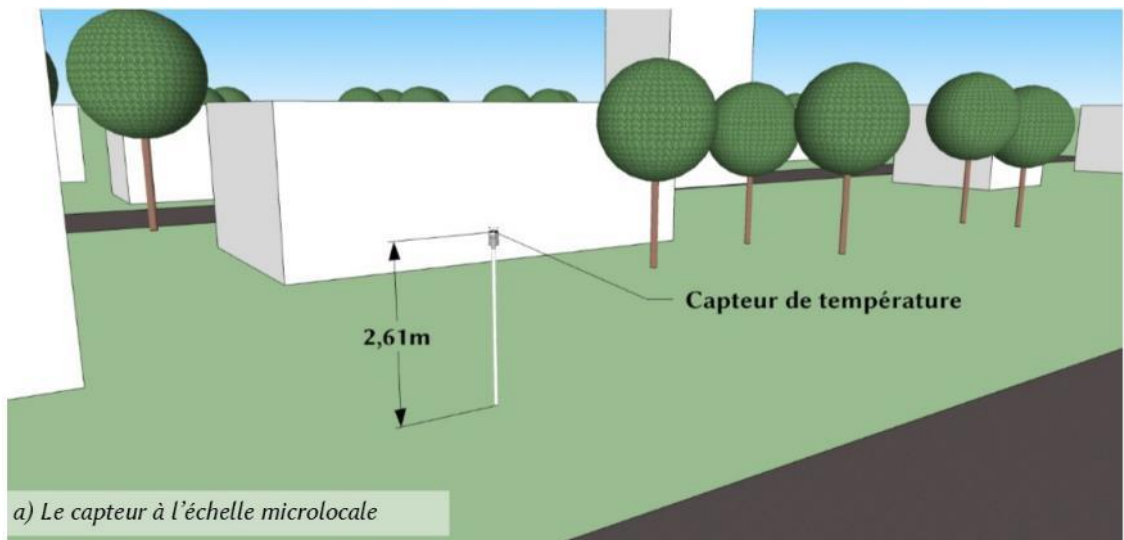


Figure 14, schéma conceptuel de l'empreinte potentielle de l'environnement urbain sur un capteur de température placée à 2,6 m. Adaptée de Kjung et al. 2002 ; Schmid 2002 ; Voogt 2002 ; Oke 2006. a) Vue du capteur à l'échelle microlocale. b) Vue à l'échelle locale par absence de vent, l'aire de l'empreinte de l'environnement urbain sur le capteur est représentée par un disque rouge. c) Vue à l'échelle locale avec un vent important (symbolisée par une flèche noire), l'aire de l'empreinte de l'environnement urbain sur le capteur est représentée par une ellipse rouge.

3.1.2. Le matériel

Plusieurs types de capteurs et de matériel ont été utilisés : les stations météorologiques pour des mesures à long-termes, les capteurs de température reliés à des enregistreurs pour réaliser des campagnes de mesures sur plusieurs mois et une station portable munie d'une sonde thermo-couplée pour les mesures mobiles ponctuelles. Ces différents types de mesures répondent à des échelles temporelles différentes en relation avec l'échelle spatiale souhaitée.

a) Les stations météorologiques

Le réseau de stations météorologique est composé de deux modèles de stations de la marque DAVIS® : *Weather Monitor II* et *Vantage Pro 2*. Ces stations sont équipées de plusieurs sondes afin de mesurer les paramètres suivants : la température, l'humidité relative, le vent (vitesse et direction), les précipitations et la pression atmosphérique. Les stations sont montés sur un trépied afin d'être à une hauteur d'environ 2 m (figure 15). Ces modèles de stations météorologiques ont été retenues car ils présentent l'avantage d'avoir un excellent rapport qualité / prix, ce qui présente un intérêt pour le déploiement d'un réseau dense en stations notamment en milieu urbain (Perrin de Brichambaut 1994).



Station météorologique Davis, modèle *Weather Monitor II*. Station installée sur le site *Les Gallets* à Rennes.



Station météorologique Davis, modèle *Vantage Pro 2*. Station installée sur le site de *l'Ecomusée* à Rennes.

Figure 15, photographies des deux modèles de stations météorologiques utilisées. Source : Foissard X., septembre 2010.

Les deux modèles de stations sont équivalents en termes de méthodes de mesures et du dispositif de capteurs, les différences concernent les consoles de stockage de données. Le modèle *Vantage Pro 2* (plus récent) réalise la transmission des données acquises via un émetteur/récepteur radio (sans fil), pour le modèle *Weather Monitor II* les données sont transférées à la console par une liaison filaire. La capacité de stockage entre les deux modèles de stations diffère également, l'autonomie est de 107 jours pour la station *Vantage Pro 2*, contre 65 jours pour la station *Weather Monitor II*. Le second modèle de station impose une fréquence de relevés plus importante (figure 16). L'ensemble des données acquises puis transmises à la console doivent ainsi être relevées régulièrement par un opérateur sur-place à l'aide d'un ordinateur portable. Bien évidemment la fréquence des relevés est imposée par l'autonomie de la mémoire de la console.

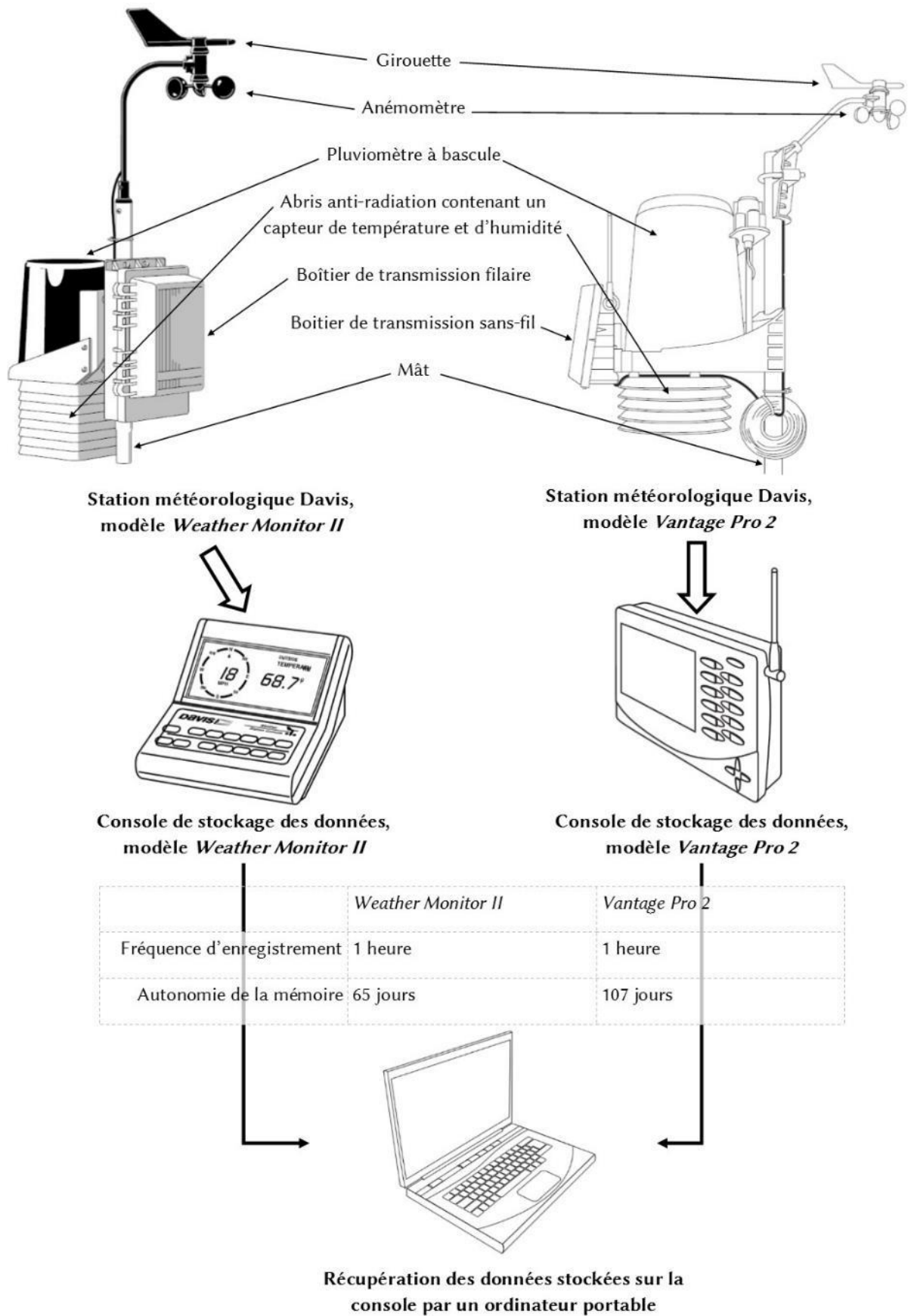


Figure 16, schéma du dispositif des stations météorologiques mis en place. Figures extraites et adaptées de DAVIS®.

les caractéristiques annoncées par le constructeur. En 2003, 6 stations météorologiques ont été placées dans un espace dégagé sur une surface enherbée en campagne. L'enregistrement a été réalisé pendant la deuxième décennie de novembre à un pas de temps horaire. Le procédé d'observation des écarts à la mesure a été effectué à partir d'une des stations désignée comme « référence ». Sur les 10 jours de contrôles, les enregistrements des stations ont révélés un écart moyen de mesure de la température variant entre $+0,17^{\circ}\text{C}$ et $-0,09^{\circ}\text{C}$ et un écart moyen de la mesure de l'humidité relative de $+1,9\%$ et $-3,9\%$. Compte-tenu de la précision annoncée par le constructeur à savoir $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ et $\pm 3\%$ (voir $\pm 4\%$), les mesures s'avèrent satisfaisantes pour réaliser l'observation de l'ICU. La figure 17 montre la répartition des écarts de température à la station de référence, moins de 5% des mesures ont un écart supérieur au seuil de précision annoncé $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (Dubreuil et al. 2011).

Le choix de ces modèles de stations s'avère adapté pour l'observation de l'ICU à Rennes. La précision de mesures de la température est suffisante pour observer la variabilité spatiale de l'ICU et le bon rapport qualité / prix permet d'implanter un nombre important de stations pour constituer un réseau dense.

b) Les capteurs de température

Un second type de mesures a été réalisé durant l'étude, il s'agit d'observations par des campagnes de plusieurs mois. Le capteur utilisé est une sonde de température avec un enregistreur de la marque Gemini[®], dont le modèle est *TinyTag Talk 2* (TK-4023). Le choix de ce type de capteur réside par sa petite taille et par son coût modéré permettant de multiplier les points de mesures. Ce modèle a été très largement utilisé pour l'observation aux échelles fines des parcelles viticoles (Quénol et Beltrando 2008; Quénol 2012; Bonnefoy et al. 2013; Bonnefoy 2013).

Les capteurs Tinytag sont composés de deux parties : un enregistreur surmonté d'une sonde de type thermistance. Selon le constructeur la précision de la mesure de la température est de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ pour $[0^{\circ}\text{C} ; 70^{\circ}\text{C}]$, en dehors de cette intervalle la précision diminue : de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ à $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ entre 0°C et -20°C . Concernant la mémoire, elle peut contenir jusqu'à 16 000 enregistrements ; il est possible d'enregistrer en continuité pendant 3 mois en réalisant une mesure de la température minimum et maximum toutes les 20 minutes. La pile lithium de 3,6V permet de garantir une autonomie de fonctionnement pendant 2 à 3 années, ce qui est suffisant pour la réalisation de campagne de mesures sur plusieurs mois.

Plusieurs choix de variables sont disponibles à chaque instant d'enregistrement : la température minimum, la température maximum et la température instantanée. Le nombre de variables et la fréquence d'enregistrement font bien évidemment varier l'autonomie de la mémoire. Le choix du pas de temps et des variables enregistrées est un compromis entre l'échelle de la mesure et la contrainte de réalisation. Le choix du pas de temps sera d'autant plus court que l'échelle d'observation est grande, cependant la fréquence du relevé des capteurs sera plus importante et plus fastidieuse.

La sonde du capteur est placée dans un abri du modèle *RS3* de la marque ONSET COMPUTER CORPORATION[®]. Il est relativement petit et il bénéficie d'une bonne circulation de l'air, ce qui accroît la réactivité de la mesure. L'abri est fixé sur un mât par un collier de serrage et la partie enregistrement est installée dans un boîtier étanche (boîtier de jonction

Station 022	Station 023	Station 024	Station 025	Station 026	Station 027
Température	Température	Température	Température	Température	Température
% écart 0° :	% écart 0° :	% écart 0° :	% écart 0° :	% écart 0° :	% écart 0° :
36,46	27,08	10,11	14,80	26,71	11,91
% écart 0-0,5°	% écart 0-0,5°	% écart 0-0,5°	% écart 0-0,5°	% écart 0-0,5°	% écart 0-0,5°
59,93	67,87	86,28	79,78	68,95	85,20
% écart 0,5-1°	% écart 0,5-1°	% écart 0,5-1°	% écart 0,5-1°	% écart 0,5-1°	% écart 0,5-1°
2,89	3,25	2,17	4,69	3,61	2,17
% écart +1°	% écart +1°	% écart +1°	% écart +1°	% écart +1°	% écart +1°
0,72	1,81	1,44	0,72	0,72	0,72
Ecart moyen :	Ecart moyen :	Ecart moyen :	Ecart moyen :	Ecart moyen :	Ecart moyen :
0,09 °C.	0,14 °C.	-0,07 °C.	0,17 °C.	0,11 °C.	-0,09 °C.
Humidité :	Humidité :	Humidité :	Humidité :	Humidité :	Humidité :
Ecart moyen :	Ecart moyen :	Ecart moyen :	Ecart moyen :	Ecart moyen :	Ecart moyen :
-3,2 %	-3,6 %	1,9 %	-3,9 %	-2,8 %	-3,7 %

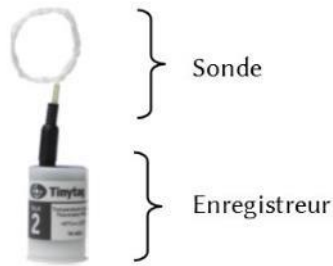
Figure 17, tableau des écarts de température et d'humidité relative mesurée par 5 stations météorologiques avec la station de référence. Extrait de l'ouvrage *Ville et Biodiversité*, (Dubreuil et al. 2011).

électrique) également fixé sur le mât (figure 18). Le mât peut être un poteau planté pour cet usage, cependant pour l'installation en ville les contraintes étant importantes (manque de place, discrétion requise contre le vandalisme...), le capteur peut être placé sur du mobilier urbain tel qu'un lampadaire, un poteau téléphonique... Ce dispositif est placé à environ 3 mètres du sol selon les préconisations décrites précédemment dans ce chapitre (*cf.* 3.1 Les mesures en milieu urbain).

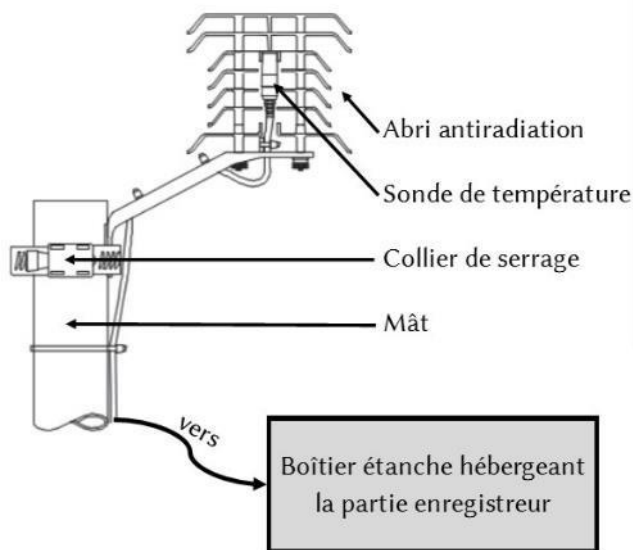
Afin d'évaluer la précision de mesure de température des Tinytags, un lot de 18 capteurs ont été installés dans le même local et programmés pour un enregistrement toutes les heures des minimales et des maximales pendant 4 jours, soit 192 enregistrements par capteur. La précision a été évaluée par l'écart à la médiane enregistrée pour chaque capteur par heure pour les Tx et Tn. Sur 3536 observations, 3,5% des enregistrements présentent un écart supérieur de 0,4°C à la médiane (figure 20). Le choix de la valeur médiane pour « référence » permet de ne pas sous-estimer une mesure aberrante. La moyenne des écart-types observés sur l'ensemble de la période d'observation est de 0,2°C pour les Tn et les Tx. Le calcul de l'intervalle confiance à un seuil de 95% révèle que 80% des intervalles de confiance sont compris entre [0°C ; 0,2°C] et moins de 5% des intervalles de confiance sont supérieurs à 0,4°C, c'est-à-dire l'incertitude fournie par le constructeur (+/-0,4°C) (figure 19). Cette évaluation permet de considérer comme suffisamment précis pour l'usage de ces capteurs à l'observation de l'ICU.

c) L'enregistreur de température à sonde thermocouple

Un enregistreur avec une sonde thermocouple a été utilisé pour réaliser des mesures mobiles de la température. Ce type d'observation requiert un capteur dont la réactivité aux variations de température est accrue. Les sondes de température de type *thermocouple* répondent à ce critère pour un coût peu élevé et elles demeurent robustes. L'enregistreur de température est de la marque Testo[®], le modèle 175-T3, équipé d'une sonde thermocouple. L'enregistreur permet d'enregistrer 16000 valeurs avec une sonde de +/-1,5°C de précision et un temps de réponse inférieur à 5 secondes. A titre de comparaison, la sonde de type *thermistance* du capteur Tinytag possède un temps de réponse de 25 secondes et les sondes des stations météorologiques ont un temps de réponse de 12 secondes. La perte de précision est compensée par l'excellent



Capteur de température *TinyTag Talk 2*



Fixation de l'abri *RS3* intégrant le capteur *TinyTag Talk 2*



Dispositif installé au parc des Gayeulles, à Rennes

Figure 18, schéma d'installation du capteur *Tinytag Talk 2*, adapté de Gemini et Onset Computer Corporation. Photographie : Foissard X., février 2012.

temps de réponse qui permettra de mieux rendre compte de l'amplitude thermique observée lors des transects. La différence entre les sondes de type *thermocouple* et *thermistance* réside dans la méthode mesure, la première mesure l'écart de tension électrique qui est inversement proportionnel à l'écart de la température et la seconde mesure la résistance électrique qui augmente en fonction de la température (Oke 1987; Nicholas et al. 2001).

Afin de connaître l'incertitude du capteur Testo, une série de mesure de 31 points d'observation a été réalisée avec cet enregistreur et 10 capteurs Tinytag dans un local en condition atmosphérique stable. La température est évaluée par la moyenne de 10 capteurs Tinytags. La moyenne des écarts de température est de $-0,1^{\circ}\text{C}$ (avec un écart-type de $0,1^{\circ}\text{C}$) entre le capteur Testo et la moyenne des 10 capteurs Tinytag. Le capteur est opérationnel pour l'observation de l'ICU par des mesures itinérantes par sa réactivité et sa haute fréquence d'enregistrement. L'avantage de la mesure itinérante est le grand nombre de points de mesures, cependant il faut tenir compte du décalage temporel qui est une source d'incertitude (Quénol 2011).

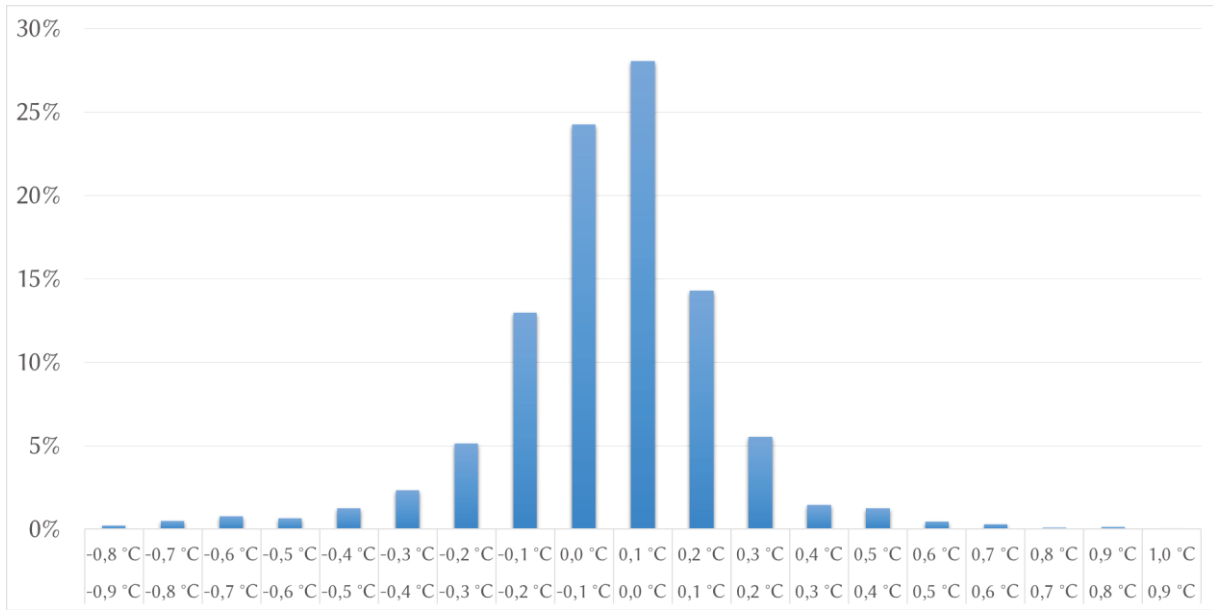


Figure 20, fréquence des écarts à la médiane de 18 capteurs Tinytag pendant 96h.

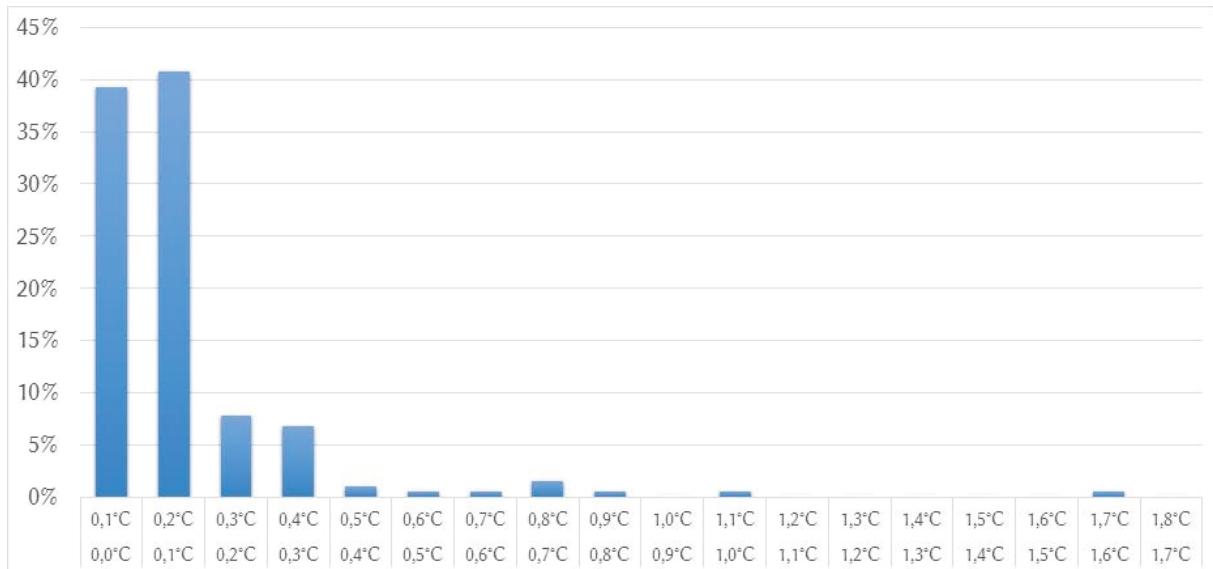


Figure 19, fréquence des intervalles de confiance à 95% mesurés par 18 capteurs Tinytag pendant 96h.

3.2. Un réseau de station météorologique à l'échelle de l'agglomération

L'aspect multiscalair de l'ICU est pris en compte par l'usage de plusieurs réseaux de mesures à différentes échelles emboîtées. Ici, nous abordons l'échelle de l'agglomération rennaise, c'est-à-dire le territoire de Rennes Métropole (705 km² en 2014). Le réseau de mesures met en évidence le gradient de température de la campagne à la ville en étant représentatif de la variabilité spatiale de l'ICU. Ce réseau de mesures est composé de stations météorologiques représentatifs des différents milieux de l'agglomération rennaise. L'objectif est de réaliser une observation à long terme afin d'observer l'effet de l'urbanisation sur la modification locale du climat. Les premières stations ont été installées lors du programme ECORURB en 2004, puis le réseau est complété en 2010 à l'occasion de cette thèse.

3.2.1. Le réseau de stations météorologiques du programme ECORURB

Le réseau de mesure a été installé dans le cadre du programme ECORURB (écologie du rurale vers l'urbain), ce programme de recherche transdisciplinaire porte sur l'effet de l'urbanisation sur la biodiversité locale (2003-2012). Les travaux menés par différentes équipes de recherche ont donné lieu à l'ouvrage « Ville et biodiversité, Les enseignements d'une recherche pluridisciplinaire » (Clergeau 2011). Lors de ce programme, il est mis en évidence notamment l'impact de l'ICU à Rennes sur la phénologie du platane et du cerisier (Quénol et al. 2010).

En 2004, des stations météorologiques (*Weather Monitor II* puis *Vantage Pro 2*) ont été installées ; au total 16 stations météorologiques sont implantées (figure 21). Les stations sont placées préférentiellement sur des sites clôturés et/ou fermés la nuit afin de garantir la sécurité du matériel. La proximité de bâtiment est également nécessaire pour assurer l'approvisionnement en électricité.

La répartition des stations météorologiques est réalisée selon trois types de sites : urbain, suburbain et périurbain (Quénol et al. 2010; Pellissier et al. 2008). Cette classification est *a priori* qualitative, cependant des indices permettent de les distinguer quantitativement tels que la fraction d'occupation du sol, la hauteur des bâtiments... Les traitements réalisés pour obtenir ces indices sont abordés dans le chapitre 4.

- Les sites urbains correspondent à des espaces fortement imperméabilisés dont la fraction bâtie varie de 20 à 40 % (figure 22). La hauteur des bâtiments est comprise entre R+1 et R+34 (Rez-de-chaussée+n étage), ce qui correspond aux immeubles du centre-ville ancien, aux tours (gratte-ciels), aux maisons individuelles de ville ou en bandes (elles sont définies par la continuité des façades et par la présence parfois de jardins privatifs de dimension réduite en situation arrière (Allain 2004)). Le type de bâtiment y est très hétéroclite. La fraction de végétation est réduite, cependant une grande variabilité existe entre les quartiers. Selon la classification *Local Climate Zone (LCZ)* de Oke, T.R. ces espaces correspondent aux *LCZ 2* et *LCZ 5* « *compact midrise* » et « *open midrise* », c'est-à-dire des espaces fermés à ouverts avec un bâti dense (figure 23) (Stewart 2011).

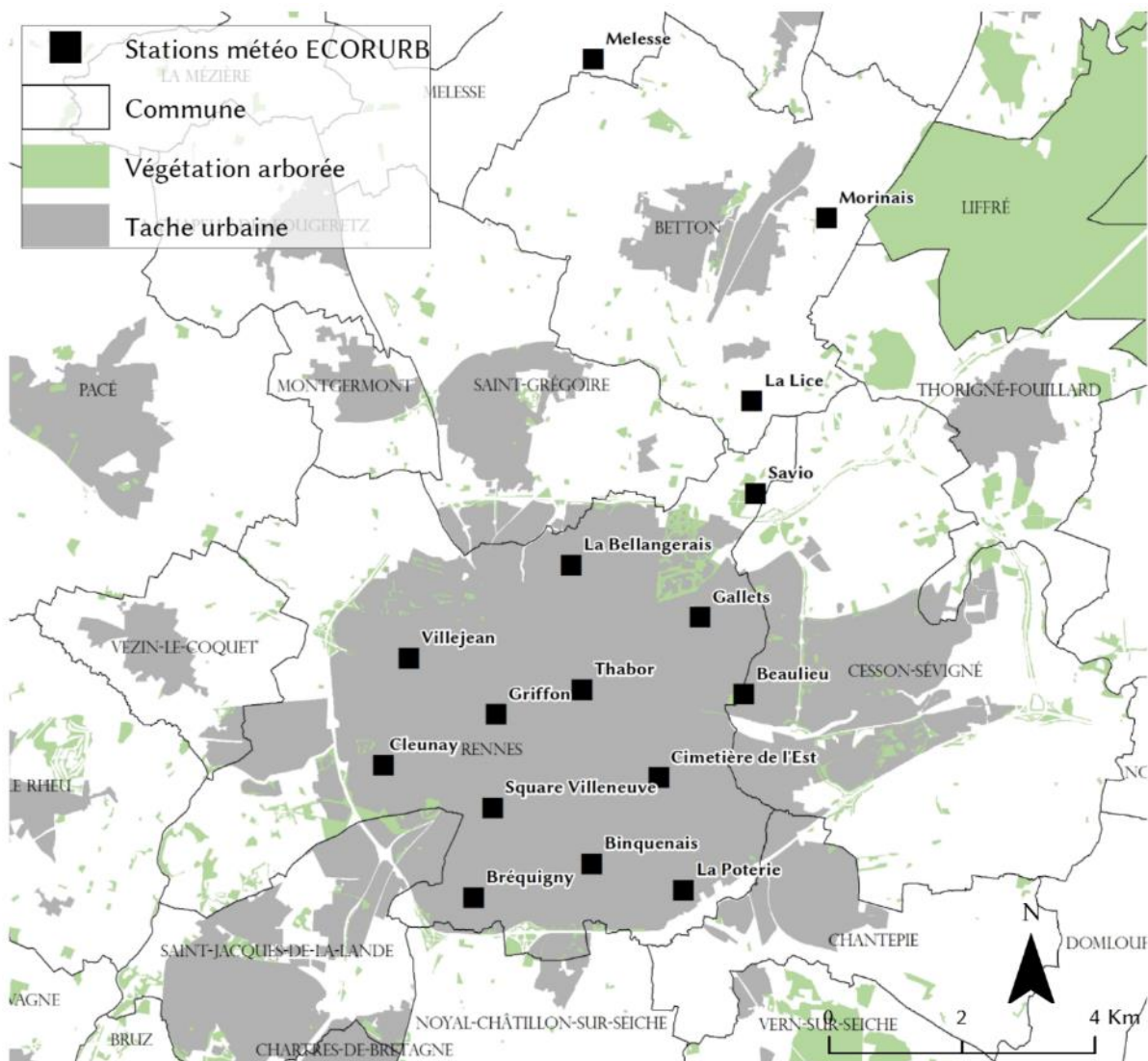


Figure 21, réseau de stations météorologiques implantées lors du programme ECORURB à partir de 2004 à Rennes. Sources : service SIG Ville de Rennes, laboratoire LETG Rennes COSTEL.

- Les sites suburbains sont les espaces intermédiaires entre les espaces urbains et périurbains. Ils possèdent une fraction végétalisée plus importante entre 30% et 50% avec un ratio de surfaces bâties inférieur à 20% (figure 22). Le bâti y est essentiellement constitué de barres, de petits collectifs et de pavillons. A partir de la classification *LCZ* ces espaces correspondent aux classes *LCZ 5* et *LCZ 6*, « *open midrise* » et « *open lowrise* », à savoir des espaces ouverts avec des immeubles de taille moyenne (R+5) à des maisons individuelles (figure 23).
- Les sites périurbains concernent les espaces essentiellement agricoles, au demeurant les stations sont placées à proximité de bâtiments pour des raisons pratiques. Ces bâtiments peuvent être des maisons individuelles et des fermes, elles sont très largement environnées par la végétation qui représente 50% à 98% de la fraction d'occupation du sol (figure 22). Quant à la fraction bâtie elle constitue moins de 5%, ce qui permet de classer ces espaces dans les catégories *LCZ 6* et *LCZ 9*, soit « *open lowrise* » et « *sparcely built* » : des maisons individuelles plus ou moins clairsemées (figure 23).

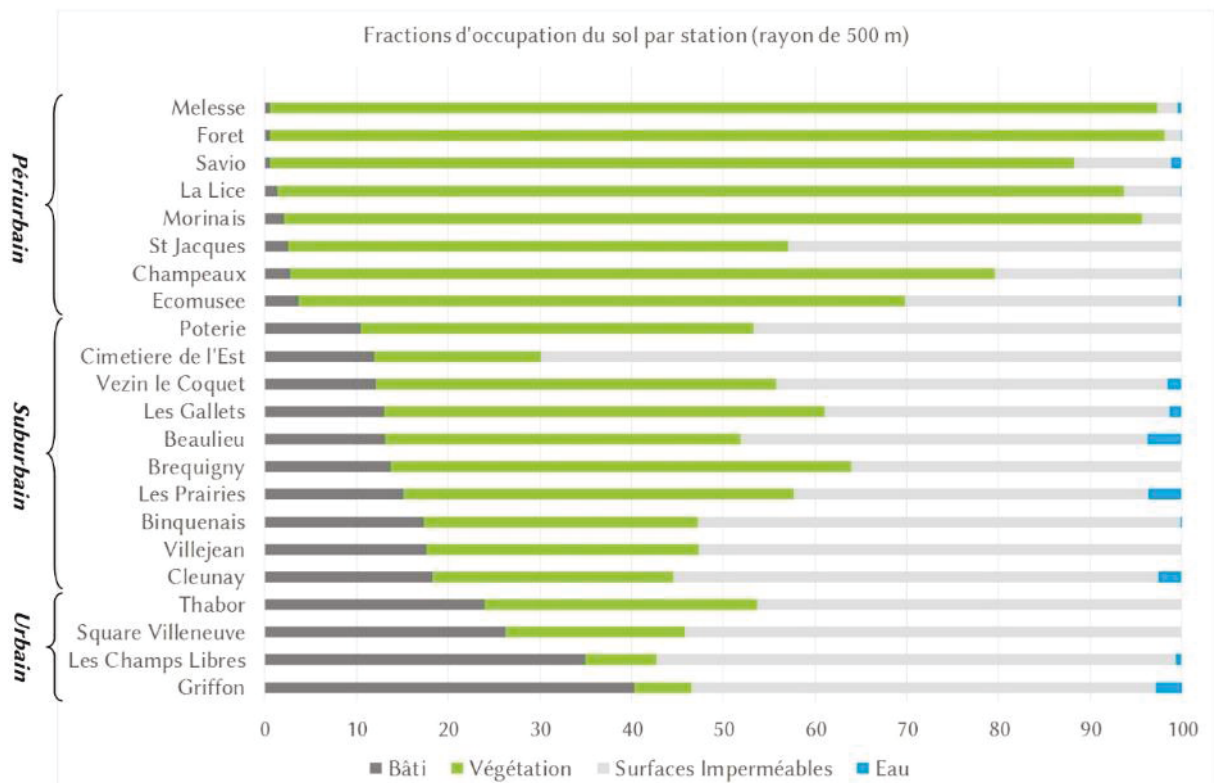


Figure 22, classement des stations météorologiques triées par fraction de surfaces bâties selon les trois grands types d'espace : urbain, suburbain et périurbain.

a) Les sites urbains

Les stations installées dans les sites urbains sont les stations suivantes : *Griffon*, le *Square Villeneuve* et *Thabor*. La station *Griffon* est située dans le centre-ville ancien dans une cour fermée, dont le bâti est dense et avec peu de végétation à proximité (figure 24). Les formes structurantes de ce quartier sont établies au XVIIIème siècle, après l'incendie de 1720 qui détruisit une grande partie du centre-ville. Cependant des bâtiments médiévaux (maisons à colombages) subsistent avec ses ruelles étroites, à partir desquels est bâtie et structurée une « ville neuve » durant le XVIIIe siècle (Meyer 1984). La station *Square Villeneuve* située dans le quartier Sud-Gare, composée de maisons de ville et d'immeubles de type petits collectifs. Elle est installée sur un toit à environ 3 m du sol, dans un petit parc (figure 24). La station du *Thabor* est également installée dans un parc urbain, cependant plus étendu. Comme pour le quartier Sud-Gare, ce quartier est constitué de maisons de ville et d'immeubles type petits collectifs dont les jardins sont situés à l'arrière et les façades sont alignées en continues le long de la chaussée.

b) Les sites suburbains

Parmi les sites périurbains : *Cleunay*, *Villejean*, *Binquenais*, *Bréquigny*, *Beaulieu*, *Gallets*, *Cimetière de l'Est* et *Poterie*. On peut distinguer deux groupes, les sites comprenant un habitat collectif et les sites composés de maisons individuelles. Les sites : *Cleunay*, *Villejean*, *Binquenais*, *Bréquigny* et *Poterie* sont composés de barres d'immeubles dont les constructions datent des décennies 1970 et 1980 (figure 25). Ces nouveaux aménagements bénéficient d'une fraction de végétation variant entre 25% et 50%.

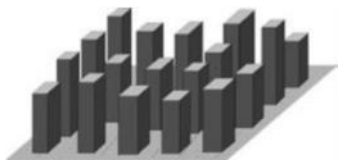
Les sites *Beaulieu* et des *Gallets* correspondent aux quartiers pavillonnaires avec des jardins privatifs individuels et de quelques barres d'immeubles dont le rapport entre la fraction

de végétation et la surface bâtie est d'environ 3. La station *Gallets* est installée sur le terrain du réservoir d'eau de la ville, qui correspondant aux critères communs des châteaux d'eau, ce site est placée sur un des points les plus hauts de la ville. Le site est particulièrement dégagé et recouvert essentiellement d'une surface enherbée, ce qui permet de mesurer les précipitations et le vent conformément aux préconisations détaillés précédemment (figure 24).

La station du *Cimetière de l'Est* est particulière à plusieurs titres : les cimetières ont la spécificité d'être des sites fortement imperméabilisés (70%, pour ce site) avec un espace très ouvert, le quartier est composé d'anciennes maisons individuelles contigües d'avant-guerre (similaires au quartier de la station urbaine *Square Villeneuve*) et de petits immeubles collectifs construits des décennies 1950 à 1990.

c) Les sites périurbains

Les quatre sites périurbains sont similaires, ils correspondent à des terrains enherbés à proximité de terres agricoles (prairies, maïs, céréales essentiellement) délimitées par des haies bocagères, parmi lesquelles quelques petites parcelles boisées subsistent. Les maisons individuelles et les fermes sont relativement distantes les unes des autres (environ 50 m), ce qui garantit une ouverture de l'espace important (figure 25). Selon Bourget E., cet espace est qualifié de *paysage périurbain et bourgs* dont les activités sont variées : « [...] *l'espace mêle les activités primaires (agriculture de plaine dans des parcelles de tailles et de formes irrégulières, avec bocage relictuel et à ragoisse déstructuré), activités secondaires ([...] industries et commerces dans les Zones d'Activités), et activités tertiaires, de services et de loisirs. [...] En plus des bourgs dans lesquels résident une majorité de travailleurs dont l'activité est située dans la ville-centre. Dans cet espace très anthropisé, quelques parcelles boisées subsistent encore, notamment pour l'agrément.* » (Bourget 2011). Ici, les bourgs et les zones d'activités ont été considérés comme étant associés aux espaces suburbains permettant de distinguer le milieu urbain et rural : l'espace périurbain étant associé à la campagne et l'espace suburbain aux surfaces plus largement imperméabilisées suite à l'étalement urbain. Les stations *Melesse*, *Morinai*, *La Lice* et *Savio* sont respectivement à 7 km, 5 km, 2 km et 500 m de Rennes.



LCZ 1 : Bâtiments hauts et denses (tours de plus de 10 étages, gratte-ciels...), quartiers de type « Central Business District ».



LCZ 2 : Bâtiments de hauteurs moyennes et denses (R+3 à R+10), quartiers de type centre-ville ancien européen.



LCZ 3 : Petits bâtiments et denses (R à R+2), quartiers résidentiels ou commerciaux denses.



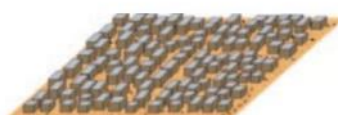
LCZ 4 : Bâtiments hauts avec des espaces ouverts (tours de plus de 10 étages). Large présence de végétation au sol.



LCZ 5 : Bâtiments de hauteurs moyennes (R+2 à R+8) avec une présence importante de végétation au sol.



LCZ 6 : Bâtiments de faibles hauteurs (R à R+2) avec une présence importante de végétation au sol, l'espace est ouvert.



LCZ 7 : Petits bâtiments le plus souvent de plain-pied, l'ensemble est très dense. Cette catégorie est à associer aux espaces urbanisés de façon informels (favelas, bidonvilles...).



LCZ 8 : Bâtiments de grandes-surfaces et peu élevés (R à R+2) dont la surface au sol est essentiellement imperméable. Il s'agit de zones d'activités et de centre-commerciaux.



LCZ 9 : Petits bâtiments de faibles hauteurs. L'espace est faiblement urbanisé, il correspond à l'espace périurbain.

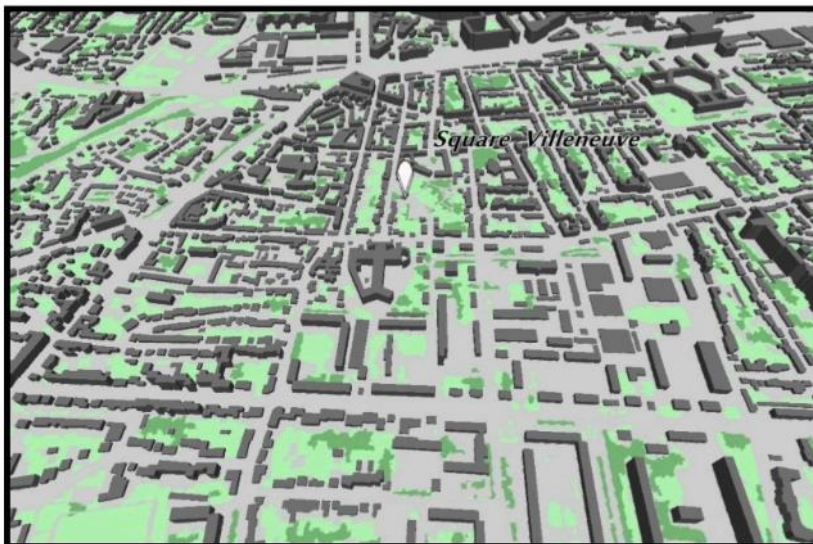


LCZ 10 : Bâtiments issus d'activités industrielles lourdes, équipés de tours, de cheminées. Il s'agit d'un espace ouvert, très largement imperméabilisé.

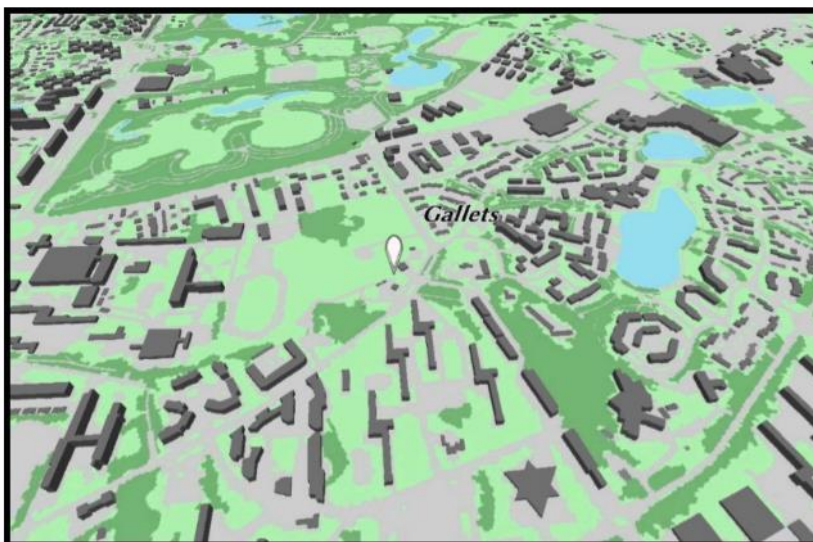
Figure 23, classification des quartiers par typologie des bâtiments, extraits de Oke T.R. et Stewart I.D. 2011.



Station météorologique du Griffon, site urbain (centre-ville ancien).

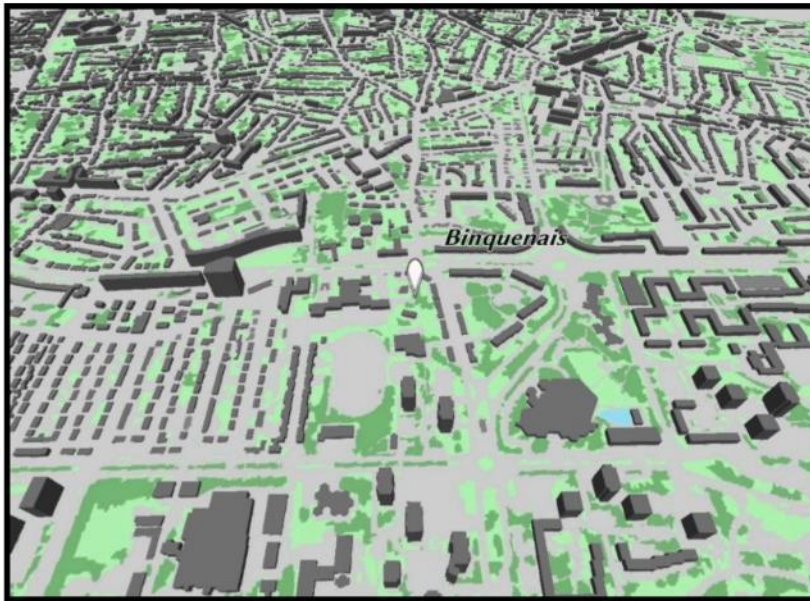


Station météorologique du Square Villeneuve, site urbain (maisons de villes).



Station météorologique des Gallets, site suburbain (quartier composite, pavillonnaires / barres d'immeubles)

Figure 24, vues en perspectives et photographies des contextes des stations météorologiques du Griffon, de la Binquenais et des Gallets. Photographies : Foissard X., septembre 2010 (Binquenais et Gallets) et novembre 2011 (Griffon).








Station météorologique de la Binquenais, site suburbain (barres d'immeubles)



Station météorologique de La Lice, site périurbain (maisons individuelles et fermes éparses)

Légende

-  Bâtiment
-  Végétation basse
-  Végétation haute
-  Surfaces imperméables
-  Réseau hydrique

Vues en perspective à 300 m du sol, orientées en direction du nord

Echelle au sol : 1 / 5 000

Figure 25, vues en perspectives et photographies des contextes des stations météorologiques de la Binquenais et des Lices.

3.2.2. *Les nouvelles stations météorologiques*

Au début de la thèse de nouvelles stations météorologiques viennent compléter le réseau de mesures à partir de 2010. Cinq stations sont placées dans les trois espaces décrits précédemment : urbain, suburbain et périurbain (figure 26). Il est à noter que la station au nord de Rennes *La Bellangerais* ne sera pas maintenue, elle est démontée à partir de 2007.

Dans l'espace urbain, la station *Les Champs Libres* est placée dans le centre-ville récent (au sud du quartier de la station *Griffon*). Ce quartier est aménagé par des barres d'immeubles datent des décennies 1970 à 2010. Une grande place (largement imperméabilisée), quelques maisons de villes et la présence de la gare à moins de 500 m composent ce quartier. Il est à noter qu'un immeuble (R+6) aux abords immédiats de la station viendra remplacer une maison (R+2), c'est-à-dire environ 20 m. La seconde station urbaine est placée dans un tout autre contexte, un parc. *Les prairies Saint Martin* est un site particulier. Il correspond à une zone inondable avec un réseau hydrique dense, il est composé de jardins, d'une prairie, de friches et de boisement. Cependant malgré l'aspect composite du milieu, l'ensemble forme une trame verte le long du canal Saint Martin du centre-nord de la ville jusqu'en périphérie. Cette enclave verte en centre-ville est encaissée de 15 m à 20 m par rapport au quartier à l'est, dont quelques immeubles la surplombent.

L'espace suburbain est représenté par une nouvelle station située dans un quartier pavillonnaire à Vezin-Le-Coquet, il s'agit d'une ville de moins de 5 000 habitants à l'ouest de Rennes. Le quartier est largement représenté par des maisons individuelles (R+1) avec leur jardin privatif. En dehors du cœur d'agglomération, ce type de quartier est fréquemment rencontré, ce qui est à mettre en relation avec l'étalement urbain.

La station de *l'Ecomusée* est placée dans l'espace périurbain au sud de Rennes, ce site est en dehors du cœur d'agglomération délimité par la rocade. Le site est une ferme composée de petites parcelles prairiales, délimitée par quelques boisements, avec au sud une zone d'activité. A l'est de ce site, la station synoptique de Météo-France est installée à l'aéroport *Saint-Jacques*, le site répondant aux normes des stations synoptiques de l'Organisation Météorologique Mondiale (World Meteorological Organization 2010). Il est à noter la présence d'activités industrielles (usine Peugeot-Citroën) à l'est et au nord de la station à environ 1km, et la présence d'une zone humide et d'un parcours de golf à l'ouest. C'est à partir de cette station synoptique qu'est réalisée l'observation de la température et des types de temps (état du ciel, vent synoptique...), à long-terme (depuis 1945) à Rennes. Au nord de Rennes, une station est implantée en lisière de la *Forêt*, dans une clairière. Ce site, en milieu périurbain, permet de révéler l'influence de la forêt sur la température en contraste avec les autres stations périurbaines installée dans un contexte de type prairies bocagères. Enfin une station gérée par les Jardins de la ville de Rennes vient compléter le réseau. A l'origine, cette station est utilisée pour un usage horticole, correspondant à l'activité des *Serres Champeaux*. Ce site est en milieu périurbain entre Vezin-le-Coquet et Rennes, dont la caractéristique est commune aux stations proches du cœur d'agglomération telle que *Savio* et *l'Ecomusée* (environ 300m).

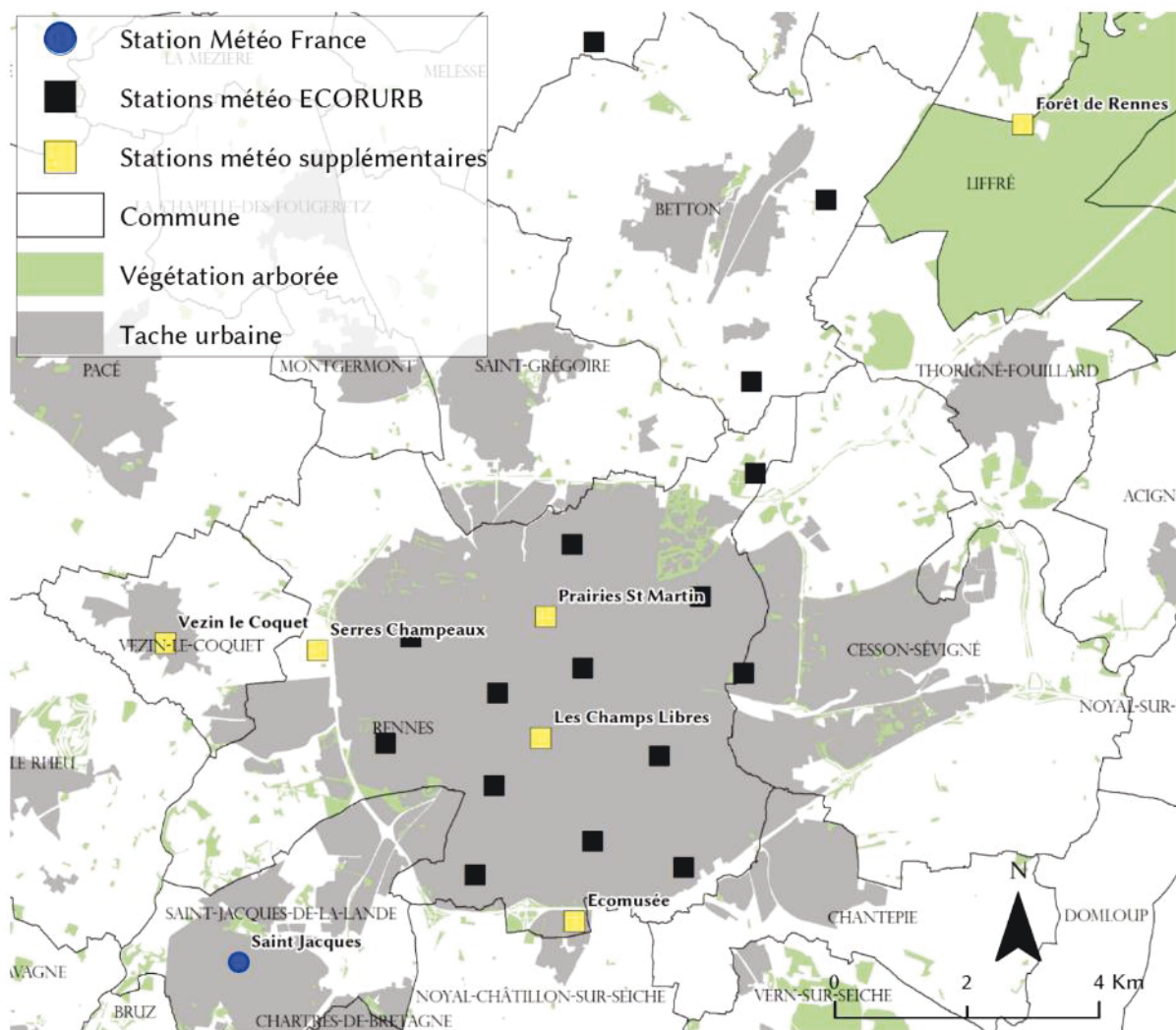


Figure 26, réseau de stations météorologiques implantées lors de la thèse à partir de 2010 et les stations météorologiques disponibles à Rennes. Sources : service SIG Ville de Rennes, laboratoire LETG Rennes COSTEL.

3.3. Le réseau de mesures à l'échelle des quartiers

Afin d'observer l'ICU à l'échelle des quartiers un second réseau de mesures est réalisé. Ce réseau de mesures est composé des capteurs de température *Tinytag Talk 2* munis d'un abri *RS3*. (cf. 3.1.2.b). Les mesures sont réalisées par campagnes, l'une est réalisée sur la période estivale 2013 afin d'observer la variabilité spatiale de l'ICU dans le milieu intra-urbain rennais. Les autres campagnes concernent plus particulièrement des quartiers, dont l'objectif est de mettre en évidence la variabilité de l'ICU au sein d'un même quartier ou d'une petite ville.

3.3.1. Le milieu intra-urbain : campagne de mesures juillet-août 2013

Cette campagne de mesures a pour but de compléter les stations météorologiques présentes dans le milieu intra-urbain rennais, à savoir 13 stations : *Les Champs Libres*, *Griffon*, *Square Villeneuve*, *Thabor*, *Prairies Saint Martin*, *Cimetière de L'Est*, *Binquenais*, *Cleunay*, *Villejean Bréquigny*, *Gallets*, *Poterie* et *Beaulieu*. Au demeurant, pour diverses raisons (coupures de

courant, des batteries défectueuses) les données de plusieurs stations sont indisponibles ou incomplètes.

L'espace intra-urbain est défini ici par un tissu urbain continu, dont la délimitation a été réalisée à l'aide d'un SIG par agrégation et soustraction de 400 m d'une zone tampon du bâti de 300m. Ce qui permet d'obtenir le contour de la tâche urbaine prenant en compte les spécificités de « la ville archipel » rennais, à savoir une tâche urbaine centrale avec une ceinture verte et des îlots urbains en périphérie.

Au total 20 capteurs sont installés dans l'ensemble des quartiers de l'espace intra-urbain rennais, correspondant aux communes de Rennes, Saint-Grégoire, Cesson-Sévigné, Chantepie et Saint-Jacques-de-la-Lande (voir figure 27). Cependant seuls 19 capteurs seront relevés, l'un des capteurs ayant été dérobé. Le choix de la répartition des points de mesures répond à 3 critères : la répartition homogène sur l'ensemble de l'espace intra-urbain, la représentativité des différents quartiers et l'installation des capteurs selon les contraintes à l'échelle microlocale.

Pour le quadrant nord-ouest (figure 28), deux capteurs ont été placés dans une Zone d'Activité (ZA) : *ZA Ouest* et *ZA Nord*. Ces espaces correspondent, selon la classification de Oke T.R., au milieu *LCZ 8*. Ils sont composés essentiellement de hangars avec peu de surfaces perméables au sol (parkings, voirie). Dans le quadrant sud-est, un capteur a également été placé dans ce type d'espace : *ZA Sud Est*. La ZAC (Zone d'Aménagement Concerté) *Baud-Chardonnet* est associable aux ZA, car actuellement il héberge un ensemble d'activités similaires aux ZA (dépôts de bus, hangars et friches industriels...). Le site *Baud-Chardonnet* se situe sur les quadrants est au nord de la gare de triage et au sud de la Vilaine dont la fraction de surfaces imperméables est proche de 60%² (figure 29), ce qui est comparable trois sites ZA. Ce site fait l'objet d'une expérimentation plus particulière, en perspective du futur projet d'aménagement (cf. chapitre 9).

Le centre-ville est représenté par le capteur situé à la *Cité d'Aleth* (voir le quadrant nord-ouest, figure 28). Il a été placé dans une cour entourée d'immeubles de 4 étages dont la fraction de végétation est faible (moins de 20%). Ce site est au nord de la partie historique du centre-ville, dont les aménagements datent de la décennie 1980.

Au nord-ouest de la *Cité d'Aleth*, le capteur *Cimetière du Nord* a été installé dans un quartier composé de maisons de ville. Le capteur installé le long du *Boulevard F. Roosevelt* est placé dans un contexte similaire (quadrant sud-est, figure 30), à savoir des maisons de ville dont les façades ont un profil le long de la chaussée. Au sud-est de ce quartier, le capteur placé dans le quartier de la *Poterie* est installé dans un espace résidentiel composé d'immeubles de type petits collectifs (R+3) dont l'agencement est comparable aux maisons de ville, cependant la végétation y est plus présente, soit 38% contre 30% pour le *Cimetière du Nord* et le *Boulevard F. Roosevelt* (figure 29).

Un capteur est placé à *Beauregard* (sur le quadrant nord-ouest, figure 28), dans une ZAC (Zone d'Aménagement Concerté) en construction qui fera l'objet d'une observation particulière (voir la partie 3.3.2.b) *Un nouveau quartier : la ZAC de Beauregard*). Une autre ZAC en cours de construction est également équipée : *La Courrouze*, elle se situe dans le quadrant sud-ouest (figure 30). Ces deux ZAC présentent des similitudes de formes urbaines, dont des immeubles récents R+5 (actuels à 15 ans maximum).

² Les fractions d'occupation du sol sont définies dans un rayon de 500m autour du point de mesures, le choix de ce rayon est établi selon ce qui est communément admis dans la littérature consacrée (Oke 2006). Au demeurant, l'analyse spatiale de la partie suivante (chapitre 5) révélera la variabilité de cette aire représentative du quartier mesuré.

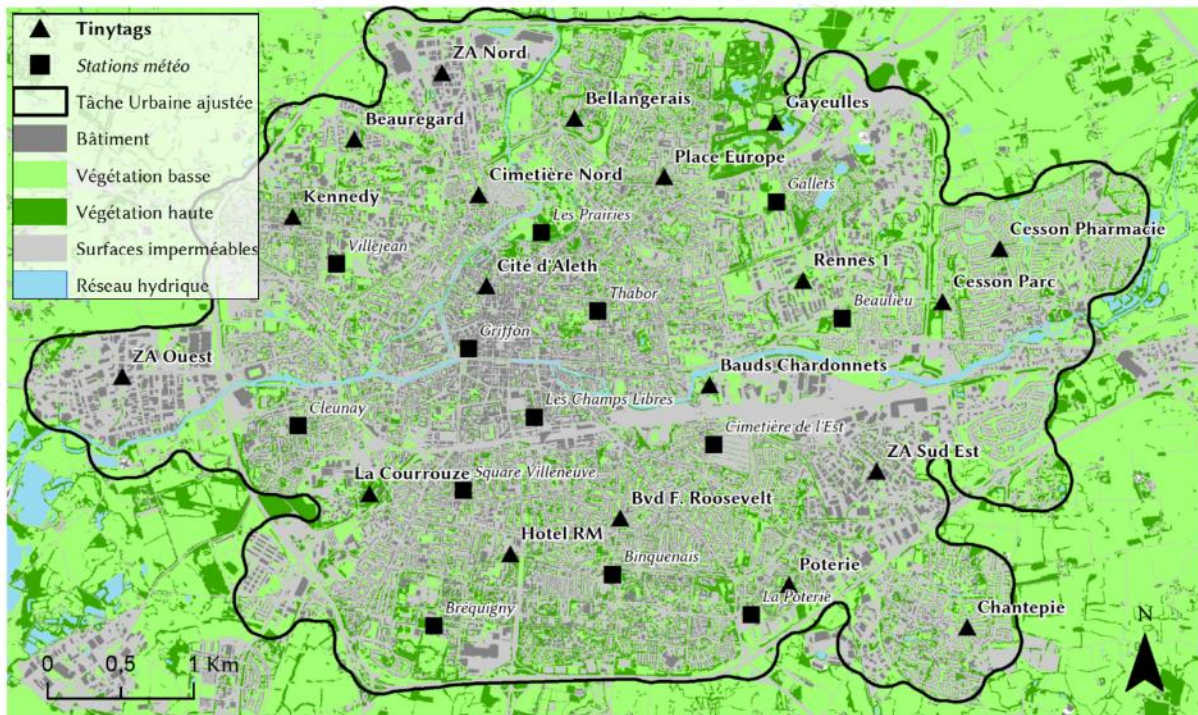


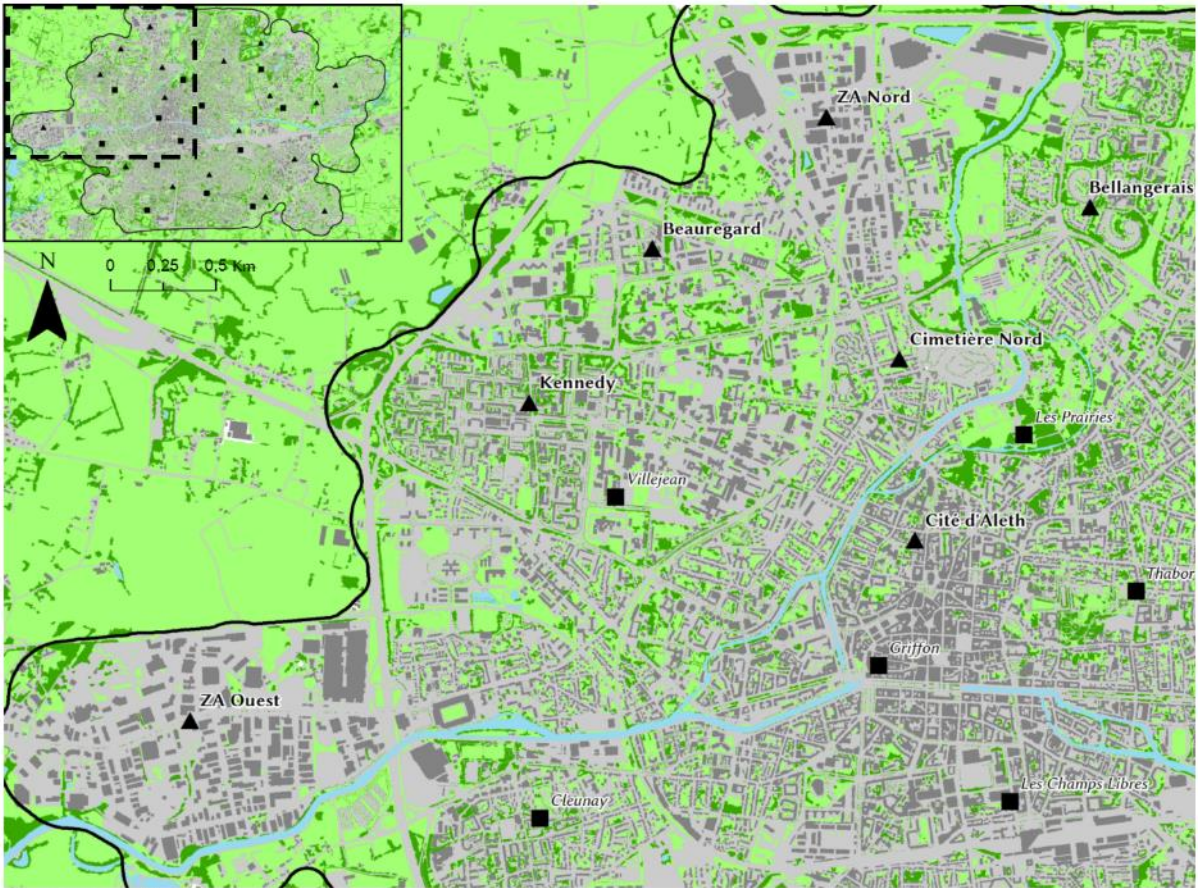
Figure 27, réseau de capteurs de la campagne de mesures intra-urbaines à Rennes juillet-août 2013. Sources : service SIG Ville de Rennes, laboratoire LETG Rennes COSTEL.

Les capteurs installés dans des espaces résidentiels composées de maisons individuelles entourées par des jardins individuels sont dans le quadrant nord-est : *Bellangerais*, *Cesson Parc* et *Cesson Pharmacie*. Ces deux derniers capteurs prennent place dans un espace résidentiel cependant l'un est placé dans à proximité d'un parc. Dans le quadrant sud-est (figure 30), tout comme Cesson-Sévigné, la ville de Chantepie possède un habitat largement représenté par des espaces résidentiels, un capteur est placé au cœur de ce tissu urbain.

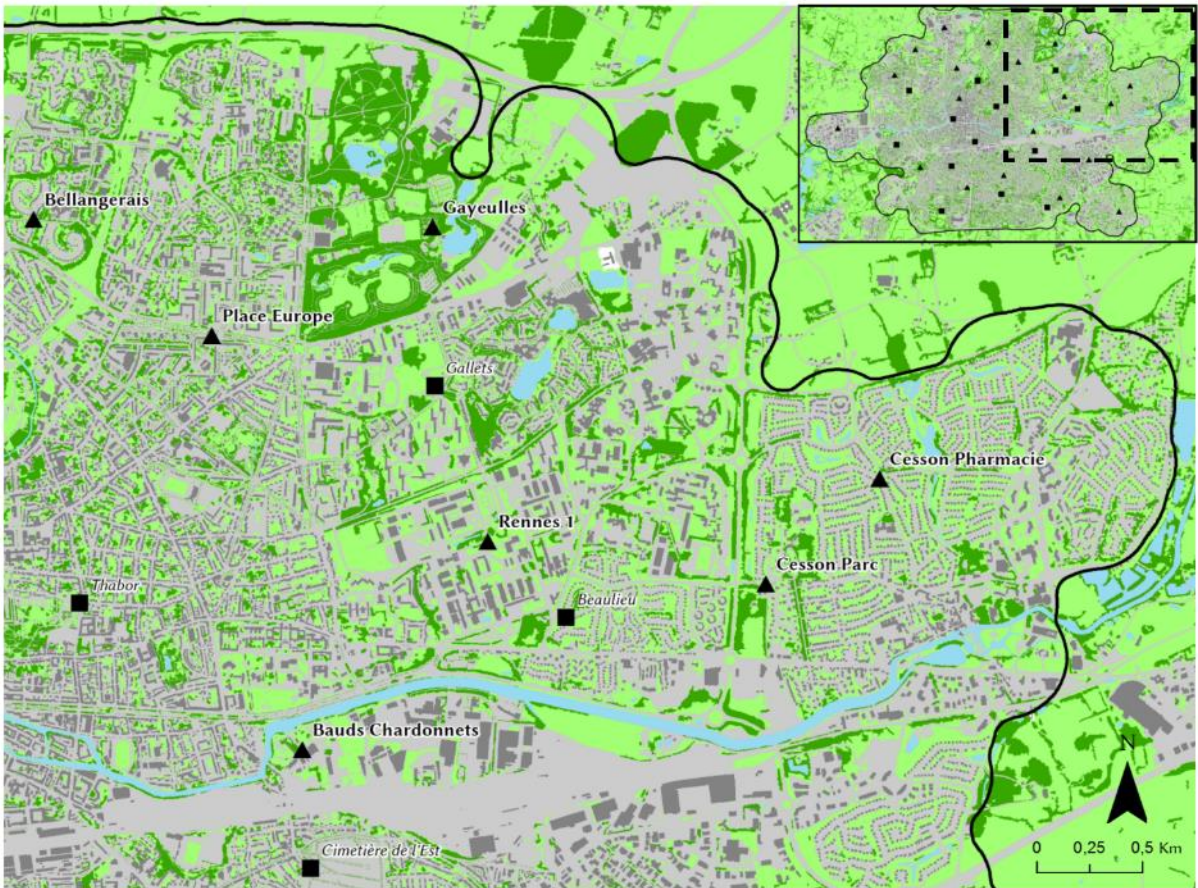
Un capteur est placé au sein d'un parc urbain au nord de Rennes, dans le quadrant nord-est (figure 28). Le parc des *Gayeulles* fait partie du réseau de capteurs installé pour analyser plus précisément la variabilité au sein d'un même quartier (cf. la partie 3.3.2.c) *Du plan d'eau, au parc urbain : la ZAC Longs Champs*). Le site des *Gayeulles* est comparable aux *Prairies Saint Martin* (noté *Les Prairies*) en tant que parc urbain (voir le quadrant nord-ouest, figure 28), cependant les surfaces diffèrent : 1km^2 pour les *Gayeulles* et $0,3\text{ km}^2$ pour les *Prairies*.

Les sites suivants - *Kennedy* sur le quadrant nord-ouest, *Place Europe* et *Rennes1* sur le quadrant nord-est, *Hôtel RM* sur le quadrant sud-ouest et *Cleunay* sur le quadrant sud-est- sont composés de barres d'immeubles et de tour (R+5 à R+15) dont la fraction est d'environ 20%, la fraction de végétation de 30% à 40% et la fraction de surfaces imperméables de 50% (voirie et parkings). Ces aménagements datent le plus souvent de la décennie 1970.

L'ensemble de ces capteurs permettent d'observer plus précisément la variabilité intra-urbaine, c'est-à-dire les écarts de température entre les quartiers. La diversité de formes urbaines rencontrées enrichit les observations, qui permettront de nourrir l'analyse spatiale et la constitution d'un modèle. Les disparités morphologiques des quartiers sont quantifiées par différents indices permettant une analyse systématique des quartiers.



Quadrant nord-ouest



Quadrant nord-est

Figure 28, quadrants nord du réseau de mesures intra-urbain à Rennes, extraits de la figure 27.

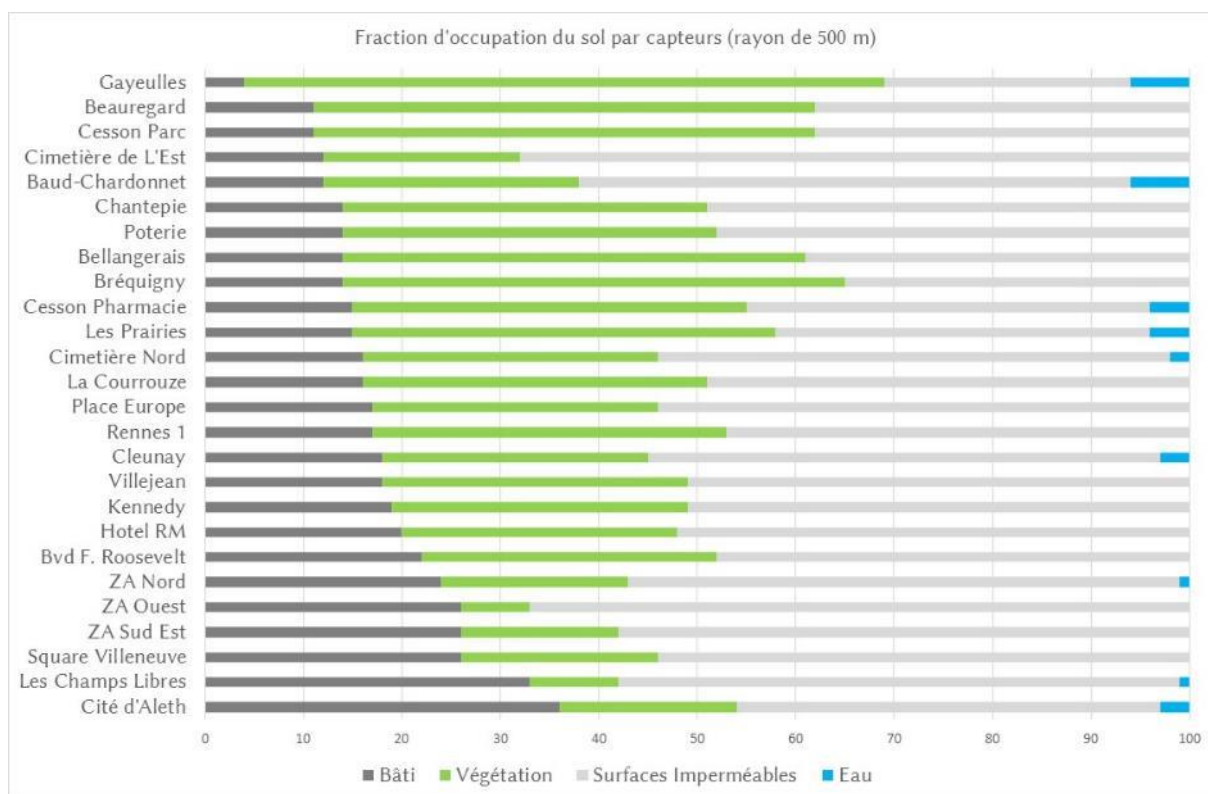
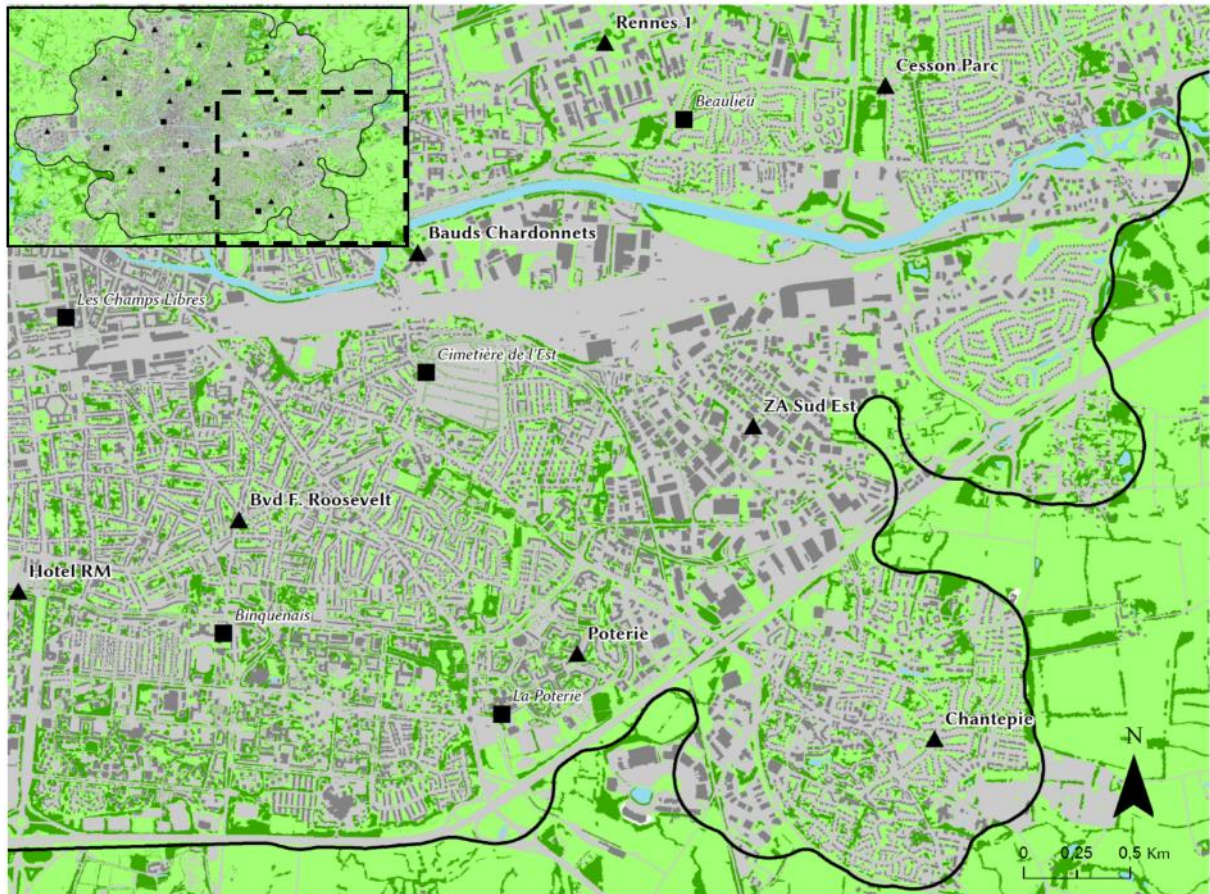
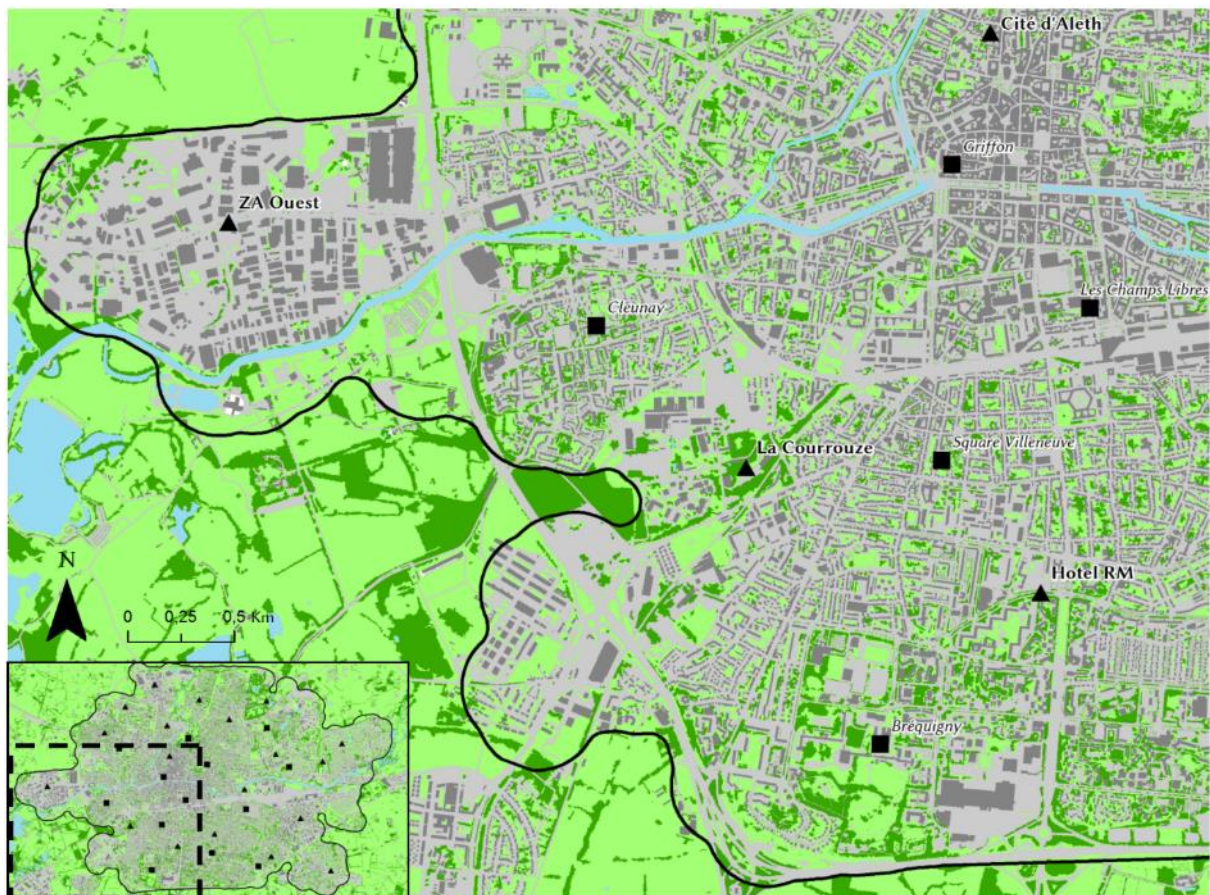


Figure 29, classement des capteurs de température installés dans l'espace intra-urbain à Rennes, trié par fraction de surfaces bâties.



Quadrant sud-est



Quadrant sud-ouest

Figure 30, quadrants sud du réseau de mesures intra-urbain à Rennes, extraits de la figure 15.

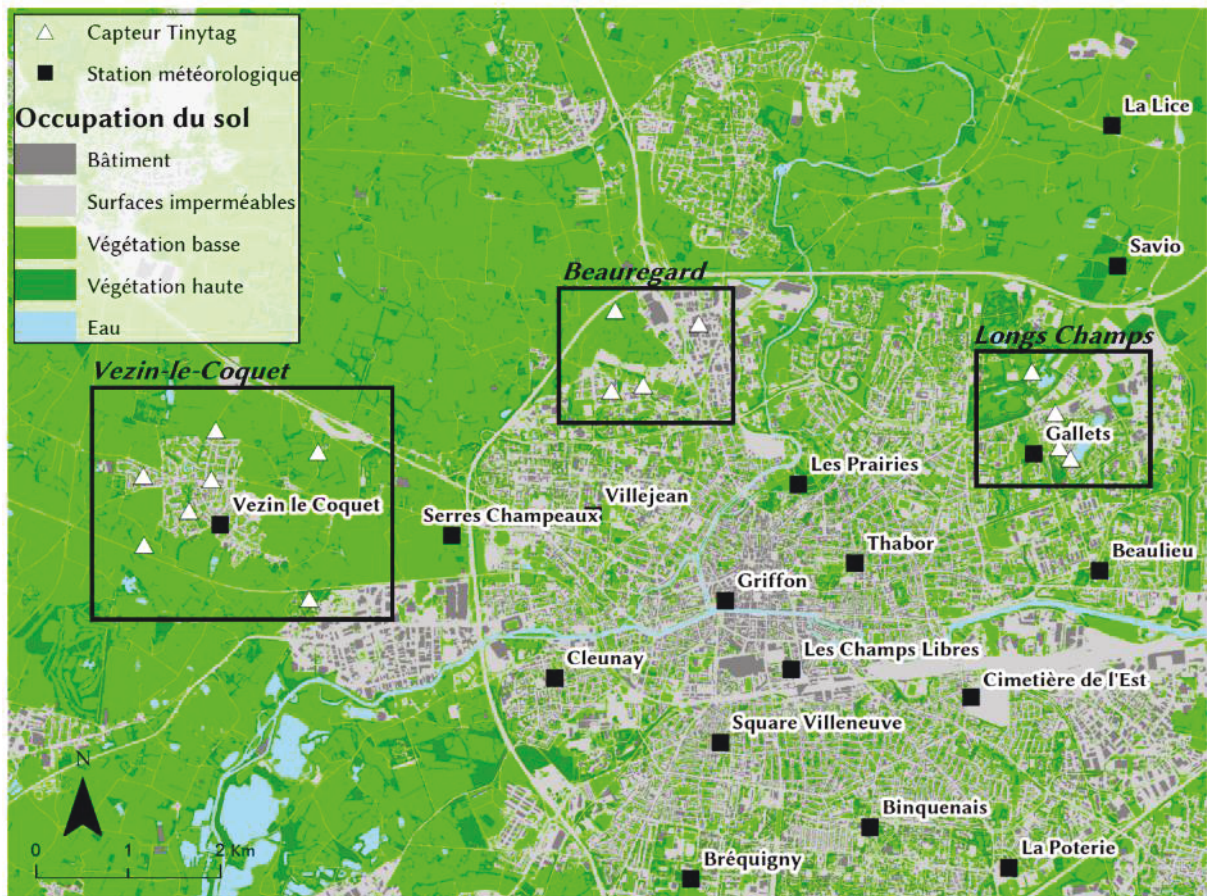


Figure 31, les trois réseaux de capteurs installés à l'échelle du quartier à Rennes.

3.3.2. Quelle est la variabilité à l'échelle d'un quartier ? Campagne de mesures 2012

Le dernier échelon d'observation est celui des quartiers et d'une petite ville. Afin d'observer la variabilité spatiale de l'ICU, trois réseaux de capteurs ont été installés : deux ZAC au sein de Rennes et un dans une petite ville en périphérie de Rennes. L'échelle d'observation est d'environ 1 / 20 000 et les capteurs ont été installés selon différents types d'espaces bien spécifiques : parc, cour de résidence, étang... L'objectif est de mettre en évidence les contrastes thermiques locaux effectifs en situation d'ICU. L'échelle de la ville de Vezein-le-Coquet est intéressante car elle permet l'observation de l'intensité de l'ICU dans une petite commune dont l'agglomération de Rennes Métropole est largement représentée avec 24 villes de moins de 10 000 habitants. Par ailleurs, cette commune est située à proximité de Rennes (environ 2km), ce qui permet d'envisager d'observer l'éventuelle influence de l'ICU rennais.

a) Une petite ville en périphérie de Rennes : Vezein-le-Coquet

Vezein-le-Coquet est une ville de 4 651 habitants située à l'ouest de Rennes dont l'espace résidentiel est composé essentiellement de maisons individuelles (pavillonnaires). Il est à noter que la construction d'une ZAC est en cours à l'ouest de la ville dont la densité des surfaces bâties et la hauteur des immeubles augmentent. Cette ZAC est relevée pour l'heure comme surface imperméable sur la figure 32. Au sud-est de la ville, la commune partage avec la ville de Rennes la ZA Ouest construite pendant la décennie 1970. Cette espace est fortement imperméabilisé avec de grands hangars, ce que l'on retrouve sur l'ensemble des ZA (voir la partie précédente,

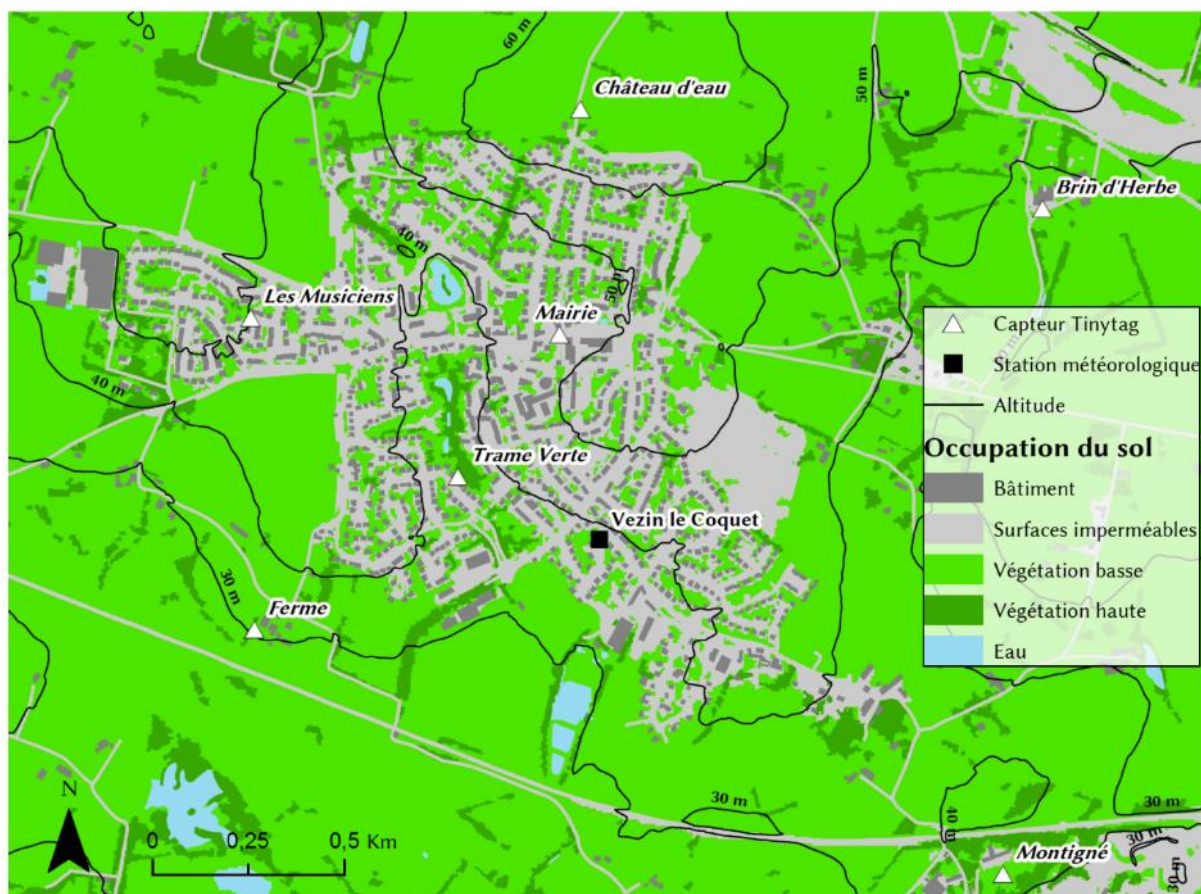


Figure 32, réseau de capteurs Tinytag installés à l'échelle de la ville de Vezin-le-Coquet.

3.3.1 Le milieu intra-urbain : campagne de mesures juillet-août 2013). Autour de l'espace urbanisé (1,2km²) de Vezin-le-Coquet, la campagne avoisinante est occupée par des espaces agricoles (céréales, prairies...) dont des reliquats de haies bocagères sont visibles.

Un capteur a été placé dans le bourg de la ville à proximité de la *Mairie*, correspondant à l'espace supposé où l'ICU est le plus intense. Un deuxième capteur est placé dans la *Trame Verte* de la ville (au centre) dans le jardin d'un particulier. Plus au sud, la station météorologique est présente dans un des quartiers pavillonnaires de la ville dont la situation est comparable avec le capteur placé dans le quartier *Les Musiciens*.

Le réseau de mesure tient compte du relief, car la ville est située sur un coteau dont l'altitude est comprise entre 30 m et 60 m. Deux capteurs sont placés selon ce dénivelé : *Château d'eau* est placé au nord de la ville au sommet et en fond de vallée un capteur est placé dans la *Ferme* au sud.

Deux capteurs sont placés hors de l'espace urbain : *Brin d'Herbe* à l'est et *Montigné* au sud dans le parc d'une maison de retraite voisine de la ZA Ouest. L'altitude de ces deux sites est similaire (environ 30 m). Ils permettront d'observer la température de la campagne avoisinante à la ville et de mesurer l'influence potentielle de la ZA à proximité du site *Montigné*.

b) Un nouveau quartier : la ZAC de Beaugard

Ce réseau de capteurs est placé dans la ZAC de Beaugard, située au nord-ouest de Rennes en limite urbaine (figure 33). La ZAC s'étend sur 0,7 km² et une seconde frange au nord viendra compléter l'aménagement actuelle par 0,4 km² supplémentaire, le site est donc en cours d'urbanisation et accueillera à terme environ 10 000 habitants. Ce site présente l'intérêt de proposer les formes urbaines de la décennie actuelle avec notamment une conservation des haies bocagères existantes dans le projet. Un capteur est placé dans le cœur d'immeuble de *Résidence* (R+5) et à 300 m, un deuxième capteur est installé dans le *Parc de Beaugard*. Le point de mesure *Le Haut Quincé* est disposé au nord de la ZAC dans l'espace correspondant à la campagne avoisinante, « avant urbanisation ». Un dernier capteur vient compléter le réseau dans la ZA à l'est, ce qui permet de révéler le contraste entre deux classes de sites *LCZ 5* et *LCZ 8* contiguës.

c) Du plan d'eau, au parc urbain : la ZAC Longs Champs



Figure 33, réseau de capteurs Tinytag installés à l'échelle de la ZAC de Beaugard. Photographies : Foissard X., juillet et août 2011.

Ce quartier plus ancien a été bâti lors de la décennie 1980, il assure plusieurs fonctions : le logement, les activités commerciales et l'agrément (figure 34). Le quartier se situe au nord-ouest de Rennes, au sud du *Parc des Gayeulles* (superficie 1km²) dans lequel est installé un capteur. L'espace résidentiel est composé d'habitats individuels et de petits collectifs denses mais cependant peu élevés (R+1 à R+3). Un des capteurs est placé dans une cour fortement imperméabilisée (noté *Résidence 1*) et le second capteur est positionné dans une cour d'un espace résidentiel de maisons mitoyennes dont la végétation est plus notable. Au sud, un capteur est placé à proximité (environ 10 m) de l'*Etang* afin d'en évaluer la fraîcheur potentielle. Enfin, la ZA est également équipée cependant son emprise demeure plutôt modeste comparativement à la ZA de Beaugard (0,2 km² contre 1km²).



Figure 34, réseau de capteurs Tinytag installés à l'échelle de la ZAC Les Longs Champs. Photographies : Foissard X., janvier et février 2012.

Conclusion du chapitre 3

La mise en place des réseaux de mesures doit répondre aux contraintes propres à l'installation de stations dans le milieu urbain. La question de la représentativité de la station est essentielle pour la constitution d'un réseau de mesures cohérent. A partir des recommandations de Oke T.R., trois réseaux de mesures ont été installés. Ils correspondent chacun à la variabilité spatio-temporelle observée selon trois échelles imbriquées de l'ICU : à l'échelle de l'agglomération, à l'échelle intra-urbaine, à l'échelle du quartier.

Un réseau de 22 stations météorologiques est établi, afin d'observer la variabilité de l'ICU à l'échelle de l'agglomération. Ce réseau a été initié en 2003 à la suite du programme pluridisciplinaire ECORURB. Il est complété par de nouvelles stations météorologiques au début de cette thèse. Ces observations vont constituer une base de données pour l'analyse et la modélisation spatio-temporelle de l'ICU sur plusieurs années.

La variabilité intra-urbaine de l'ICU est abordée par un second réseau de mesures, équipé de capteurs de température. Ce réseau correspond à une campagne de mesures réalisée en été 2013. Au total, 20 capteurs de températures ont été mis en place au sein du cœur de métropole (le milieu intra-urbain). L'objectif est d'observer et d'analyser la variabilité spatiale à cette échelle et de la modéliser dans un second temps. Des mesures mobiles par transects sont planifiées dans un premier temps, afin d'évaluer l'amplitude totale de l'ICU et d'en estimer la variabilité à cette échelle.

Enfin, un réseau temporaire de capteurs de température est établi sur trois quartiers distincts : une petite ville (Vezin-le-Coquet) et deux ZAC (Beauregard et Longs Champs). L'objectif est d'observer la variabilité de l'ICU au sein d'un même quartier et d'établir la relation entre l'ICU et la typologie du site.

Les trois échelles d'observation de l'ICU sont établies. Les protocoles de mesures sont définis pour fournir les données nécessaires aux étapes suivantes : l'analyse spatiale et temporelle, puis et l'élaboration des modèles associés (spatialisation et prévision de l'ICU).

- PARTIE II -

ANALYSES SPATIALES ET MODELISATIONS DE L' ILOT DE CHALEUR URBAIN

Les chapitres de cette deuxième partie concernent la variabilité spatiale de l'ICU. Dans le chapitre 4, la méthodologie pour la spatialisation est détaillée. Les données analysées et traitées sont issues du réseau de 22 stations météorologiques présentées lors de la première partie. Dans un premier temps, l'attention est portée sur le choix de la méthode de spatialisation multicritère parmi les autres méthodes existantes pour spatialiser l'ICU. Puis, les données et indices nécessaires à l'analyse de l'occupation du sol sont mobilisés. Dans le même temps, la variable déterminant l'ICU est retenue. A partir de ces éléments, la construction du modèle de spatialisation est réalisée. Puis elle est automatisée afin de spatialiser l'ICU pour différents intervalles de temps.

Le chapitre 6 correspond à la spatialisation de l'ICU à l'échelle de l'agglomération et à la production des cartes correspondantes. La méthode définie dans le chapitre 4 est appliquée. Préalablement, les lacunes des enregistrements des stations sont comblées. Puis une classification statistique des stations en fonction de la température est réalisée afin d'établir la relation avec l'espace géographique de la station. La méthode de spatialisation débute par l'analyse de plusieurs variables d'occupation du sol selon l'ICU observé. Les variables les plus pertinentes sont retenues pour la construction du modèle de spatialisation. La qualité des modèles produits est évaluée. Enfin, l'automatisation de la spatialisation permet d'observer la variabilité spatiale de l'ICU pour plusieurs intervalle de temps (quotidiens, saisons...).

La variabilité spatiale de l'ICU à l'échelle des quartiers est abordée dans le chapitre 6. Dans un premier temps, l'analyse spatiale de l'ICU est réalisée par des mesures mobiles de la température, l'objectif est de mettre en évidence l'amplitude totale de l'ICU selon les différents quartiers traversés (définis par typologies). Dans un deuxième temps, la variabilité spatiale de l'ICU est mesurée à l'échelle du quartier. L'étude est menée pour trois quartiers : une petite ville et deux ZAC à Rennes. L'objectif est d'établir l'implication des effets microlocaux sur l'ICU observé à l'échelle locale. Dans un troisième temps, la spatialisation de l'ICU est réalisée à l'échelle intra-urbaine. A partir, du réseau de capteurs installé à l'échelle intra-urbaine (voir le chapitre 3) et de la méthode de spatialisation de l'ICU (développée dans le chapitre 4), la variabilité spatiale de l'ICU est observée selon plusieurs intervalles de temps, quotidiens à horaires.

Chapitre 4 : Spatialisation de l'îlot de chaleur urbain à Rennes Métropole par analyses multicritères

L'objectif de ce chapitre est d'établir une méthodologie pour spatialiser l'ICU observé à partir du réseau de stations météorologiques. Les différentes méthodes actuelles de spatialisation de l'ICU sont comparées. Les variables nécessaires à l'élaboration du modèle sont déterminées. Les variables doivent permettre de décrire la variabilité spatiale de l'ICU, ce qui signifie correspondre aux facteurs influant sur l'ICU défini dans le chapitre 1.2.2. La présence de bâtiments, les « canyons urbains » et la présence de végétation sont identifiés comme des facteurs pertinents. La méthode de spatialisation doit prendre en compte l'aire variable de la représentativité du point de mesures en ville abordé dans le chapitre précédent (chapitre 3.1.1). L'aspect multiscalaire de l'ICU est également abordé par la méthode.

4.1. L'analyse spatiale de l'environnement des stations

L'objectif de l'observation de l'îlot de chaleur urbain à l'aide d'un réseau de mesure est de produire une cartographie. Ce phénomène étant structuré selon un emboîtement d'échelles, le réseau de mesures a été organisé selon cette disposition. L'étape de la spatialisation est ordonnée selon cette même logique : de l'échelle de l'agglomération à l'échelle des quartiers. La première phase de la spatialisation est l'analyse de l'occupation du sol environnant les points de mesures.

4.1.1. *Le choix de l'analyse statistique multivariée*

Plusieurs méthodes de spatialisation sont disponibles pour la modélisation des températures : les modèles numériques et les modèles empiriques. La première méthode couvre un large champ de la météorologie et de la climatologie, notamment dans la prévision et la simulation. La seconde correspond à une méthode statistique employée pour la modélisation aux échelles fines.

a) Les modèles numériques (ou l'approche déductive)

Cette méthode est qualifiée d'approche déductive car un modèle est constitué à partir d'équations issues des principes de la physique de l'atmosphère. Elle présente l'avantage de reproduire avec fidélité les processus physiques que l'on souhaite simuler, ainsi elle est très largement employée pour la prévision météorologique (aux échelles synoptiques). Cependant elle se révèle contraignante par la diversité des facteurs à intégrer pour la constitution du modèle.

Cette méthode de modélisation requiert d'importante puissance de calcul et elle est employée plus largement à court terme, à l'échelle temporelle de la prévision météorologique.

Les échelles appréhendées par la méthode déductive dépendent de la thématique abordée. Les modèles de prévisions météorologiques s'inscrivent de l'échelle planétaire à l'échelle régionale dont la maille varie entre 250 km à 2,5 km selon le modèle. Météo-France a développé 3 modèles distincts : ARPEGE, ALADIN et AROME (respectivement selon l'ordre scalaire croissant) (Seity et al. 2011). Pour les modèle de prévision à maille la plus fine (AROME) de Météo-France, la capacité de prévoir les phénomènes à l'échelle mésoclimatique tels que les orages ou la brume est rendue possible. Les échelles temporelles de ces modèles de prévisions sont limitées à 5 jours pour un phénomène à l'échelle régionale et à 1 jour pour un événement à une échelle mésoclimatique plus fine (Carrega 2003; Beltrando and Chémery 1995).

D'autres modèles numériques atmosphériques existent tels que WRF (Weather Research Forecast), il s'agit d'un modèle récent développé par deux institutions américaines la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et le NCAR (National Center for Atmospheric Research). Il présente l'avantage d'intégrer les éléments topographiques et il peut également être couplé à des modèles de surfaces spécifiques comme le milieu urbain (Chen et al. 2011). En France, Météo France a produit le modèle couplé SURFEX comprenant le modèle atmosphérique mésoéchelle Meso-NH (et le modèle de surface « urbain » TEB (Town Energy Balance) (Masson et al. 2002, 2013).

Le modèle ENVI-met est remarquable par la précision du maillage (0,5 m à 10m) dont il dispose pour intégrer les informations relatives à l'occupation du sol. Ce modèle est développé à l'université de Mayence par M. Bruse (Bruse and Fleer 1998). Il permet de simuler selon 3 dimensions (4 avec la dimension temporelle) les interactions générées par les bâtiments, la végétation, l'eau et les surfaces entre le sol et l'atmosphère (dans la canopée urbaine). Le modèle calcule les paramètres de vent, de la température de l'air, de la température moyenne radiante, de l'humidité relative, de la pression de vapeur d'eau. Il permet d'obtenir des résultats convaincants à l'échelle de quelques îlots (Taleghani et al. 2014). Au demeurant, la modélisation avec un paramètre de vent faible ou nul exprime ses limites (Bruse 2004).

b) Les modèles empiriques (ou l'approche inductive)

Très largement employée en géographie, l'approche inductive consiste à construire un modèle statistique à partir d'un échantillonnage de données acquises *in situ* (Arnaud and Emery 2000). La spatialisation des températures est une problématique récurrente en climatologie, c'est-à-dire la création à partir d'un champ continu à partir d'un champ discret (points d'observation). On peut distinguer deux groupes de méthodes d'interpolation spatiale : les méthodes géostatistiques et les méthodes multicritères. La classification de ces méthodes varie selon la discipline, car les besoins et les applications sont évidemment différentes. On peut également retrouver les dénominations suivantes : « déterministe / stochastique » (Myers 1994).

L'interpolation spatiale qualifiée « géostatistique » repose sur le principe de l'autocorrélation spatiale : la ressemblance maximale d'un point avec ses voisins. Par conséquent, la proximité spatiale avec le point mesuré implique une proximité avec la valeur. La méthode la plus couramment employée est le *krigeage* (Krigé 1951). Cette méthode d'interpolation est construite à partir d'un variogramme dont la fonction doit minimiser la variance (Gratton 2002). La méthode est couramment utilisée dans plusieurs disciplines lorsque les variables fluctuent peu sur de faibles distances. Elle présente l'avantage d'être adaptable selon les besoins (fonctions pondérées, inverses, splines...). Elle connaît un succès croissant à partir de la décennie 90, elle est fréquemment employée dans les géosciences et les sciences

environnementales, notamment la climatologie (Li and Heap 2014). Les limites de cette méthode existent : ainsi, dès que la variabilité spatiale du phénomène est inférieure à la distance entre les points de mesures et dès que l'espace devient anisotrope la forte variabilité du milieu impose la multiplicité des points de mesures (World Meteorological Organization 2011). Dans le cas d'un réseau de stations météorologiques, si la température varie entre deux postes de mesures selon l'hétérogénéité du milieu, ces éléments ne seront pas intégrés par le modèle (Carrega 2003).

La seconde méthode est l'interpolation spatiale multicritère, elle se définit par son approche stochastique car elle intègre le concept de hasard et fournit l'évaluation ainsi que l'erreur associée (la variance) (Li and Heap 2014). Cette méthode apparaît comme la plus adaptée à l'étude climatique aux échelles fines, comme il a été largement détaillé dans la thèse de M. Madelin (Madelin 2004). Pour un usage en climatologie aux échelles fines, la méthode consiste en l'analyse de l'occupation du sol et de la topographie, c'est-à-dire à déterminer les meilleurs descripteurs de l'environnement des stations météorologiques selon la variable à décrire (dans notre cas, la température). La détermination des meilleurs descripteurs est une étape importante car il est important de respecter une cohérence des mécanismes physiques et la pertinence statistique. Le principe de la méthode « fonctionnelle » impose de s'assurer que les variables explicatives est une relation avec la variable à expliquer, l'analyse statistique met en évidence le degré de corrélation et l'apport d'explication réelle de celle-ci (Carrega 1992). Cette méthode se révèle efficace pour l'étude aux échelles fines, évidemment sous la condition d'avoir un réseau de mesures adapté à la variabilité spatiale de l'occupation du sol et de la topographie. L'avantage de cette méthode réside sur l'évaluation de l'erreur-type de la modélisation et sa significativité. De nombreux travaux en climatologie aux échelles fines ont employés cette méthode pour diverses applications (viticoles, urbaine, forestières...) et variables (précipitations, température, ensoleillement...) (Laughlin and Kalma 1987; Carrega 1992; Blennow and Persson 1998; Bottyan and Unger 2003; Joly et al. 2007; Quénot 2012a; Bonnefoy 2013; Madelin 2004).

4.1.2. *L'occupation du sol sur le territoire de Rennes Métropole*

La méthode retenue pour la spatialisation de l'ICU requiert des informations sur l'occupation du sol. La constitution d'un jeu de données spatiales aussi complet que possible est essentielle pour l'analyse spatiale. Dans un premier temps, les informations sont extraites de la base de données du SIG (Système Information Géographique) de Rennes Métropole. Cependant il est important de recourir à une information topographique aussi exhaustive que possible, sinon les lacunes introduiraient un biais supplémentaire. Ainsi, l'extraction de la végétation issue de l'espace privé est un élément indispensable pour la réalisation de la spatialisation. A partir des informations constituées sur l'ensemble du territoire, des indices discriminants de la morphologie et les structures sont calculés afin de déterminer les formes spatiales corrélées avec l'ICU.

a) La base de données disponible par le service SIG de la ville de Rennes

Les informations mises à disposition par le service SIG de la ville de Rennes et la direction des jardins de la ville de Rennes dans le cadre de la thèse renseignent sur l'emprise au sol des bâtiments, de la voirie, du réseau hydrique, de la végétation arborée (dans l'espace public) sur l'ensemble du territoire de Rennes Métropole. La hauteur des bâtiments est disponible dans la table attributaire des bâtiments. Le tracé du réseau de voiries est renseigné sous la forme de polygones dont la largeur est spécifiée dans la table attributaire. Le réseau hydrique - formé de rivières, de cours d'eau et d'étangs - est représenté au format de polygones.

La végétation est une information partiellement disponible sur le territoire étudié (Rennes Métropole) car elle couvre exclusivement l'espace public, malgré la richesse des éléments

répertoriés par le service des jardins de la ville de Rennes : arbres d'ornements, arbres d'alignements, haies, surfaces enherbées, massifs arbustifs, massifs champêtres, massifs forestiers, massifs floraux, les surfaces minérales... La richesse et le détail de ces informations imposent bien évidemment une simplification et une exhaustivité sur l'ensemble du territoire. L'essentiel des espaces renseignés par la base de données SIG se restreint aux limites communales et aux espaces gérés par le service des jardins de la ville de Rennes.

Les informations disponibles et exploitables pour l'analyse spatiale sont :

- les bâtiments (emprise et hauteur)
- la voirie après création d'une zone tampon correspondant à la largeur renseignée dans la table attributaire
- le réseau hydrique composé de rivières, petits cours d'eau et étangs.
- les surfaces enherbées et les espaces boisés
- les arbres d'alignement et les arbres remarquables après la création d'une zone tampon de 4 m de diamètre

b) L'apport de la télédétection pour la végétation

Les lacunes de l'occupation du sol, notamment dans l'espace privé sont comblés à l'aide d'une scène satellite. La végétation arborée, les surfaces enherbées et les surfaces agricoles sont déterminées à partir d'une image RapidEye datée du mois de juillet 2010. L'image possède une résolution de 5 m, cependant les informations pré-acquises permettent de se contenter de cette résolution car la plupart des éléments sont déjà classés (tableau 1). La méthode employée pour la classification est orientée objet et supervisée dont l'indice kappa est supérieur à 0,9 avec l'espace de validation.

La végétation est répartie en deux classes, la végétation haute pour les surfaces arborées et la végétation basse pour les surfaces enherbées et les espaces agricoles. Les espaces interstitiels non-reconnus comme de la végétation sont classés en tant que surfaces imperméables. Dans ces espaces non-reconnus ou mal identifiés, on retrouve essentiellement la voirie (trottoirs) et les parkings. La classification finale de l'occupation du sol pour le quartier de la Bellangerais est illustrée sur la figure 35.

Occupation du sol	Format
Bâtiment	Polygones
Voirie	Polylignes
Réseau hydrique	Polygones
Végétation (boisement)	Polygones
Végétation (arbres et arbres d'alignement)	Points

Tableau 1, informations SIG disponibles et mobilisées auprès du service SIG de la ville de Rennes.

c) La constitution d'indices morphométriques à l'échelle intra-urbaine

Les indices de fractions d'occupation du sol permettent d'analyser l'espace sur deux dimensions ; l'intégration de la hauteur des bâtiments et de l'altitude prend en compte la troisième dimension spatiale. L'indice *Sky View Factor* (noté SVF) est utilisé pour intégrer la

forme des bâtiments à savoir non-seulement la hauteur des bâtiments mais également leur espacement. Il permet de mesurer « l'effet de canyon » de ceux-ci.

Le *Sky View Factor* correspond au degré d'ouverture du ciel, c'est-à-dire la fraction de ciel observable au sol. L'indice est sans dimension et compris entre 0 et 1, pour un degré d'observation maximal du ciel =1 (cas d'une plaine sans obstacle) et une fermeture complète du ciel =0. Le SVF est un indice utilisé en climatologie urbaine pour mesurer le rayonnement diffus émis par les surfaces environnantes, ce concept est décrit par T.R. Oke. Il existe plusieurs cas d'expositions topographiques : dans un bassin, à proximité d'un mur, d'une pente, dans un canyon et en fond de vallée (Oke 1987).

Le calcul du rayonnement diffus reçu sur une surface s est défini à partir de l'équation (1), où Ψ_s correspond au SVF calculé sur une demi-sphère, avec β pour l'angle vertical formé par l'obstacle obstruant le ciel, φ est l'angle horizontal de la tranche d'observation dont α définit l'angle de la fraction horizontale obstruée par l'obstacle et enfin Φ détermine l'azimut de la tranche. Il est à noter que le zénith de la sphère est paramétré à 90° (Dozier and Frew 1990; Böhner and Antonić 2009).

$$\Psi_s = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\cos \beta \cdot \cos^2 \varphi + \sin \beta \cdot \cos(\Phi - \alpha) \cdot (90^\circ - \varphi - \sin \varphi \cdot \cos \varphi)] d\Phi \quad (1)$$

Cette équation est simplifiée par Oke T.R. (selon le contexte topographique) et adaptée pour le milieu urbain dont le modèle retenu est le « bassin » (2). Cette simplification selon le modèle en « bassin » demeure valable pour les petites distances (figure 36), dont le rayon du cylindre D est fixé et la hauteur du bâtiment H détermine l'angle vertical β (Oke 1987).

$$\Psi_s \approx \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2)$$

L'évaluation du SVF peut être réalisée selon plusieurs méthodes. La méthode de T.R. Oke (figure 36) est peu consommatrice en temps de calcul, elle est nommée méthode multiscalaire. La deuxième méthode, dite « analytique », est construite à partir de la première méthode, cependant le calcul du SVF est réalisé en intégrant plusieurs éléments de l'équation (1) : l'angle horizontal obstrué par l'obstacle α et la procédure de découpage par « tranche » (figure 37). Pour chaque « tranche », la fraction obstruée O est déterminée dans l'hémisphère de rayon D reçu par la surface exposée ΔA . La fraction obstruée calculée Ψ_o permet d'obtenir le SVF (Ψ_s) selon l'équation (3) (Bottyan and Unger 2003; Unger 2009; Chen et al. 2012; Häntzschel et al. 2005; Johnson and Watson 1984).

$$\Psi_s = 1 - \Psi_{o-\Delta A} \quad (3)$$

La troisième méthode consiste à déterminer le SVF à partir d'une observation réalisée à l'aide d'un théodolite ou d'un appareil photo muni d'un objectif très grand angle (environ 8 mm) en « œil-de-poisson ». Les clichés sont réalisés selon l'axe zénithal. Après une correction des déformations liées à l'optique de l'objectif, le SVF est estimé à partir du cliché à l'aide d'un logiciel pourvu d'un algorithme de détermination ou manuellement (Grimmond et al. 2001; Gál and Rzepa 2007; Svensson 2004). Les résultats divergent très peu selon les algorithmes appliqués et cette méthode a l'avantage d'intégrer la végétation. Au demeurant, la méthode « analytique » est applicable sur l'ensemble de l'espace étudié.

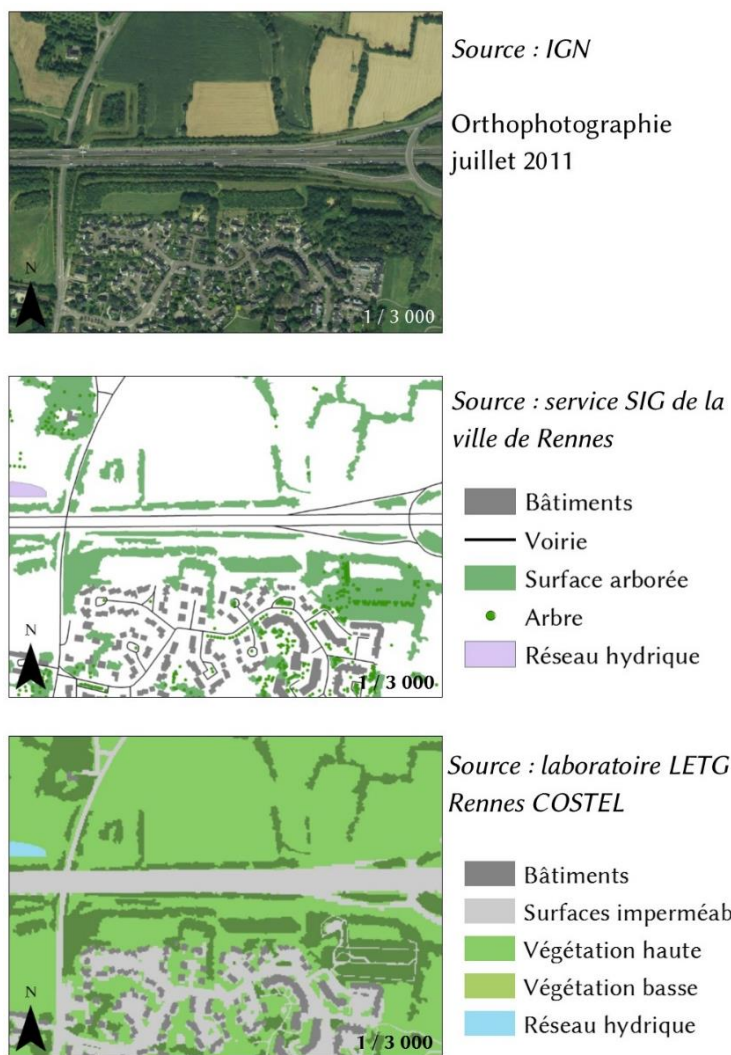


Figure 35, extraits du SIG du quartier de la Bellangerais à Rennes selon trois sources disponibles.

La méthode est appliquée dans l'espace intra-urbain rennais à l'aide du logiciel de traitements géostatistiques SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) (Bock et al. 2008). La méthode multiscalaire et analytique sont disponibles et permettent le calcul du SVF sur une durée très variable selon les paramètres retenus. Le MNE (Modèle Numérique d'Élévation) est obtenu à partir du MNT (Modèle Numérique de Terrain) accessible auprès du service SIG de la ville de Rennes à une résolution de 2 m, auquel est ajoutée la hauteur des bâtiments. Le calcul est réalisé sur l'espace intra-urbain afin de ne pas surcharger le processus, d'autant que le phénomène de canyon lié aux bâtiments est faible en campagne. Plusieurs essais, on montrer que la méthode multiscalaire de T.R. Oke s'avère efficace et rapide. Les résultats sont équivalents selon la méthode et les paramètres choisis, car la résolution du modelé (terrain) est de 2 m et l'analyse statistique est réalisée sur des zones tampons agrégeant les résultats (le rayon est compris entre 100 et 900 m).

L'analyse spatiale est complétée par l'analyse de la structure et de la forme de la végétation et des bâtiments. Ces indicateurs morphométriques sont utilisés en écologie pour la description du paysage. Ils intègrent différents éléments géométriques avec un degré de complexité plus ou moins important (McGarigal et al. 2009). L'intérêt de ces descripteurs est de pouvoir répondre aux questions de structures paysagères ; par exemple, la relation entre la température et la répartition de la végétation selon un parc (formes rassemblées) ou selon une trame imbriquée

dans les structures bâties. Le calcul des indices est réalisé à l'aide de l'outil *Patch Analyst 5*

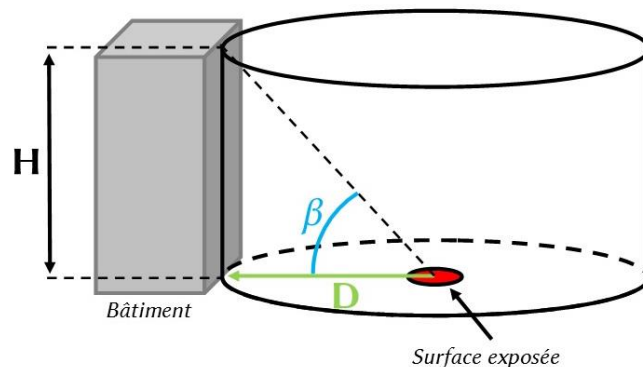


Figure 36, schéma simplifié du calcul du Sky View Factor selon le modèle en "bassin", adapté de T.R. Oke.

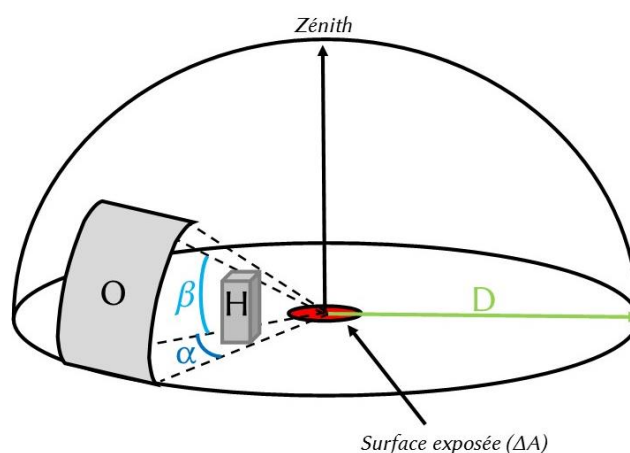


Figure 37, schéma de détermination du SVF selon la méthode analytique, adapté de L. Chen.

(Rempel et al. 2012). Les indices retenus sont opérés par classes, les deux classes utilisées dans cette étude sont les bâtiments et la végétation dans une zone tampon de 900 m environnant les stations météorologiques dans l'espace intra-urbain. Le choix de ces deux classes à analyser dans l'espace intra-urbain permet une interprétation plus simple pour une première approche par cet outil.

Les indices suivants ont été exploités (McGarigal and Marks 1995) :

- « Total Edge » (noté TE), il correspond à la somme des périmètres des éléments.
- « Mean Patch Edge » (noté MPE), il est défini par le périmètre moyen de chaque élément.
- « Mean Patch Size » (noté MPS), il calcule la taille moyenne des éléments composant la classe (en hectare).
- « Area Weighted Mean Shape Index » (noté AWMSI), cet indice calcule pour une classe la moyenne du rapport entre le périmètre et l'aire de l'élément, pondérée par l'aire de l'élément (4).

$$AWMSI = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\text{périmètre}_i}{2\sqrt{\pi \times \text{aire}_i}} \right) \left(\frac{\text{aire}_i}{\sum_{i=1}^n \text{aire}_i} \right) \right] \quad (4)$$

4.2. Spatialisation par la méthode multicritère : la régression linéaire multiple

La méthode de spatialisation est réalisée en trois étapes, dans un premier temps le choix des variables à spatialiser, puis la sélection des variables explicatives les plus pertinentes et enfin l'application de la régression dans l'espace. Le choix de la variable à l'étude, dans le cas de l'ICU, est la température. Cependant il reste à déterminer pour quelle date ? Quelle est la situation météorologique retenue propre au phénomène de l'ICU ? La question du choix de la représentativité de l'ICU par une nuit particulière ou par une moyenne mensuelle, saisonnière ou annuel se pose. Cette question peut s'appliquer également pour le choix de l'heure à laquelle l'ICU peut être représenté pour une nuit, comment résumer l'intensité de l'ICU pour chaque station ? Dans un deuxième temps, la sélection des variables pour la construction du modèle par la régression linéaire constitue une étape où les facteurs d'occupation du sol sont confrontés pour évaluer leur apport dans le modèle. L'analyse statistique des facteurs permettent la hiérarchisation des éléments influant dans l'intensité de l'ICU. Enfin, lors de la troisième étape la régression est réalisée à partir des rasters créés à partir des éléments d'occupation du sol par fenêtre glissante. Les qualités et faiblesses des modèles sont comparées par différents tests statistiques.

4.2.1. *La variable à expliquer : sélection des gradients thermiques à spatialiser*

La spatialisation de l'ICU à l'échelle de l'agglomération est réalisée sur l'année 2011 à partir des 20 stations météorologiques du réseau et des stations hors réseau : *Les Serres Champeaux* et *Rennes Saint Jacques*. La disponibilité du jeu de données est indiquée sur la figure 38. Les séries sont parfois lacunaires, cependant les stations de référence rurale (*Melesse*) et urbaine (*Griffon*) sont complètes, ce qui permet de distinguer les situations (nocturnes) avec un gradient de température contrasté. L'analyse spatiale est réalisée dans un premier temps en retenant les nuits où l'ensemble des stations ont été opérationnelles avec un ICU marqué voir intense (dans des conditions atmosphériques favorables à sa formation (voir le chapitre 7). L'analyse est réalisée à partir de l'ICU moyen en 2011, puis plusieurs nuits avec un ICU marqué à intense. Ainsi les distorsions spatiales liées à l'incertitude de la mesure et aux particularités atmosphériques quotidiennes sont mises en évidence. Les situations où l'ICU est considérées comme présent sont détaillées dans la partie 7.2.2, l'analyse des conditions météorologiques est requise afin de s'assurer de le gradient de température résulte de ce phénomène.

L'ICU est caractérisé par l'écart de température entre la campagne et la ville, dont la présence est nocturne. Cependant l'écart de température entre la station urbaine et rurale n'est pas constant sur l'ensemble de la nuit. Un choix doit être pris pour définir l'ICU à partir de données horaires, comme schématisé sur la figure 39. L'exemple choisi présente la température mesurée sur 24 heures du 22 au 23 mai 2011 par les stations *Griffon* et *Melesse*. La situation atmosphérique est favorable à la mise en place de l'ICU (ciel clair et vent moyen inférieur à 2,0 m/s). L'écart de température entre le centre et la campagne croît progressivement en fin d'après-midi et devient supérieur à 3°C au coucher du soleil pour atteindre un maximum à 6,4°C à 3h. L'écart de température diminue rapidement après les heures les plus fraîches de la nuit, et dès le lever du soleil l'écart disparaît subitement. Ce signal montre que l'intensité de l'ICU varie au cours de la nuit, le choix de l'écart de température qualifiant le mieux l'ICU est donc multiple et peut être la moyenne nocturne, l'écart maximal instantané ou l'écart des températures minimales...

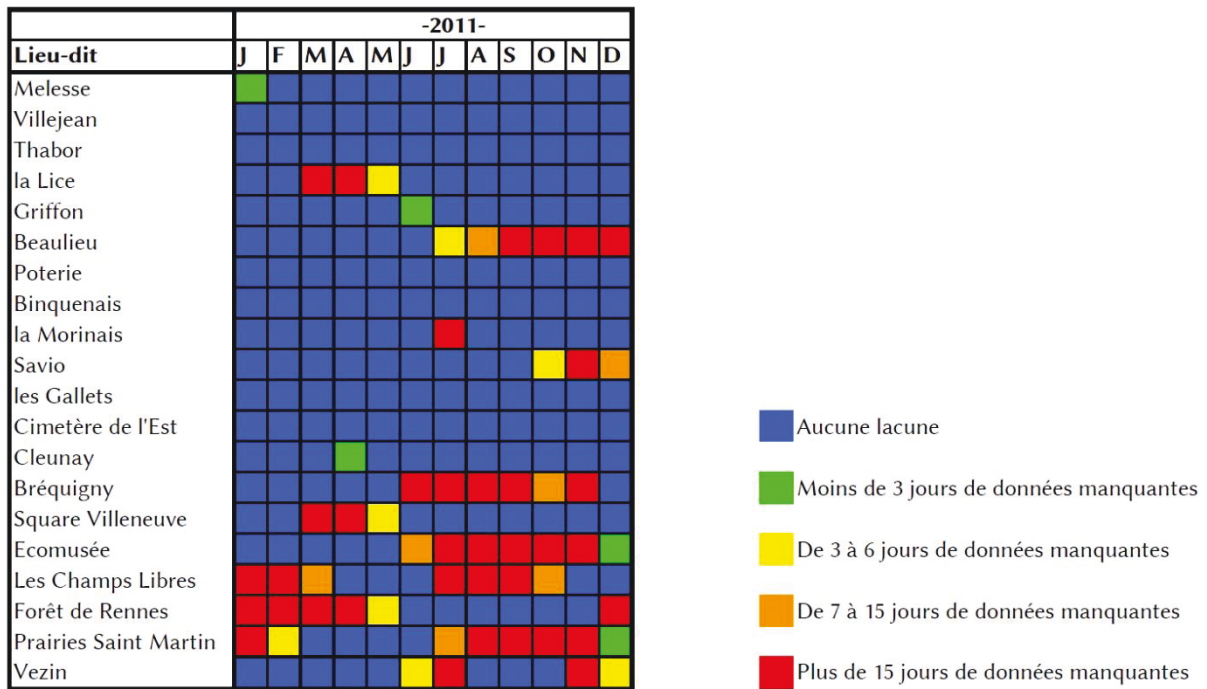


Figure 38, disponibilités et lacunes des stations météorologiques du réseau de mesures à Rennes en 2011. Adaptée de Dubreuil V., 2010.

Pour qualifier l'ICU au cours de la thèse, le choix retenu est l'écart des températures minimales. L'heure de l'enregistrement de la température minimale (T_{min}) entre deux stations n'est pas nécessairement identique, cependant elle permet d'intégrer l'heure la plus fraîche de la nuit correspondant à la phase de récupération de l'organisme suite à une journée caniculaire (Stéphan et al. 2005; Gabriel and Endlicher 2011). L'exemple pris, en figure 39, indique que la T_{min} est atteinte à 5h pour les deux stations, avec une différence de $6,2^{\circ}C$. L'écart instantané maximum permet d'évaluer l'amplitude maximale de l'ICU, cependant cette mesure requiert une bonne synchronisation de l'enregistrement, de plus l'heure de l'observation de l'écart maximum peut grandement différer d'une station à une autre. L'écart maximum de température est de $6,4^{\circ}C$ pour la nuit de 22-23 mai 2011. L'observation de l'ICU par le calcul de l'écart moyen nocturne pose la question du choix de cet intervalle de mesure variable tout au long de l'année. L'écart de température moyen nocturne du 22-23 mai est de $5,4^{\circ}C$. L'exemple du 22 au 23 mai 2011 montre que l'écart de température est déjà marqué en fin d'après-midi, car dès que le soleil décline le déstockage de l'énergie cumulée dans la journée débute et maintient la température plus élevée en ville.

4.2.2. Les variables explicatives : construction des modèles de régression

a) La construction du modèle de régression

Les variables explicatives sont issues de l'analyse de l'occupation du sol environnant les stations météorologiques. La sélection des descripteurs pour réaliser la régression est une étape importante soumise à certaines précautions. Deux approches sont abordées ici, la première est réalisée « manuellement » à partir des matrices de corrélation et la seconde est une procédure de sélection automatique déterminant les meilleurs modèles possibles à partir d'un critère statistique.

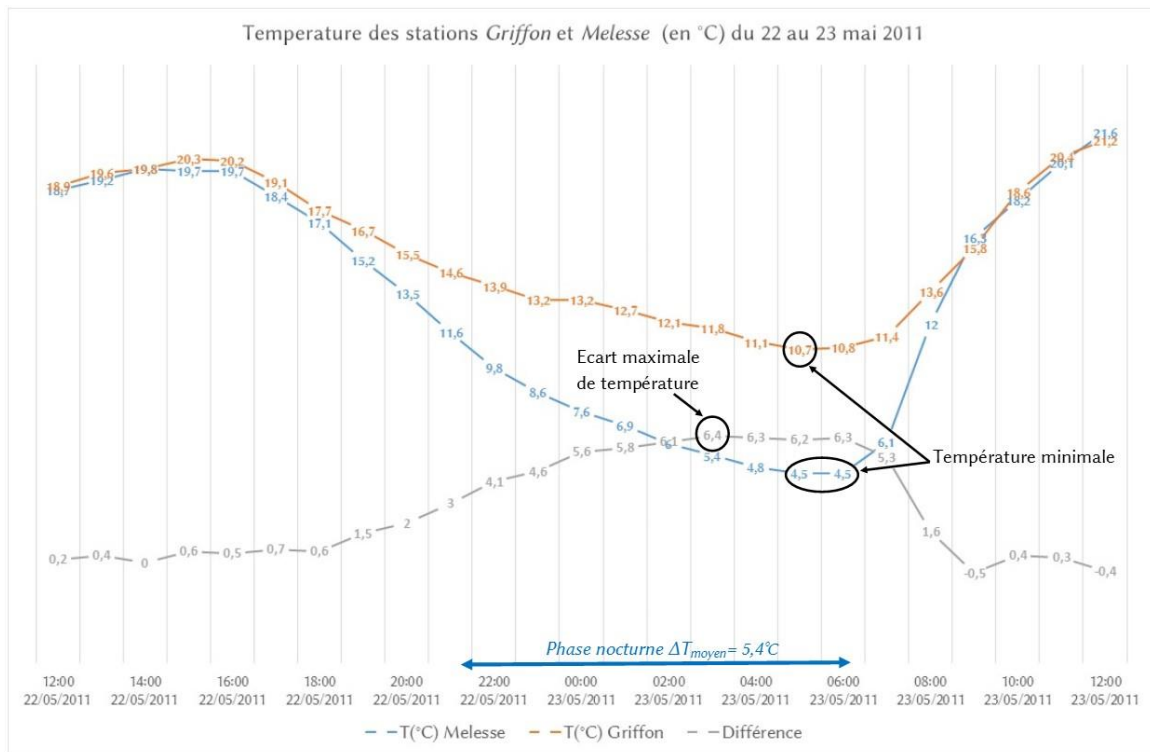


Figure 39, température du 22 au 23 mai 2011 de la station rurale (Melesse), de la station urbaine (Griffon) et la différence.

Les descripteurs utilisés sont déterminés par la fraction d'occupation du sol pour les informations suivantes : surfaces bâties, imperméables, la végétation haute et basse, la végétation totale et le réseau hydrique. D'autres informations autres que la fraction d'occupation du sol sont utilisées : la hauteur moyenne des bâtiments et la moyenne du SVF. Des informations ponctuelles sont également employées telles que l'altitude et la distance au centre-ville de la station météorologique. La distance au centre-ville est calculée à partir du centroïde des polygones de l'ensemble des bâtiments du territoire de Rennes Métropole. Les traitements effectués sont réalisés à l'aide de la suite logiciel *ArcGis 10.1*®. Les calculs sont réalisés dans plusieurs tailles de zones tampons comme l'illustre la figure 40 pour la station *Les Prairies Saint Martin* : 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m, 600 m, 700 m, 800 m et 900 m. Ces emprises permettent de définir statistiquement la représentativité des stations météorologiques. L'aire de représentativité correspond à environ 500 m de rayon selon la littérature (*cf.* chapitre 3.1.1). Ce choix méthodologique de modifier l'emprise permet de définir la meilleure échelle intervenant dans la mise en place de l'ICU, car selon les conditions atmosphériques cet espace fluctue. Pour différentes saisons et différents types de temps, le degré de corrélation entre la dimension des emprises au sol et les distributions de température observées varie (Suomi et al. 2012).

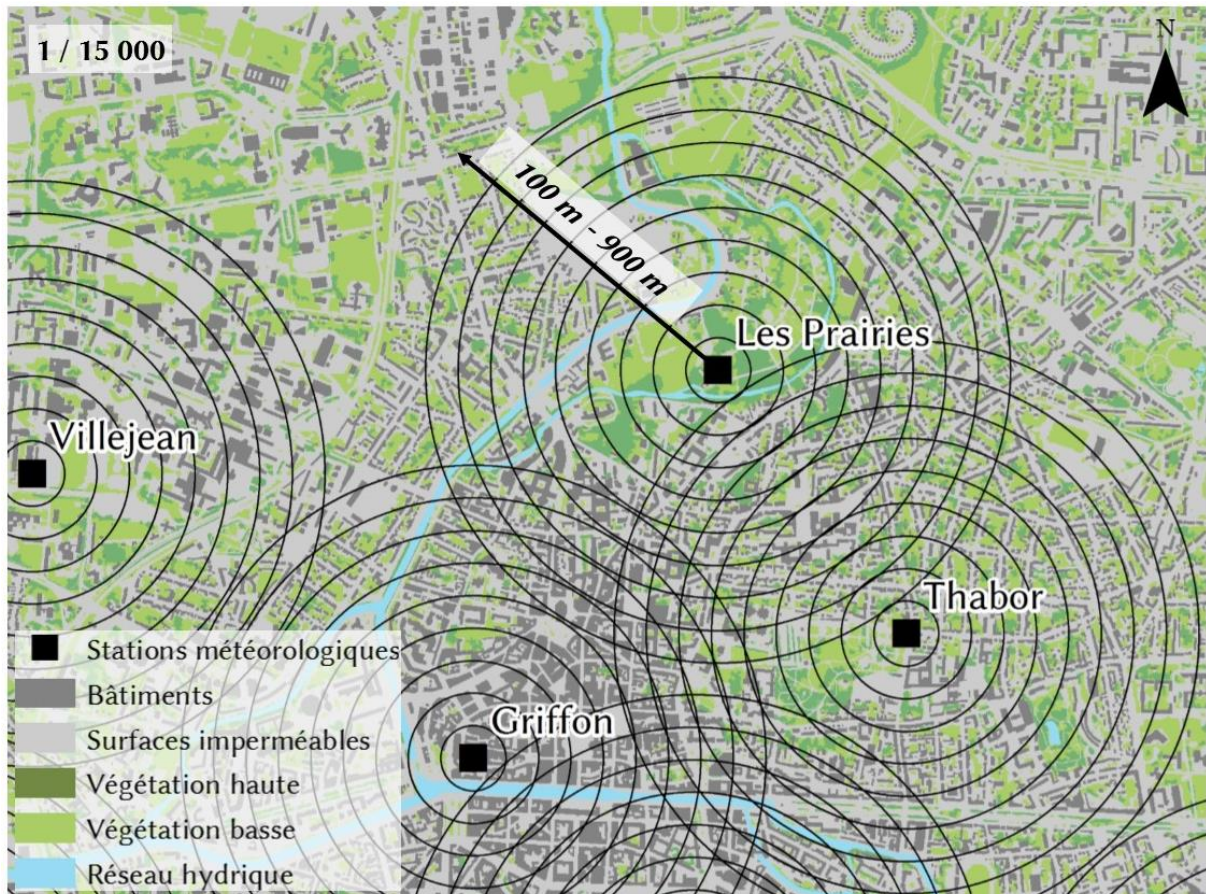


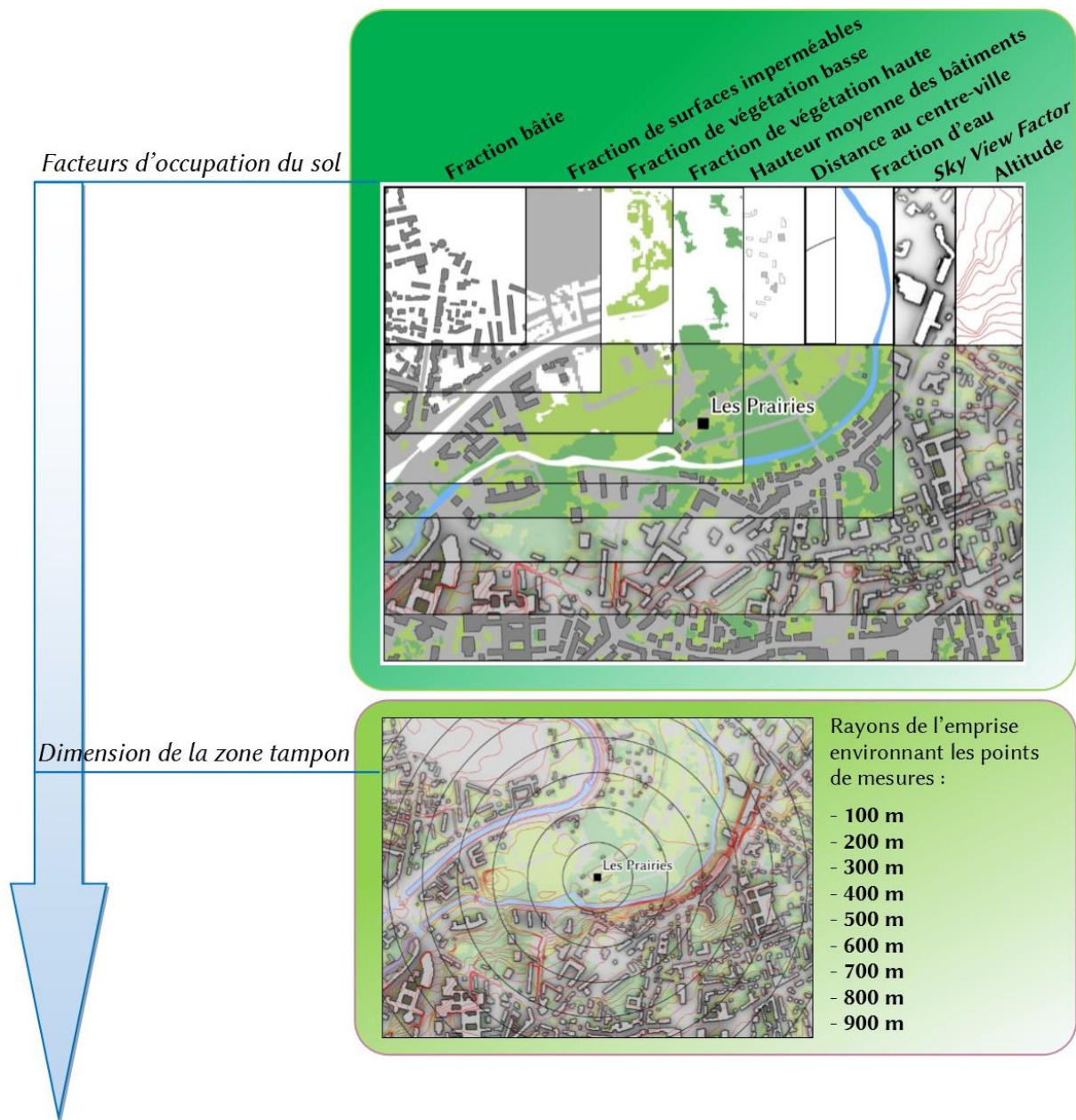
Figure 40, emprises des zones tampons où sont réalisés les traitements statistiques des indices d'occupation du sol pour chacune des stations météorologiques.

La construction des modèles de spatialisation est récapitulée par le schéma de la figure 41. La régression linéaire multiple est une méthode statistique largement employée en géographie, notamment en climatologie aux échelles fines (voir la partie 4.1.1). L'usage de la régression linéaire multiple impose une corrélation entre les variables géographiques (les descripteurs) et la variable à décrire (la température) ; préalablement une hypothèse doit être formulée sur l'établissement des relations entre les variables « explicatives » et la variable « à expliquer » (Carrega 2008b). La régression linéaire multiple est décrite par l'équation (4).

$$Y' = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b \quad (4)$$

Cette équation (4) est définie par la température estimée Y' et les variables géographiques (les régresseurs) notées x_n et les paramètres à déterminer a_n et b . L'équation du nuage de points observée selon les « variables explicatives » est décrite par l'équation (5), où Y correspond à la température observée et ε représente l'ensemble des résidus définis par : $\varepsilon = Y - Y'$.

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + \varepsilon \quad (5)$$



Deux méthodes de construction des modèles de régressions linéaires

A	B
1. Matrice de corrélation	Sélection automatique :
2. Sélection supervisée	méthode exhaustive
⇒ Modèle de régression	⇒ Modèle de régression

Figure 41, schéma de spatialisation à partir de l'analyse de l'occupation du sol appliquée selon deux méthodes : l'une supervisée (en A), la seconde automatisée et exhaustive (en B).

L'usage de la régression linéaire multiple requiert quelques précautions. Ces éléments de contrôles statistiques permettent d'assurer la validité de la régression (Chadule et al. 1987; Carrega 1992; Madelin 2004; Bonnefoy et al. 2013b) :

- Les observations (la température) doivent suivre une loi gaussienne, ce principe est difficilement respecté dans le cas d'un nombre d'observations faible ($n \leq 30$). Au demeurant, le choix d'une répartition spatiale homogène des points de mesures selon le gradient de température issu de l'ICU assure d'une bonne distribution des observations ;
- Les variables descriptives et la variables « à décrire » doivent répondre à une relation linéaire ; au cas où une relation répondant à une autre fonction (exponentielle, logarithmique...) il est possible d'ajuster les paramètres ;
- Les variables explicatives ne doivent pas être colinéaires, c'est-à-dire exprimer la même information. Dans le cas présent, le descripteur n'apporte pas une nouvelle information à la régression. Il est important de s'assurer de leur indépendance. Le nombre de variables pertinentes à conserver pour la régression augmente la part de variabilité expliquée, jusqu'à un seuil où cette part augmente peu à chaque nouvelles variables. P. Carrega estime que le nombre optimal de variables ne dépasse pas 3 ou 4, au-delà la variance n'est expliquée que d'à peine 1%. La significativité de chaque régresseur peut être contrôlée par la corrélation partielle avec la variable dépendante. L'ordre de grandeur des variables entre-elles doit être le même, dans le cas contraire elles sont normalisées ;
- L'analyse des résidus permet d'observer le biais éventuel du modèle. Ainsi il faut s'assurer de l'homoscédasticité et de la normalité des résidus. La régression des résidus avec les variables permet de considérer l'implication de celle-ci sur le biais constaté.

Plusieurs tests de la qualité des modèles sont disponibles. Dans le cas d'une régression à deux descripteurs (X_1 et X_2), la variance est expliquée indépendamment en partie par ceux-ci et une autre part est redondante. Le choix des bons descripteurs est d'obtenir la part maximale de la variance décrite en minimisant cette part commune et redondante de la variance expliquée entre les descripteurs (figure 42). Le coefficient de détermination ajustée (noté R^2_{aj}) tient compte de l'inflation de la variance liée au nombre des descripteurs (contrairement au R^2).

Les critères AIC et BIC (*Akaike Information Criterion* et *Bayesian Information Criterion*) permettent de retenir les modèles avec la plus petite *Somme des Carrés Résiduels* en maximisant la vraisemblance. Ces critères consistent à comparer les modèles entre eux et à conserver celui avec le critère le plus faible. Il est à noter que le critère BIC fonctionne selon le même principe que le critère AIC, cependant il a tendance à sélectionner des modèles plus petits (Akaike 1973; Schwarz 1978; Cornillon and Matzner-Lober 2010).

b) La sélection supervisée

La méthode de sélection supervisée est réalisée par l'analyse des matrices de corrélation des variables descriptives et de la variable « température ». L'évaluation de l'intensité de la liaison entre les variables est définie par le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson (noté r). A partir de cette matrice, la variable la plus corrélée avec la température est retenue puis les suivantes sont sélectionnées selon le degré de corrélation le plus élevé avec la

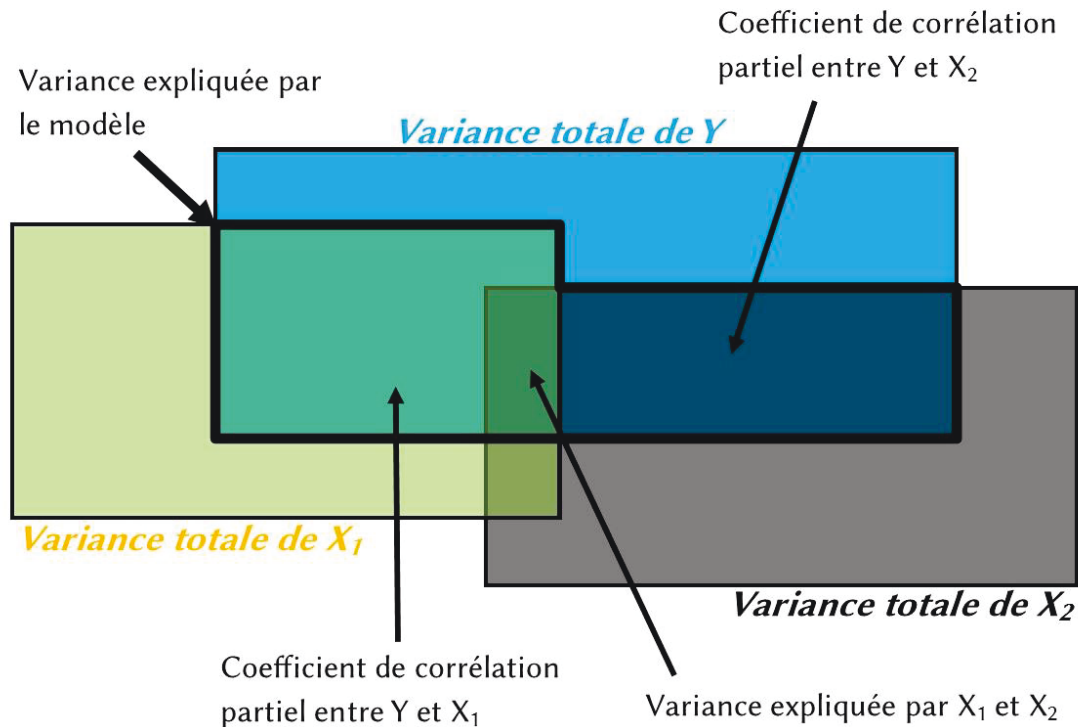


Figure 42, schéma récapitulatif de la variance de chaque élément : de l'observation à la modélisation, adapté du Groupe Chadule.

température tout en minimisant la corrélation avec la première variable. Puis une troisième variable peut être également retenue dans les mêmes conditions.

Un contrôle de l'apport de la part de variance expliquée par chaque nouvelle variable est réalisé : le coefficient R^2_{aj} du modèle augmente-t-il significativement ? Les coefficients dans la régression de chaque variable sont-ils cohérents avec la relation attendue avec la température ? Par exemple, la fraction de végétation en ville est proportionnellement inverse avec le gradient de température, plus la végétation est présente, plus la température est faible Le signe attendu du coefficient de la fraction de végétation dans l'équation finale de la régression est négatif.

Le test de Fisher-Snedecor permet de connaître la significativité du modèle pour un risque d'erreur défini (par défaut 5%). La p -value $Pr(>/t/)$ associée précise le degré de pertinence de la régression et de chaque coefficient, ce qui permet la détection d'une variable superficielle. Comme décrit précédemment, le contrôle de la distribution des résidus est essentiel pour déceler les biais éventuels du modèle. Cette méthode permet de connaître les corrélations statistiques entre l'ICU et les combinaisons pertinentes des facteurs d'occupation du sol et leurs limites. Cependant, un nombre limité de régression peuvent être construite car le temps de traitement peut s'avérer fastidieux.

c) La sélection automatique : la procédure de sélection exhaustive

L'automatisation est réalisée à l'aide du logiciel R et des bibliothèques suivantes : *gdal* (Geospatial Data Abstraction Library), *raster*, *MASS* (Modern Applied Statistics with S) et *leaps* (R Core Team 2014). Deux niveaux dans le processus d'automatisation sont à distinguer la sélection automatisée de variables (abordée ici) et la spatialisation des températures par l'application de la régression retenue (développée dans la partie suivante, 4.2.3 L'application de

la régression par « fenêtres glissantes »). Plusieurs méthodes de sélection de modèles sont disponibles dont les procédures peuvent utiliser les critères AIC, BIC R^2_{aj} ou le test F de Fisher-Snedecor :

- La recherche pas à pas : la méthode ascendante (forward). Cette méthode ajoute une nouvelle variable à chaque pas. L'ajout de chaque nouvelle variable dans le modèle est réalisé par comparaison à l'ajout distinct de chaque variable disponible. Puis l'ajout au modèle d'une nouvelle variable s'interrompt quand il n'y a plus d'apport à la régression selon le critère de choix ;
- La recherche pas à pas : la méthode descendante (backward). La procédure est inverse à la méthode précédente, l'ensemble des variables est déjà ajouté à la régression puis les variables sont soustraites une à une selon un critère de sélection. Si le retrait de la variable n'entraîne pas une diminution significative du critère du modèle, la procédure continue ;
- La recherche pas à pas : la méthode mixte (both ou stepwise). Elle fonctionne selon la même procédure que la méthode ascendante sauf qu'elle élimine les variables qui sont devenues peu significatives (après le nouvel ajout).
- La recherche exhaustive. Comme son titre l'indique, elle explore l'intégralité des combinaisons possibles de variables et les compare et les trie selon le critère de sélection. La méthode s'avère gourmande en puissance de calcul si le nombre de variable est important car 2^p-1 modèles sont possibles (pour p = nombre de variables), soit dans notre cas 2^7-1 régressions à comparer. Cependant l'élimination préalable de variables peu corrélées et la restriction d'un nombre limité de descripteurs ($p \leq 3$) allège considérablement la procédure.

La méthode de recherche pas à pas est utilisée pour la sélection de variables supervisée et automatique. La procédure *stepwise* est retenue car elle s'avère plus complète dans l'analyse de la significativité de l'apport de chaque variable. Cette méthode, peu consommatrice en temps de calcul, est employée également pour la sélection de variables supervisées afin de comparer les résultats et d'ajuster la sélection des descripteurs.

La procédure *stepwise* est employée à l'aide de la fonction *stepAIC()* avec le logiciel R permettant d'utiliser les critères AIC et BIC de sélection. Le choix opéré par cette procédure est contrôlée par l'analyse des corrélations entre les variables, cependant le nombre de variables retenues peut s'avérer surnuméraire ($p \geq 4$).

Le choix de la méthode de recherche exhaustive bénéficie d'un compromis entre une évaluation complète des variables et contraindre la sélection d'un nombre de variables cohérent par l'intrication importante des facteurs d'occupation du sol entre eux. L'outil *regsubsets()* est utilisé, le choix du nombre final de variables retenues dans la régression peut ainsi être paramétré ainsi que le résultat graphique du classement des modèles possibles. Cette méthode permet d'automatiser la procédure de sélection des variables et d'appliquer les régressions pour la spatialisation pour plusieurs dates (heures, jour, mois, saison et année).

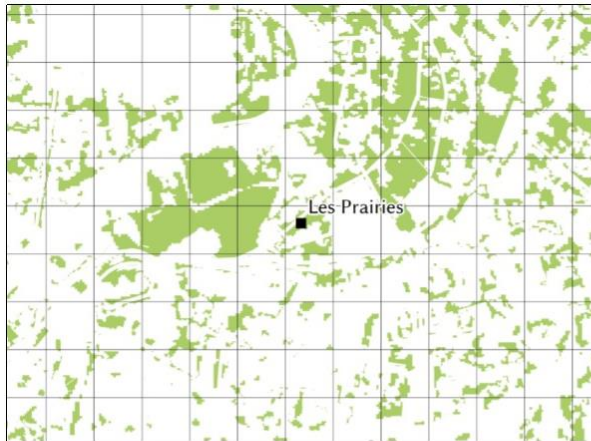
4.2.3. L'application de la régression par « fenêtrages glissants »

Les régressions obtenues précédemment sont appliquées maille par maille afin de spatialiser les températures correspondants à l'ICU. La maille retenue à l'échelle de l'agglomération est de 100 m x 100 m, considérant que la variabilité à l'échelle locale correspondante à l'échelle de mesure est constituée par cette unité spatiale de 1 ha. La surface du territoire de Rennes Métropole est d'environ 900 km², soit 90 000 mailles. La mise en place de la régression est réalisée par « fenêtrages glissants », les zones tampons de chaque variable retenue sont appliquées avec le coefficient défini lors de la régression.

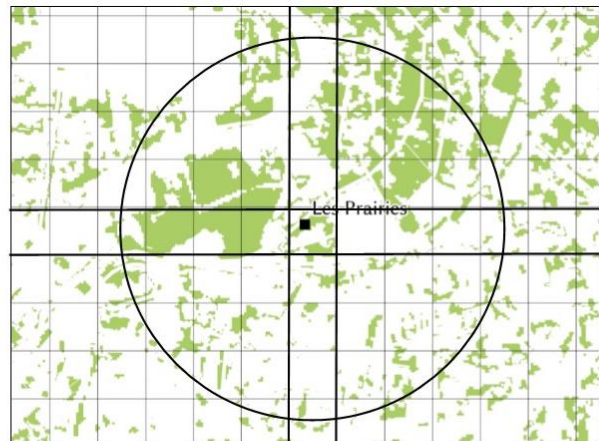
Les couches rasters correspondant aux facteurs d'occupation du sol sont construites selon le schéma de la figure 43, à l'aide du logiciel ArcGis©. La première étape est d'appliquer le maillage sur l'ensemble de la couche d'occupation du sol, puis de calculer la fraction d'occupation du sol dans la zone tampon définie et d'attribuer cette valeur à la maille. De proche en proche, le raster d'occupation du sol pour une zone tampon prédéfinie est constitué. Ce procédé est appliqué pour l'ensemble des zones tampons de rayon 100 m à 900 m, constituant un catalogue de 74 rasters.

Après la sélection de la régression pour la spatialisation (par la méthode supervisée A ou la sélection automatique B), les variables retenues sont extraites parmi le catalogue de rasters produits (figure 43). Les coefficients de détermination issus de la régression sont appliqués pour les variables retenues. L'exemple de la figure 44 indique le cas où deux variables explicatives sont employées, les coefficients a_1 , a_2 et b sont appliqués maille par maille. Cette étape de la spatialisation est réalisée selon la méthode de sélection du modèle A ou B : dans le cas de la méthode A la spatialisation est appliquée à l'aide de l'outil ArcGis « manuellement » et dans le cas de la méthode B cette étape est incluse dans la chaîne de traitement automatisée sous R à l'aide de la librairie *gdal*.

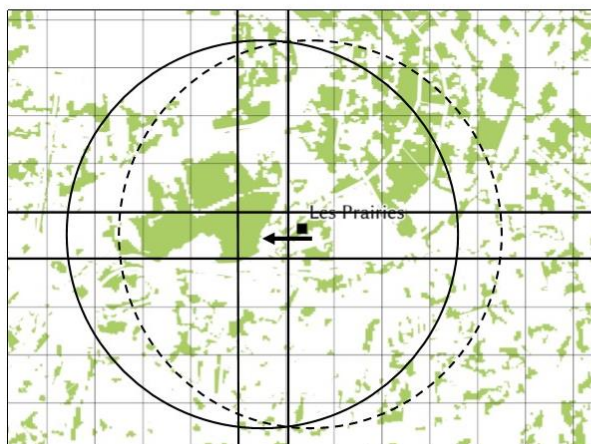
Les travaux d'automatisation de la méthode de spatialisation sont menés conjointement avec la méthode de spatialisation des températures à l'échelle du terroir viticole (échelles fines) du programme TERVICLIM (Quénol 2012b). Préalablement, l'automatisation de la méthode de spatialisation a été initiée au cours des travaux de C. Bonnefoy pour la spatialisation des températures à l'échelle des parcelles viticoles dans le cadre de sa thèse (Bonnefoy 2013; Bonnefoy et al. 2013b). L'analyse spatiale aux échelles fines et la sélection des variables pour la construction d'un modèle de spatialisation des températures est commune pour plusieurs aspects selon la thématique (urbaines, viticoles...). Bien évidemment une adaptation est nécessaire, par l'usage d'indices spécifiques et la cohérence avec les hypothèses de départ. Dans le cas du milieu urbain, la création de descripteurs morphologiques et multiscalaires constituent un atout pour la spatialisation de l'ICU.



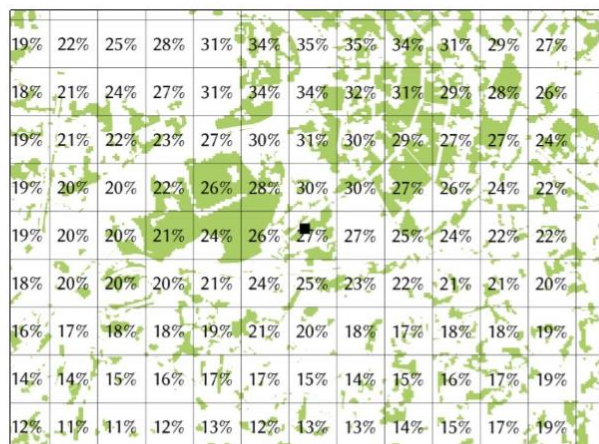
1. Sélection de la couche d'occupation du sol à traiter : fraction de végétation basse / mailles (résolution 100 m x 100 m).



2. Attribution de la valeur à la maille : valeur moyenne de la fraction de végétation basse dans un rayon de 400 m.

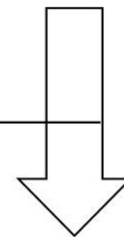


3. Puis attribution de la valeur à la maille voisine.



4. De proche en proche, le traitement terminé produit un raster de la fraction de végétation basse dans un rayon de 400 m.

Dimension de la zone tampon	Occupation du sol
100 m - 900 m	Fraction de bâtie, surfaces imperméables, en eau, de la végétation totale, végétation haute, végétation basse ; la hauteur moyenne des bâtiments ; la distance au centre-ville ; l'altitude.



5. Le traitement est effectué pour l'ensemble des indices et facteurs d'occupation du sol pour chaque zone tampon.

x74

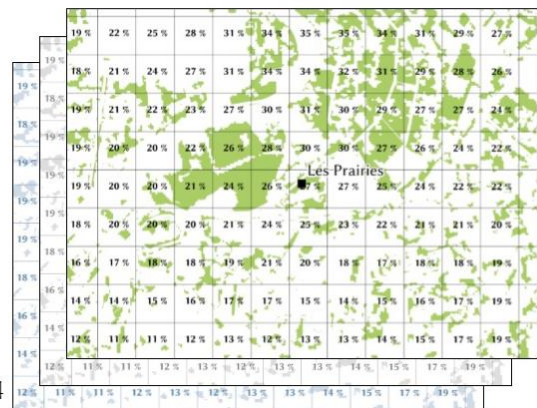


Figure 43, schéma de constitution des rasters des facteurs d'occupation du sol.

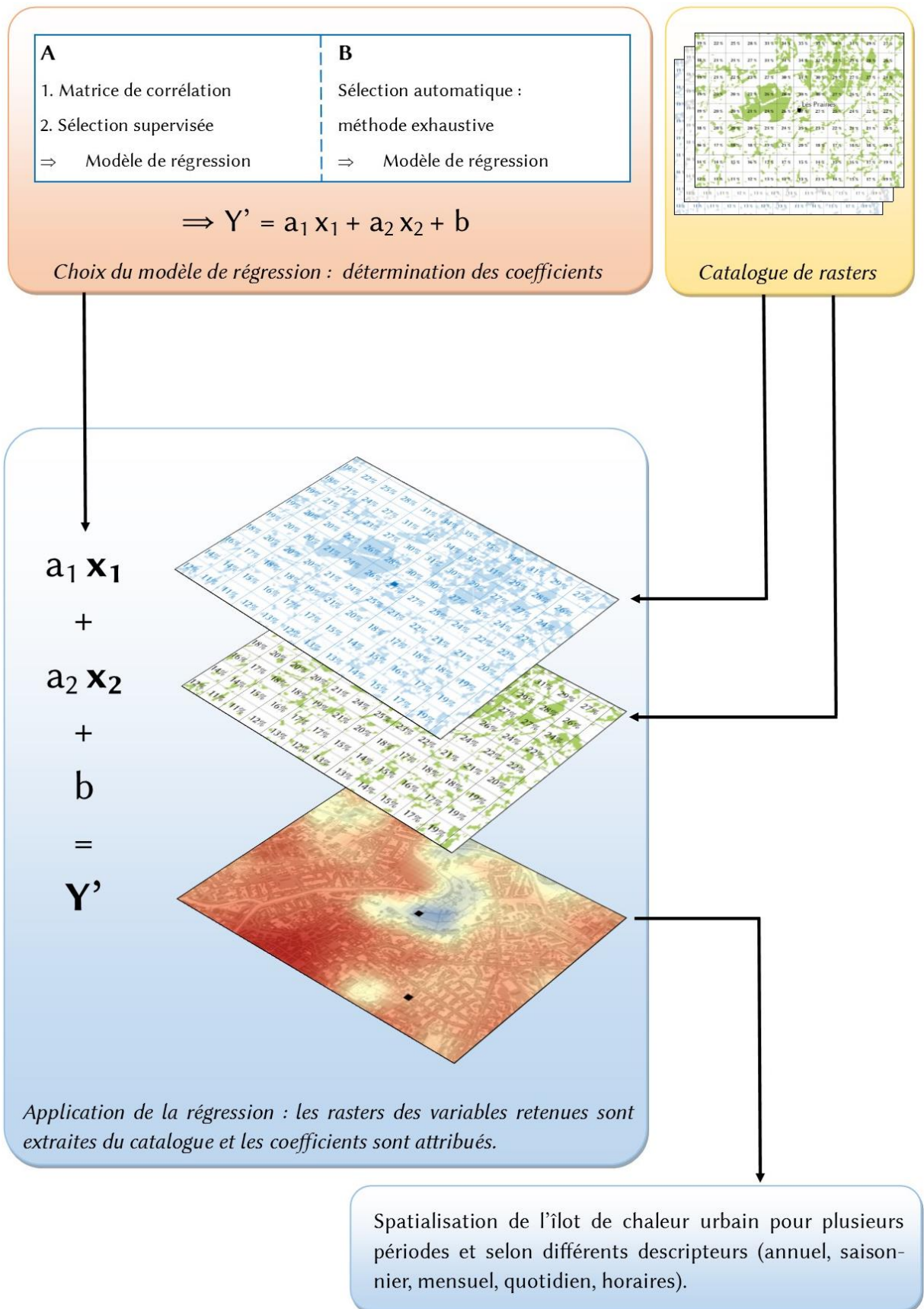


Figure 44, schéma de l'application de la régression : exemple de spatialisation avec deux variables descriptives retenues.

4.3. L'îlot de chaleur urbain : de l'échelle de l'agglomération à l'échelle intra-urbaine

L'analyse spatiale est réalisée selon une seconde échelle : l'échelle intra-urbaine. Celle-ci est étudiée dans un second temps après l'analyse à l'échelle de l'agglomération. La superficie de l'espace intra-urbain est de 90 km² contre 711km² pour l'agglomération. Deux réseaux de mesures sont exploités pour la spatialisation à l'échelle intra-urbaine : le premier réseau est une sélection des stations météorologiques et le second réseau complète ces stations par des capteurs de température à l'occasion d'une campagne de mesures ponctuelle. L'analyse spatiale intra-urbaine a pour objectif d'observer la variabilité entre les quartiers et de distinguer les éléments influant sur l'îlot de chaleur à cette échelle. Le gradient ville-campagne est pris en compte par le réseau de stations météorologiques (22 stations), les capteurs et la sélection de stations météorologiques comprise dans le milieu intra-urbain permettent d'apporter une cartographie plus fine de l'ICU.

4.3.1. Le réseau de stations intra-urbaines : 13 stations météorologiques retenues

A partir du réseau de 22 stations météorologiques, une sélection de 13 stations définies comme « urbaines » sont retenues. Le choix de ces stations est réalisé par leur emplacement dans la tache urbaine rennaise, c'est-à-dire dans le tissu urbain continu. Plusieurs communes sont comprises dans cet espace : Rennes, Saint-Grégoire, Cesson-Sévigné, Chantepie et Saint-Jacques-de-la-Lande. Une méthode spatiale précise pour définir cette aire à l'aide d'un SIG est de déterminer une zone tampon autour des bâtiments puis d'agréger cette zone. L'enveloppe est ensuite restreinte par l'extraction autour de cet espace. La tache urbaine obtenue inclue l'ensemble des stations météorologiques urbaines installées dans cet espace où le tissu urbain est continu.

La méthode de spatialisation est ensuite appliquée sur l'ensemble de l'aire (hachurée) en figure 45. Les indices notamment le *Sky View Factor* (SVF) sont calculés sur l'ensemble de cette aire, constituant un catalogue de raster pour l'application des régressions obtenues. Cependant les indices créés par « fenêtre glissantes » sont définis à une résolution de 30 m. L'indice SVF est donc uniquement utilisé à cette échelle d'analyse car la variabilité extra-urbaine n'apporte pas une information pertinente au regard du temps de calcul requis pour déterminer l'indice à l'échelle de l'agglomération.

Comme détaillé précédemment (*cf. 4.2 Spatialisation par la méthode multicritère : la régression linéaire multiple*), l'analyse spatiale est réalisée à partir des zones tampons des stations intra-urbaines. Puis, les régressions construites sont appliquées sur l'aire intra-urbaine à une résolution de 30 m, composant un raster de 36 603 pixels. Cette méthode de régression locale avec une sélection restrictive des stations météorologiques permet d'obtenir une meilleure cohérence spatiale des modèles avec cependant une limite liée au faible nombre d'observations réduisant la robustesse du modèle (Joly et al. 2007).

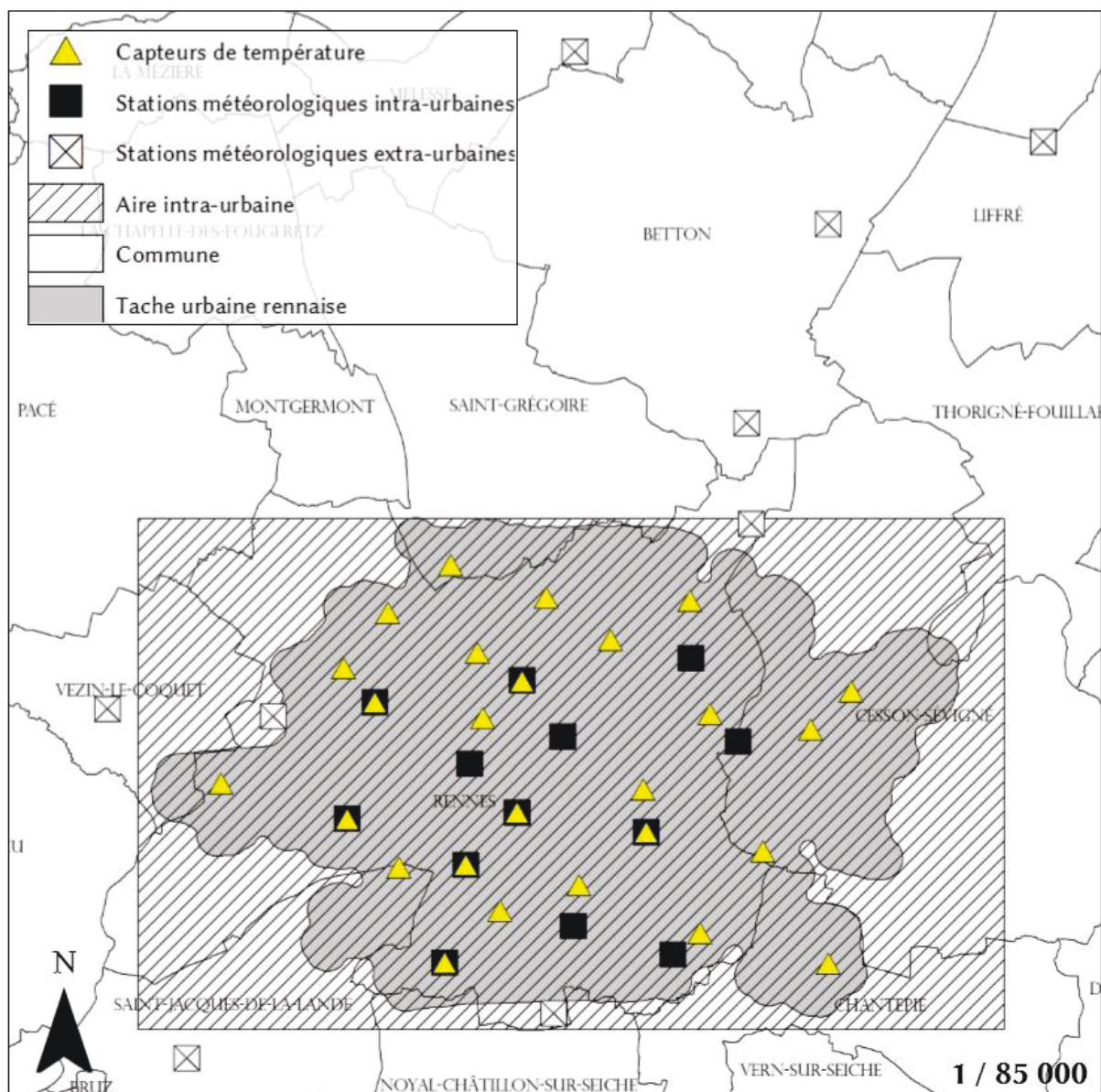


Figure 45, carte des stations et capteurs retenus pour la spatialisation à l'échelle intra-urbaine à Rennes.

4.3.2. La campagne de mesures intra-urbaine de l'été 2013 : 23 points de mesures

Afin de mieux prendre en compte la variabilité spatiale de l'ICU dans le milieu intra-urbain et de combler les lacunes liées au faible nombre de points d'observation, une campagne de mesures est réalisée durant l'été 2013 (cf. chapitre 3.3.1). 20 nouveaux capteurs de température sont installés et intégrés au réseau de stations météorologiques mesures urbaines. L'ensemble des points d'observation valide pour la spatialisation sont au nombre de 23. L'analyse spatiale est réalisée puis à partir des différents descripteurs retenus, les régressions sont appliquées sur l'aire intra-urbaine. Cette campagne de mesures permet d'évaluer les différents modèles de régression selon différentes typologies de quartiers rencontrés et, par exemple, de connaître la capacité d'un modèle à prévoir un îlot de fraîcheur en ville.

Conclusion du chapitre 4

La méthode de spatialisation développée est une méthode multicritère par régression linéaire multiple. Plusieurs variables d'occupation du sol sont retenues pour décrire la variabilité spatiale de l'ICU : la fraction bâtie, la fraction de surfaces imperméables, la fraction de végétation haute (arbres), la hauteur moyenne des bâtiments, l'altitude, la distance au centre-ville, la fraction d'eau. La variabilité de l'aire de représentativité des stations météorologiques est prise en compte par le calcul des fractions d'occupation du sol selon des zones tampon variant de 100 m à 900 m. Des indices spécifiques sont employés afin de décrire la morphologie urbaine : l'effet de canyon par le *Sky View Factor* et des indicateurs morphométriques décrivant la végétation.

L'observation de l'ICU par le réseau de stations météorologiques est établie par les écarts de température minimale avec la station rurale *Melesse*. L'ICU (maximal) quotidien correspond à l'écart de température minimale entre la station située dans le centre-ville *Griffon* et *Melesse*.

La spatialisation est réalisée en deux étapes. La première étape consiste à l'analyse statistique des variables d'occupation du sol et la sélection des variables les plus pertinentes afin de constituer le modèle de régression. Puis la seconde étape correspond à l'application du modèle de régression par fenêtre glissantes. Cette méthode de spatialisation est élaborée pour le réseau de stations météorologiques à l'échelle de l'agglomération. Cependant la campagne de mesures réalisée dans le milieu intra-urbain ouvre la perspective d'une spatialisation à l'échelle des quartiers. Deux échelles emboîtées de spatialisation de l'ICU sont prises en compte par la méthode décrite dans ce chapitre.

Chapitre 5 : Cartographie de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle de l'agglomération

Ce chapitre a pour objet la spatialisation de l'ICU à partir du réseau de stations météorologiques installé dans l'agglomération rennaise (*cf.* chapitre 3.2). Ces 22 stations sont dans un premiers temps contrôlées et complétées de lacunes éventuelles sur l'ensemble des jours de l'année 2011. Puis, une classification statistique des stations est réalisée à partir des températures minimales, afin d'évaluer la relation entre la température observée par la station et l'espace géographique de celle-ci. Ces étapes préliminaires permettent de distinguer les sites particuliers du réseau de mesures.

La méthodologie développée dans le chapitre 5 est appliquée dans ce chapitre. La première étape consiste à analyser les variables d'occupation du sol identifiées dans le chapitre 5 avec l'ICU observé en 2011. Plusieurs sélections de variables d'occupation du sol sont réalisées selon plusieurs méthodes de sélections (supervisées et exhaustives) afin de comparer les modèles retenus. La méthode est appliquée et plusieurs cartes d'ICU sont produites pour plusieurs intervalles de temps. Les structures spatiales de l'ICU obtenu sont analysées, mais également les biais et les limites du modèles. La question de la variabilité saisonnière de l'ICU est abordée à l'issue de ce chapitre.

5.1. Travaux préalables de reconstitutions des lacunes aux séries de température minimale de l'année 2011

L'analyse spatiale de l'ICU est réalisée à partir des écarts de températures minimales observées entre la station rurale *Melesse* et les autres stations météorologiques (*cf.* chapitre 4.1.2). L'année 2011 est retenue pour l'analyse car les données sont moins lacunaires sur l'ensemble du réseau de stations (moins de 15 % des enregistrements manquant). Dans un premier temps, les séries sont complétées afin de pouvoir réaliser une analyse saisonnière complète. Puis à partir de l'analyse de la relation entre les facteurs météorologiques et l'intensité de l'ICU (*cf.* chapitre 7.2.2), les nuits avec un ICU marqué ou intense sont identifiées. Ces séries complétées sur l'ensemble des stations météorologiques sont exploitées pour l'analyse spatiale et la construction de modèle de spatialisation.

Pour de multiples raisons, les enregistrements peuvent s'avérer incomplets ou inexploitable (batteries faibles, vandalisme...). Ces lacunes peuvent entraver la détermination de la température minimale et donc la mesure de l'ICU. La méthode établie porte sur

Stations météorologiques	Série complète (%)	Station associée (variable explicative)	R ² ajusté (par régression linéaire)
Griffon	100		
Melesse	100		
Binquenais	100		
Villejean	100		
Thabor	100		
Poterie	100		
Gallets	100		
Cimetière de l'Est	100		
St Jacques	100		
<i>Champeaux</i>	98	Villejean	0,96
<i>Cleunay</i>	94	Villejean	0,99
<i>Morinais</i>	92	La Lice	0,99
<i>Veziin Le Coquet</i>	87	La Lice	0,98
<i>Savio</i>	86	Morinais	0,99
<i>La Lice</i>	84	Morinais	0,99
<i>Square Villeneuve</i>	84	Thabor	0,99
<i>Forêt</i>	61	Gallets	0,98
<i>Beaulieu</i>	60	Binquenais	0,99
<i>Bréquigny</i>	55	Cleunay	0,99
<i>Ecomusée</i>	55	Poterie	0,97
<i>Les Champs Libres</i>	52	Square Villeneuve ; Griffon	0,99
<i>Les Prairies</i>	44	La Lice	0,97

Tableau 2, proportion de séries complètes et station météorologique utilisée pour la reconstitution des données manquantes par régressions linéaires.

l'observation de la température minimale sur l'ensemble des stations météorologiques afin d'établir la proximité statistique des stations. Les lacunes les plus importantes concernent 6 stations météorologiques avec 44% à 61% des données complètes et pour 7 stations 84% à 98% des données sont disponibles (tableau 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Dans un premier emps une matrice de corrélation est réalisée afin de définir le degré de proximité des stations. Puis pour chaque station présentant des séries incomplètes, la station la plus proche (au regard de leur variabilité) est retenue pour compléter le jeu de données manquant par régression linéaire.

Les stations incomplètes (en italique sur le tableau 2) sont associées à une station à partir des matrices de corrélation. Afin d'illustrer la méthode, la température des stations *Les Prairies* et *Les Champs Libres* est comblée. La température minimale observée par la station *Les Prairies* (située dans un parc en ville) est corrélée avec la station *La Lice* (placée dans la campagne avoisinante), avec R=0,99. La régression linéaire est réalisée avec les températures minimales observées, ce qui permet d'obtenir l'équation suivante :

$$Tn_{Les Prairies} = 0,81 + 0,97 \times Tn_{La Lice}$$

Ce modèle de régression explique pour 108 observations la variabilité de la température minimale sur le site *Les Prairies*, selon un R²ajusté=0,97 avec une RMSE=0,66. La régression appliquée permet de modéliser la température minimale manquante de cette station pour 205 journées. Cette méthode est employée pour l'ensemble des stations présentant des lacunes, avec une exception pour le cas de la station *Les Champs Libres* où deux régressions linéaires ont été utilisées pour combler l'intégralité des lacunes. La première régression est réalisée avec la station du *Square Villeneuve* (située à proximité du centre-ville) avec 137 observations, pour un R²ajusté=0,99 et une RMSE=0,27, dont l'équation est la suivante :

$$Tn_{Les Champs Libres} = 0,88 + 0,98 \times Tn_{Square Villeneuve}$$

Cette première régression est utilisée pour combler 167 journées, cependant pour couvrir intégralement les données manquantes (9 journées restantes) il est nécessaire d'utiliser une seconde station en centre-ville, la station *Griffon*. Pour cette régression, la variabilité est également bien prise en compte ($R^2_{\text{ajusté}}=0,99$ et $RMSE=0,34$), dont l'équation est la suivante :

$$Tn_{\text{Les Champs libres}} = 0,07 + 0,99 \times Tn_{\text{Griffon}}$$

A l'aide de cette méthode les 13 stations présentant des lacunes sont complétées afin de pouvoir calculer les moyennes saisonnières ou mensuelles de l'ensemble du réseau de mesures.

5.2. Classifications climatique et géographique des stations météorologiques

5.2.1. CAH des températures minimales en 2011

Dans un premier temps, les stations sont classées selon une CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) suivant la méthode de Ward par une métrique de type distance euclidienne (dissimilarités). La première classification est réalisée à partir des températures minimales observées en 2011, soit pour 8030 observations pour 22 stations. La partition est effectuée en 3 classes, ce qui permet d'expliquer 62% de la variance totale (figure 46).

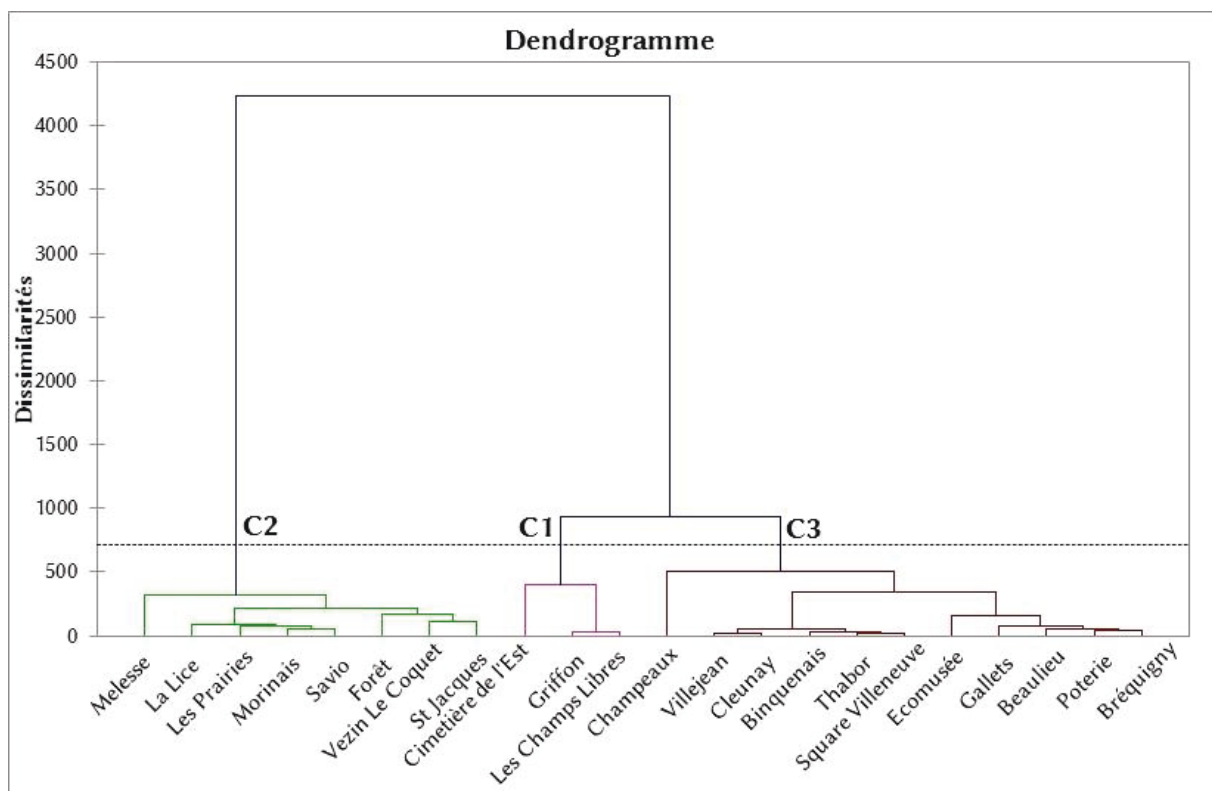


Figure 46, dendrogramme de la CAH des Tn observées par les stations météorologiques à Rennes en 2011. La CAH distingue trois classes : C1 (assimilée à l'espace urbain), C2 (assimilée à l'espace périurbain) et C3 (assimilée à l'espace suburbain).

A l'issue de la CAH, la classe 1 (notée C1) correspond aux sites « urbains », la deuxième classe (C2) concerne les stations « périurbaines » et enfin, la troisième classe (C3) rassemble les stations « suburbaines » (voir la figure 47). Nous pouvons constater la proximité plus importante

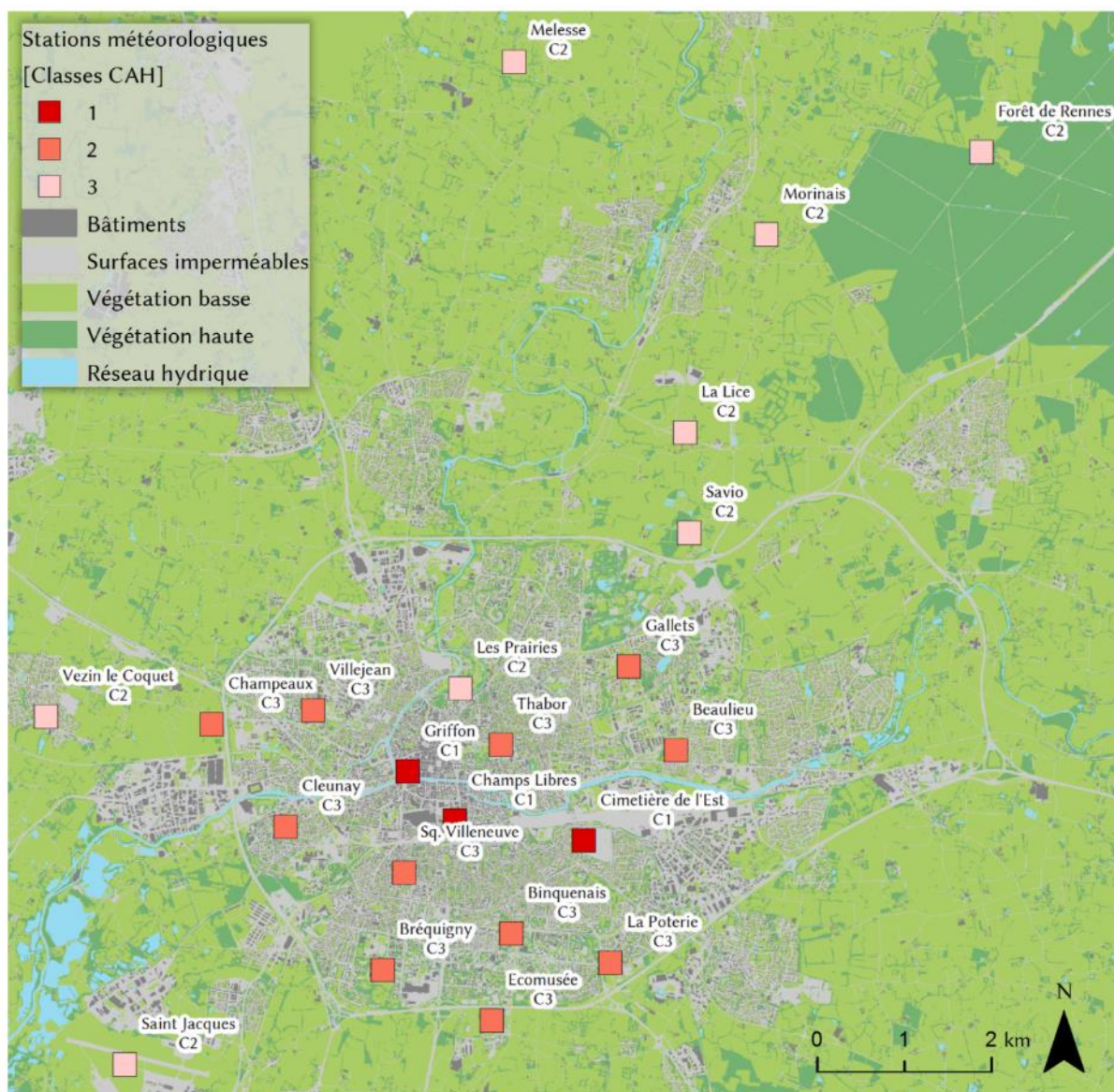


Figure 47, réseau de stations météorologiques à Rennes. Les classes (Cx) sont issues de la CAH réalisée à partir des Tn observée en 2011.

entre les classes regroupant les stations en ville C1 et C3 que les stations en périphérie de la classe C2. Cette partition des stations correspond en grande partie aux espaces définis précédemment (cf. chapitre 3.2.1), cependant des différences apparaissent.

La station *Les Prairies* est identifiée comme appartenant à la classe des stations périurbaines C2 alors qu'elle est située aux abords du centre-ville dans un parc urbain. La particularité de ce site urbain est présenter une proximité climatique avec les stations en milieu rural, ce site constitue une exception au sein du réseau de mesures. Parmi les stations périurbaines, la station de *Vezin Le Coquet* est classée C3 donc proche des stations suburbaines selon la partition de la CAH. Inversement, les stations *Champeaux* et *Ecomusée* placées en limite de la tache urbaine (identifiées dans l'espace périurbain) sont associés aux stations de la classe C3 (assimilée suburbaine) par la CAH. Les stations *Thabor* et *Square Villeneuve* qualifiées urbaines sont deux parcs en ville dont la CAH les associe à la classe C3 (assimilée suburbaine). La station *Cimetière de l'Est* (dont la typologie appartient à l'espace suburbain) est identifiée par la CAH comme plus semblable aux stations urbaines de la classe C1.

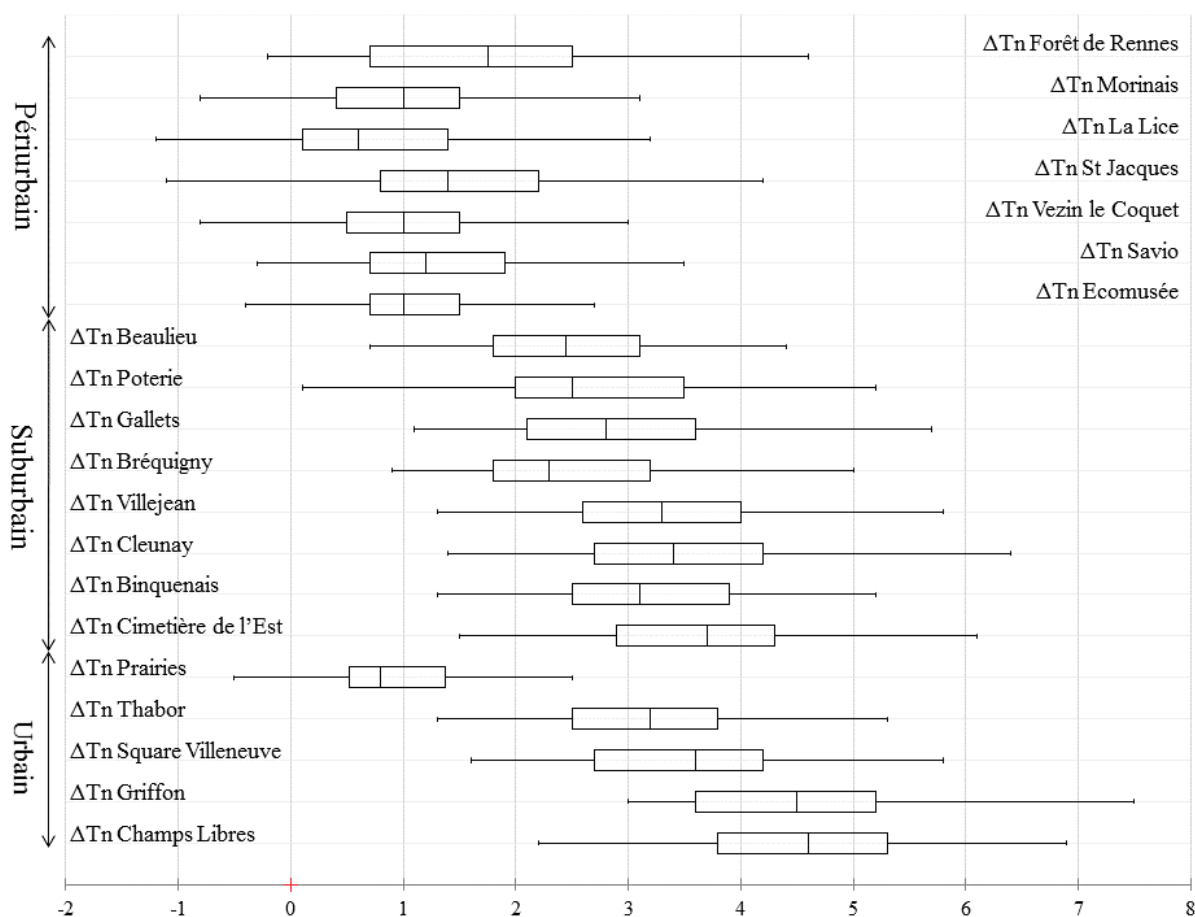


Figure 48, distributions des écarts des températures minimales (°C) avec la station rurale Melesse en présence de l'ICU en 2011. Choix des quantiles : Q1=25% ; Q2 = 50% et Q3=75%.

5.2.2. CAH des stations météorologiques en situation d'ICU à Rennes

Dans un second temps, une CAH est réalisée à partir des températures minimales observées en condition d'ICU en 2011, ce qui correspond à 89 journées, donc 1958 observations (cf. chapitre 7.2.2). La distribution des écarts de températures minimales avec la station rurale *Melesse* est représentée par la figure 48. Il s'avère que la variabilité de l'intensité de l'ICU par station est importante, l'écart-type moyen est d'environ 1°C. Le gradient de température du centre-ville vers la périphérie est mis en évidence selon les trois espaces suivants : urbain, suburbain et périurbain. Cependant, des disparités sont présentes au sein de ces groupes montrent les particularités de certain site de mesure. La sélection des journées, où l'ICU est considéré comme présent car les conditions météorologiques sont réunies, permet d'écarter les autres situations résultant de phénomènes autres que l'ICU. Cette seconde CAH discrimine les sites de mesures exclusivement selon l'ICU.

Il apparaît que cette seconde CAH permet d'expliquer 72% de la variance (contre 62% pour la première). De même que pour la CAH réalisée précédemment, la classification diffère avec la typologie des quartiers pour quelques stations de la partition. Ces stations identifiées dans une autre classe sont les mêmes pour la CAH précédente : *Les Prairies*, *Vezin Le Coquet*, *Champeaux*, *Thabor* et *Square Villeneuve*. Cependant deux exceptions apparaissent, la station *Cimetière de l'Est* définie comme un site urbain en C1 est cette fois-ci identifiée comme une station suburbaine (C2) comme caractérisée initialement par la typologie de quartier. De même,

la station *Ecomusée* est également identifiée cette fois-ci par la CAH en classe C2 (périurbaine) comme l'indique sa typologie définie à l'origine.

A partir de cette CAH, deux sous-classes issues de C3 sont distinguées (figure 49) : C3a et C3b. C3a regroupe des stations suburbaines plus chaudes que C3b, la Tn moyenne est de 9,1°C contre 8,3°C en condition d'ICU en 2011. L'ensemble des classes obtenues par la CAH ont une cohérence spatiale visible sur la figure 50. Les stations C1 sont localisées dans le centre-ville, ce sont les sites les plus chauds avec Tn=10,2°C. Puis autour du centre-ville, les stations C3a sont disposées en formant une première ceinture, dont celle-ci est à son tour entouré par les stations C3b. Enfin les stations C2 sont présentes en dehors la tache urbaine rennaise, elles constituent les stations les plus fraîches avec en moyenne Tn=6,8°C. Seule la station *Les Prairies* apparaît classée en C2, constituant une anomalie fraîche en ville.

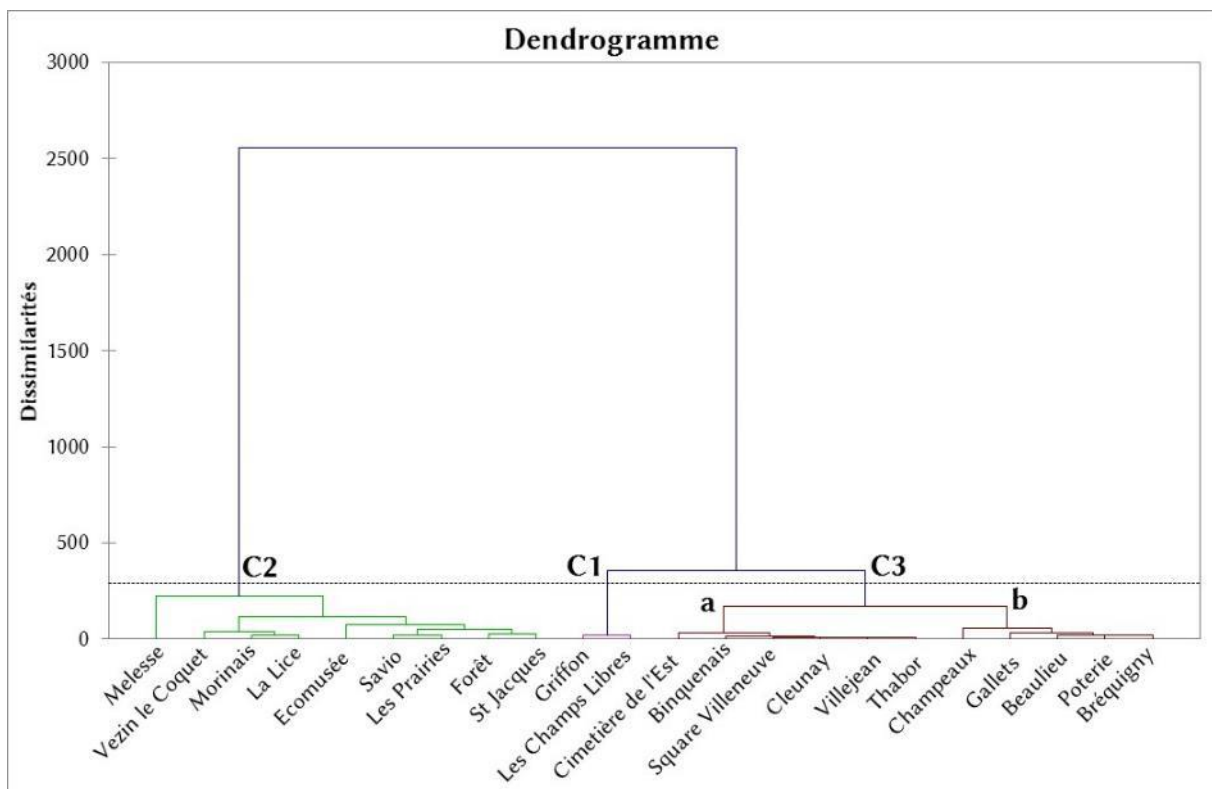


Figure 49, dendrogramme de la CAH des Tn observées en condition d'ICU par les stations météorologiques à Rennes en 2011. La CAH distingue trois classes : C1 (assimilée à l'espace urbain), C3 (assimilée à l'espace suburbain) et C2 (assimilée à l'espace périurbain) composée de deux sous-classes a et b

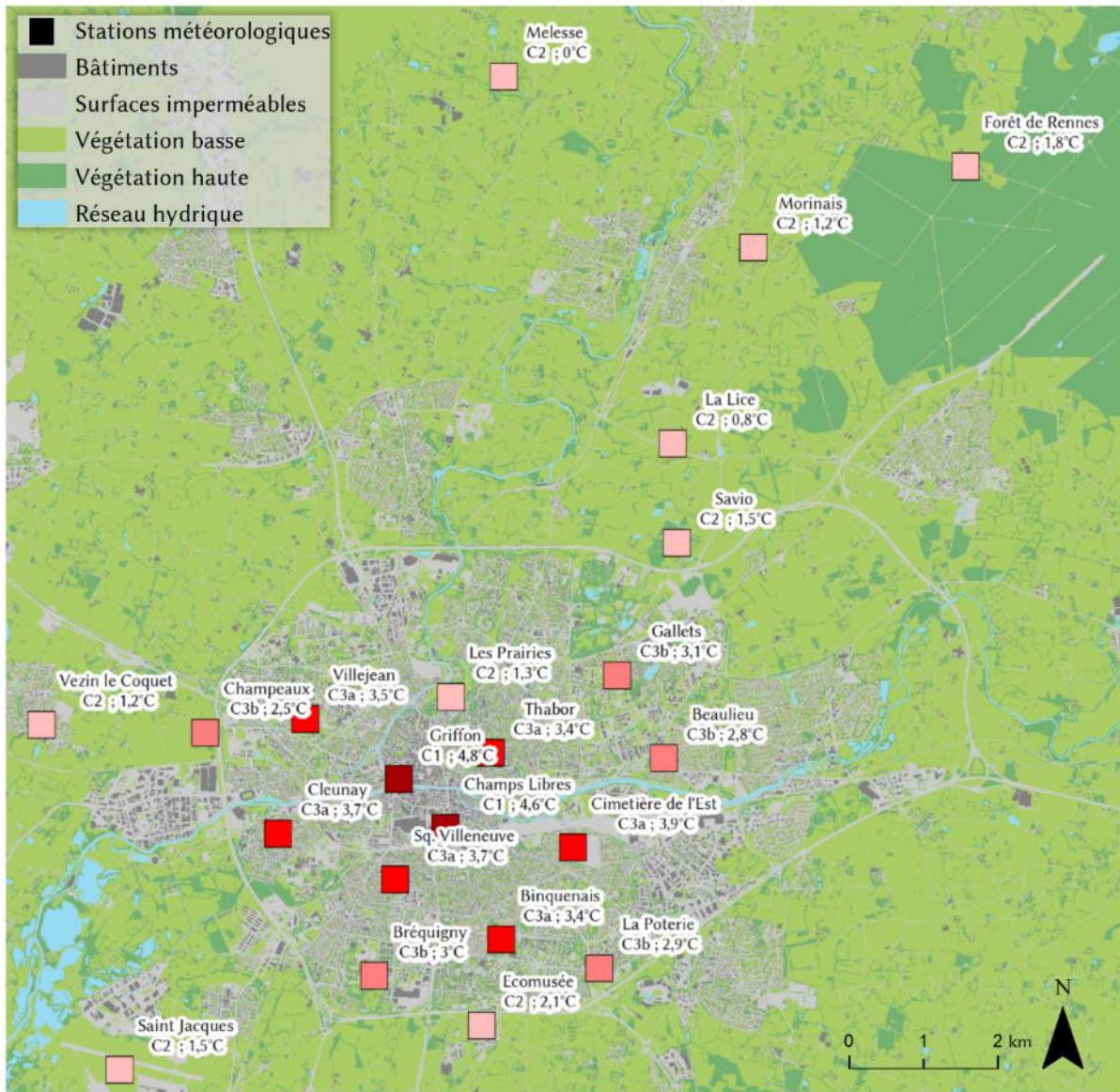


Figure 50, réseau de stations météorologiques à Rennes en 2011. Les classes (Cxx) sont issues de la CAH réalisée à partir des Tn observée en condition d'ICU. Ecarts des Tn moyenne observée en condition d'ICU avec la station de référence en campagne Melesse (°C)

5.3. Relation entre l'îlot de chaleur urbain et l'occupation du sol

La spatialisation de l'ICU est réalisée selon la méthode multicritère par régression linéaire décrite précédemment (chapitre 4.2). Les facteurs d'occupation du sol environnant les stations météorologiques sont analysés avec les gradients de température résultants de l'ICU. Dans un premier temps, les variables les plus pertinentes sont comparées et retenues. Puis dans un second temps, la construction des modèles est réalisée à partir des précédentes analyses. Enfin la spatialisation est effectuée ainsi que l'étude des résidus et des biais du modèle appliqué.

L'analyse spatiale de l'ICU met en évidence l'organisation en cercles concentriques des écarts de température relevés (voir la figure 51). Le facteur distance au centre-ville décrit sur l'ensemble du réseau de mesure 68% de la variabilité de la température selon une fonction logarithmique. Ce facteur décrit très schématiquement la structure de l'urbanisation à Rennes, dont la densité des bâtiments et de surfaces imperméabilisées est plus forte au centre et décroît vers la périphérie (inversement pour la végétation). Ce facteur décrit la structure spatiale de l'urbanisation et indirectement le gradient de température qui en résulte : l'ICU.

5.3.1. Choix des régresseurs et applications des modèles de régression

Pour l'étude des facteurs de l'occupation du sol corrélés avec la présence de l'ICU, les facteurs suivants sont utilisés : la fraction de surfaces bâties, la fraction de surfaces imperméables (voirie...), la fraction de végétation, la fraction de végétation haute (arbres), la fraction de végétation basse (surfaces enherbées), la fraction de surface en eau (réseau hydrique), l'altitude et la distance au centre-ville.

Dans un premier temps, les variables à expliquer retenues sont l'ICU moyen en 2011, l'ICU moyen observé pour 8 nuits avec un ICU intense (noté ICU 8j) et enfin l'ICU observé le matin du 23 mai 2011 (noté ICU 23/05/2011). Concernant l'ICU observé sur 8 jours, il s'agit de 8 situations où l'ICU est intense avec des écarts de température minimale entre le centre-ville et la campagne compris entre 4,3°C et 5,9°C. Ces situations ont été observées les 10, 18, 22, 23, 25, 28, 29 mai et le 1^{er} juin 2011. Elles ont été sélectionnées car les séries de mesures sont complètes pour l'ensemble de ces périodes, afin de spatialiser l'ICU moyen sans biais éventuellement lié au comblement des lacunes. L'écart de température minimale observé le 23 mai 2011 permet d'exposer une situation où l'ICU est particulièrement intense ($\Delta T_n=6,2^\circ\text{C}$).

L'ensemble de ces variables descriptives de l'occupation du sol est comparé à l'aide d'une matrice de corrélation afin de définir les liens avec les gradients de température relatifs à l'ICU. Les résultats issus de ces matrices de corrélation sont récapitulés, en figure 52, par des boîtes à moustache. Celles-ci présentent la variabilité de la corrélation liée aux dimensions des zones tampons pour chaque variable d'occupation du sol.

Certaines variables apparaissent peu corrélées aux ICU, telles que la fraction d'eau ($R_{\text{moyen}}=0,1$) et la fraction de végétation haute ($R_{\text{moyen}}=0,2$) (figure 52). Ces résultats permettent d'écarter ces variables pour la construction du modèle. De même, l'altitude des stations demeure peu corrélée aux ICU observés ($R_{\text{moyen}}=0,4$). En revanche elle l'est plus aux autres variables d'occupation du sol, ce qui indique que cette variable ne constitue pas un bon descripteur pour la régression.

Les variables concernant la fraction de végétation totale ou la fraction de végétation basse sont bien corrélées aux ICU (figure 52). Le degré de corrélation fluctue quelque peu selon l'observation de l'ICU et pour l'ensemble des zones tampons évaluées ($R_{\text{moyen}}=0,9$). Quant à la

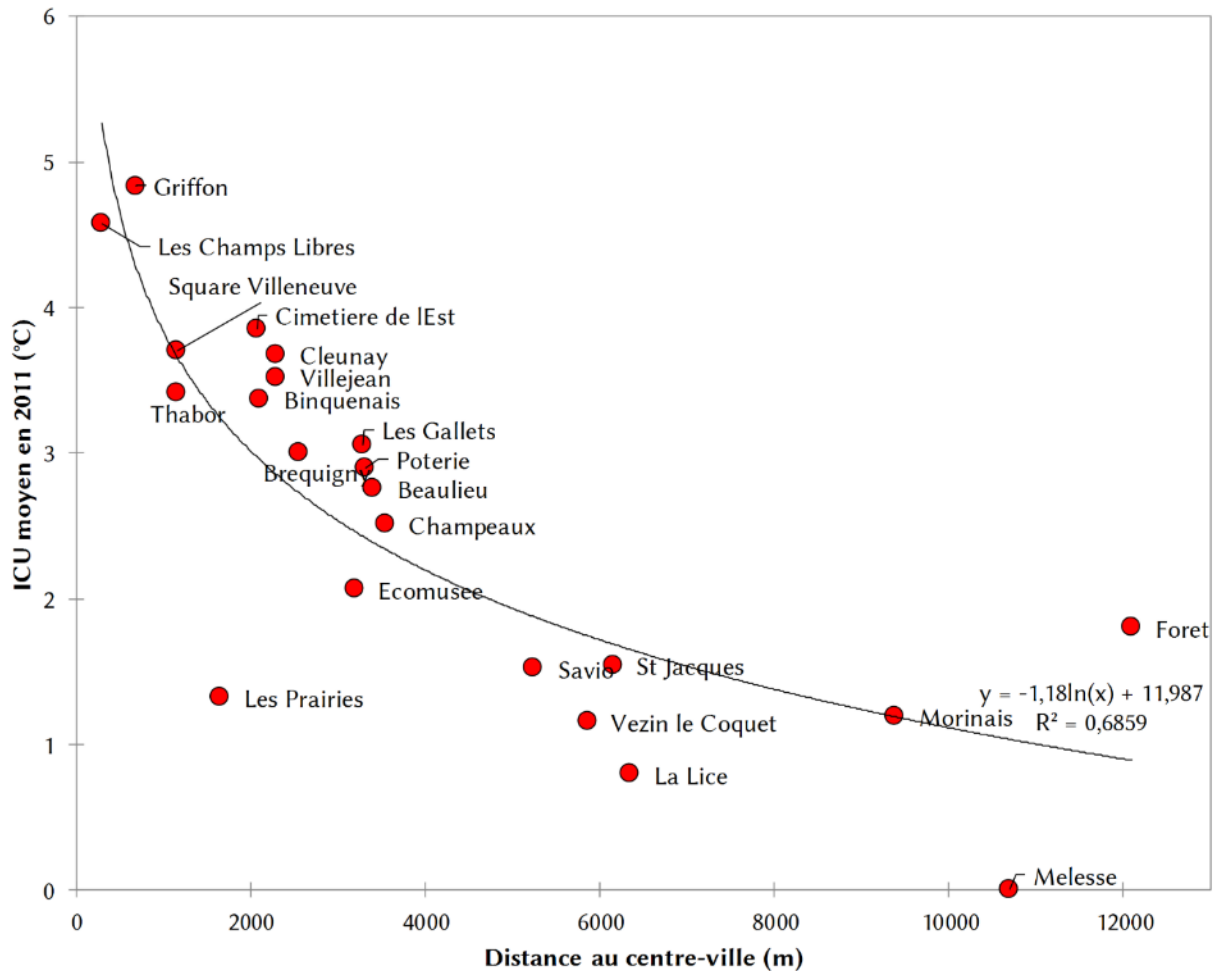


Figure 51, répartition de l'ICU moyen observé en 2011 selon la distance au centre-ville.

fraction de végétation basse, le degré de corrélation fluctue selon la dimension de la zone tampon retenue ($R_{moyen}=[0,75 ; 0,9]$).

Les corrélations réalisées avec les facteurs d'occupation du sol « artificialisés » se révèlent significatives (figure 52). Cependant les fractions imperméables et la hauteur moyenne des bâtiments sont plus ou moins corrélées selon le choix du rayon de la zone tapon. Le degré de corrélation fluctue de $R=[0,5 ; 0,7]$ pour la hauteur moyenne des bâtiments selon le choix de la zone tampon et de $R=[0,7 ; 0,9]$ pour la fraction de surfaces imperméables selon la dimension de la zone tampon mais également selon la période d'observation d'ICU retenue. Quant à la fraction bâtie, elle est bien corrélée quel que soit le choix de la période d'observation de l'ICU. La variation de la taille la zone tampon influence peu le degré de corrélation, cependant une exception notable pour la zone tampon de 100m apparait bien plus faiblement corrélé ($R=0,65$) avec l'ICU.

A partir des résultats issus des matrices de corrélation, les variables retenues pour la construction des modèles de régressions sont : la fraction de végétation totale, la fraction de végétation basse, la fraction bâtie et la fraction de surfaces imperméables. Les variables retenues doivent constituer des prédicteurs apportant une information supplémentaire à l'explication de la variabilité de l'ICU. Dans ce cas, l'ajout des deux variables introduit peu d'informations supplémentaires à la régression, ce qui impose d'éliminer les combinaisons de variables fortement corrélées entre-elles pour définir le meilleur modèle de régression.

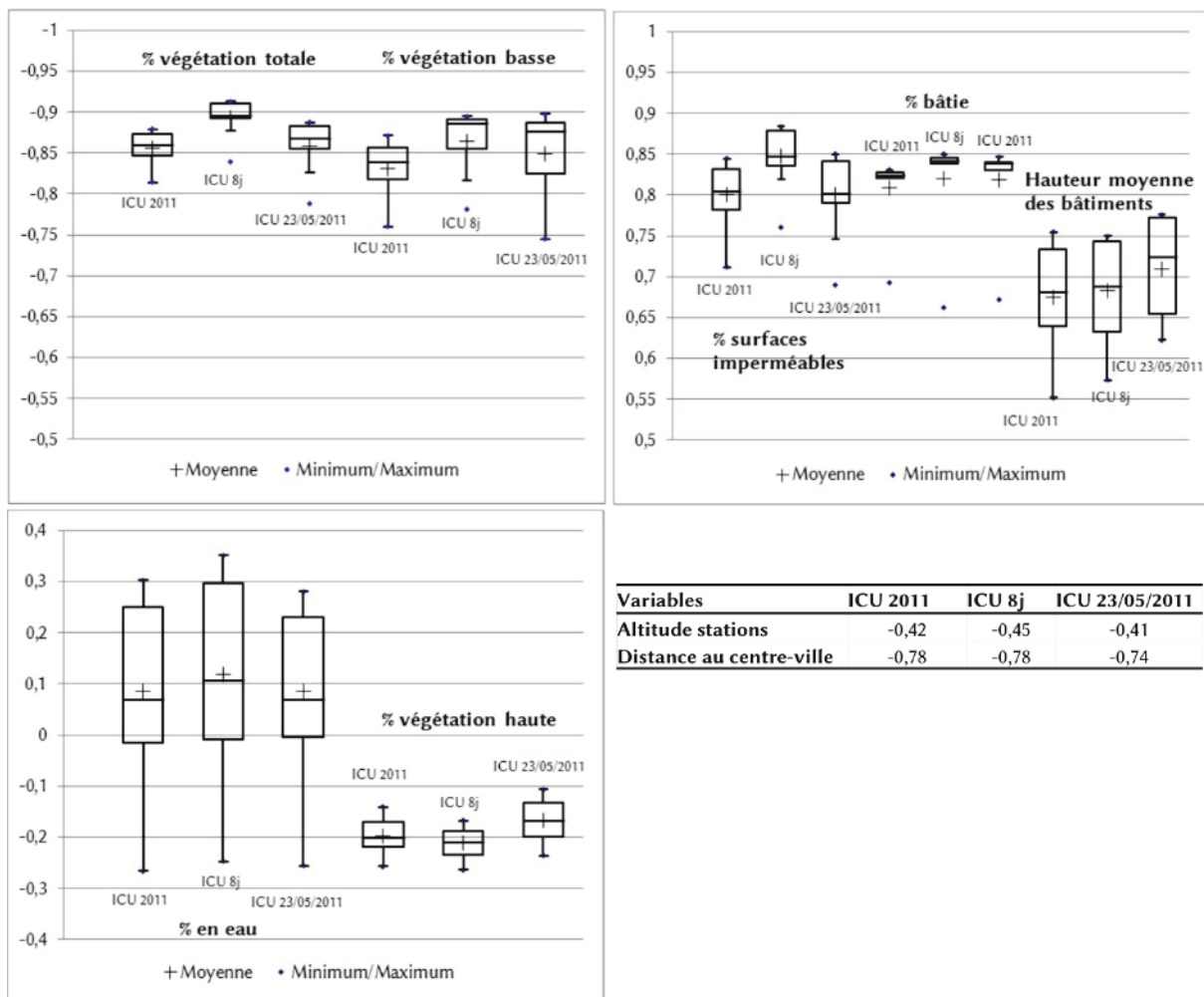


Figure 52, degrés de corrélations (R) des facteurs de l'occupation du sol (pour l'ensemble des zones tampons) avec les températures résultant de l'observation de l'ICU selon trois critères : l'ICU moyen en 2011, l'ICU moyen lors 8 journées spécifiques et l'ICU observé le 23 mai 2011. N.B. : les zones tampons ont pour rayon : 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900m.

5.3.2. Exercices préalables supervisés

Afin de déterminer les meilleurs modèles de régression pour la modélisation de l'ICU, la construction des modèles de l'ICU est réalisée préalablement avec l'ICU moyen observé en 2011. La construction du modèle est supervisée, puis automatisée dans second temps pour les autres périodes d'observation de l'ICU.

La matrice de corrélation graphique de l'ICU avec les variables d'occupation du sol corrélées significativement en 2011 est illustrée en figure 53. Elle met en évidence la corrélation entre les variables potentiellement descriptives de l'ICU, et les nuages de points illustrent la structure des corrélations.

a) Modélisation de l'ICU en 2011 : modèle à une variable

Le premier modèle de régression est réalisé à l'aide de la variable la plus fortement corrélée avec l'ICU : la fraction de végétation totale dans un rayon de 900m. Le choix de cette variable ne permet pas d'en accepter d'autres car elles apparaissent trop fortement corrélées. Le résultat

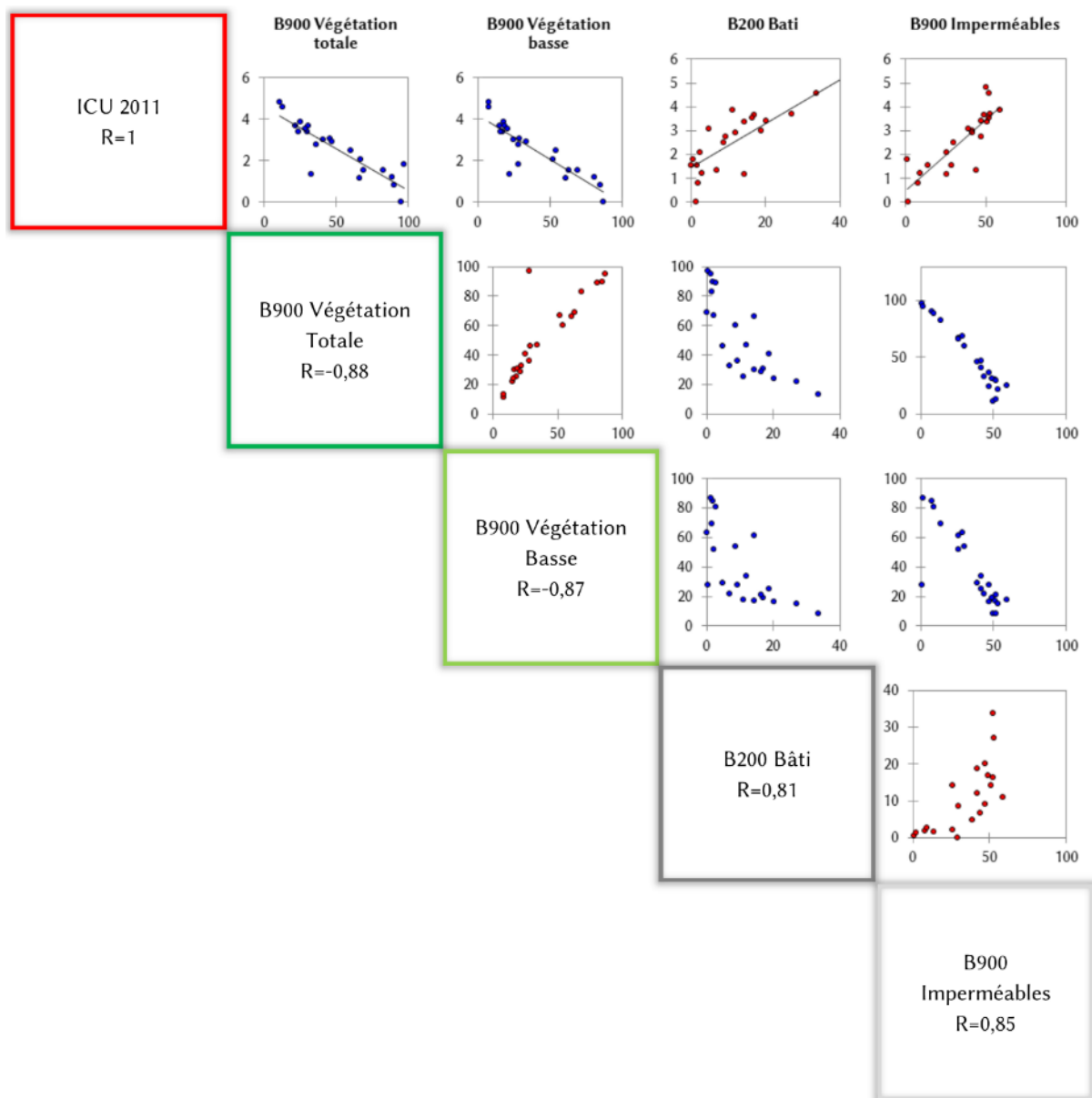


Figure 53, matrice de corrélation de l'ICU moyen en 2011 et des variables d'occupation du sol corrélées significativement.

de cette régression (1) est représenté en figure 54. Le modèle permet d'expliquer 77% de la variabilité de l'ICU et la RMSE est de 0,62. Il apparaît sur le graphique que les résidus les plus importants sont les stations Les Prairies et Forêt de Rennes, avec respectivement des résidus de $-1,9^{\circ}\text{C}$ et $1,1^{\circ}\text{C}$. C'est à dire que le modèle sous-estime l'îlot de fraîcheur dans le parc des Prairies Saint-Martin et que la douceur nocturne de la forêt n'est pas bien évaluée par le modèle.

La régression est appliquée selon la méthode décrite dans le chapitre 4.2.3, ce qui permet de produire la carte illustrée en figure 55. Les isothermes montrent un gradient de température du centre vers la périphérie pour Rennes, mais également pour les villes limitrophes. L'ICU correspond à la tache urbaine avec un maximum de $+4,5^{\circ}\text{C}$ dans le centre et un minimum de $+0,5^{\circ}\text{C}$ dans la campagne avoisinante. Le modèle présente des résidus supérieurs à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pour 5 stations météorologiques dont 2 présentent des résidus supérieurs à $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ (les *Prairies* et la *Forêt de Rennes*). Les stations *Melesse* et *Griffon* sont les deux stations respectivement les plus chaudes et fraîches du réseau et le modèle surestime la température à *Melesse* ($-0,8^{\circ}\text{C}$) et

inversement sous-estime la température à *Griffon* (+0,7°C), ce qui peut être attribué à la linéarité du modèle de régression. La station périurbaine de *Vezein-le-Coquet* est surestimée par le modèle avec un résidu de -0,8°C. Quant aux autres stations du réseau, il n'y a pas de typologie de quartier présentant un biais systématique par le modèle, les résidus sont répartis de manière homogène. Cependant il faut souligner l'absence d'îlot de fraîcheur constitué par les parcs en ville sur la carte.

b) Modélisation de l'ICU moyen en 2011 : modèle à deux variables

L'apport de variables supplémentaires impose de vérifier leur significativité dans la construction du modèle de régression. La méthode de sélection exhaustive est employée pour ajouter les variables une à une et comparer les modèles créés selon le critère AIC (voir le chapitre 4.2.2). Les variables de fraction de végétation basse dans un rayon de 900m et la fraction de surfaces bâties dans un rayon de 200m. Ces variables ont été contrôlées et retenues car elles sont peu corrélées entre-elles ($R=0,69$). Le résultat de cette régression (2) est synthétisé sur la figure 54. La variabilité de l'ICU moyen en 2011 est décrite à 82% et elle apparaît selon le critère AIC plus pertinente que le modèle précédent (AIC=-24). De même, l'erreur résiduelle est plus faible (RMSE=0,54). Le critère Durbin-Watson (DW) indique l'absence d'autocorrélation des résidus du modèle.

Un seuil de corrélation ($R \geq 0,7$) est fixé afin de s'assurer de la pertinence de la contribution de la variable à la régression. Par ailleurs, des tests de régressions montrent un faible apport de la troisième variable à la régression. Dans le cas de l'ICU moyen en 2011, selon la méthode de sélection exhaustive pour trois variables, le modèle retenu est composé des variables suivantes : la fraction de végétation basse dans un rayon de 900m, la fraction de surfaces bâties dans un rayon de 100m et la fraction de surfaces imperméables dans un rayon de 100m. Le modèle permet de décrire 83% de la variabilité et une erreur résiduelle de : RMSE=0,53. Le modèle n'est pas amélioré significativement malgré l'apport d'une variable supplémentaire dans la régression.

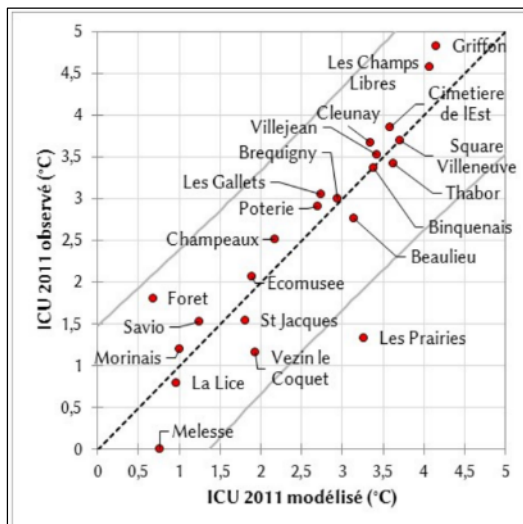
La carte issue de l'application de la régression est présentée en figure 56. L'intensité de l'ICU modélisé varie de +0,3°C à 5,8°C. Il apparaît comme précédemment un gradient de température allant du centre vers la périphérie, cependant des petits îlots de chaleur en villes apparaissent au sein de plusieurs quartiers. L'analyse des résidus sur le graphique (figure 54) et la carte montre que la station *Les Prairies* est la moins bien évaluée par le modèle avec un résidu de -1,5°C. Comme pour le modèle précédent (1), les particularités de ce parc urbain sont sous-estimées mais il apparaît une bande plus fraîche au nord de la station correspondant à la trame verte. Au total, 6 stations présentent un résidu supérieur à $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Dans l'espace périurbain, les stations *Melesse*, la *Forêt de Rennes* et de *Vezein-le-Coquet* sont surestimées respectivement +0,6°C et +0,8°C pour cette dernière station. Un îlot de chaleur relatif à la présence de la forêt est visible, cependant malgré la bonne estimation de la température minimale à la station en lisière de la forêt de Rennes il demeure que la température en son sein est très probablement mal-évaluée. La disposition du réseau de mesure et la construction du modèle ne permettent pas l'évaluation des gradients de température nocturne de la forêt. Il est donc important de ne pas tenir compte du résultat de la spatialisation de la température en forêt. La station périurbaine des serres de *Champeaux* indique un écart entre la valeur observée et modélisée de +0,6°C, ce qui porte à 4 le nombre de station périurbaine avec un résidu (en valeur absolue) supérieur à $\pm 1,0^\circ\text{C}$. Enfin la station urbaine *Cimetière de l'Est* est la seconde station avec *Les Prairies* à présenter un résidu supérieur à $\pm 1,0^\circ\text{C}$, avec une sous-estimation de l'ICU de +0,7°C.

c) Modélisation de l'ICU moyen en 2011 : modèle à deux variables sélectionnées parmi des critères caractérisant les surfaces artificialisées

La construction du premier modèle a été réalisée en n'intégrant qu'une seule variable renseignant sur des critères de la fraction de végétation (fraction de végétation totale dans un rayon de 900m). Dans le cas présent seules les variables correspondant à la fraction de surfaces artificialisées sont utilisées, à savoir la fraction de surfaces bâties et imperméables. A partir de la méthode de sélection exhaustive, les variables suivantes sont retenues : la fraction de surfaces imperméables dans un rayon de 900m et la fraction de surfaces bâties dans un rayon de 200m. Le résultat de la régression (3) est synthétisé en figure 54. Le modèle permet d'expliquer 79% de la variabilité de l'ICU avec une erreur résiduelle RMSE=0,58, ce qui est un score intermédiaire aux deux modèles précédents. Le critère AIC confirme ce classement avec un score AIC=-21, contre -19 et -24 pour les modèles précédents.

La régression est appliquée, elle est illustrée en figure 57. Le gradient de température est proche de celui observé par le modèle précédent (2) : un maximum à +5,9°C (dans le centre-ville) et un minimum de 0,6°C, et avec la présence de petits îlots de chaleur en ville. Cependant quelques différences apparaissent, les parcs se révèlent plus frais de -0,3°C et le quartier du *Cimetière de l'Est* est plus chaud de +0,3°C par rapport au modèle précédent. Le modèle ne prend pas en compte la présence de la forêt comme dans le cas du premier modèle (1).

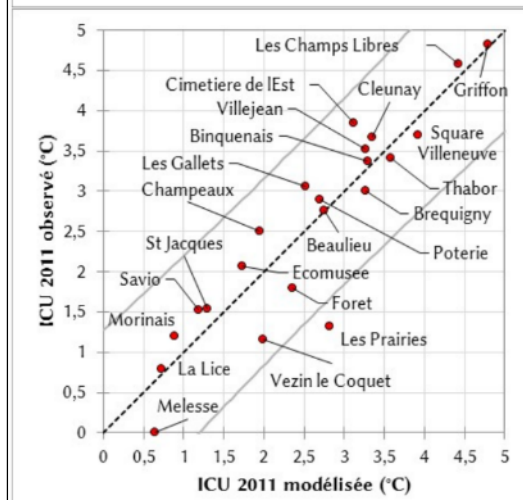
L'analyse des résidus (figure 54 et figure 57) montrent que 5 stations présentent un écart entre la température observée et modélisée supérieur à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dont 3 stations ont un écart supérieur à $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$. La température des stations *Les Prairies*, *Vezin-le-Coquet* est surestimée respectivement de 1,3°C et 1,2°C. La station *Forêt de Rennes* est sous-estimée de 1,1°C comme dans le cas du premier modèle, de même pour la station *Melesse* dont le résidu du modèle est de -0,8°C. Enfin, la station suburbaine *Les Gallets* est sous-estimée de 0,7°C pour ce modèle, ce qui porte au nombre de deux stations en ville avec une erreur résiduelle supérieure à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.



Modélisation de l'ICU moyen observé en 2011, à une variable selon la méthode de sélection supervisée :

$$ICU_{2011} = 4,6 - 0,040 \times B900 \text{ Végétation totale} \quad (1)$$

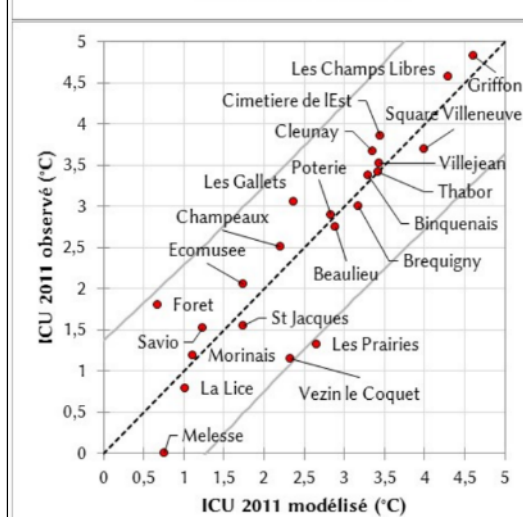
Observations	22
AIC	-19
R ² _{ajusté}	0,77
RMSE	0,62
DW	1,44
F	68



Modélisation de l'ICU moyen observé en 2011 à deux variables selon la méthode de sélection exhaustive :

$$ICU_{2011} = 3,2 - 0,029 \times B900 \text{ Végétation basse} + 0,044 \times B200 \text{ Bati} \quad (2)$$

Observations	22
AIC	-24
R ² _{ajusté}	0,82
RMSE	0,54
DW	1,87
F	49



Modélisation de l'ICU moyen observé en 2011 à deux variables selon la méthode de sélection exhaustive parmi des facteurs caractérisant les surfaces artificialisées :

$$ICU_{2011} = 0,6 + 0,039 \times B900 \text{ Imperméables} + 0,049 \times B200 \text{ Bati} \quad (3)$$

Observations	22
AIC	-21
R ² _{ajusté}	0,79
RMSE	0,58
DW	1,71
F	41

Figure 54, résultats de trois régressions linéaires de l'ICU moyen observé en 2011.

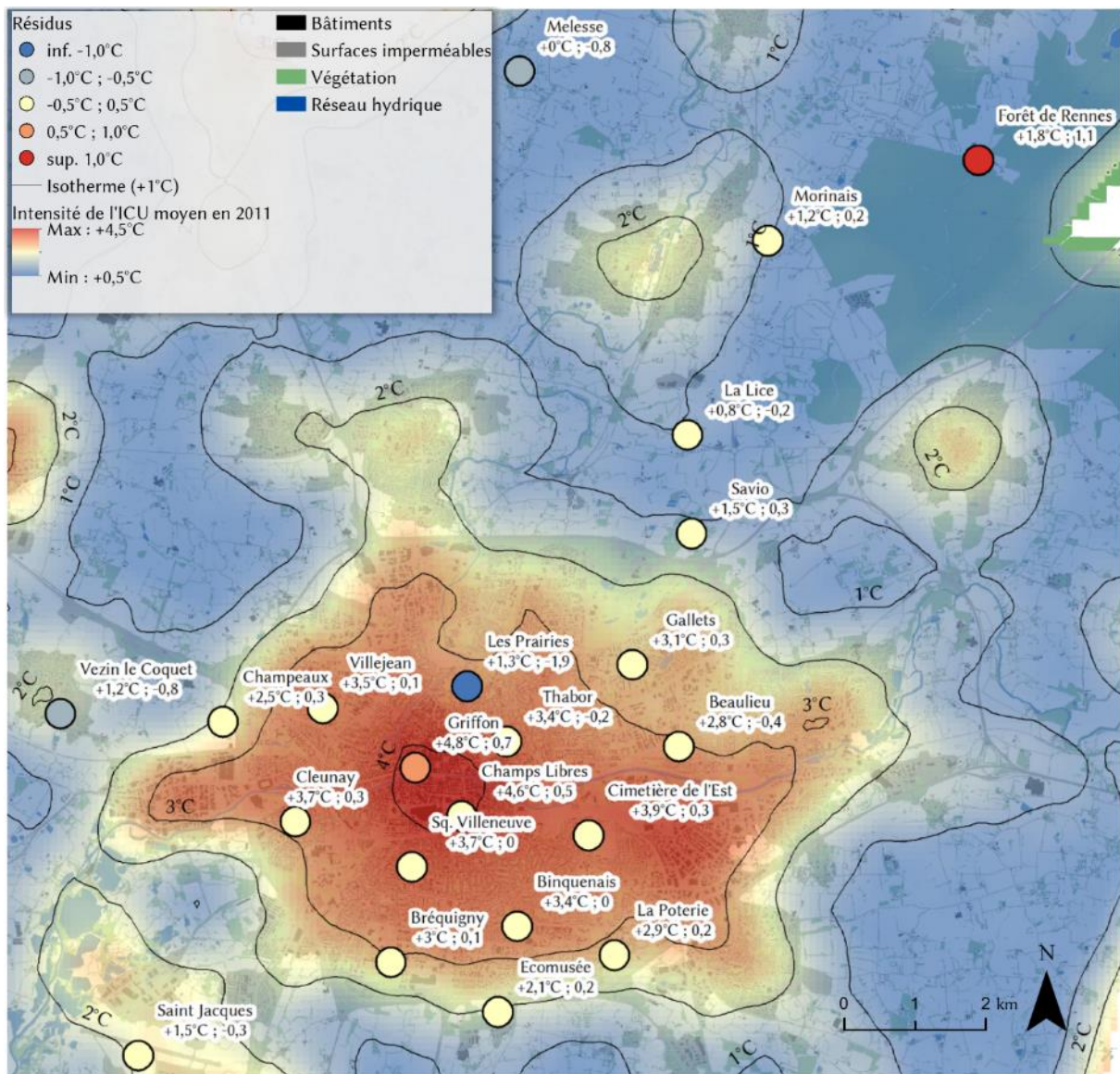


Figure 55, carte de l'ICU moyen en 2011 issue de la régression avec la variable suivante : B900 Végétation totale.

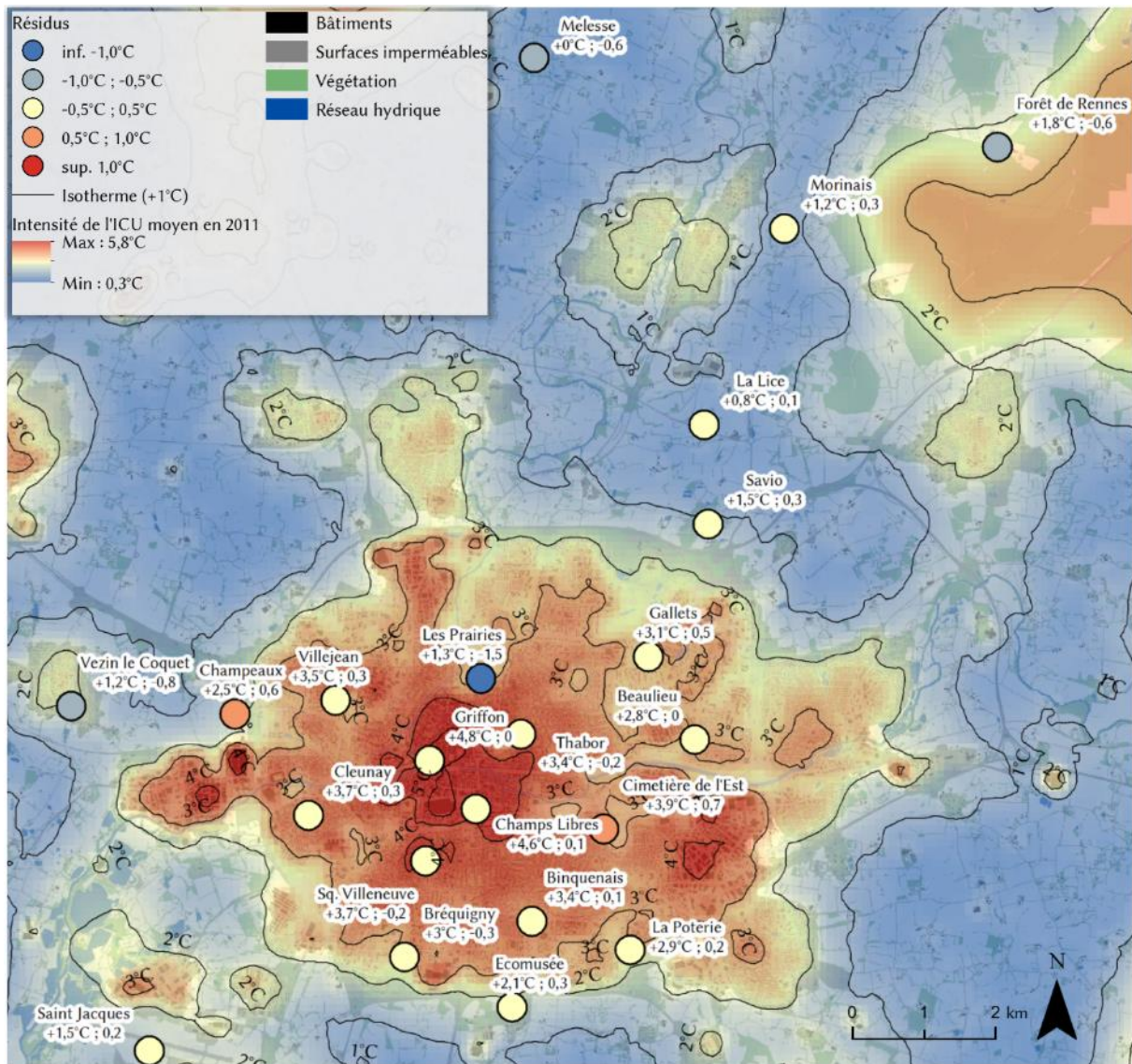


Figure 56, carte de l'ICU moyen en 2011 issue de la régression avec les variables suivantes : B200 Bati et B900 Végétation basse.

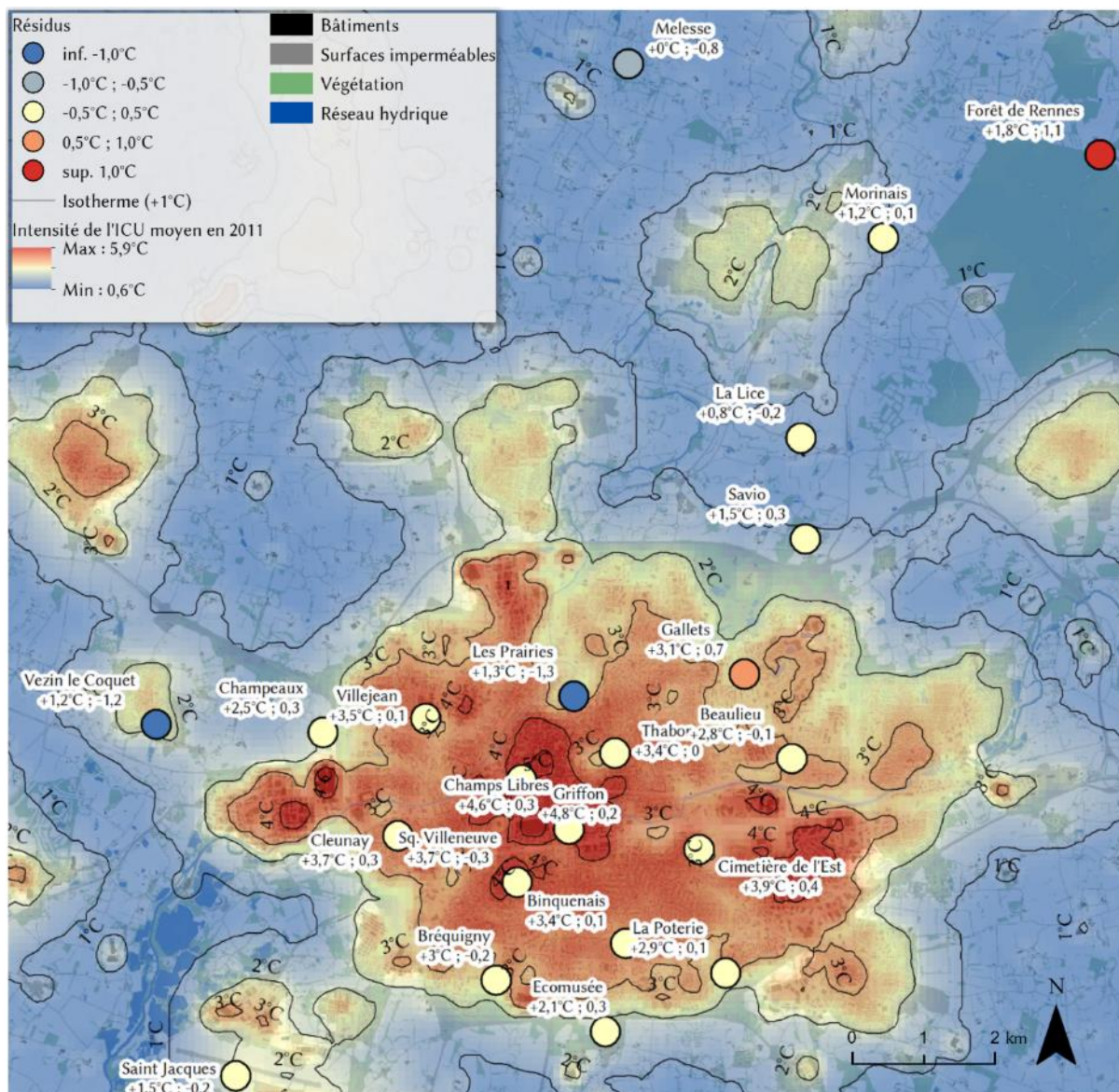


Figure 57, carte de l'ICU moyen en 2011 issue de la régression avec les variables suivantes : B200 Bati et B900 Surfaces imperméables.

5.3.3. Automatisation de la méthode et application

Après la phase d'application supervisée de la spatialisation de l'ICU, la méthode est automatisée afin de produire une cartographie de l'ICU sur différentes périodes d'observation. L'automatisation de l'ICU est réalisée à l'aide du logiciel R (comme décrit précédemment, chapitre 4.2.2), dont deux fonctions principales sont utilisées afin d'obtenir le meilleur modèle et d'appliquer le modèle de régression retenu. Les principales étapes de la spatialisation sont récapitulées par la figure 58.

La première fonction utilisée est la fonction *regsubsets()* disponible dans la librairie *leaps* (Miller 2002). Elle permet de déterminer les variables afin d'obtenir la régression optimale selon la méthode exhaustive. Cependant cet outil requiert le paramétrage du nombre de prédicteurs maximum. L'analyse précédente indique qu'au-delà de deux variables, les prédicteurs apportent peu d'informations supplémentaires à la régression. La fonction est également paramétrée de manière à sélectionner le meilleur modèle selon le critère BIC. Enfin une dernière étape de contrôle des variables explicatives (retenues par la fonction *regsubsets()*) est effectuée. Cette étape consiste à refuser une régression dont les variables prédictives ont un coefficient de corrélation supérieur à 0,7. Si la situation se présente, la seconde meilleure régression est alors sélectionnée.

La seconde étape consiste à l'application de la régression retenue. Les rasters des variables explicatives de la régression sont extraites du catalogue des rasters (constitué préalablement dans le chapitre 4.2.3). Les rasters correspondant aux variables retenues sont convertis en matrice afin de pouvoir appliquer les coefficients de la régression précédemment élaborée. Cette étape est réalisée par la fonction *raster*, ce qui permet de produire une carte de l'ICU à partir de la régression retenue lors de la première étape. Associés à la carte constituée, les indices décrivant la qualité de la régression retenue lors de la première étape sont extraits.

Cette méthode automatisée est appliquée à l'ensemble des 89 jours où l'ICU est présent. Sur l'ensemble des 47 variables disponibles, 15 sont utilisés pour la régression de chacune de ces journées. Il apparait sur le tableau 3 que pour environ la moitié des journées, seule une variable a été utilisée pour la régression. Parmi les variables les plus employées, on peut distinguer la fraction de végétation basse dans un rayon de 900 m, puis la fraction de surfaces bâties pour les zones tampons de 100m et 200m, et enfin les fractions de surfaces imperméables et de végétation totale dans un rayon de 900m. Les modèles réalisés sont de qualités variables, le coefficient $R^2_{\text{ajusté}}$ fluctue de 0,33 à 0,87 avec une moyenne de 0,71 (figure 59). L'analyse des journées, dont la variabilité est moins expliquée par le modèle, ne met pas en évidence un facteur météorologique déterminant. Cependant le vent moyen observé au moment de la mesure de l'ICU est de 0,9 m/s pour les journées les mieux modélisées, contre 1,8 m/s pour les journées les moins bien décrites. Le vent au moment de la mesure peut expliquer en partie la difficulté du modèle à décrire le déplacement de l'ICU.

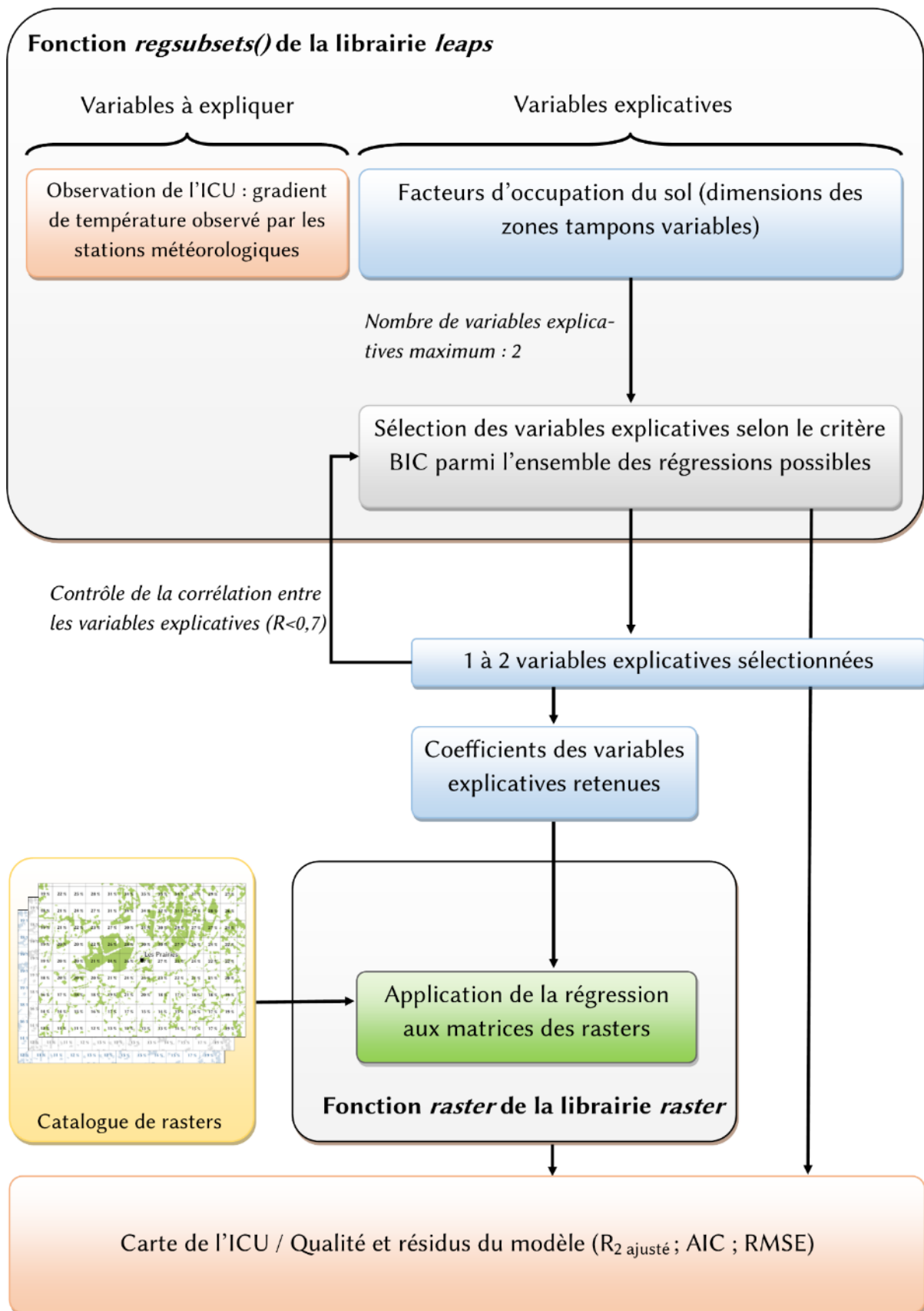


Figure 58, schéma récapitulatif de l'automatisation de la méthode de spatialisation de l'ICU sous le logiciel R et des principales fonctions utilisées.

	variable unique	b900 vegetation basse	b900 impermeables	b200 bati	b100 bati	b800 impermeables	b900 vegetation totale	b500 vegetation basse	b300 bati	b500 impermeables	b400 impermeables	b200 impermeables	b200 hauteur bati	b100 impermeables	b100 hauteur bati
b900 vegetation basse	17	0	0	13	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b100 bati	0	9	4	0	0	2	1	1	0	0	1	1	0	0	0
b200 bati	0	13	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b900 impermeables	2	0	0	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
b900 vegetation totale	11	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b300 vegetation totale	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b200 vegetation totale	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b200 impermeables	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
b300 bati	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
b500 impermeables	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
b500 vegetation basse	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
b600 vegetation totale	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b700 bati	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b700 vegetation basse	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b800 impermeables	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b100 hauteur bati	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b100 impermeables	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
b100 vegetation totale	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b200 hauteur bati	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
b400 bati	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b400 impermeables	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b700 hauteur bati	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 3, occurrence des variables utilisées pour les régressions des 89 journées avec de l'ICU en 2011.

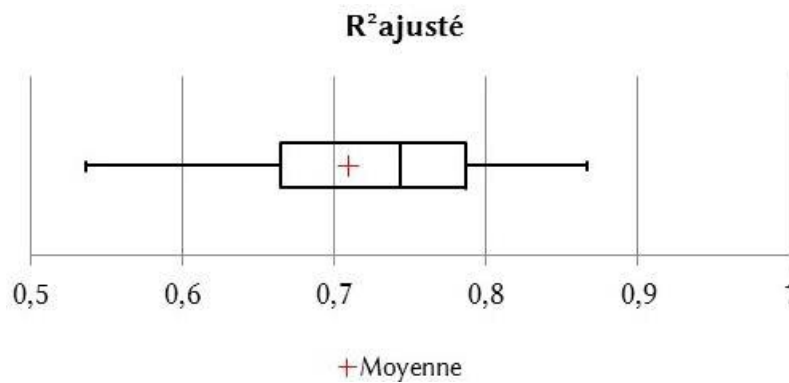


Figure 59, répartition des valeurs des R²aj. des modèles de régression réalisés pour les 89 jours avec ICU en 2011. Choix des quantiles : Q1=25% ; Q2 = 50% et Q3=75%.

5.4. Analyse spatiale de l'ICU

5.4.1. L'ICU observé à Rennes

a) Spatialisation de l'ICU intense (moyenne de 8 jours)

La méthode de spatialisation est appliquée pour l'ICU moyen observé lors de 8 jours où l'ICU est intense. L'intensité maximale de l'ICU observée est de +5,2°C et +5,1°C pour les stations situées dans le centre-ville : *Griffon* et *Les Champs Libres*. L'équation suivante est alors appliquée :

$$ICU_{8j} = 3,52 - 0,039 \times B900 \text{ végétation basse} + 0,051 \times B200 \text{ bati}$$

La régression permet d'expliquer 86% de la variabilité de l'ICU avec une RMSE de 0,60. Le résultat de la spatialisation est illustré par la figure 60. Les résidus observés sont les plus importants (supérieurs à ±1,0°C) pour les stations intra-urbaines *Les Prairies* et *Cimetière de l'Est*, puis les stations de *Vezein le Coquet* et *Forêt* présentent des résidus supérieurs à ±0,5°C. Hormis les stations *Les Prairies* et *Cimetière de l'Est*, les stations en ville indiquent des résidus inférieurs ou égaux à ±0,5°C, ce qui est un résultat proche à celui observé par la spatialisation de l'ICU moyen observé en 2011. Par ailleurs comme indiqué précédemment pour la spatialisation de l'ICU moyen en 2011, il apparaît également quelques petits îlots de chaleurs en ville et l'îlot de chaleur en forêt dont l'intensité est surévaluée (cependant il n'est pas à prendre en compte car la forêt n'est pas l'objet de l'étude). Des îlots de fraîcheurs sont présents en campagne, où la température minimale est inférieure à celle enregistrée à la station *Melesse*.

b) L'ICU de la nuit du 23 mai 2011

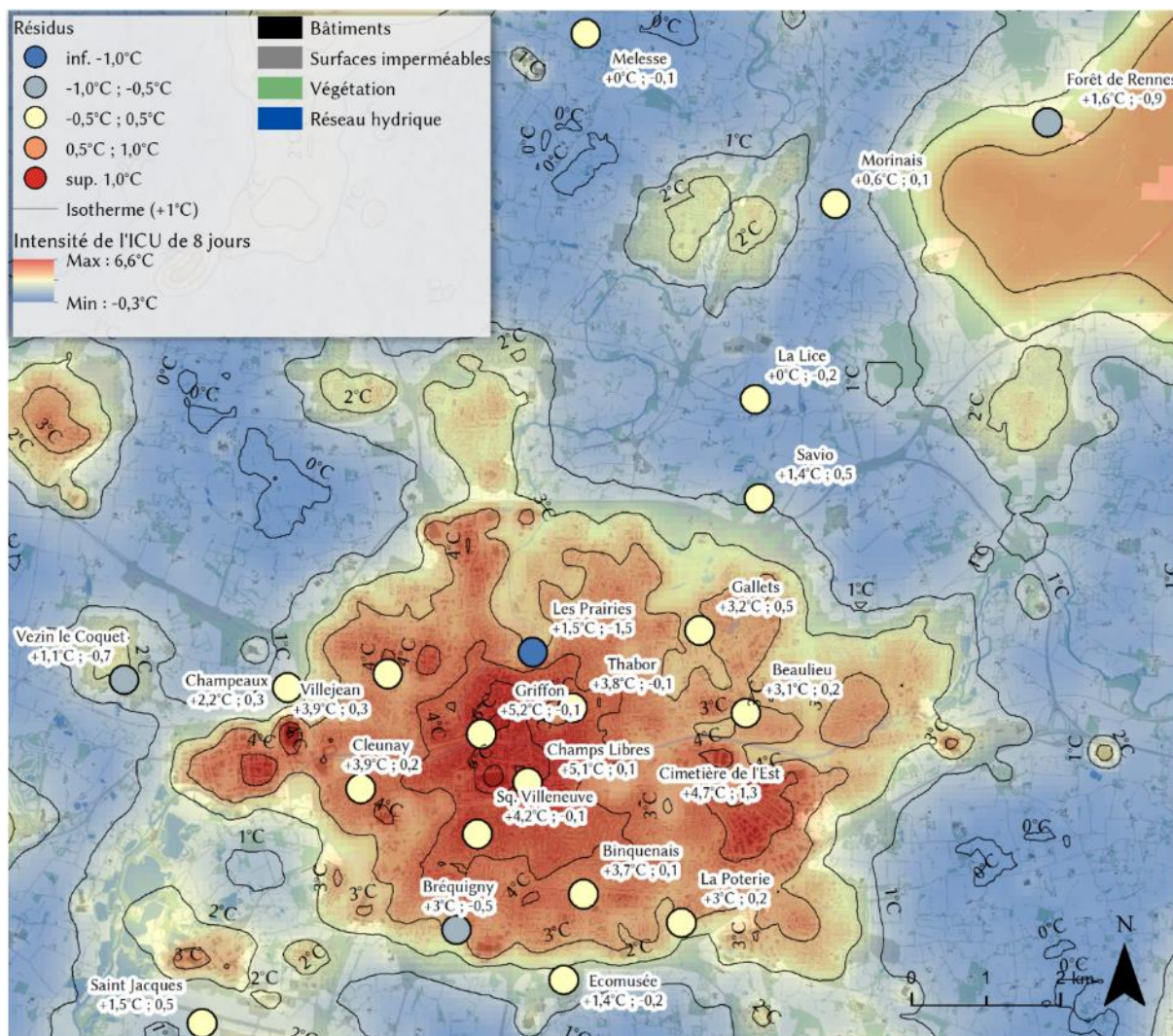
Parmi les 8 jours où l'ICU a été observé comme intense, une journée a été retenue : le 23 mai 2011. Cette situation présente un ICU intense avec un maximum dans le centre-ville de +6,2°C pour la station *Griffon* et +5,5°C à la station des *Champs Libres*. La méthode de spatialisation est exécutée, à partir de l'équation de la régression suivante :

$$ICU_{23/05/2011} = 3,93 - 0,045 \times B900 \text{ végétation basse} + 0,061 \times B200 \text{ bati}$$

La spatialisation et les résidus issus de la régression sont illustrés par la figure 61. La régression permet d'expliquer 87% de la variabilité du gradient de température résultant de l'ICU avec une RMSE de 0,68. Les résidus les plus importants sont *Les Prairies* et la station *St Jacques* avec respectivement -1,9°C et +1,2°C. Ce modèle surestime également l'ICU dans le parc des Prairies Saint Martin, l'îlot de fraîcheur observé apparaît peu présent sur la carte. Le modèle sous-estime la présence de l'ICU à la station Météo-France pour cette nuit du 23 mai 2011, ce qui peut s'expliquer par la température minimale élevée comparativement aux autres stations périurbaines.

La spatialisation de l'ICU du 23 mai 2011 révèle comme précédemment de petits îlots de fraîcheurs en campagne et des plusieurs petits îlots de chaleur en ville. Ces petits îlots de chaleur apparaissent ici démarqués dans les Zones d'Activité (ZA) de Rennes (la ZA Ouest, la ZA Nord et la ZA Sud-Est). Ces petits îlots de chaleur sont plus marqués ici, ce qui correspond à l'observation de l'ICU particulièrement intense le 23 mai 2011. Cependant, l'analyse spatiale à l'échelle des différents quartiers rennais nécessiterait la mise en place d'un réseau de mesure adaptée. En effet, dans le cas présent les différentes ZA ne sont pas instrumentées, ce qui ne permet pas de déterminer la capacité de la méthode à spatialiser l'ICU dans ce type d'espace urbain.

Au total, 7 stations présentent des résidus supérieurs à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, ce qui est supérieur au score des modèles précédents ($\text{RMSE}_{23/05/2011}=0,68$, contre $\text{RMSE}_{8j}=0,60$ et $\text{RMSE}_{2011}=0,53$). Cependant la variabilité semble légèrement mieux prise en compte. La méthode permet d'obtenir un modèle dont la qualité de prédiction est équivalente pour plusieurs périodes d'observation : la moyenne annuelle, la moyenne sur 8 jours spécifique et une nuit. La moyenne permet de « lisser » des observations particulières, tel qu'un ICU anormalement chaud la nuit du 23 mai à la station *St Jacques* ($+2,2^{\circ}\text{C}$).



Résidus (°C)

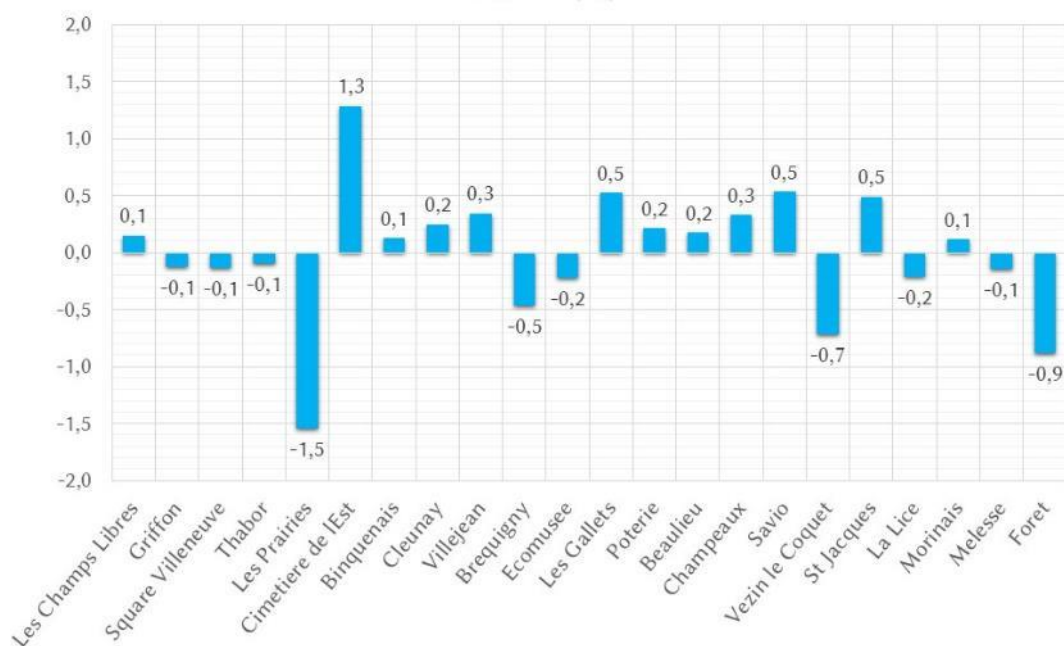
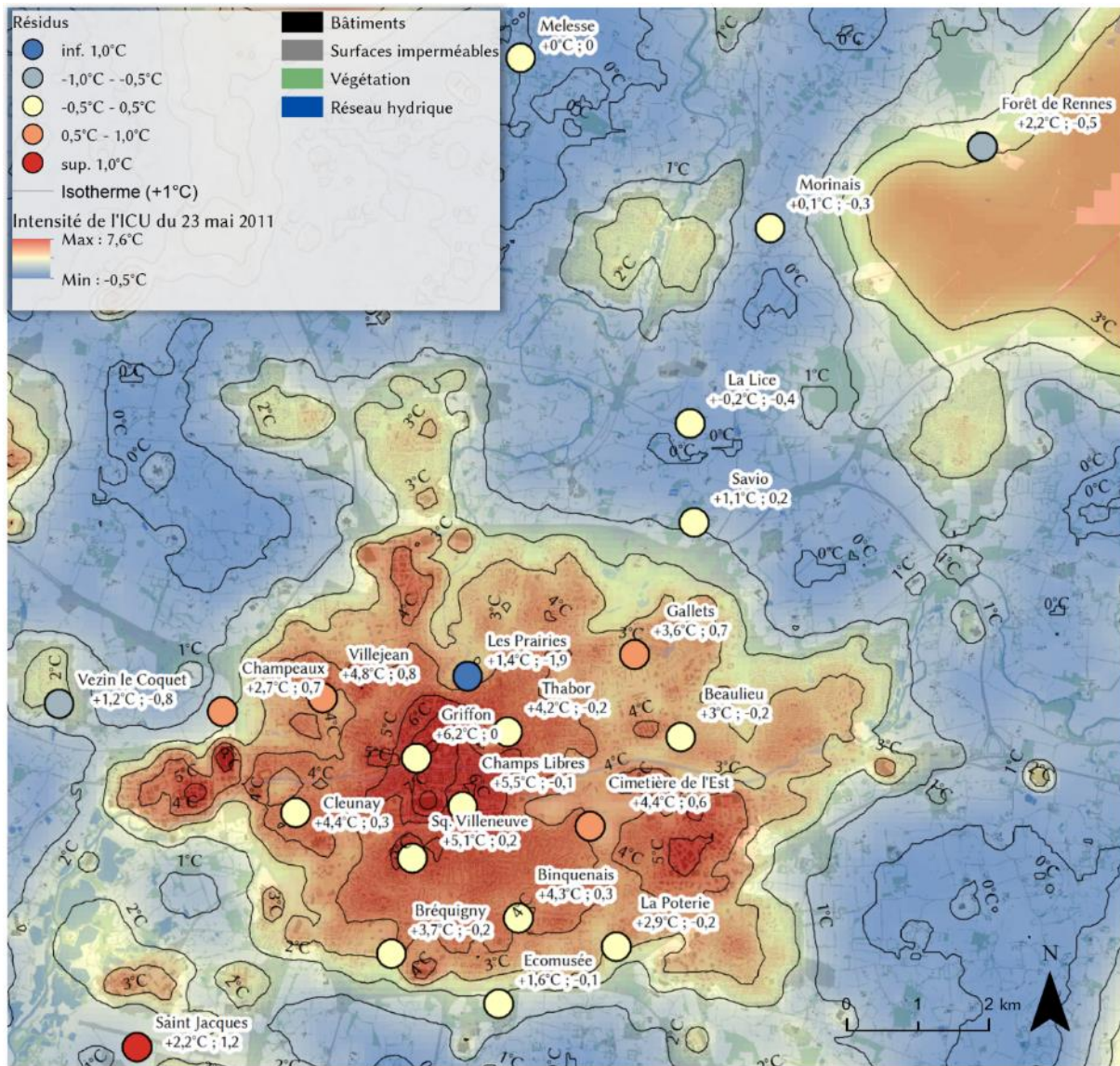


Figure 60, carte et résidus du modèle de spatialisation de l'ICU moyen observé à Rennes lors de 8 situations où l'ICU est intense en mai et juin 2011.



Résidus (°C)

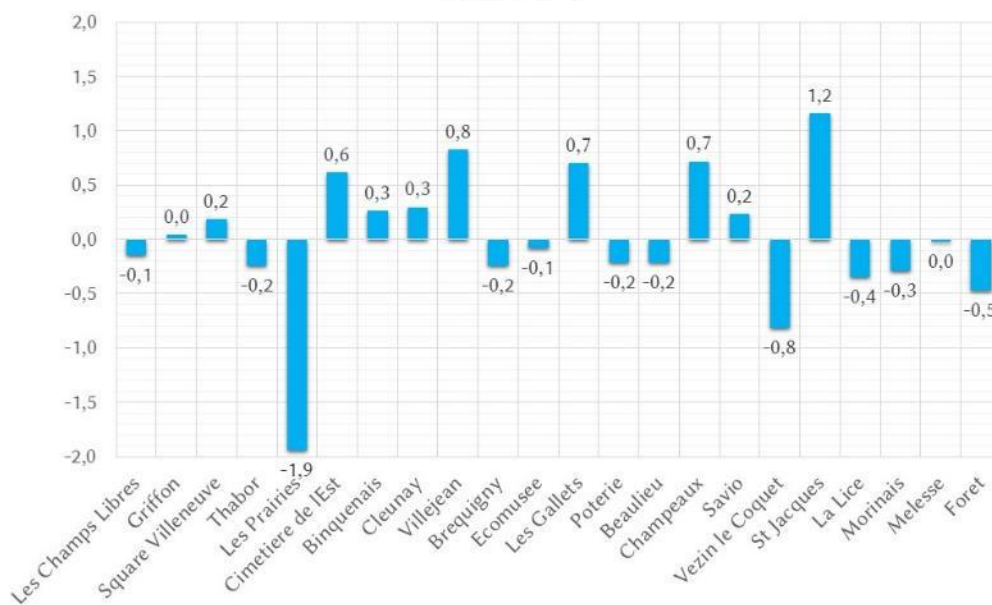


Figure 61, carte et résidus du modèle de spatialisation de l'ICU observé à Rennes le 23 mai 2011.

5.4.2. Comparaisons saisonnières

Afin d'observer la variabilité spatiale de l'ICU selon les saisons le même modèle de régression a été appliqué en figure 62, c'est-à-dire que les mêmes variables ont été utilisées pour la régression de l'ICU afin que les cartes soient comparables. La part de variabilité de l'ICU expliquée par les modèles diffère selon la saison. L'ordre dans lequel la variabilité est la mieux décrite par les modèles est le suivant : tout d'abord l'hiver ($R^2_{aj./hiver}=0,88$), puis le printemps ($R^2_{aj./printemps}=0,84$), l'été ($R^2_{aj./été}=0,80$) et enfin l'automne ($R^2_{aj./automne}=0,75$). Ces écarts peuvent s'expliquer en partie par le nombre de jours retenus pour calculer l'ICU moyen saisonnier. La moyenne hivernale de l'ICU est composée de 10 jours ce qui constitue le plus faible échantillonnage et donc des écarts de température plus homogènes sur l'ensemble des jours retenus, excluant les situations avec des gradients de température inhabituels. Cependant, l'automne est représenté par moins de jours que le printemps et l'été (21 jours contre respectivement 30 et 28 jours) et le modèle n'explique que 75% de la variabilité de l'ICU. L'analyse du vent observé au moment de la mesure pour les jours où l'ICU est présent ne diffère pas selon les saisons, il est en moyenne d'environ 1,0 m/s. Ce paramètre n'apparaît pas comme un facteur permettant de justifier la difficulté du modèle à décrire l'ICU, par un déplacement inhabituel de l'ICU lié au vent.

L'analyse des résidus indique des écarts résiduels plus importants en été ($RMSE_{été}=0,64$). Ces écarts sont observés pour les mêmes stations qu'au printemps, ce qui signifie que les modèles au printemps et en automne présentent un biais similaire. Pour ces deux modèles, la station *Les Prairies* présentent les résidus les plus importants avec $-1,6^{\circ}\text{C}$ au printemps et $-1,8^{\circ}\text{C}$ en été, dont les biais sont identiques aux modèles précédents : la surestimation de l'ICU dans ce parc urbain. Ces deux modèles présentent également des résidus importants pour les stations *Cimetière de l'Est* et *Vezein le Coquet* avec une sous-estimation de l'ICU d'environ 1°C pour la première et une sous-estimation d'environ 1°C pour la seconde. En automne, les résidus les plus importants sont également pour les stations *Les Prairies*, *Vezein le Coquet* ($-1,2^{\circ}\text{C}$), mais plus spécifiquement pour la station *Melesse* avec une surestimation de $-1,2^{\circ}\text{C}$.

Les cartes de l'ICU (illustrées en figure 62) mettent en évidence la variabilité spatiale de l'ICU selon les saisons. L'intensité des ICU modélisé est représentée selon 3 intervalles d'écart de température avec la station rurale de référence *Melesse* : $[0^{\circ}\text{C}; +2^{\circ}\text{C}[$, $[+2^{\circ}\text{C}; +4^{\circ}\text{C}[$ et $[+4^{\circ}\text{C}; +6^{\circ}\text{C}[$. Ces seuils permettent de distinguer l'ICU plus intense observé dans le centre-ville en comparaison de l'ICU observé dans les quartiers limitrophes. Il apparaît que l'intensité de l'ICU augmente de l'hiver, au printemps puis à l'été. L'ICU intense ($\Delta T_n \geq 4,0^{\circ}\text{C}$) dans le centre-ville croît, cette augmentation des écarts de température est observée par l'ensemble des stations intra-urbaines (à l'exception des stations *Les Prairies* et *La Poterie*). La station *Les Prairies* observent même un rafraîchissement entre le printemps et l'été de $1,0^{\circ}\text{C}$.

Entre l'hiver et l'été, l'ICU observé par les stations intra-urbaines augmentent d'environ $+1^{\circ}\text{C}$. Les stations en périphérie proche de Rennes (*Ecomusée*, *St Jacques*, *Champeaux* et *Savio*) observent également une augmentation d'environ $+1^{\circ}\text{C}$ entre l'hiver et l'été. Sur la même période, les stations situées plus en périphérie enregistrent des écarts de température constants.

De l'été à l'automne, l'ICU intense modélisé en ville est similaire cependant l'ICU observé en périphérie (supérieur au seuil $+2^{\circ}\text{C}$) s'étend aux communes autour de la tache urbaine rennaise. En effet les stations *St Jacques* et *Savio* enregistrent cette augmentation et elles franchissent le seuil de $+2^{\circ}\text{C}$. Cependant la station de *Vezein-le-Coquet* ne confirme pas la présence de l'ICU supérieur à 2°C dans l'espace résidentiel. La station en *Forêt de Rennes* montre une augmentation de l'écart de température de $1,7^{\circ}\text{C}$ avec la station *Melesse* de l'hiver à l'automne. L'inertie thermique de la forêt liée aux feuillages pourrait expliquer ces écarts de

température avec l'hiver, mais cela ne n'explique pas la présence d'un écart de température plus important en automne.

Outre la qualité du modèle de spatialisation de l'ICU variable, il apparait que la structure de l'ICU évolue selon la saison. Ainsi l'intensité de l'ICU n'augmente pas de façon homogène sur l'ensemble des sites mesurés. L'origine de ces variations saisonnières peut correspondre à la présence de facteurs permettant la mise place de l'ICU. La faible présence de végétation et le chauffage en ville peut expliquer la différence de structure spatiale de l'ICU (Stewart et Oke 2012). L'observation dans le parc *Les Prairies* permet de supposer la mise en place d'une évapotranspiration plus efficace, engendrant un îlot de fraîcheur plus marqué en ville en été ?

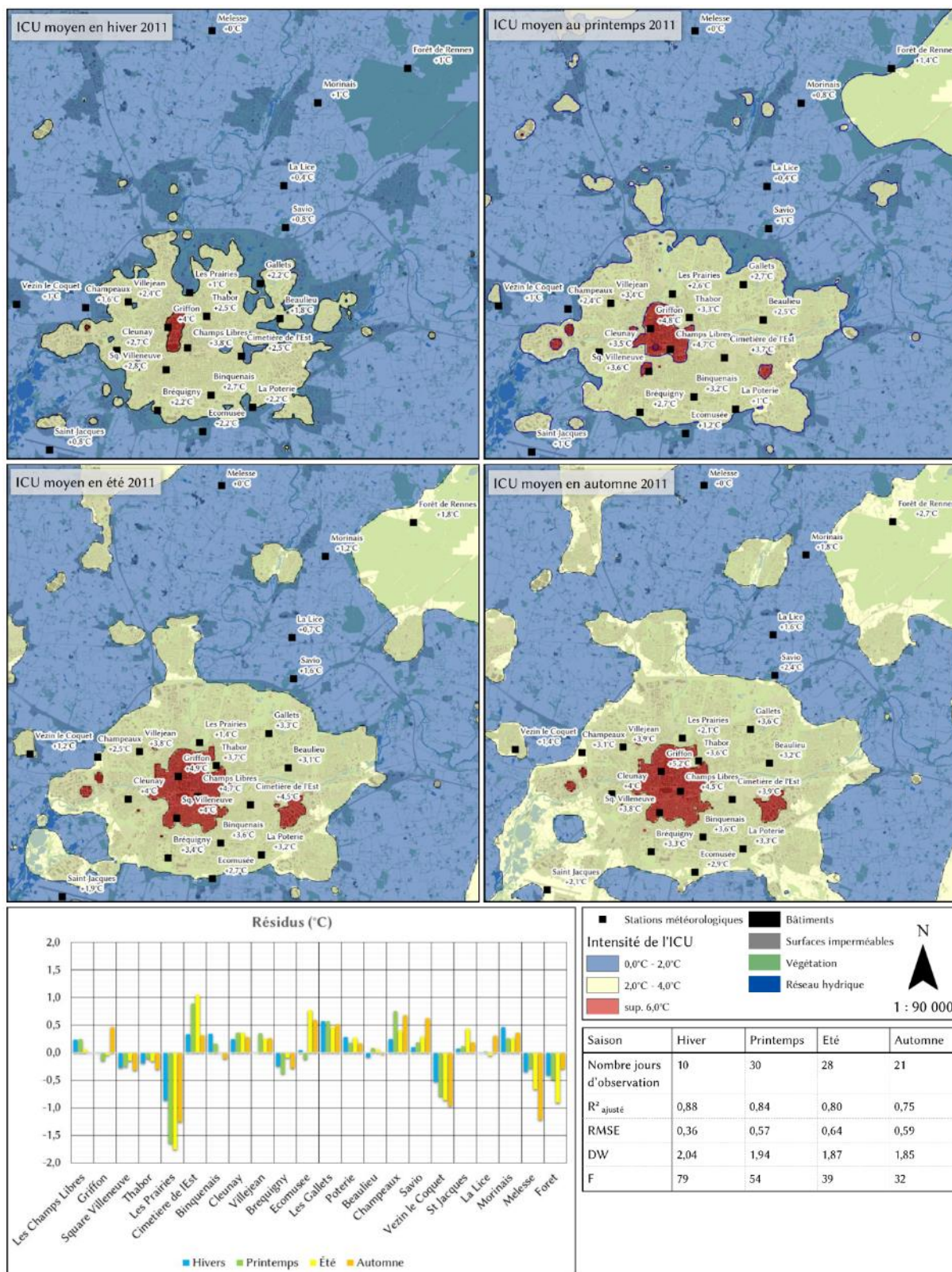


Figure 62, cartes et résidus des modèles de spatialisation de l'ICU moyen selon les quatre saisons de l'année 2011.

Conclusion du chapitre 5

L'analyse et la spatialisation de l'ICU sont réalisées sur l'ensemble des journées de l'année 2011. Ces travaux sont menés à l'échelle de l'agglomération pour une maille de 100 m de résolution. A cette échelle, une forte variabilité de l'ICU existe au sein d'une maille. La méthode de spatialisation a été automatisée, ce qui permet de produire des cartes pour l'ensemble des situations souhaitées. L'analyse spatiale de l'ICU en fonction de l'occupation du sol a permis de mettre en évidence la fluctuation des variables retenues selon les situations d'ICU. Les variables les plus significatives pour spatialiser l'ICU quotidien en 2011 sont : la fraction bâtie dans un rayon de 200 m et la fraction de végétation basse dans un rayon de 900 m. La variabilité de l'ICU expliquée par le modèle change selon le jour étudié, en moyenne elle est de 71%. Il apparaît que les jours en présence de vent sont moins bien décrits par le modèle. La variabilité de l'ICU moyen en 2011 est mieux expliquée par le modèle (82%), de même pour les situations où l'ICU est intense avec 87%. La méthode mise en place est satisfaisante pour spatialiser l'ICU moyen et intense. En revanche, il semble moins adapté aux situations météorologiques plus complexes. La méthode permet d'observer la variabilité spatiale de l'ICU en fonction des saisons. Cependant les résidus sont plus importants pour le parc urbain des *Prairies* au printemps et l'été. Ce biais est également constaté pour les autres modèles réalisés pendant ces deux périodes. La méthode de spatialisation a mis en évidence des variables d'occupation du sol influentes sur l'ICU. Ces éléments permettent d'envisager la construction d'indices par seuils afin de limiter l'effet de l'ICU. De même, la production de carte d'ICU est un outil permettant d'évaluer l'exposition des quartiers à ce phénomène.

Chapitre 6 : L'îlot de chaleur urbain à l'échelle des quartiers : spatialisation et limites scalaires

Ce chapitre analyse la variabilité spatiale de l'ICU à l'échelle intra-urbaine. Cette échelle s'insère au sein de celle de l'agglomération (abordée dans la deuxième partie de la thèse) et elle correspond à l'échelle d'intervention des aménageurs.

Dans un premier temps, la méthode par mesures mobiles est réalisée. L'objectif est d'observer la variabilité de l'ICU à travers différents quartiers le long d'un transect et d'établir l'amplitude totale de l'ICU. Cette méthode de mesures mobiles est comparée avec la mesure par des stations (météorologiques).

Dans un deuxième temps, l'analyse de l'ICU est réalisée afin de définir la variabilité au sein d'un même quartier. La variabilité de l'ICU est étudiée de l'échelle du quartier à l'échelle microlocale. L'objectif est de déterminer l'influence microlocale. Deux quartiers et une petite ville sont équipés de capteurs de température selon le protocole de mesures détaillés dans le chapitre 3.

Enfin, le réseau de mesures déployé à l'échelle intra-urbaine (*cf.* chapitre 3) est employé afin de spatialiser l'ICU selon la méthode décrite dans le chapitre 4.3. La spatialisation de l'ICU à l'échelle intra-urbaine est comparée avec le niveau supérieur, l'échelle de l'agglomération. Les limites et les capacités de cette méthode sont discutées.

6.1. Les mesures mobiles par transects

6.1.1. *Le protocole de mesures itinérantes*

Les mesures itinérantes par transects sont fréquentes pour l'évaluation de l'ICU, de nombreuses études y ont eu recours. La première observation de l'ICU réalisée par des mesures itinérantes sur un véhicule date de 1927 par Wilhelm Schmidt à Vienne, et quelques années plus tard elle a été suivie par Albert Peppler en 1929 à Karlsruhe, en Allemagne. Puis bien d'autres utiliseront cette méthode d'observation en Europe et au Canada (Stewart 2011). A partir des années 1950, des publications mentionnent l'observation de l'ICU par l'usage de transects (Sundborg 1951; Chandler 1962; Oke 1973). Cette méthode de mesures demeure jusqu'à maintenant largement employée pour la mesure de la température de l'air afin d'observer l'ICU

(Endlicher 1981; Eliasson 1996; Upmanis et al. 1998; Morris and Simmonds 2001; Alcoforado and Andrade 2005; Wong and Yu 2005; Quénol et al. 2010; Dubreuil et al. 2010; Zhao et al. 2011; Acero et al. 2013; Leconte et al. 2015). La mesure mobile par véhicule peut être exploratoire ou être utilisée à des fins de validation de modèle.

Cette méthode permet d'obtenir une bonne résolution spatiale d'observation de la température et d'établir des profils thermiques rendant compte de l'amplitude du phénomène rapidement et sans la mise en place d'un protocole de mesures long et fastidieux. Au demeurant, des inconvénients sont à souligner :

- la variabilité temporelle de l'ICU impose une durée de mesures relativement court, soit environ 30 min afin d'obtenir un ICU instantané (Oke 1973; Oke and Maxwell 1975);
- la mesure ne garantit pas une représentativité à l'échelle locale de l'ICU (c'est-à-dire représentative du quartier traversé), des effets microlocaux peuvent influencer la mesure (la chaussée, les véhicules...);
- la réactivité du capteur au changement de température, ce temps de latence peut engendrer un décalage entre le profil de température réel et mesuré.

La mesure est réalisée par une sonde thermocouple décrite précédemment (chapitre 3.1.2), celle-ci est placée dans un abri et l'ensemble est installé sur un mat fixé à une voiture à environ 2 m du sol. Ces dispositions sont prises afin de limiter les effets microlocaux sur la sonde ainsi que l'influence du véhicule. La vitesse de circulation de la voiture est d'environ 30 km/h pour réduire l'inertie liée au temps de réactivité de la sonde. L'itinéraire réalisé comporte trois transects qui débutent et se concluent dans la campagne avoisinante, en traversant le centre-ville afin d'observer l'amplitude maximale de l'ICU. La durée de chaque transect est d'environ 30 min pour conserver un ICU représentatif de l'instant de mesures. L'enregistrement de la température est réalisé à un pas de temps de 5 sec. Quant à l'itinéraire, il est enregistré à l'aide d'un GPS (GARMIN, *Dakota 10*) dont la fréquence d'enregistrement est de 5 sec, en synchronisation avec l'enregistrement de la température.

L'objectif de ces transects est d'établir un aperçu de l'amplitude totale de l'ICU. La haute résolution de l'enregistrement permet la mesure de l'ensemble des sites traversés. La mise en relation avec la typologie des quartiers révèle la structure de l'ICU et l'influence des quartiers. Enfin, la comparaison entre les mesures itinérantes et les mesures fixes posent la question de la représentativité du capteur de température en ville.

6.1.2. L'îlot de chaleur urbain du 27 au 28 septembre 2011

Les transects sont réalisés la nuit du 27 au 28 septembre 2011, lors d'un vague de chaleur de 7 jours où les températures maximales enregistrées sont supérieures à 25°C et l'ensoleillement quotidien est de 10h environ. La nuit du 27 au 28 septembre 2011 correspond en effet à un type de temps favorable à la mise en place d'ICU intense : le ciel est clair avec un vent faible (environ 2 m/s orienté à l'est).

Pour la journée du 27 septembre, la température maximale enregistrée par la station installée dans le centre-ville (*Griffon*) et la station située dans la campagne (*Melesse*) est respectivement de 26,7°C et 27,2°C (figure 63). La température minimale atteinte par la station *Griffon* est de 16,7°C et de 10,8°C par la station *Melesse*, ce qui indique un ICU (ΔT_n) de 5,9°C. La différence de température devient significative dès le coucher du soleil (à 18h UTC) avec +2,4°C et elle est supérieure à 6°C durant la nuit avec un maximum à 6,7°C. Cet écart entre la différence de température instantanée relevée et ΔT_n relevée illustre les différentes méthodes d'évaluation de l'ICU. Dans le cas présent, la différence instantanée avec la station rurale *Melesse* est retenue pour définir l'ICU.

La durée des mesures des transects n'excède pas environ 30 min est importante pour conserver la même structure de l'ICU entre la fin et le début du parcours. La figure 63 montre une diminution de la température de -0,5°C à -0,7°C par heure pour les stations *Melesse* et *Griffon*, ce qui indique que le premier point de mesures de la température du transect est très probablement plus faible à la fin de l'enregistrement du transect.

L'ensemble des mesures itinérantes et des mesures réalisées par les stations météorologiques placées à proximité des itinéraires sont récapitulées par la figure 64. Au total, trois transects sont effectués. Le premier transect A-B est orienté du nord vers le sud et la période

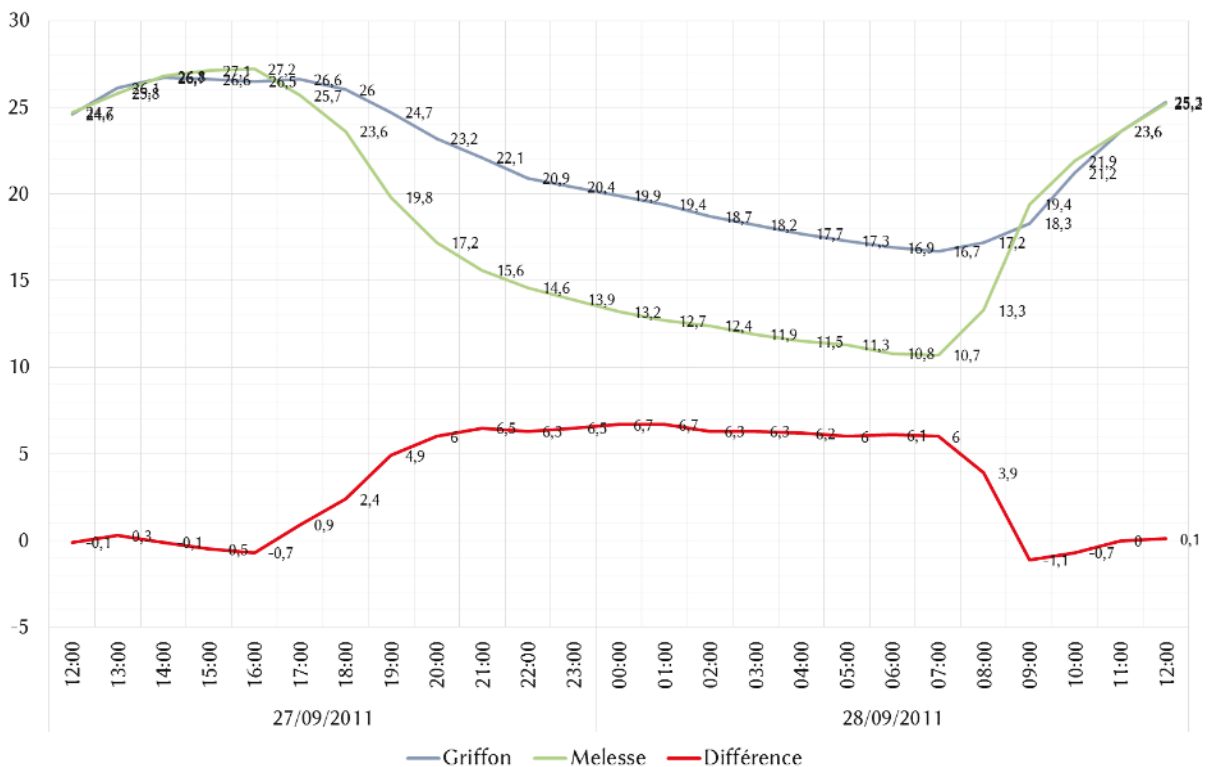


Figure 63, température mesurée (°C) du 27 à 12h (UTC) au 28 septembre 2011 à 12h par la station en centre-ville (*Griffon*), la station de référence campagne (*Melesse*) et la différence.

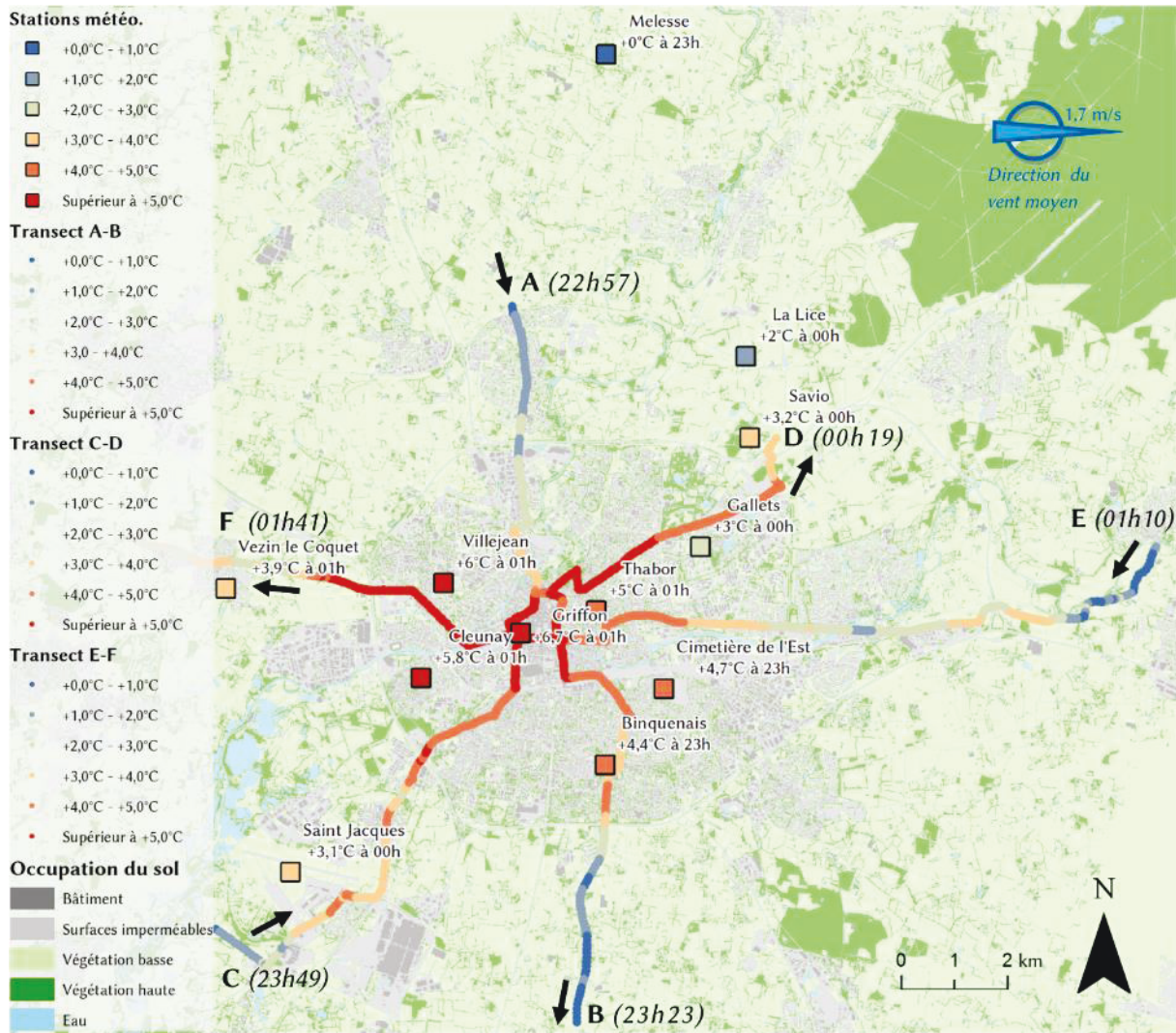


Figure 64, écarts de température instantanés avec la station Melesse (référence « campagne ») pour chaque point de mesures des transects et des stations météorologiques (à l'heure de passage). L'enregistrement du transect A-B (orienté nord - sud) débute le 27 septembre à 22h57 (UTC) et se conclut à 23h23 le 28 septembre 2011. L'enregistrement du transect C-D (sud-ouest – nord-est) démarre à 23h49 et se termine à 00h19. Le transect E-F (orienté est - ouest) est déclenché à 01h10 et arrêté à 01h41.

d'enregistrement est de 22h57 à 23h23 (soit 26 min). Les stations *Melesse*, *Cimetière de l'Est* et *Binquenais* sont situées à proximité de l'itinéraire de ce transect. Le deuxième transect C-D est orienté du sud-ouest vers le nord-est, il débute à 23h49 et se conclue à 00h19. Les stations météorologiques *St Jacques*, *Gallets*, *Savio* et *La Lice* sont localisées le long du parcours. Le troisième transect E-F orienté de l'est vers l'ouest démarre à 01h10 et s'arrête à 01h41. Ce transect passe à proximité des stations du *Thabor*, de *Griffon*, de *Cleunay*, de *Villejean* et de *Vezin-le-Coquet*.

a) Le transect A-B (nord-sud)

Le premier transect débute par la commune de Saint-Grégoire au nord de Rennes. La figure 65 indique le profil thermique et la typologie du quartier traversé. Il apparaît que l'ICU demeure faible au passage de St-Grégoire (+1,7°C), cependant une légère augmentation de la température se distingue pour les trois zones d'activités traversés. La zone d'activité au Nord de Rennes révèle

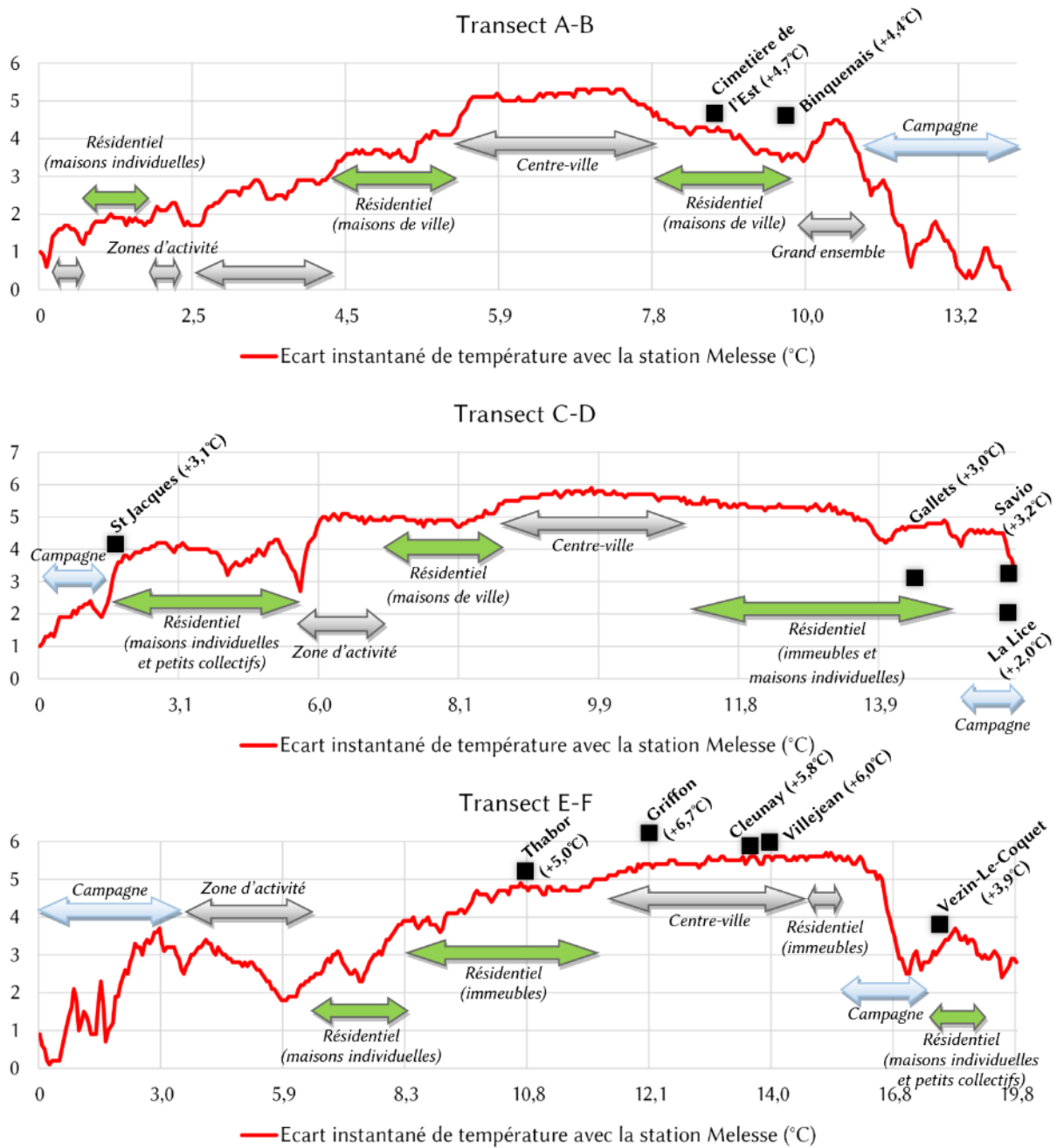


Figure 65, profils thermiques et par typologie des quartiers traversés par les trois transects la nuit du 27 au 28 septembre 2011. Les stations météorologiques sont indiquées et relevées au passage à proximité de celles-ci.

un ICU de +2,5°C en moyenne puis la traversé de zone résidentielle composée de maisons de ville indique une augmentation progressive de l'ICU (soit un ICU de +3,5°C). Deux sauts de température successifs sont observés à l'approche du centre-ville pour atteindre un premier seuil à +4,0°C et un second à +5,0°C. Le centre-ville constitue un plateau de température à environ +5,0°C, cependant elle décroît progressivement à l'approche et dans les quartiers résidentiels (maisons de ville). Les stations météorologiques du *Cimetière de l'Est* de la *Binquenais* enregistrent respectivement +4,7°C et +4,4°C ce qui est supérieur aux températures relevées par le transect à proximité (+4,2°C et +3,6°C). Le passage dans un quartier composé de grands-ensembles apparaît par un pic de température (culminant à +4,5°C), puis une chute rapide de la

température correspond au passage urbain-rural avec une grande fluctuation de la température en campagne.

b) Le transect C-D (sud-ouest – nord-est)

Le deuxième transect commence au sud de la commune de Saint-Jacques-de-la-Lande en campagne, puis il traverse le centre de la commune, essentiellement résidentiel composé de maisons individuelles et d'immeubles (figure 65). Cet espace présente un ICU compris entre $+3,0^{\circ}\text{C}$ et $+4,0^{\circ}\text{C}$. Une baisse de la température est observée entre ce quartier résidentiel et la zone d'activité, ce qui correspond à un espace sans construction. Puis à partir de la zone d'activité, la température atteint $+5^{\circ}\text{C}$ et demeure lors de la traversé de l'espace résidentiel (maisons de ville), ce qui constitue un plateau. Un second plateau est observé dans le centre-ville avec un ICU proche d'environ $+5,5^{\circ}\text{C}$. Ce plateau thermique se poursuit en dehors du centre-ville lors de la traversée de quartiers résidentiels composés de maisons de ville et d'immeubles. Un creux (thermique) apparaît peu avant la station les *Gallets* au passage à proximité du Parc des Gayeulles, mais il demeure faible et bien supérieur à la température mesurée par la station représentative du quartier ($+4,2^{\circ}\text{C}$ contre $+3,0^{\circ}\text{C}$ mesuré par la station *Gallets*). Une fois la campagne atteinte la température reste encore élevée ($+4,5^{\circ}\text{C}$) puis arrivé au niveau de la station *Savio*, le profil thermique chute pour atteindre la température relevé à la station la plus proche *Savio* ($+3,2^{\circ}\text{C}$). La température relevée par la station La Lice (située à 1,5 km plus au Nord) est de $+2,0^{\circ}\text{C}$.

c) Le transect E-F (est-ouest)

Le troisième transect débute à l'est de Rennes près des communes d'Acigné et de Noyal-sur-Vilaine, le profil de température indique une grande variabilité de la température comprise entre $+0,0^{\circ}\text{C}$ et $+3,5^{\circ}\text{C}$ à l'approche de la commune de Cesson-Sévigné. La zone d'activité apparaît plus chaude ($+3,0^{\circ}\text{C}$ environ) que l'espace résidentiel composé de maisons individuelles ($+2,2^{\circ}\text{C}$ en moyenne), cependant ces deux espaces n'apparaissent pas homogènes, de grandes fluctuations de températures sont observées en leur sein. Le passage dans l'espace résidentiel composé d'immeubles présente une augmentation progressive de l'intensité de l'ICU de $+4,0^{\circ}\text{C}$ à $+5,0^{\circ}\text{C}$. La station *Thabor* située dans un parc près du centre-ville enregistre également $+5,0^{\circ}\text{C}$ au même moment. Le profil de température se stabilise à $5,5^{\circ}\text{C}$ environ dans le centre-ville mais également dans le quartier résidentiel adjacent composé d'immeubles. La station *Griffon* représentative du centre-ville mesure un ICU de $+6,7^{\circ}\text{C}$, ce qui indique une sous-estimation de la température de la mesure réalisée par le transect ou un éventuel effet microlocal. Les stations situées dans des quartiers plus à l'ouest *Cleunay* et *Villejean* enregistrent respectivement un ICU de $+5,8^{\circ}\text{C}$ et $6,0^{\circ}\text{C}$ ce qui est proche à la température relevée par le transect. Une fois dans la campagne avoisinante la température chute brutalement de $+5,0^{\circ}\text{C}$ à $+2,5^{\circ}\text{C}$, puis un pic apparaît au passage de la commune de Vezin-le-Coquet ($+3,5^{\circ}\text{C}$).

d) Interprétations et conclusions

La température relevée par les transects présente une forte variabilité à la campagne, notamment à la fin du transect A-B, au début des transects C-D et E-F. Cette variabilité correspond à l'altitude du terrain. L'air frais s'écoule le long des pentes vers les espaces les plus bas lors des conditions radiatives, ce qui correspond aux conditions favorables à la mise en place de l'ICU. Cette inversion thermique se traduit par la présence de lacs d'air froid se constituant dans le fond des vallons (Carrega 1992). Lors du passage en fond du vallon, la température mesurée par transect baisse rapidement. Cependant la relation entre la température et l'altitude diminue en ville, le phénomène d'îlot de chaleur urbain supprime ce phénomène d'inversion

thermique. Au demeurant, au début du transect E-F la traversée de la zone d'activité à l'espace résidentielle indique une diminution de la température. La température relevée est plus élevée à l'entrée dans la ville que dans l'espace résidentiel. Cette fraîcheur constatée dans l'espace résidentiel correspond à la présence d'un vallon.

La comparaison entre la température mesurée par les transects et les stations météorologiques montrent les incertitudes de la mesure des transects liées à l'inertie de la mesure (temps de réactivité de la sonde), de la représentativité de la mesure sur la voirie (est-elle représentative du quartier ?), des effets microlocaux et de l'incertitude de la sonde ($\pm 1,5^\circ\text{C}$). Ainsi un écart important de mesures de la température apparaît entre le transect C-D et la station à proximité *Gallets*, celle-ci enregistre $+3,0^\circ\text{C}$ contre $+4,5^\circ\text{C}$ par le transect alors que l'îlot de fraîcheur du parc des Gayeulles observé par le transect demeure supérieur à la température mesurée par la station *Gallets*. De même, pour la fin de ce transect, la température enregistrée demeure élevée ($+4,5^\circ\text{C}$) même en campagne. Ces éléments révèlent une part d'incertitude de cette méthode de mesures par transects.

Le transect E-F permet de mettre en évidence un déplacement très probable de l'ICU vers l'ouest par la présence d'un vent d'est de $2,0\text{ m/s}$ (soit une légère brise selon l'échelle de Beaufort). Lors de ce transect, le plateau thermique atteint dans le centre-ville demeure jusque dans les quartiers résidentiels plus en périphérie à l'ouest. Cet ICU intense est mesuré par les stations météorologiques situées à l'ouest du centre-ville *Villejean* et *Cleunay* avec respectivement $+6,0^\circ\text{C}$ et $+5,8^\circ\text{C}$.

A partir de ces observations, un profil thermique schématique adapté à la ville de Rennes est réalisé en figure 66 (Oke 1987). Ce profil montre les « plateaux » observés selon les quartiers séparés parfois par une augmentation importante de la température nommée ici « rupture ». Selon les situations et la précision de la mesure le nombre de plateaux varie entre deux et trois. De même, la présence de rupture n'est pas systématiquement observée. Ce schéma de profil demeure théorique mais permet de mettre en évidence des grands ensembles thermiques selon

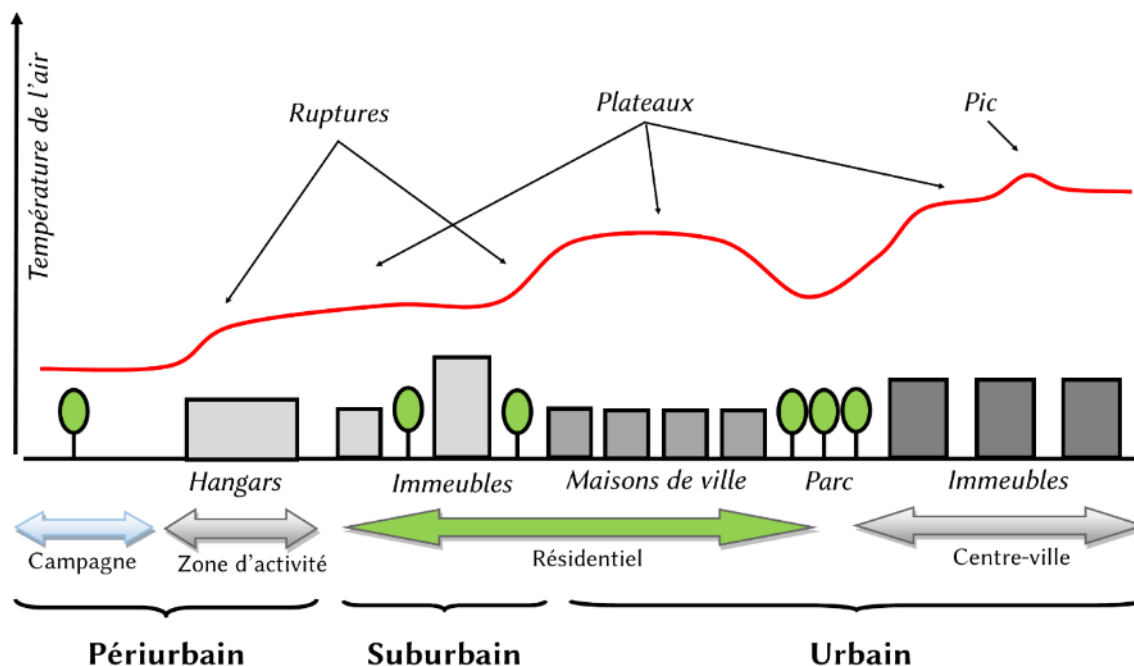


Figure 66, schéma du profil thermique observé à Rennes selon une typologie de quartiers, adapté de Oke T.R., 1987.

des typologies de quartier. Les transects permettent d'apprécier l'amplitude de la température relative à l'ICU, cependant des limites apparaissent quant à la précision de la mesure, ce qui ne permet pas de conclure définitivement sur les particularités thermiques des quartiers.

6.2. Les mesures ponctuelles à l'échelle d'un quartier

Afin d'évaluer la variabilité de l'ICU à l'échelle d'un quartier, trois sites sont équipés de capteurs de température de type Tinytag. La méthode d'installation et le choix des sites sont détaillé dans le chapitre 3.3.2. Les capteurs sont placés au sein d'un même quartier dans des sites avec un environnement immédiat différent : cour d'une résidence, parc, zone d'activité, selon la topographie... Au total trois sites sont équipés, deux quartiers au nord de Rennes sont retenus : la ZAC de Beauregard et la ZAC des Longs Champs et une petite ville à l'ouest de Rennes : Vezin-le-Coquet. Les stations météorologiques *Vezin-le-Coquet* et *Gallets* sont situés à proximité des sites mesurés, elles permettront de révéler la variabilité spatiale de l'ICU à proximité de celle-ci (figure 67).

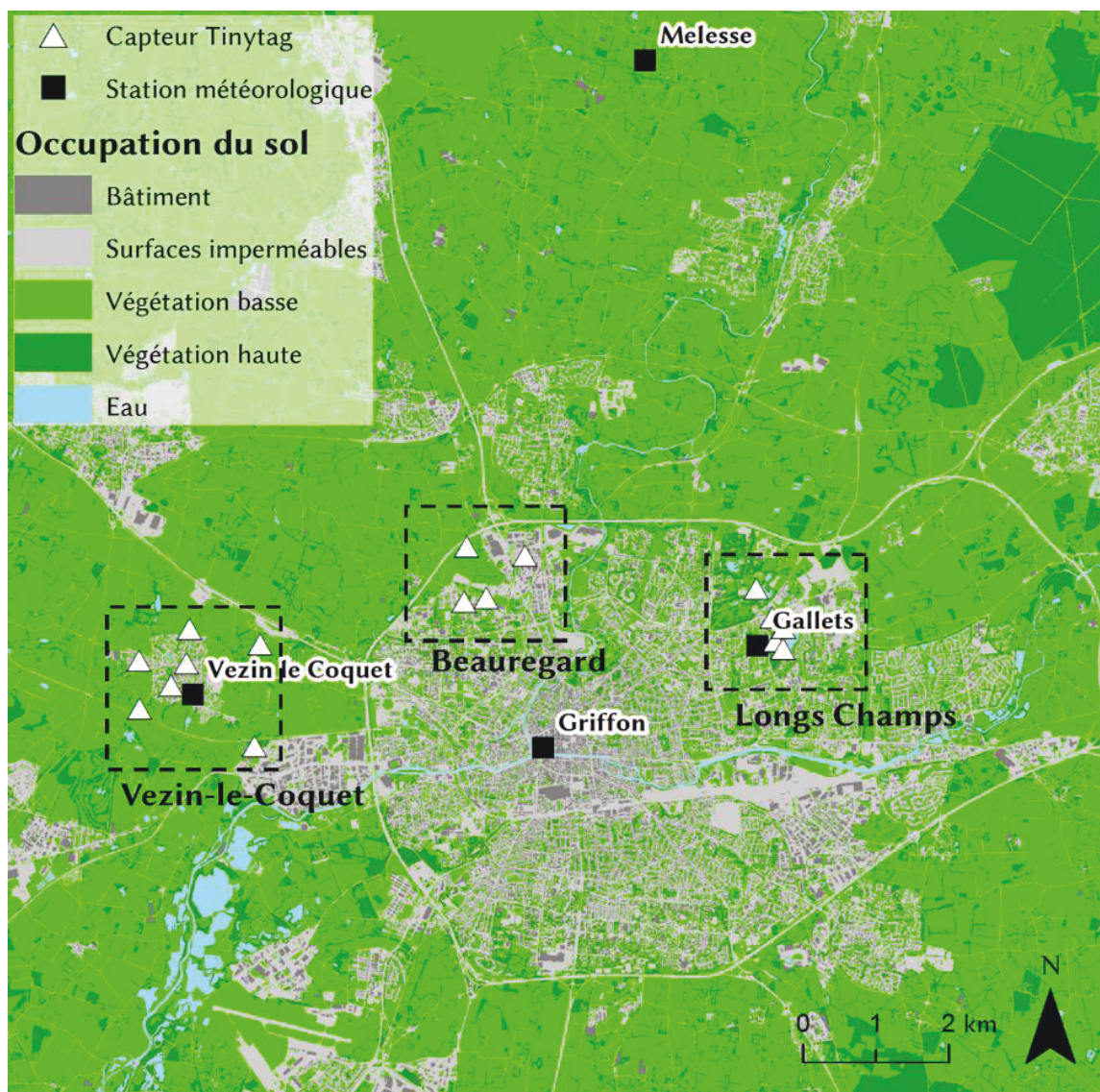


Figure 67, emplacement des trois sites étudiés à l'échelle d'un quartier : une petite ville (Vezin-le-Coquet), une ZAC récente (Beauregard) et une ZAC à proximité d'un parc (Longs Champs).

Les mesures ont été réalisées durant l'été 2012 avec une phase préliminaire de vérifications de la cohérence des données. L'analyse de ces trois sites est réalisée sur la période du 17 au 18 août 2012. L'observation débute peu avant que la température maximale soit atteinte (à 15h20) et se poursuit pendant 24h à un pas de temps de 20 min. Cette période est retenue car l'ICU mesurée le 18 août au matin est de $+4,8^{\circ}\text{C}$ entre la température minimale enregistrée entre la station dans le centre-ville *Griffon* et la station rurale *Melesse* (figure 67). Les 17 et 18 août sont deux journées que l'on peut qualifier de très chaudes avec une température maximale supérieure à 30°C ; la température maximale relevée par la station de Météo-France *St-Jacques* est respectivement de $34,5^{\circ}\text{C}$ et $31,9^{\circ}\text{C}$.

6.2.1. La ZAC de Beauregard

Cette ZAC récente est actuellement encore en construction, c'est pourquoi un capteur (*Le Haut Quincé*) est placé hors de la proximité immédiate de constructions afin de définir un site de mesures en-dehors de l'espace urbanisé (voir la figure 68). L'ICU mesuré (ΔT_n avec *Melesse* le 18 août 2012) sur ce site est le plus faible avec $+1,5^{\circ}\text{C}$. Le second site le plus frais correspond au *Parc de Beauregard* avec $+2,2^{\circ}\text{C}$, dont le relevé indique une influence très probable de l'ICU sur ce site. A environ 300 m, se trouve le site *Résidence* installé dans une cour fermée et largement végétalisée, l'ICU mesuré est de $+2,6^{\circ}\text{C}$. Ce relevé est proche au site placé au cœur de la zone d'activité plus à l'est (ZA) avec $+2,7^{\circ}\text{C}$, dont la végétation y est très peu présente, ce qui indique une homogénéité de l'ICU dans les espaces bâtis au sein d'un même quartier. Cependant l'écart maximum de l'ICU observé au sein du quartier est de $1,2^{\circ}\text{C}$ entre le site du *Haut Quincé* et la ZA, 900 m sépare ces deux points ce qui correspond à une distance suffisante pour atténuer l'ICU. Quant aux écarts de température observés entre la *Résidence*, le *Parc de Beauregard* et *Le*



Figure 68, ICU observé à la ZAC Beauregard la nuit du 17 au 18 août 2012.

Haut Quincé, ils indiquent un îlot de fraîcheur faible pour ce parc de 6 ha. Une étude réalisée dans un parc à Göteborg (en Suède) aux dimensions similaires rapportent un effet de rafraîchissement sur 20 m à 30 m avec un écart maximum de 0,8°C et 0,9°C pour un parc de 4 ha (Upmanis et al. 1998). L'îlot de fraîcheur du *Parc de Beauregard* apparaît très certainement plus faible que dans un contexte plus largement bâti où le gradient thermique serait plus important.

Afin d'observer la variabilité temporelle de l'ICU, la figure 69 montre la température enregistrée du 17 au 18 août sur les quatre sites. La température maximale est atteinte par le capteur situé dans la ZA avec 35,1°C, il demeure le site le plus chaud, jusqu'à 23h, puis les sites *Résidences* et le *Parc de Beauregard* enregistrent une température similaire à ce site jusqu'au lever du soleil. Ces trois sites se révèlent très proches au regard de la période d'observation de l'ICU. Seul le site *Le Haut Quincé* se distingue en étant plus frais en moyenne de -1,4°C par rapport aux trois autres sites. Ces observations permettent de mettre en évidence le caractère homogène de l'ICU à l'échelle du quartier malgré une typologie différente (une zone d'activité et une résidence composée d'immeubles récents R+5). Le capteur dans le parc indique la présence d'un léger îlot de fraîcheur en fin de nuit, mais se révèle sur l'ensemble de la nuit inexistant.

6.2.2. Les Longs Champs

Dans ce quartier, cinq capteurs ont été installés et la station *Gallets* située à proximité est utilisée. Cependant l'ensemble des capteurs n'étaient malheureusement pas opérationnel du 17 au 18 août 2012, l'observation est donc réalisée en deux parties la première du 17 au 18 août 2012 et la seconde la nuit du 2 au 3 février 2012 lors de la période d'observation préliminaire. Les conditions météorologiques sont similaires pour l'observation de l'ICU, le vent est faible avec un ciel dégagé. L'écart observé entre le centre-ville (*Les Champs Libres*) et la campagne (*Melesse*) sont comparables : le 18 août, $\Delta T_n = 4,8^\circ\text{C}$ et le 3 février $\Delta T_n = 4,5^\circ\text{C}$.

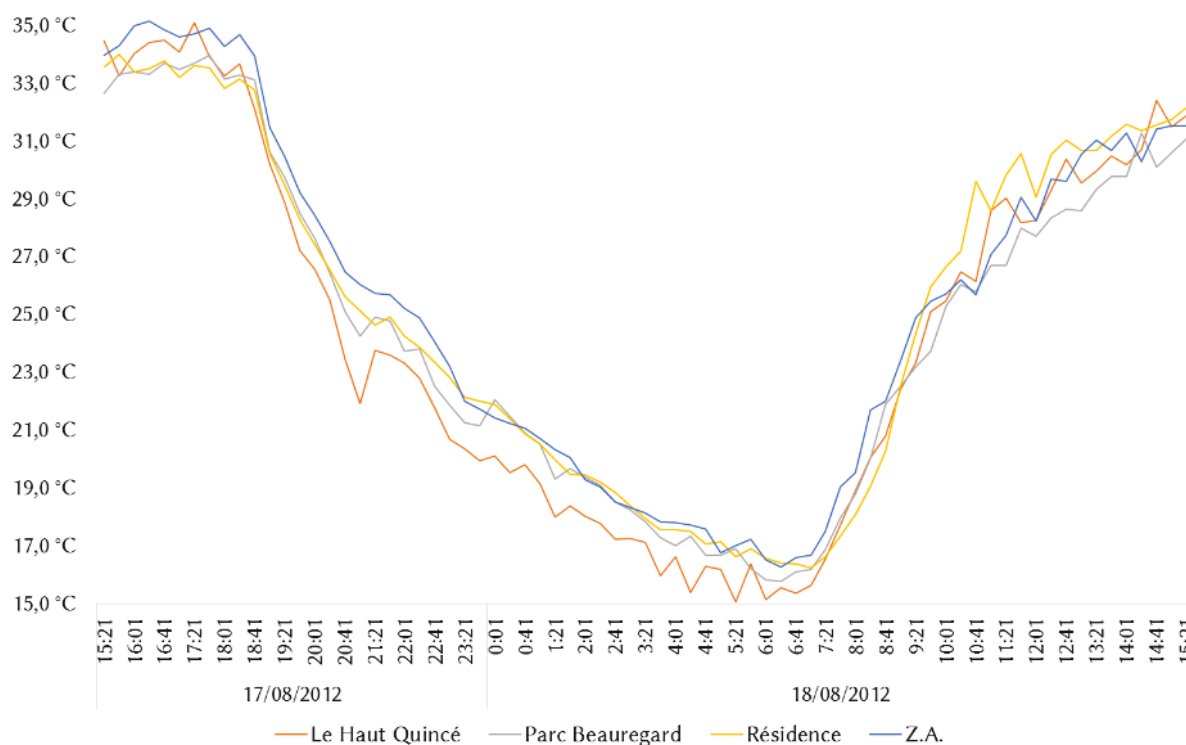


Figure 69, température relevée sur les sites de la ZAC Beauregard du 17 au 18 août 2012.

L'ICU observé le 18 août au matin par les sites est indiqué en figure 70. Le site le plus chaud avec $+3,9^{\circ}\text{C}$ correspond à la ZA, elle est comparable en terme de typologie à celle présente précédemment près de la ZAC Beauregard. De même, un capteur est installé dans une cour fermée d'une résidence, cependant elle est cette fois-ci faiblement végétalisée. L'ICU mesuré dans cette cour (*Résidence 1*) est de $+3,4^{\circ}\text{C}$. Un capteur est également placé dans un parc, cependant aux dimensions plus importantes (100 ha). L'ICU dans le *Parc des Gayeulles* est mesuré à $+1,5^{\circ}\text{C}$, ce qui est identique à la valeur relevée précédemment sur le site *Le Haut Quincé*. La ZA et la *Résidence 1* affiche un ICU largement supérieur à l'ICU constaté à Beauregard pour une typologie similaire, soit $1,2^{\circ}\text{C}$ de plus. Cependant la station *Gallets* représentative du quartier enregistre un ICU de $+2,4^{\circ}\text{C}$, ce qui est proche des valeurs relevées à Beauregard. Les sites *Résidence 1* et ZA révèle à l'échelle du quartier des effets microlocaux plus importants que précédemment à Beauregard. Les deux sites sont à proximité immédiate d'espaces fortement imperméabilisés. Ainsi à cette échelle microlocale, l'ICU est plus important d'environ 1°C pour ces deux sites.

La figure 72, montre la température enregistrée par les capteurs pendant 24h. Il apparaît que le site de la ZA est le plus chaud avec une température maximale de $34,8^{\circ}\text{C}$ contre $33,0^{\circ}\text{C}$ observé au même moment dans le *Parc des Gayeulles*. La température relevée la nuit est en moyenne $2,8^{\circ}\text{C}$ plus fraîche que pour les trois autres sites, ce qui constitue un îlot de fraîcheur marqué. Les sites de la ZA et de la *Résidence 1* apparaissent similaires sur l'ensemble de la période, la station des *Gallets* devient plus fraîche que ces deux sites à partir de 1h. Ces observations confirment l'analyse précédente, l'ICU mesuré apparaît plus hétérogène dans ce quartier avec un gradient de $1,9^{\circ}\text{C}$ entre l'ICU observé dans le *Parc des Gayeulles* et la ZA (distants de 500m). De même entre les *Gallets* et la *Résidence 1*, un gradient de 1°C en 300 m.



Figure 70, ICU observé à la ZAC Longs Champs la nuit du 17 au 18 août 2012.

Les mesures réalisées la nuit du 2 au 3 février 2012 permettent de comparer l'ICU avec deux autres sites du même quartier (voir la figure 71). Le premier site est une cour de résidence (*Résidence 2*) avec une part plus importante de végétation que sur le site *Résidence 1*. Le second site est situé à proximité d'un étang (*Etang*). L'ICU observé de cette nuit n'est pas identique à celui du 18 août car les saisons sont différentes et par conséquent la présence de la végétation et son influence sur l'ICU est également différente. Cependant, il apparaît que l'ICU mesuré près de l'étang (+1,7°C) est similaire à celui observé par la station météorologique *Gallets* (+1,8°C). L'ICU observé dans la *Résidence 1* est également plus élevé d'1°C environ avec +2,7°C. L'ICU observé dans la cour de la *Résidence 2* (+2,0°C) est très proche à l'ICU des sites des *Gallets* et de l'*Etang*. La présence de végétation dans la cour de la *Résidence 2* semble atténuer l'influence microlocal des bâtiments et des surfaces imperméabilisés. Le *Parc des Gayeulles* est le site le plus frais avec +0,6°C, soit un écart de température 1,2°C avec la station des *Gallets*, ce qui est proche de l'écart de température de 0,9°C observé le 18 juillet.

La distance entre la station *Gallets* et la lisière du parc est de 500 m pour un écart thermique d'environ 1°C, tandis que la distance de la *ZA* à la lisière du parc est de 300 m pour un écart d'environ 2°C, ce qui n'indique pas un effet de rafraîchissement lié à la proximité du parc. Les effets microlocaux semblent être plus influant sur l'ICU pour le site *ZA*. D'autres travaux sur l'effet de l'îlot de fraîcheur (nocturne) d'un parc indiquent des résultats variables :

- un îlot de fraîcheur de 3,5°C pour un parc de 135 ha (Mayer 1988)
- pour un parc de 150 ha un effet de rafraîchissement nocturne maximum de 4,4°C sur les quartiers limitrophes de 845 m à 1175 m (Upmanis et al. 1998) ;
- un rafraîchissement au maximum de 4°C des quartiers environnant à une distance variant de 20 m à 440 m (environ 400 m pour les journées très chaudes) pour un parc de 111 ha (Doick et al. 2014).



Figure 71, ICU observé à la ZAC Longs Champs la nuit du 2 au 3 février 2012.

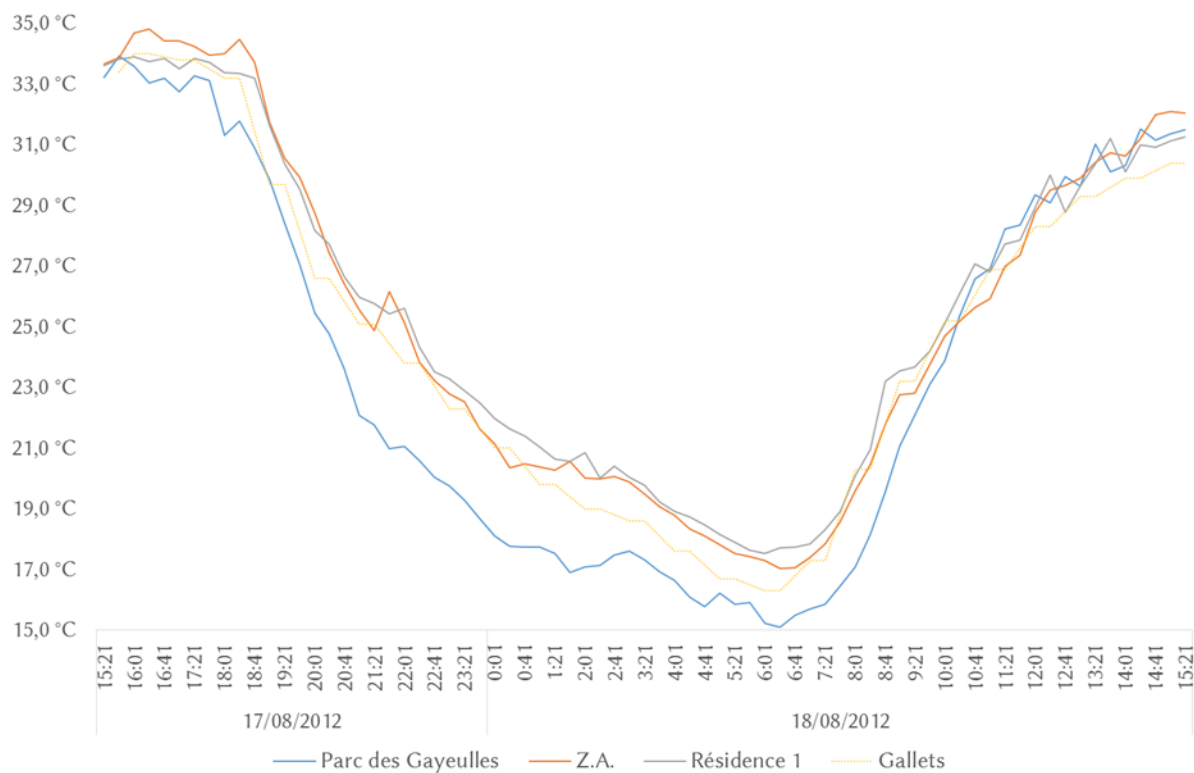


Figure 72, température relevée sur les sites de la ZAC Longs Champs du 17 au 18 août 2012.

6.2.3. Vezin le Coquet

Sur la commune de Vezin-le-Coquet un réseau de 8 capteurs a été mise en place. La figure 73 montre l'ICU observé le matin du 18 juillet sur la commune. Le capteur situé dans le centre de la ville (*Mairie*) enregistre le point le plus chaud, soit $+2,7^{\circ}\text{C}$. Cet îlot de chaleur dans le centre de la ville est de la même intensité que dans les deux quartiers au nord de Rennes pour cette nuit : *Beauregard* (*Résidence* $+2,6^{\circ}\text{C}$) et les *Longs Champs* (*Gallets* $+2,4^{\circ}\text{C}$). Ce site de la *Mairie* se trouve au cœur du bourg où la végétation y est plus faible que dans les autres quartiers de la ville. Parmi les trois sites en ville dans des quartiers pavillonnaires, *Les Musiciens* et la *Trame Verte* ont un ICU équivalent avec respectivement $+1,5^{\circ}\text{C}$ et $+1,3^{\circ}\text{C}$. La proximité d'un parc (à moins de 10 m) et d'un petit étang au site *Trame verte* ne semble pas provoquer une diminution de la température. Ce parc de 2 ha (dont l'emprise a une forme allongée) est situé au cœur de la ville et il est bordé essentiellement par des maisons individuelles (pavillonnaires). Cependant le troisième site en ville (*Vezin le Coquet*) dont le quartier est également pavillonnaire mesure le point le plus frais en ville ($+0,8^{\circ}\text{C}$), ce qui est équivalent aux sites en campagne : *La Ferme* ($+0,6^{\circ}\text{C}$) et *Brin d'Herbe* ($+0,6^{\circ}\text{C}$).

Le second point le plus chaud ($+1,9^{\circ}\text{C}$) est enregistré au nord sur le site *Château d'eau*. Ce site (en campagne) est le plus élevé, à 64 m. Cette observation extra-urbaine permet de montrer l'importance de la topographie pour expliquer le gradient de température observé. L'inversion thermique implique que les sites les plus frais sont situés aux altitudes les plus basses, ce qui est le cas des sites de la *Ferme* et de *Brin d'Herbe* avec une altitude respective de 31 m et 35 m, soit un baisse de la température de $-1,0^{\circ}\text{C}$ pour 30 m de dénivelé. Ce gradient de température peut

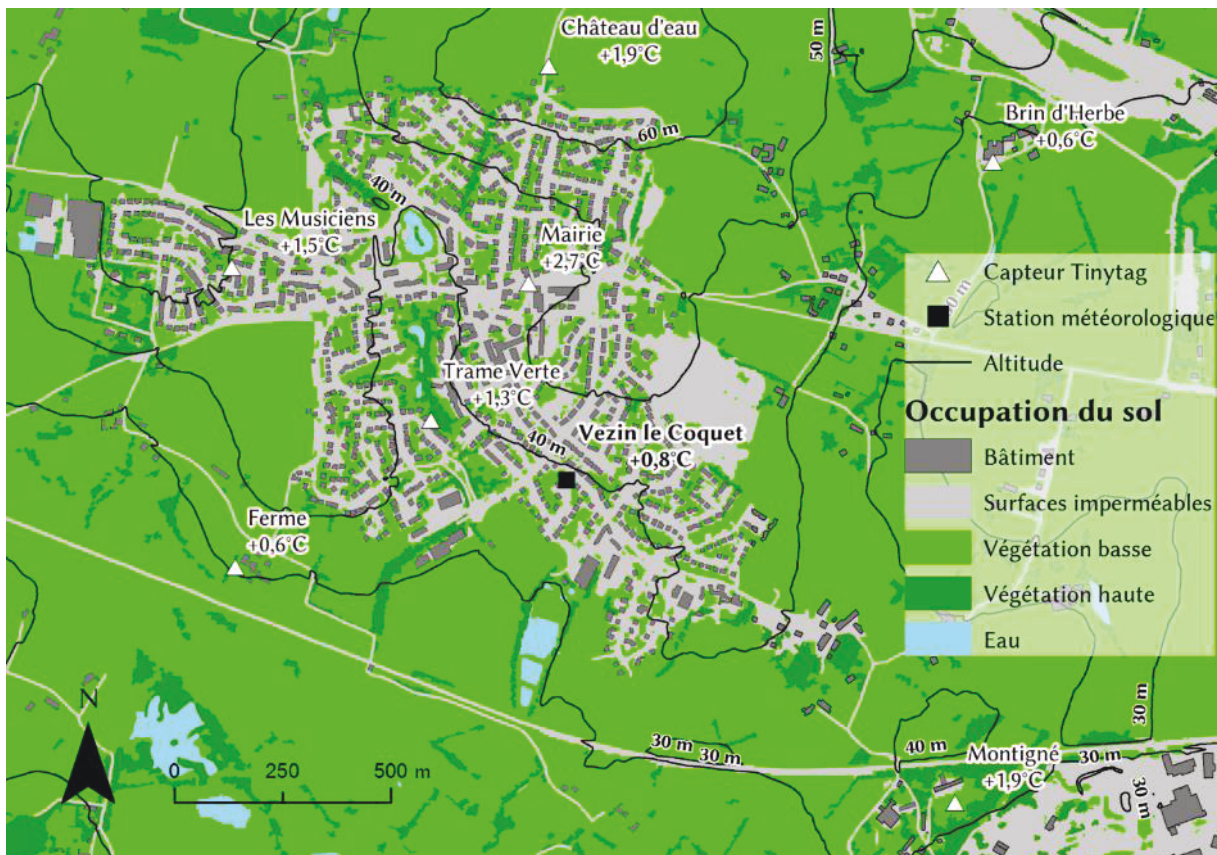


Figure 73, ICU observé à Vezin-le-Coquet la nuit du 17 au 18 août 2012.

expliquer la température observée par la station météorologique *Veizin le Coquet* dont la température est proche avec une altitude de 37 m.

Le site de *Montigné* au sud-est se révèle aussi chaud que le site *Château d'eau* malgré son environnement immédiat fortement végétalisé (un parc boisé). Ce site est sous l'influence de l'ICU issu de la ZA Ouest (située à moins de 300m). Cette observation confirme l'influence d'un quartier sur la température environnante, notamment avec un vent faible (Oke 1982).

L'analyse de la température du 17 au 18 août 2012 sur l'ensemble des sites (figure 74) montre que la *Mairie* est le site le plus chaud durant la journée ($T_x=35,1^\circ\text{C}$) et la nuit ($T_n=16,3^\circ\text{C}$). Il s'agit du seul site où l'ICU y est marqué. Trois sites se rafraichissent plus rapidement dès le coucher du soleil (19h UTC) avec en moyenne $-3,9^\circ\text{C/h}$: la *Trame verte*, *Brin d'Herbe* et la *Ferme*. Puis l'ensemble des sites atteignent en fin de nuit des températures comprises entre $15,5^\circ\text{C}$ et $14,0^\circ\text{C}$, seul le site de la *Mairie* se distingue.

Ces observations permettent de montrer un ICU présent dans le centre-ville d'une petite ville (de moins de 5000 habitants) et comparable à celui observé dans les quartiers au nord de Rennes ($+2,7^\circ\text{C}$). Le facteur topographique apparaît important dans la mise en place du gradient de température à l'échelle de *Veizin-le-Coquet*, même dans les quartiers résidentiels. Le gradient de température observé révèle que l'influence de l'ICU dans le centre de la ville et s'atténue rapidement dans les quartiers pavillonnaires avoisinants au profit de la topographie. Cependant le site de *Montigné* montre l'influence de l'ICU engendré par la zone d'activité voisine, malgré sa localisation dans un parc boisé.

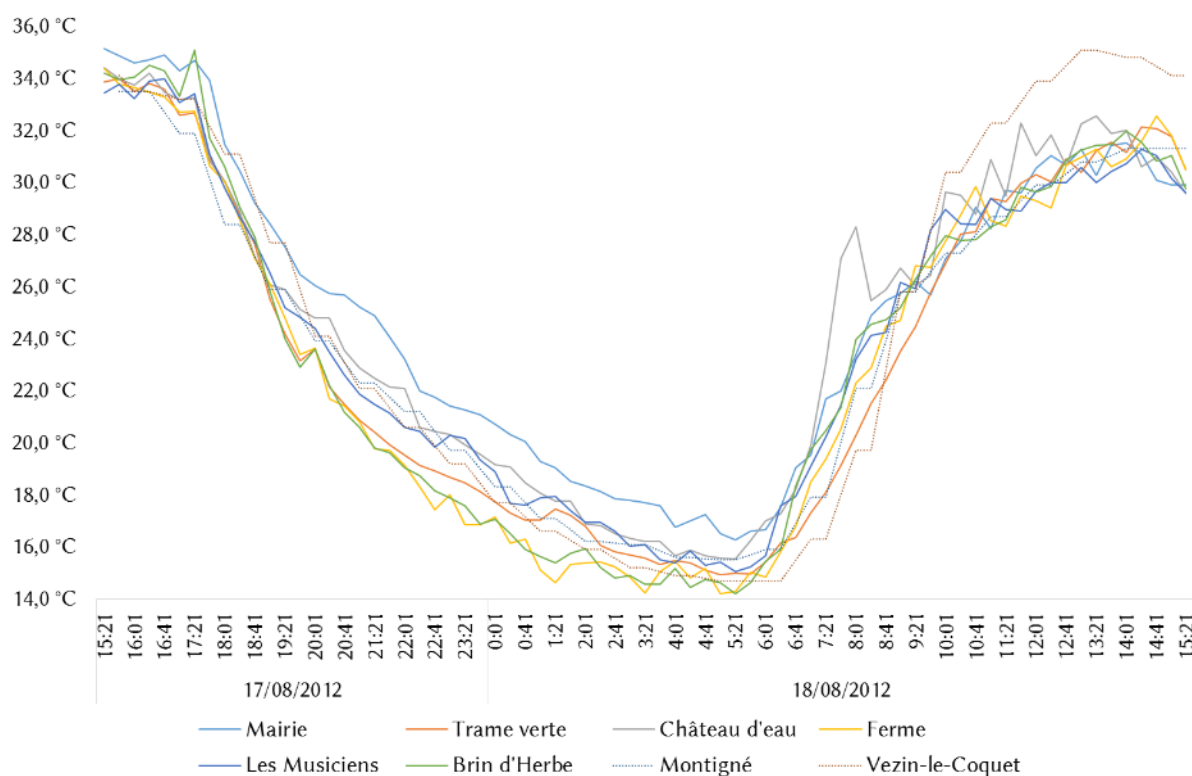


Figure 74, température relevée sur les sites de *Veizin-le-Coquet* du 17 au 18 août 2012.

6.3. Spatialisation de l'ICU à l'échelle intra-urbaine

6.3.1. L'ICU moyen de l'été 2013

L'installation de capteurs Tinytag dans l'espace intra-urbain de Rennes est détaillée dans le chapitre 3.3.1. Un réseau de 20 capteurs est installé dans différents quartiers compris dans la tache urbaine rennaise afin de mettre en évidence la variabilité spatiale de l'ICU et de la spatialiser. Suite à la campagne de mesure de l'été 2013, une sélection des nuits où l'ICU est marqué ou intense, a été réalisée, c'est-à-dire les nuits avec un ciel clair et un vent faible (inférieur à 5 m/s) et un $\Delta T_n \geq 3^\circ\text{C}$ (entre le centre-ville et la campagne). Au total 12 nuits ont été retenues et à partir desquels la moyenne des ΔT_n observés pour chaque site (23 sont pris en compte) et la station rurale (*Melesse*) est établie.

a) Méthode de spatialisation et analyses préalables des variables descriptives

Selon la méthodologie détaillée dans le chapitre 4.2.2, l'automatisation est appliquée avec le logiciel R selon le script réalisé pour la spatialisation à l'échelle de l'agglomération rennaise décrite dans le chapitre 6.3.3. La méthode requiert une analyse de l'occupation du sol. Les mêmes facteurs utilisés pour l'analyse des stations météorologiques sont retenus : la fraction de surfaces bâties, la hauteur moyenne des bâtiments, la fraction de surfaces imperméabilisées, la fraction de végétation haute, la fraction de végétation basse, la fraction d'eau, l'altitude et la distance au centre de la ville. Les fractions d'occupation du sol ont été calculées à partir des mêmes dimensions de zones tampons utilisées à l'échelle de l'agglomération, notées : B100, B200, B300, B400, B500, B600, B700, B800 et B900. Cependant une variable supplémentaire est ajoutée : le Sky View Factor (SVF), dont la méthode de calcul est décrite dans le chapitre 4.1.2. Cet indice permet de décrire les formes urbaines des bâtiments et plus précisément l'effet de « canyon urbain » (Oke 1987).

L'analyse spatiale des sites en fonction de l'ICU observé est réalisée par une matrice de corrélation avec l'ensemble des facteurs d'occupation du sol. Les variables significativement corrélées à l'ICU moyen observé durant l'été 2013 sont recensées dans le tableau 4. Le facteur le plus corrélé est le SVF moyen dans un rayon de 200 m (noté B200 SVF), puis la hauteur moyenne bâtie sur la même surface (B200 hauteur bâti) est la seconde variable la mieux corrélée. D'autres études ont également mis en évidence la pertinence de l'usage du SVF à cette échelle (Unger

Variables	ICU (moyenne de 12 jours)	b200 svf	b200 hauteur bâti	b400 vegetation totale	b400 impermeables	b200 bâti	b400 vegetation basse	b400 vegetation haute
ICU (moyenne de 12 jours)		-0,70	0,69	-0,68	0,63	0,62	-0,61	-0,53
b200 svf	-0,70		-0,89	0,59	-0,41	-0,76	0,61	0,37
b200 hauteur bâti	0,69	-0,89		-0,66	0,43	0,80	-0,71	-0,38
b400 vegetation totale	-0,68	0,59	-0,66		-0,91	-0,85	0,88	0,81
b400 impermeables	0,63	-0,41	0,43	-0,91		0,64	-0,76	-0,79
b200 bâti	0,62	-0,76	0,80	-0,85	0,64		-0,76	-0,66
b400 vegetation basse	-0,61	0,61	-0,71	0,88	-0,76	-0,76		0,43
b400 vegetation haute	-0,53	0,37	-0,38	0,81	-0,79	-0,66	0,43	

Tableau 4, matrice de corrélation entre l'ICU moyen de 12 jours les facteurs d'occupation du sol les plus corrélés avec celui-ci. Note : plus de degré de corrélation est élevé, plus la couleur est foncée.

2004; Svensson 2004). Le SVF est un indice intégrant la hauteur moyenne du bâti ainsi que sa disposition, c'est pourquoi il est fortement corrélé avec la hauteur moyenne des bâtiments. Ces résultats montrent que le degré de corrélation est le plus élevé pour des zones tampons de 400 m pour les variables relatives à la fraction de végétation et des zones tampons de 200 m pour les variables descriptives des bâtiments. La matrice de corrélation réalisée à l'échelle de l'agglomération de l'ICU moyen observé en 2011 avec les variables d'occupation du sol indique ce même rayon de 200 m le plus corrélé avec la fraction bâtie (voir le chapitre 6.3.1). En revanche la fraction de végétation à l'échelle de l'agglomération est plus corrélée pour un rayon de 900 m. Ce changement d'échelle d'analyse montre une relation statistique constante concernant les indices sur les bâtiments et l'ICU. Tandis que la fraction de végétation suit le changement d'échelle par une diminution de l'aire d'influence statistique sur l'ICU. La fraction d'eau et l'altitude n'apparaissent pas significativement corrélées avec l'ICU à l'échelle intra-urbaine.

b) Modélisation de l'ICU moyen (sur 12 jours) et application du modèle de régression

La modélisation de l'ICU est réalisée par régression linéaire avec la méthode de sélection exhaustive (bibliothèque R : *regsubset()*) selon le critère BIC. À partir de l'ensemble des variables corrélées positivement pour l'ensemble des tailles de zones de tampon et de l'ICU, l'équation suivante est retenue :

$$ICU_{12j} = 15,05 - 5,12 \times B200\ SVF + 0,067 \times B900\ surfaces\ imperméables$$

Le modèle permet d'expliquer 68% de la variabilité de l'ICU, avec une RMSE de 0,5. Les résidus ne sont pas autocorrélés au regard du critère DW=1,92. La régression est appliquée à l'échelle intra-urbaine et illustrée par la figure 75.

Le résidu de la modélisation le plus important est sur le site *Les Prairies*, soit -1,9°C. Ce site est un parc urbain particulier, il abrite une zone humide dont la situation topographique est encaissée par rapport aux quartiers environnants. Dans ce contexte, ce parc urbain constitue un îlot de fraîcheur important à proximité du centre-ville (-0,6°C). Les résultats des modélisations de l'ICU à l'échelle de l'agglomération indiquent, pour la station des *Prairies*, une sous-estimation systématique l'îlot de fraîcheur (voir le chapitre 6.2.3). Dans le cas présent, le site des *Gayeulles* est également un parc avec un ICU nul, dont le modèle prévoit un îlot de fraîcheur similaire (+0,3°C observé contre +0,1°C simulé).

Les autres sites sont bien pris en compte par le modèle, aucun des résidus n'est supérieur à ±0,5°C. Parmi les 22 sites, 17 ont un résidu inférieur à ±0,3°C, ce qui est satisfaisant au regard de la précision de la mesure des capteurs TinyTag (±0,4°C pour un intervalle de confiance de 95%, voir le chapitre 3.1.2).

La mauvaise prédiction de l'îlot de fraîcheur du site *Les Prairies* permet de mettre en évidence sa spécificité à l'échelle intra-urbaine : la mise en place d'un îlot de fraîcheur exceptionnel à une échelle probablement microlocale, dont le réseau de mesure présent n'est pas adapté à l'échelle de ce phénomène. En soustrayant ce point de la régression le modèle retient les variables suivantes : B300 SVF et B900 surfaces imperméabilisées ; avec l'équation suivante :

$$ICU_{12j} = 3,78 - 5,05 \times B300\ SVF + 0,06 \times B900\ surfaces\ imperméables$$

La variance expliquée par le modèle s'améliore avec $R^2_{aj}=0,89$, et une erreur résiduelle plus faible avec RMSE=0,2. Sur les 22 points d'observations, 19 sites ont un résidu inférieur à ±0,3°C. La cartographie de l'ICU à partir de ce second modèle ne présente de différence importante avec le modèle précédent, la répartition et la structure de l'ICU demeure similaire.

Cette méthode permet d'observer la variabilité de l'ICU à l'échelle des quartiers, cependant une incertitude demeure pour le site des *Prairies*. Une analyse menée à l'échelle de ce quartier permettrait de comprendre la mise en place de l'îlot de fraîcheur et son échelle : microlocale ou locale ? Un observatoire pluridisciplinaire dédié aux Prairies Saint Martin a été mis en place afin d'observer à l'échelle de ce parc : le climat, la biodiversité et sa composante sociale ; dont la question de l'ICU est sous-jacente (Quénol et al. 2014).

c) La relation entre l'ICU et la typologie des quartiers : premières observations

L'ICU moyen sur 12 jours atteint une valeur maximum de 3,6°C à la station située dans le centre-ville *Les Champs Libres* (la station *Griffon* étant indisponible) et la valeur la plus faible est atteinte dans le parc *Les Prairies* au nord du centre-ville (-0,6°C) (voir la figure 75). Un second capteur est présent dans le centre-ville *Cité d'Aleth*, non-loin du site *Les Prairies* (environ 400 m), ce site enregistre un ICU de 3,0°C. Puis une ceinture de quartiers en périphérie où les sites mesurent un ICU d'environ 2,5°C composée des sites suivants : *Villejean*, *Cleunay*, *Hotel RM*, *Bvd F. Roosevelt*, *Baud Chardonnet*. Les sites faisant exception à cette ceinture par un ICU plus faible sont les sites de *La Courrouze* (+1,8°C) et du *Cimetière Nord* (+1,7°C).

En observant les quartiers par typologie, le second parc instrumenté *Les Gayeulles* n'enregistre pas la présence de l'ICU ce qui similaire au site des *Prairies*. Les ZA enregistrent un ICU variant entre +1,4°C et 2,2°C ; le site *Baud Chardonnet* avec une typologie similaire (hangars...) observe un ICU un peu plus marqué (+2,4°C). Les quartiers pavillonnaires composés de maisons individuelles présentent un ICU d'environ 1,0°C, on peut dénombrer les sites suivants : *Bellangerais*, *Cesson Pharmacie*, *Cesson Parc* et *Chantepie*. Les sites correspondants

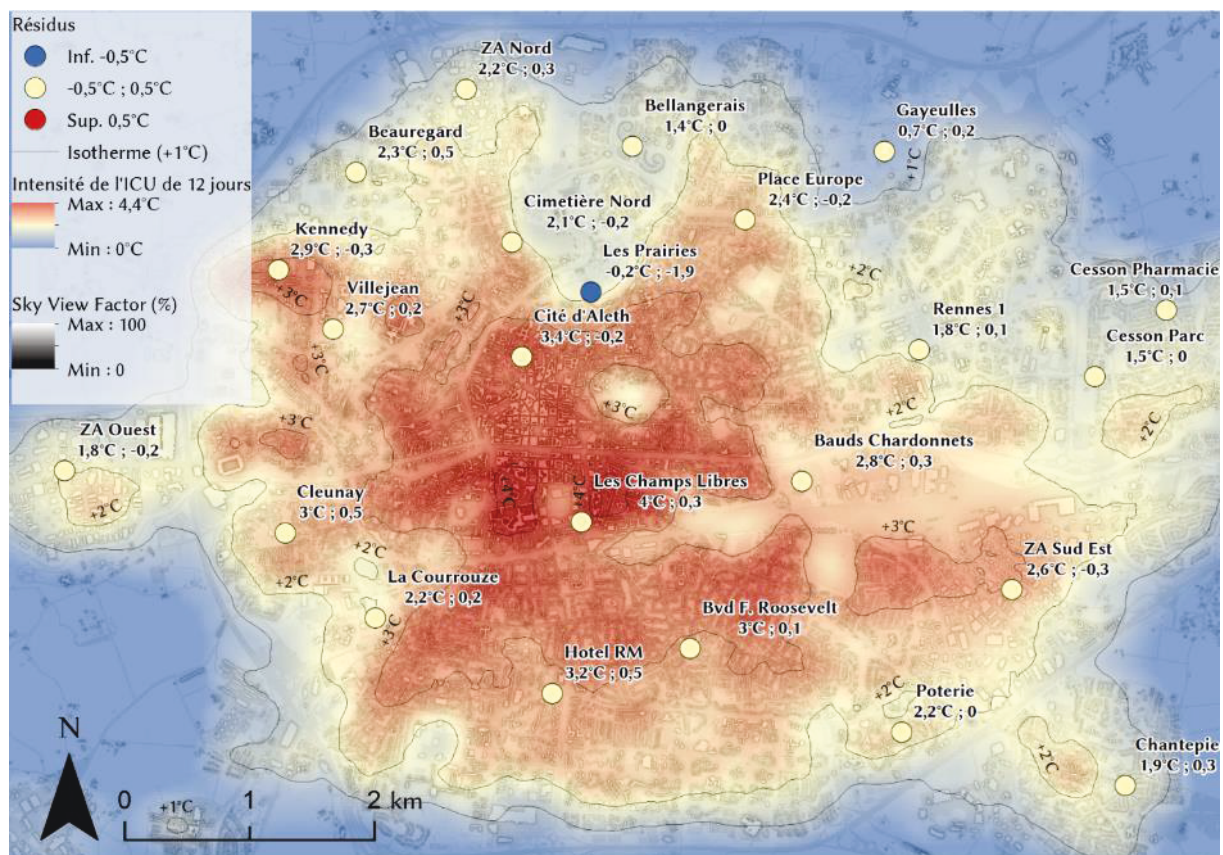


Figure 75, ICU moyen de 12 jours durant l'été 2013 spatialisé à partir des variables suivantes B200 SVF et B900 surfaces imperméables.

à des maisons de villes (*Cimetière Nord* et *Bvd Roosevelt*) observent un ICU différent (+1,7°C contre 2,6°C). Concernant les quartiers composés d'immeubles sous formes de barres et de tours, les sites de *Kennedy*, *Villejean*, *Cleunay* et *Hotel RM* enregistrent un ICU similaire (environ 2,5°C), tandis que les sites *Place Europe* et *Rennes 1* apparaissent plus frais +2,0°C et +1,4°C. Ces typologies de quartiers peuvent engendrer un ICU similaire, cependant les spécificités de chaque quartiers rendent complexes cette relation et imposent des nuances.

6.3.2. Cartographie de l'îlot de chaleur urbain heure par heure : la nuit du 14 au 15 juillet 2013

a) Spatialisation avec l'ensemble des sites de mesures (25)

La spatialisation est réalisée pour la nuit du 14 au 15 juillet 2013 avec un ICU marqué ($\Delta T_n=4,0^\circ\text{C}$). Cette nuit fait suite à une journée très chaude, les maximales ayant atteint 30,6°C le 14, et 29,6°C le lendemain à la station Météo-France *St Jacques*. La spatialisation est réalisée cette fois-ci à partir des écarts de températures constatées heure par heure. La période d'observation retenue débute à 23h (UTC) car l'ICU devient visible avec un $\Delta T_n=3,2^\circ\text{C}$, puis l'observation se conclue à 05h (UTC). Au total l'observation et la spatialisation est réalisée pour 7 heures sur les 25 sites de mesures disponibles cette nuit-là. La mesure de l'ICU diffère de la méthode précédente car il s'agit de l'écart de température instantané observé.

La méthode de spatialisation est appliquée, puis pour chaque régression les couples des variables retenues sont indiqués sur le tableau 5. Les variables utilisées pour la régression varient selon les heures mais il apparaît que pour 5 heures les variables employées sont similaires à celles utilisées précédemment pour la spatialisation de l'ICU moyen observé durant l'été 2013 (B200-B300 SVF et B900 surfaces imperméables). La qualité des modèles de régression retenus sont indiquées en figure 76. Le modèle de l'ICU à 4h explique le mieux la variabilité de l'ICU avec $R^2_{\text{ajusté}}=0,72$, à l'inverse l'heure où sa variabilité est la moins bien décrite est à 01h avec $R^2_{\text{ajusté}}=0,62$. Quant à l'erreur résiduelle, elle varie entre une RMSE=[0,7 ; 0,9], dont les résidus ne présentent pas d'autocorrélation selon le critère DW. L'analyse des résidus révèle que les résidus le plus élevés sont observés également pour le site *Les Prairies* avec des résidus compris entre -2,2°C et -2,9°C. Cependant, le modèle évalue bien l'absence d'ICU pour ce site avec des valeurs estimées comprises entre -1,9°C et 0,3°C. Par ailleurs pour le site des *Gayeulles* (parc), où l'ICU est également absent, les températures sont bien modélisées avec des résidus faibles [-0,2°C ; 0,2°C]. Pour l'ensemble des heures 59% des prévisions ont un résidu inférieur à $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Les sites avec une moyenne résiduelle importante (après *Les Prairies*) sont la *ZA Ouest* (0,9°C) puis les sites *Kennedy* et la *Courrouze* (0,8°C) et le *Cimetière de l'Est* et *Villejean* (0,7°C). Les résidus ne présentent pas de structures spatiales ni de corrélations avec des variables pouvant permettre d'expliquer un biais des modèles.

Les régressions sélectionnées sont appliquées, les cartes produites sont illustrées en figure 78. L'ICU apparaît heure par heure plus intense, avec dans un premier temps un ICU marqué dans le centre-ville avec quelques îlots isolés dans des quartiers en périphérie. Puis à partir de 01h, ces îlots isolés forment un ICU plus agrégé. Cependant, on peut constater la présence d'îlots de fraîcheur marqués à l'est du site *Cité d'Aleth* (emplacement du parc du Thabor) et également entre les sites *Les Champs Libres* et *Cimetière de l'Est*. L'ICU apparaît plus intense pour la partie sud du centre-ville plus précisément dans le quartier des *Champs Libres*.

	b900 impermeables	b200 svf	b300 svf	b100 impermeables	b400 impermeables	b600 svf	b900 vegetation basse
b900 impermeables	0	2	3	0	0	0	0
b200 svf	2	0	0	0	0	0	0
b300 svf	3	0	0	0	0	0	0
b100 impermeables	0	0	0	0	0	0	1
b400 impermeables	0	0	0	0	0	1	0
b600 svf	0	0	0	0	1	0	0
b900 vegetation basse	0	0	0	1	0	0	0

Tableau 5, occurrence des couples de variables retenue pour la modélisation de l'ICU heure par heure pour la nuit du 14 au 15 juillet 2013.

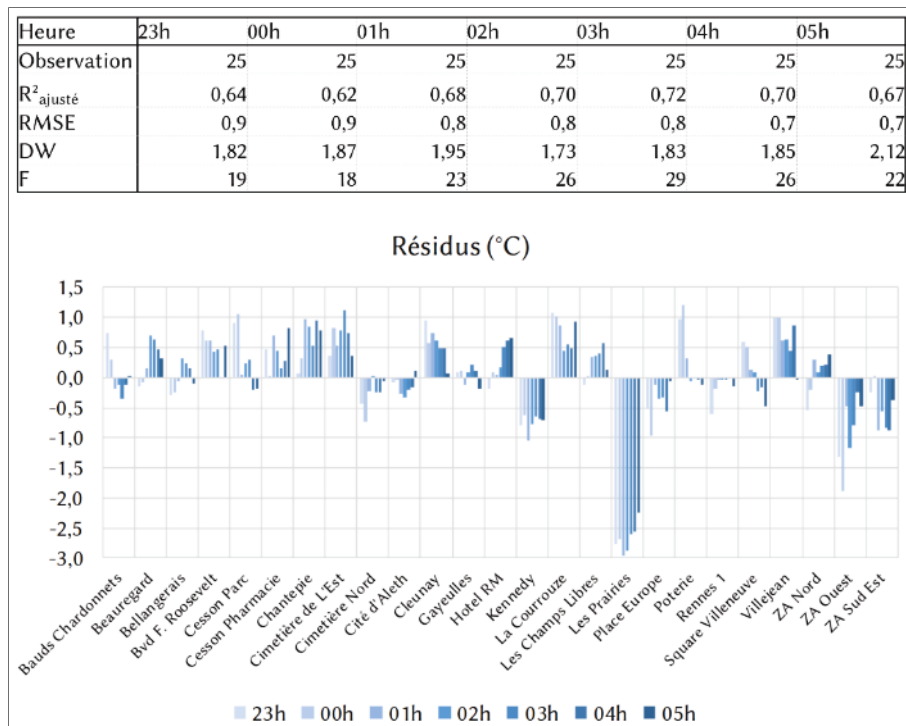


Figure 76, qualités et résidus des modèles de régression utilisées pour les 25 sites d'observation de l'ICU (heure par heure) de la nuit du 14 au 15 juillet 2013.

b) Spatialisation sans le site *Les Prairies*

La particularité du site *Les Prairies* peut expliquer la difficulté du modèle à prendre en compte cet îlot de fraîcheur. Malgré l'intensité sous-estimée de cet îlot de fraîcheur, le modèle l'identifie tout de même. L'étape présente est d'appliquer la méthode de spatialisation de l'ICU sans ce site spécifique. Les variables utilisées pour la modélisation sont dénombrées sur le tableau 6. Moins de variables différentes sont utilisées dans le cas présent, les régressions employées sont donc plus fréquemment identiques. La dimension des zones tampons de ces variables est plus grande, ce qui peut s'expliquer par l'absence du site *Les Prairies*. La particularité des *Prairies*

(l'îlot de fraîcheur marquée et localisée) infléchisse certainement les modèles vers la sélection de variables avec des zones tampons plus petites et à l'échelle de ce phénomène.

Les modèles de régressions obtenues sont évalués en figure 77. L'absence du site *Les Prairies* améliorent grandement l'explication par les modèles de la variabilité de l'ICU avec entre 74% et 85% de la variance expliquée selon le modèle. L'erreur résiduelle diminue, elle est comprise entre 0,41 et 0,62. Sur l'ensemble de la période, les résidus sont en moyenne inférieurs à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pour 73% des sites. Les sites avec les résidus en moyenne les plus élevés sont : la *ZA Ouest* et le *Cimetière de l'Est* avec $0,8^{\circ}\text{C}$, puis le site de *Beauregard* avec $0,6^{\circ}\text{C}$. Ces deux premiers sites ont déjà été classés précédemment comme les sites présentant les résidus les plus importants. Au regard de ces résultats, la suppression du point présentant une erreur résiduelle très importante a permis nécessairement d'améliorer l'explication de la variabilité de l'ICU. Cependant l'ajustement du modèle a réduit légèrement l'erreur résiduelle des points de mesures dans leur ensemble.

Les cartes issues de ces modèles sont illustrées par la figure 79. Heure après heure l'ICU apparaît progressivement, cependant dans le cas présent la structure de l'ICU apparaît plus compacte. Les îlots de fraîcheurs n'apparaissent plus distinctement. Le centre-ville, au nord-ouest des *Champs Libres* connaît l'ICU le plus intense. Autour de ce noyau la température décroît progressivement, néanmoins des structures particulières sont à signaler. Au nord du centre-ville, la trame de fraîcheur est visible mais moins marquée que précédemment. Au sud-est près du *Cimetière de l'Est*, l'ICU semble plus marqué et forme un prolongement jusqu'au site *ZA Est*.

En comparaison avec la spatialisation précédente, la structure ramassée de l'ICU correspond aux choix des variables retenues dont les zones tampons sont plus importantes donc ces modèles de l'ICU apparaissent plus homogène sur de plus grandes surfaces. Une question se pose quant au modèle le plus pertinent, car le site des *Prairies* permet d'intégrer la présence d'îlot de fraîcheur en ville. Ainsi pour construire un modèle intégrant plus précisément ces îlots, il serait pertinent d'ajouter des points de mesures dans les parcs. En revanche pour l'analyse et la spatialisation de l'ICU sur l'ensemble des quartiers il apparaît plus pertinent d'adapter le réseau afin qu'il soit représentatif de celui-ci. Au demeurant, la question de la représentativité réelle d'un capteur pose la question de son échelle microlocale ou locale, comme cela a été observé précédemment sur les trois sites d'observation : *Beauregard*, *Long Champs* et *Vezin-le-Coquet*.

	b900 impermeables	b800 impermeables	b700 svf	b500 svf	b300 svf
b900 impermeables	0	0	0	2	2
b800 impermeables	0	0	3	0	0
b700 svf	0	3	0	0	0
b500 svf	2	0	0	0	0
b300 svf	2	0	0	0	0

Tableau 6, occurrence des couples de variables retenue pour la modélisation de l'ICU heure par heure sans le site Les Prairies, pour la nuit du 14 au 15 juillet 2013.

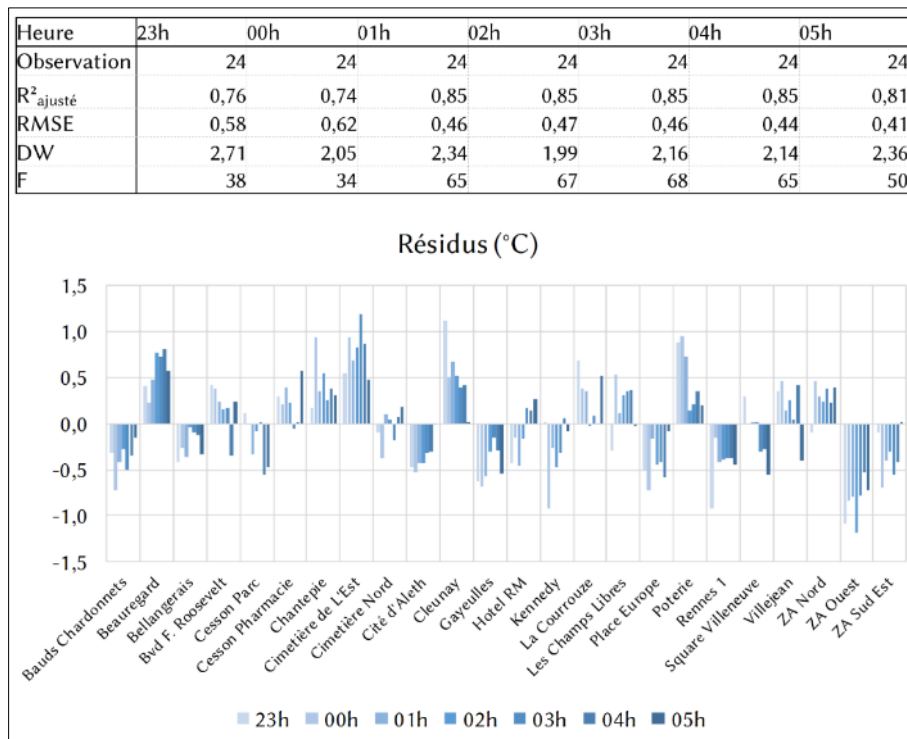


Figure 77, qualités et résidus des modèles de régression utilisées pour les 24 sites d'observation (sans le site des Prairies) de l'ICU (heure par heure) de la nuit du 14 au 15 juillet 2013.

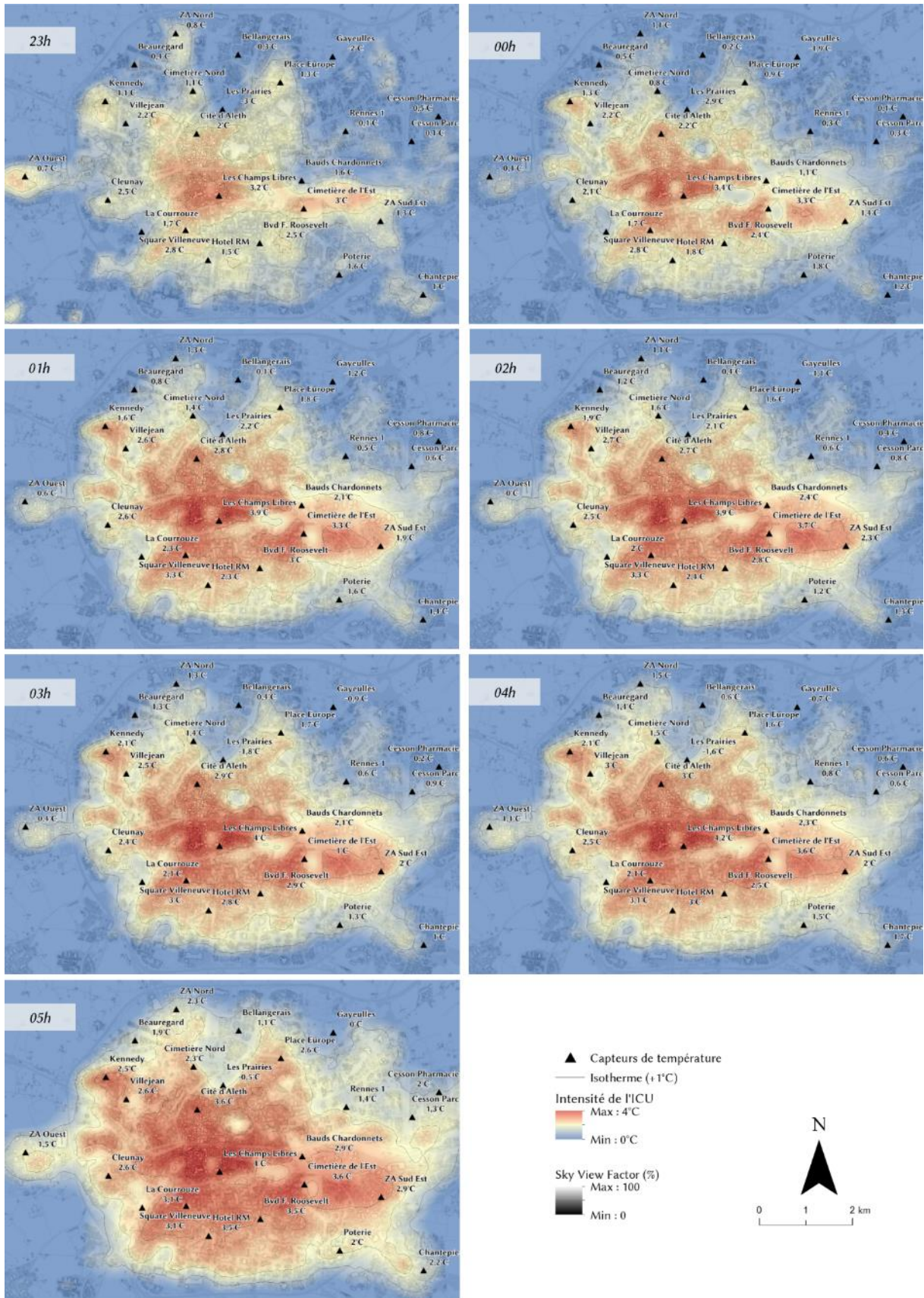


Figure 78, ICU observé et spatialisé (heure par heure) de 23h à 05h la nuit du 14 au 15 juillet 2013.

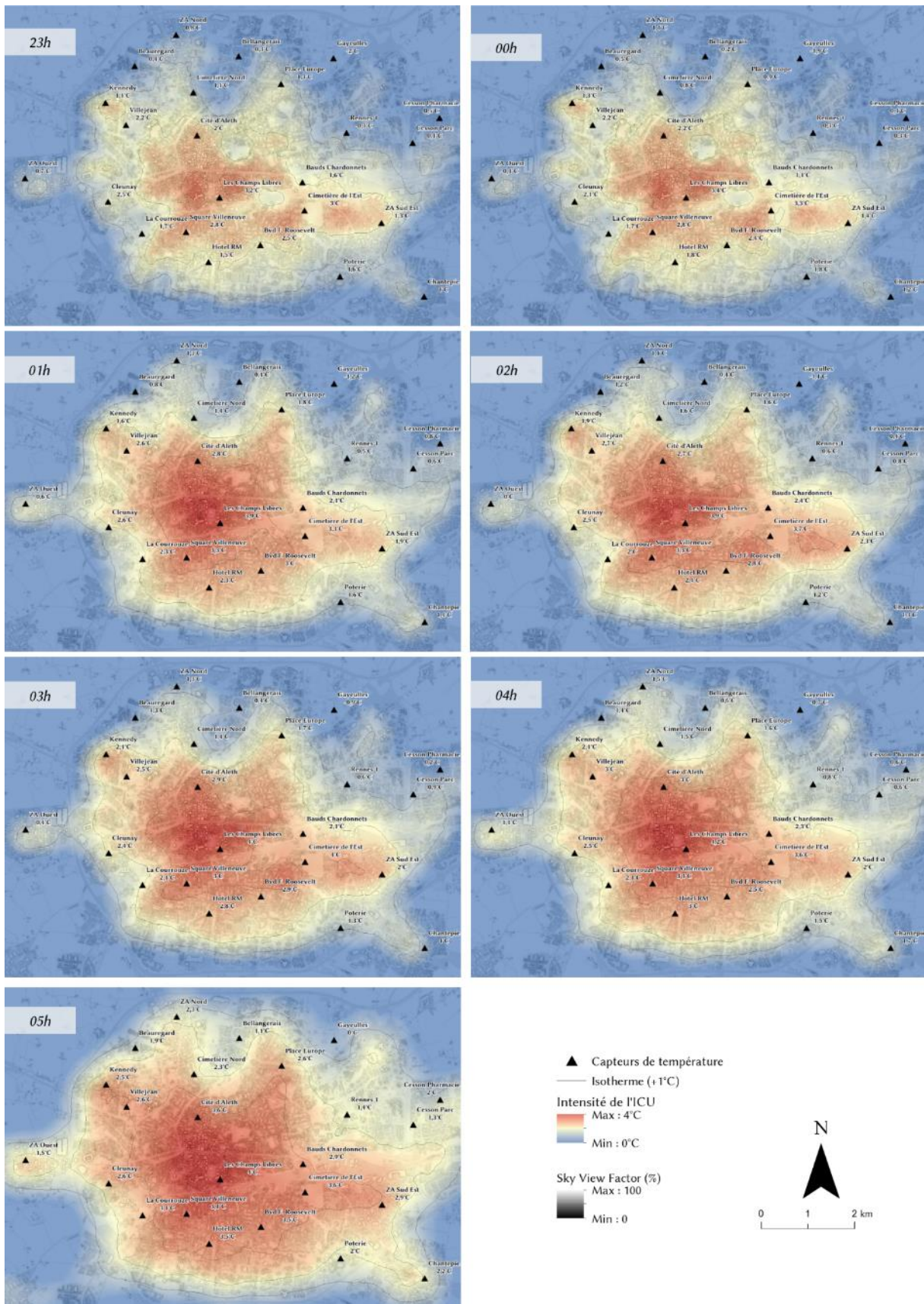


Figure 79, ICU observé et spatialisé (heure par heure) de 23h à 05h la nuit du 14 au 15 juillet 2013 (sans le site des Prairies).

Conclusion du chapitre 6

Trois méthodes de mesures en ville sont employées dans ce chapitre : les mesures mobiles par transects, les mesures au sein d'un même quartier, et les mesures intra-urbaines. Elles mettent en évidence la variabilité spatio-temporelle de l'ICU selon trois échelles au sein de la ville.

La méthode par transects met en évidence la relation entre les typologies de quartiers et l'ICU. Cependant la variabilité de l'ICU mesurée est importante et des écarts avec les stations sont observés, ce qui pose deux interrogations. La première interrogation porte sur l'incertitude liée à la mesure, c'est-à-dire la représentativité du capteur lors du transect. Le capteur est-il représentatif du quartier ou est-il représentatif de la rue empruntée ? La seconde interrogation porte sur de possibles influences microlocales au moment de la mesure. Cependant, cette méthode a permis de révéler le déplacement de l'ICU par un vent faible (2,0m/s), ce qui est confirmé par les enregistrements des stations météorologiques.

Les observations au sein de trois quartiers montrent l'influence microlocale de l'environnement immédiat sur l'ICU. La ZAC de Beauregard présente un ICU homogène, les écarts de températures sont faibles malgré les différents types de quartiers rencontrés (zone d'activités, parc et cour de résidence). Pendant la journée, la zone d'activité apparaît la plus chaude, mais au cours de la nuit les écarts avec les autres sites s'amenuisent. Le quartier des Longs Champs présente de plus grandes disparités de température, pour des sites distants de 300 m à 500m. Ces observations montrent la variabilité de l'ICU aux échelles très fines apportées par des nuances microlocales. Le *parc des Gayeulles* et la zone d'activité révèlent des écarts de températures la nuit mais également la journée. Le parc apparaît comme un îlot de fraîcheur sur une grande partie de la journée. Les typologies des sites mesurés présentent les mêmes comportements thermiques que les sites équivalents à la ZAC de Beauregard. Le réseau de capteurs de températures montre la présence d'un ICU maximal de +3°C environ dans le bourg d'une petite ville de moins de 5 000 habitants. L'influence de la topographie sur la température dans la campagne avoisinante a été observée, cependant cette influence s'amenuise rapidement en ville. L'influence d'un quartier sur sa périphérie est également observée par une station située à proximité d'une zone d'activité. A l'échelle du quartier, les effets microlocaux apparaissent plus largement sur la variabilité spatiale de l'ICU.

La spatialisation réalisée à partir du réseau de mesures à l'échelle intra-urbaine permet d'expliquer 74% à 89% de la variabilité de l'ICU. En comparaison avec l'ICU spatialisé à l'échelle de l'agglomération, les variables explicatives retenues par le modèle ont une échelle plus fine. Le *Sky View Factor* permettant d'évaluer les « canyons urbains » est introduit dans le modèle et il apparaît pertinent. La méthode de spatialisation à l'échelle intra-urbaine montre cependant la difficulté à évaluer l'îlot de fraîcheur marqué du parc urbain *Les Prairies*. La méthode de spatialisation de l'ICU a permis de produire des cartes de l'ICU sur plusieurs intervalles de temps : quotidien et horaire. Les analyses spatiales menées vont permettre de proposer des indices d'occupation du sol pertinent pour limiter l'intensité de l'ICU (voir le chapitre 9.1.2).

- PARTIE III -

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LES MOYENS D'ADAPTATION EN VILLE

Cette partie présente les conséquences éventuelles du changement climatique en ville à Rennes Métropole. Dans un premier temps, l'analyse est réalisée sur l'éventuelle influence du changement climatique sur l'ICU. Puis dans un second temps, l'étude porte sur l'exposition du territoire au changement climatique à l'ICU d'une part et au changement climatique d'autre part. Dans la deuxième partie de la thèse, l'analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'ICU a permis la construction de modèles de spatialisation de l'ICU. Ces modèles sont interprétés afin de constituer des outils d'aide à la décision à destination des aménageurs.

L'objectif à l'issue de ce chapitre 7 est d'établir un modèle pour définir l'ICU quotidien selon les types de temps. L'analyse de la variabilité temporelle de l'ICU est réalisée à partir de deux stations l'une dans le centre-ville, la seconde en périphérie. La relation entre les facteurs météorologiques (décrivant les types de temps) et l'intensité de l'ICU est analysée. Puis, à partir de ces résultats un modèle de prédiction de l'ICU quotidien est construit. Ce modèle est établi dans la perspective de projeter l'ICU à partir des modèles régionalisés du changement climatiques. Ce dernier point est appliqué dans la troisième partie.

Le chapitre 8 applique le modèle de prévision de l'ICU quotidien établi dans le chapitre précédent (chapitre 7). A partir des sorties des modèles régionalisés du changement climatique présentées dans le chapitre 2, l'ICU est projeté selon deux scénarios, A1B et A2. L'objectif est d'établir si le changement climatique entraîne une modification des facteurs météorologiques influents sur la variabilité temporelle de l'ICU et son intensité. Cette démarche est réalisée à partir des mesures de l'ICU sur les périodes 2007-2010-2011. La méthode prend pour hypothèse l'absence d'évolution de l'agglomération rennaise sur l'ensemble de la période de projection. L'analyse est menée uniquement sur la variabilité temporelle de l'ICU futur construite à partir des sorties régionalisées des modèles du changement climatique.

Les moyens d'adaptation de la ville à l'ICU et au changement climatique sont présentés dans le chapitre 9. Les travaux réalisés par d'autres villes et les résultats issus de la littérature scientifique sont présentés. Puis, une réflexion est menée pour établir le rôle potentiel des documents d'urbanisme pour intégrer ces moyens d'adaptation. A partir des résultats du chapitre 6, des indicateurs permettant de limiter l'ICU sont construits et formulés sous la forme de préconisations. La spatialisation de l'ICU (réalisée dans le chapitre 6) est appliquée au projet d'une ZAC à partir de son plan masse afin d'évaluer son impact sur l'ICU. L'exposition de la ville au changement climatique associé au phénomène d'ICU est traitée dans un second temps. A partir des modèles régionalisés (présentés dans le chapitre 2), plusieurs indices sont utilisés afin d'analyser l'occurrence des vagues de chaleur et des besoins en chauffage et en climatisation futur. Enfin, l'exposition des quartiers est présentée selon plusieurs problématiques : les conséquences sanitaires et l'impact sur la biodiversité en ville.

Chapitre 7 : Occurrence de l'îlot de chaleur urbain rennais et types de temps

A partir du réseau de stations météorologiques présenté dans le chapitre 3.2, deux stations sont retenues pour les analyses réalisées dans ce chapitre. Ces deux stations doivent permettre d'évaluer la variabilité temporelle de l'ICU. Dans un premier temps, l'analyse de l'ICU est menée pour trois années : 2007, 2010 et 2011. Après avoir établi les particularités climatiques de ces trois années, une analyse temporelle est réalisée en fonction de plusieurs facteurs météorologiques décrivant les types de temps. L'objectif est de construire un modèle de régression de l'ICU quotidien à partir des variables météorologiques précédentes.

7.1. Analyse temporelle de l'îlot de chaleur urbain des années 2007-2010-2011

L'observation de l'intensité de l'ICU à Rennes est réalisée sur trois années : 2007, 2010 et 2011. Ces années présentent des particularités climatiques influençant l'occurrence de l'ICU. Afin de résumer et de comparer ces événements, 5 variables climatiques observés à la station *St-Jacques* (Météo-France) sont retenus. La durée d'ensoleillement et le nombre de jours de pluie sont utilisés pour évaluer l'occurrence des types de temps favorables ou défavorables à la mise en place de l'ICU. Concernant le vent moyen observé, les journées sont classées en deux catégories : les journées avec un vent moyen fort supérieur à 5 m/s et les journées où l'ICU est potentiellement présent avec un vent moyen inférieur à 5 m/s (Lee and Baik 2010). Les anomalies de température sont également indiquées afin de mieux qualifier les particularités saisonnières rencontrées.

7.1.1. L'année 2007

L'année 2007 débute avec un hiver et un printemps exceptionnellement doux avec des températures moyennes respectivement +2,3°C et +2,0°C au-dessus des normales (figure 80). L'ensoleillement demeure proche des normales de janvier à mai, cependant le mois d'avril est un mois particulièrement ensoleillé avec 262h d'ensoleillement, soit +54%, ce qui se traduit par un faible nombre de jours de pluie (4 jours seulement, contre 9,4 en moyenne) et une douceur exceptionnelle (+5,2°C en moyenne pour les Tx).

Les mois de février, mai, juin et juillet sont bien arrosés avec un excédent de +50% à +130%. On dénombre pour ces mêmes mois plus de 12 jours de pluie (notamment 15 jours en février). Il est à noter que les mois de février et mai sont venteux avec respectivement 13 et 11 jours où le vent moyen est supérieur à 5 m/s. L'été 2007 est plutôt maussade et frais, l'écart des températures moyennes aux normales est de -1,3°C et le déficit d'ensoleillement est d'environ -20%.

L'automne est frais et sec, les anomalies des températures minimales et maximales sont de $-1,7^{\circ}\text{C}$ et $-0,7^{\circ}\text{C}$. Le nombre de jours de pluie n'est que de 5 à 8 jours par mois cependant l'ensoleillement reste conforme aux normales. Le vent est faible, on ne recense qu'une seule journée avec un vent moyen supérieur à 5 m/s de septembre à novembre.

L'année 2007 se termine par un mois de décembre ensoleillé (+61%) mais marqué par des épisodes de vents forts (10 jours où le vent moyen est supérieur à 5m/s) et seules les températures minimales sont en-dessous des normales. Malgré un deuxième semestre frais, l'année 2007 est classée comme la 20^{ème} année la plus chaude (au regard des températures maximales) pour la période d'observation 1925-2013.

7.1.2. *L'année 2010*

L'année 2010 débute par un mois de janvier froid et plutôt sec, avec un ensoleillement excédentaire (+18%) et l'anomalie de la température moyenne observée est de -3°C (figure 81). On ne dénombre que 2 jours avec un vent moyen fort et seulement 8 jours de pluie (contre 12 selon les normales). Cet hiver vigoureux s'interrompt à la fin du mois de février avec des précipitations importantes et le passage de la tempête *Xynthia*. Le printemps bénéficie d'un ensoleillement important avec un maximum pour le mois d'avril avec 272h cumulées (+102h d'ensoleillement selon les normales), on ne compte ainsi que 4 jours de pluie en avril.

L'été est bien marqué, les températures moyennes repassent au-dessus des normales avec $+1,0^{\circ}\text{C}$ et le bilan de l'ensoleillement est excédentaire de +37%. Cependant le mois d'août interrompt la période estivale par un temps d'automne : de la fraîcheur (température moyenne : $-1,2^{\circ}\text{C}$), un déficit d'ensoleillement de 31h et un total de 9 jours de pluie. Le vent demeure conforme aux normales voire très modéré pour les mois d'août et septembre (aucun jour de vent moyen supérieur à 5m/s). Le mois de septembre renoue avec des journées estivales par un ensoleillement à peine excédentaire (+4%).

L'automne est pluvieux et frais, la température moyenne est inférieure aux normales ($-0,8^{\circ}\text{C}$) et le mois de novembre comptabilise 14 jours de pluie. Le mois de décembre conclue l'année 2010 très fraîchement avec une température moyenne inférieure aux normales de $-4,0^{\circ}\text{C}$. Pour résumer, l'année 2010 est relativement fraîche avec une température minimale moyenne de $6,4^{\circ}\text{C}$ ce qui permet de classer cette année comme étant la 7^{ème} année la plus fraîche depuis 1925. Cependant le mois de juillet 2010 apparait comme étant le 16^{ème} mois le plus chaud depuis 88 ans avec $26,7^{\circ}\text{C}$.

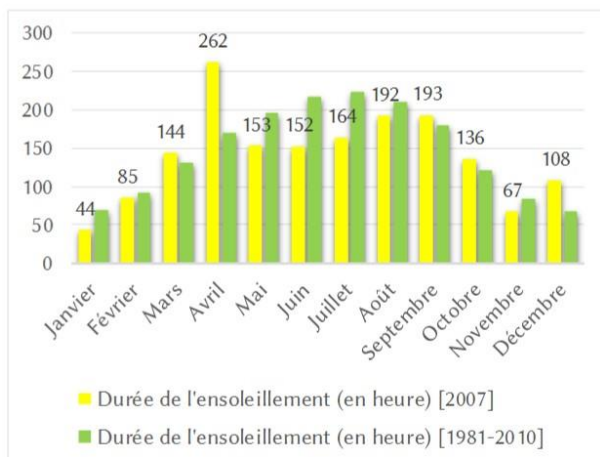
7.1.3. *L'année 2011*

La rigueur hivernale de décembre 2010 se poursuit au mois de janvier, malgré un épisode de douceur, l'anomalie des températures minimales observée est de $-2,9^{\circ}\text{C}$ (figure 82). Les mois de février et mars sont conformes aux normales malgré un déficit d'ensoleillement en février de 27h compensé par un excédent de 32h en mars.

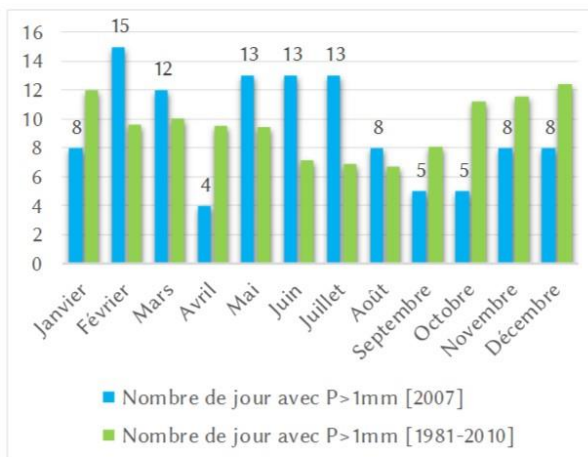
Les mois d'avril et de mai sont généreusement ensoleillés avec un excédent de +56% et +30%. Ces deux mois sont relativement secs, ce qui se traduit par seulement 4 journées de pluie pour chaque mois. On ne recense qu'une journée de vent fort (supérieur à 5 m/s)

L'été est contrasté, les températures sont conformes aux normales mais la pluie est abondante avec 25 jours de pluie. En revanche, les mois de septembre et d'octobre prolongent l'été avec des températures maximales supérieures aux normales à $+2,5^{\circ}\text{C}$ et $+2,3^{\circ}\text{C}$. Le record des températures maximales est battu le 2 octobre avec 30°C .

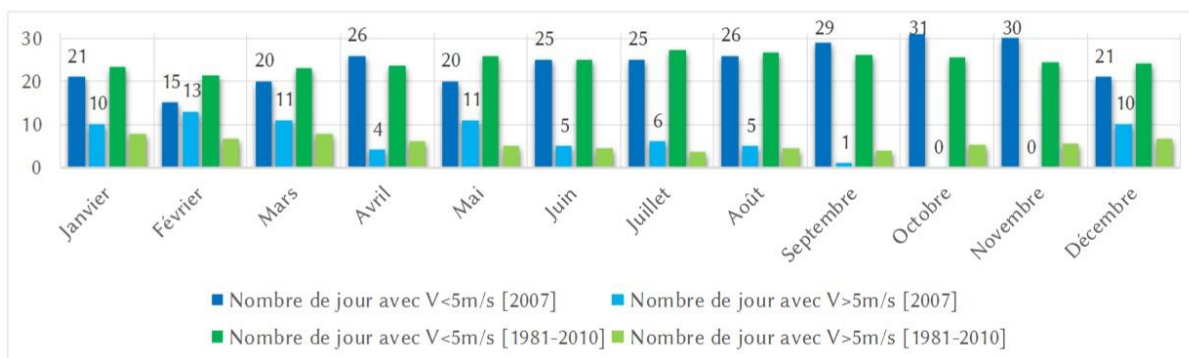
L'observation de températures élevées se poursuit pour les mois de novembre et décembre : +3,2°C de moyenne sur ces deux mois. Depuis le second semestre de l'année, chaque mois affiche des températures minimales et maximales élevées, classant l'année 2011 comme la deuxième année la plus chaude derrière 2003, la température moyenne des maximales pour ces deux années a atteint 17,7°C. L'année se termine avec un mois de novembre sec avec seulement 6 jours de pluie compensé par un mois de décembre très largement arrosé et venteux avec 18 jours de pluie et 10 jours avec un « vent fort » (avec un moyenne journalière supérieure à 5m/s).



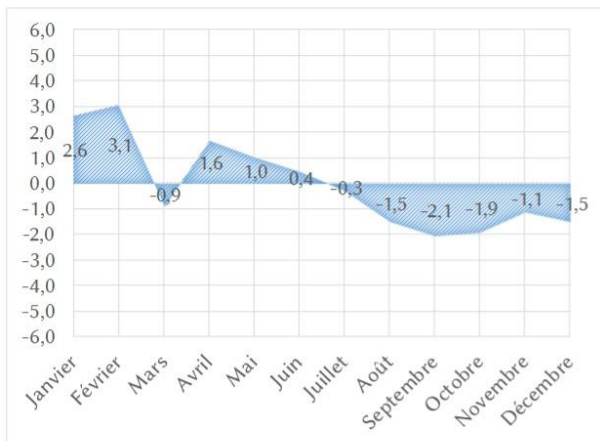
Durée mensuelle de l'ensoleillement en 2007 et les normales 1981-2010.



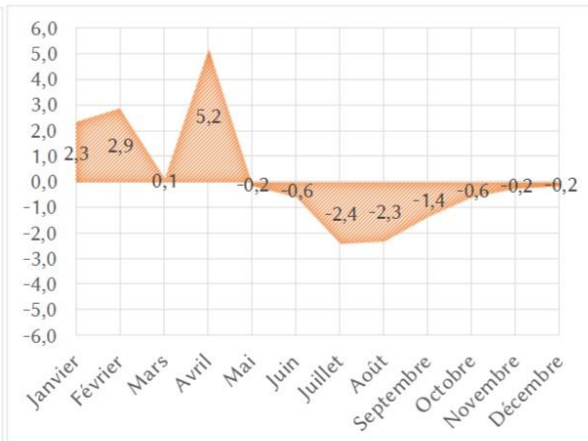
Nombre de jour où le cumul mensuel des précipitations est supérieur à 1 mm entre 2007 et les normales 1981-2010



Nombre de jour par mois où le vent moyen est supérieur et inférieur à 5 m/s en 2007 et les normales 1981-2010.

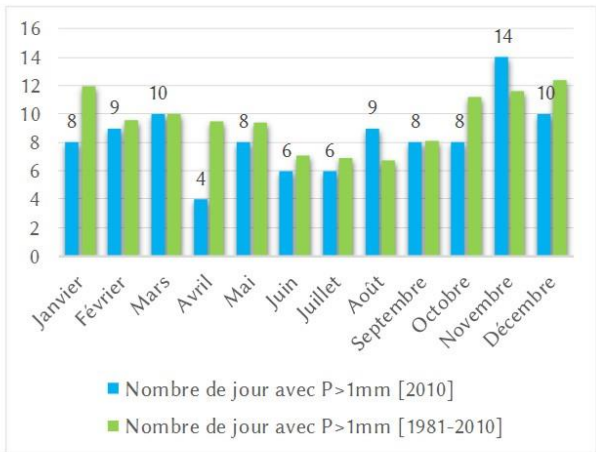
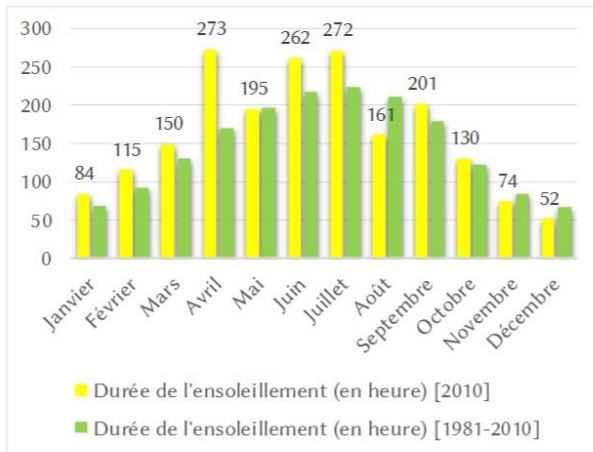


Écarts des températures minimales (en °C) en 2007 aux normales 1981-2010.



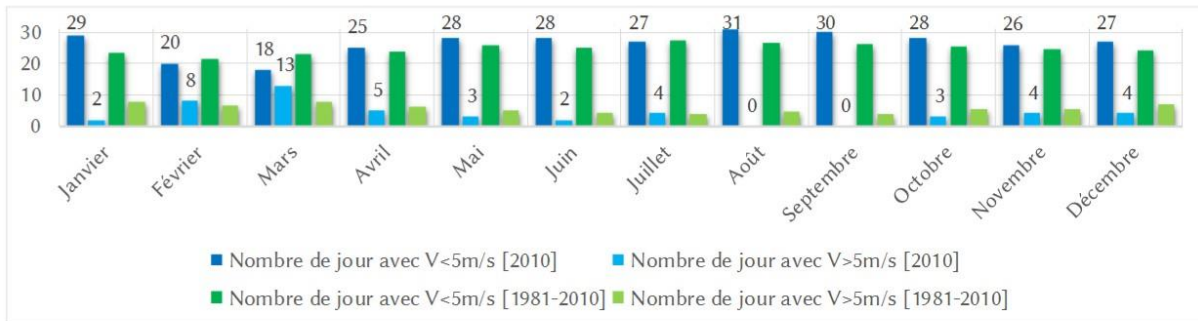
Écarts des températures maximales (en °C) en 2007 aux normales 1981-2010.

Figure 80, bilan climatique de l'année 2007 à Rennes.

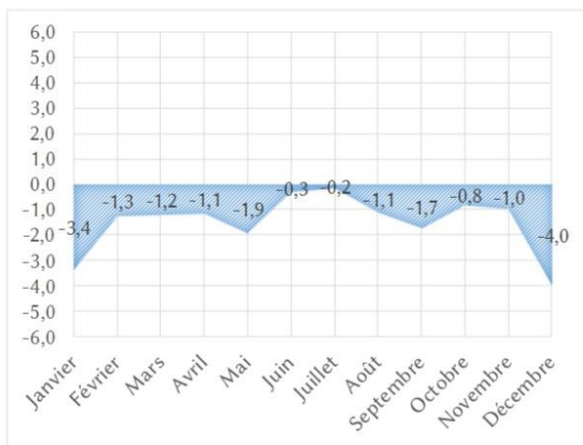


Durée mensuelle de l'ensoleillement en 2010 et les normales 1981-2010.

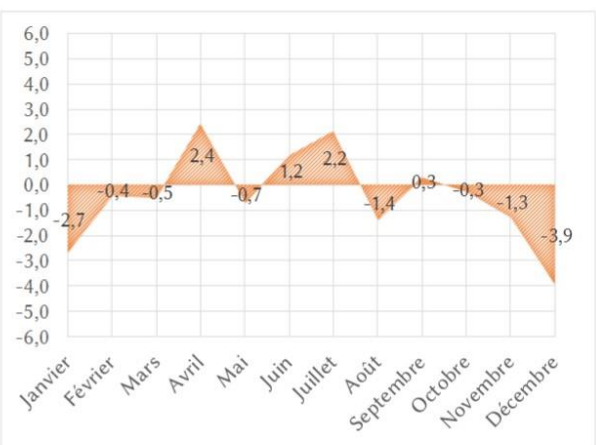
Nombre de jour où le cumul mensuel des précipitations est supérieur à 1 mm entre 2010 et les normales 1981-2010



Nombre de jour par mois où le vent moyen est supérieur et inférieur à 5 m/s en 2010 et les normales 1981-2010.

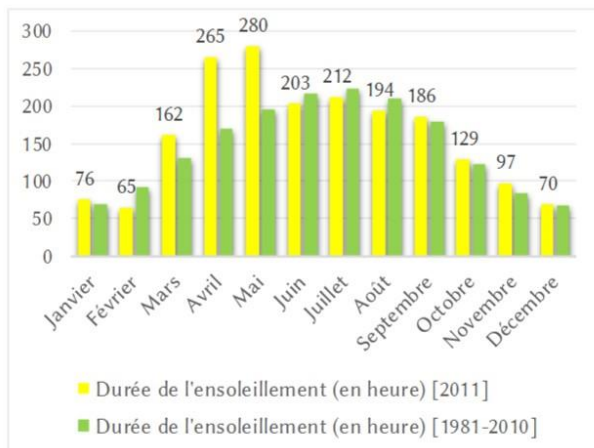


Écarts des températures minimales (en °C) en 2010 aux normales 1981-2010.

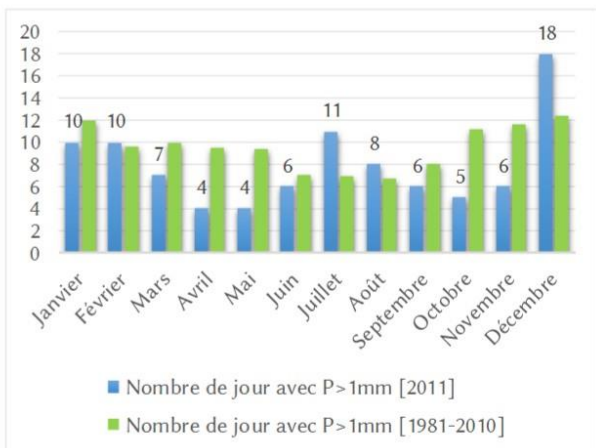


Écarts des températures maximales (en °C) en 2010 aux normales 1981-2010.

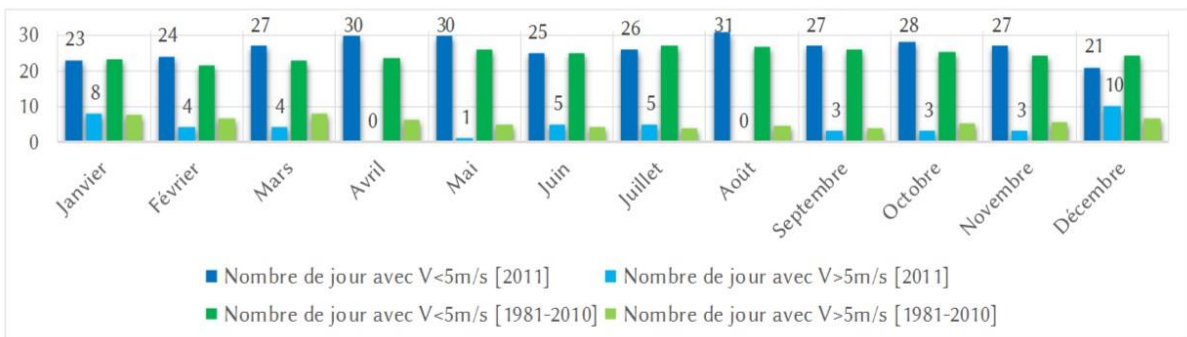
Figure 81, bilan climatique de l'année 2010 à Rennes.



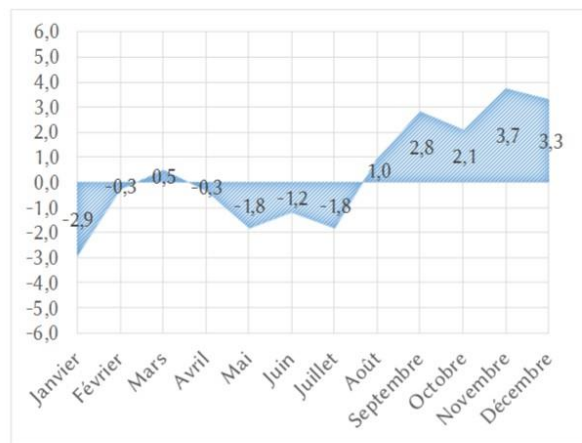
Durée mensuelle de l'ensoleillement en 2011 et les normales 1981-2010.



Nombre de jour où le cumul mensuel des précipitations est supérieur à 1 mm entre 2011 et les normales 1981-2010



Nombre de jour par mois où le vent moyen est supérieur et inférieur à 5 m/s en 2011 et les normales 1981-2010.



Écarts des températures minimales (en °C) en 2011 aux normales 1981-2010.



Écarts des températures maximales (en °C) en 2011 aux normales 1981-2010.

Figure 82, bilan climatique de l'année 2011 à Rennes.

7.1.4. Caractérisation des types de temps par des facteurs météorologiques

L'analyse de l'ICU selon les types de temps est réalisée sur les trois années détaillées précédemment. Dans un premier temps, le choix du pas de temps journalier est retenu, afin de réaliser une projection à partir des sorties de modèles régionalisés par le CERFACS (*cf.* chapitre 8). L'analyse est réalisée selon 3 facteurs météorologiques connus comme influant sur l'ICU et décrivant le type de temps rencontré. Concernant l'ICU, son intensité quotidienne est résumée par l'écart des températures minimales observées entre le centre-ville par la station météorologique *Griffon* et la campagne par la station de Météo France *Saint-Jacques-de-la-Lande* (noté *St-Jacques*), comme détaillée dans la partie suivante (chapitre 4.2.1). La station *St-Jacques* est retenue comme station de référence « campagne » afin de conserver la même station source pour les sorties de modèles du CERFACS. L'ICU sur les années 2007, 2010 et 2011, est observé par l'écart de température minimale quotidien (figure 83).

a) Le vent

Ce facteur est influant sur la présence de l'ICU, il s'agit d'une des composantes principales et déterminantes pour son intensité (Morris and Simmonds 2001; Kim and Baik 2002). La figure 84 montre la relation entre le vent moyen et l'écart des températures minimales (ΔT_n) entre la station urbaine *Griffon* et la station *St-Jacques* : plus le vent moyen observé est fort plus l'intensité de l'ICU est faible. Cette relation n'apparaît que partiellement sur ce graphique, ceci résulte du choix du pas de temps quotidien. Le vent moyen sur une journée ne précise pas l'amplitude du vent sur l'ensemble de la journée et surtout au moment où l'ICU est présent. Au demeurant, le coefficient de corrélation entre le vent moyen et l'ICU est de -0,51, ce qui permet de conserver ce facteur pour une analyse au pas de temps quotidien. Une seconde analyse des rafales moyennes quotidiennes observées en ville a été menée à l'aide de la station des *Gallets* (suffisamment dégagée pour une observation complète des vents). En 2010, il apparaît que le degré de corrélation avec l'ICU observé est faible avec $R = -0,32$.

Malgré la résolution temporelle trop partielle pour expliquer plus amplement l'intensité de l'ICU, le choix du vent moyen quotidien reste une variable importante à retenir pour la construction d'un modèle explicatif de l'ICU à partir de facteurs météorologiques.

En distinguant trois situations : où $\Delta T_n < 3^\circ\text{C}$, où $3^\circ\text{C} \leq \Delta T_n < 4^\circ\text{C}$ et où $\Delta T_n \geq 4^\circ\text{C}$; cela permet de classer les situations où l'ICU est respectivement : nul ou faible, marqué et intense. A partir de ces trois situations, trois roses des vents indiquant en proportion la direction du vent observée pour chaque journée sont construites (figure 84). Sur l'ensemble des années 2007-2010-2011, le nombre de jours où l'ICU est faible représente 80% des situations, avec un ICU marqué on dénombre 15% et enfin 5% des situations pour les nuits où l'ICU est intense. Selon ces trois classes le vent moyen est respectivement de 3,7 m/s, 3,4 m/s et 2,2 m/s.

Les roses des vents obtenues à partir des directions des vents moyens quotidiens montrent la variation de distribution du vent selon les situations favorables ou défavorables à l'ICU. Pour les situations où l'ICU est faible voire nul, le vent est orienté majoritairement d'ouest à sud pour 40% des journées et de nord à nord-nord-est pour 22% des journées. Ces orientations correspondent à des situations synoptiques telles que les flux perturbés de sud-ouest et d'ouest d'origine océanique apportant un air chaud et humide, qui peuvent signifier des vents forts et des précipitations et le flux orienté au nord apporte de la fraîcheur et des averses (Pagney 1988).

Pour les jours avec un ICU modéré, on retrouve 1/3 des journées avec un vent orienté au nord. Ce flux, bien que frais, est parfois accompagné de courtes averses qui peuvent laisser place

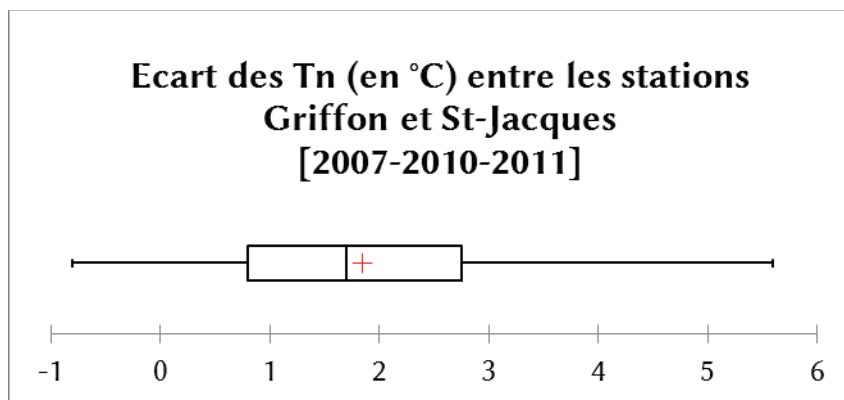


Figure 83, boîte à moustache des écarts de températures minimales entre la station urbaine Griffon et de St Jacques (Météo France) des années 2007-2010-2011. Choix des quantiles : $Q1=25\%$; $Q2 = 50\%$ et $Q3=75\%$).

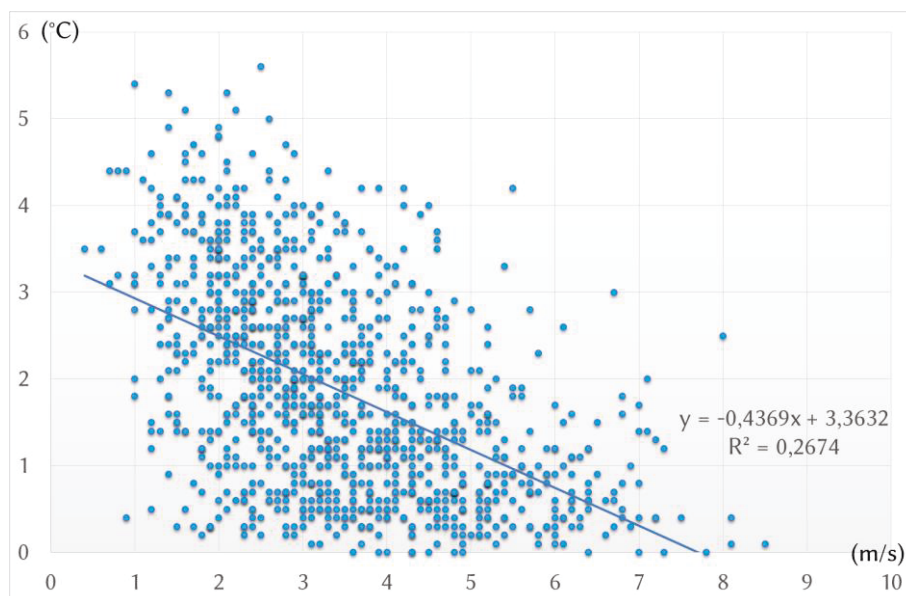
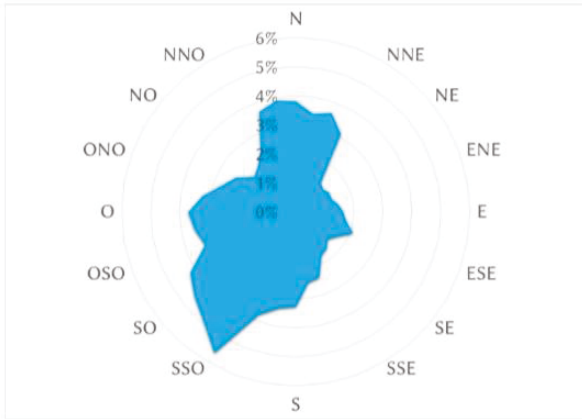


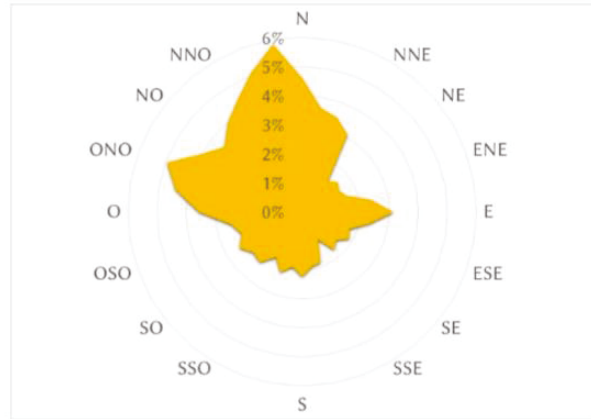
Figure 84, écarts des températures minimales observées entre les stations Griffon (centre-ville) et St-Jacques (campagne, Météo-France) en fonction du vent moyen observé à St-Jacques en 2007-2010-2011.

à un ciel dégagé. On peut noter l'orientation ouest-nord-ouest pour 20% des journées et à l'est pour 15%.

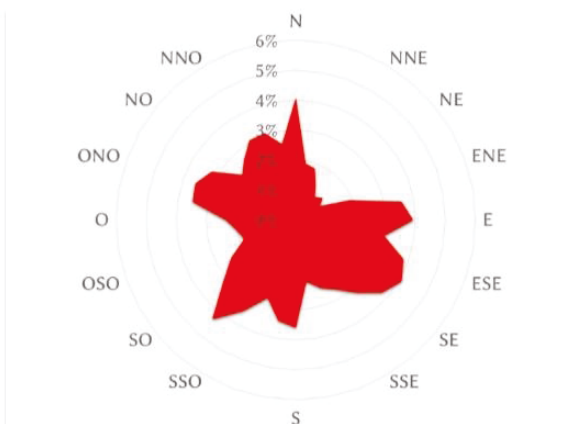
Enfin pour les jours avec un ICU intense, l'orientation des vents est multiple, ce qui correspond à des situations synoptiques anticycloniques avec peu de vents dominants. Cependant il apparaît pour les jours avec un ICU marqué à intense une orientation à l'est des vents. Ce flux d'origine continentale apporte un air froid et sec en hiver, ce qui se traduit par un temps beau et clair favorable à la formation d'un ICU. Ces roses des vents ont une structure similaire à l'analyse réalisée par Cantat O., notamment la dominance des flux d'est à nord-est associée à un ICU fort et les flux de sud-ouest à sud-sud-ouest dominants pour les épisodes sans ICU (Cantat 2004).



Rose des vents lorsque l'écart des températures minimales est inférieur à 3°C, soit 80% des situations.



Rose des vents lorsque l'écart des températures minimales est compris entre 3°C et 4°C, soit 15% des situations.



Rose des vents lorsque l'écart des températures minimales est supérieur à 4°C, soit 5% des situations.

ICU (°C)	$\Delta T_n < 3$	$3 \leq \Delta T_n < 4$	$\Delta T_n \geq 4$
Vent moyen (m/s)	3,7	3,4	2,2

Figure 85, roses des vents observées selon différents écarts de températures minimales entre la station urbaine Griffon et rurale St-Jacques sur trois années 2007-2010-2011.

b) L'ensoleillement et le rayonnement global

L'ensoleillement quotidien et le rayonnement global témoignent de l'état de la nébulosité. Ils permettent de résumer quotidiennement les conditions atmosphériques lors de la phase diurne de la journée. Cependant, la forte variabilité des types de temps peut engendrer une nuit couverte et perturbée suite à une journée ensoleillée et inversement. Ces deux facteurs météorologiques sont mesurés à la station de Météo France à *St-Jacques*. L'ensoleillement quotidien (ou durée d'insolation) correspond aux heures où le rayonnement direct mesuré est supérieur ou égal à 120 W/m². Quant au rayonnement global (noté R_g), il est défini par la somme du rayonnement direct, du rayonnement diffus et du rayonnement réfléchi (Beltrando and Chémery 1995).

La figure 86 indique les heures d'ensoleillement, le rayonnement global quotidien et l'ICU observé pendant le mois d'avril 2010. Ces deux variables reflètent de manière similaire la succession des types de temps rencontrés pendant le mois, et le coefficient de corrélation entre ces deux variables est de R=0,91. La relation des deux facteurs avec l'ICU n'apparaît pas distinctement, révélant la complexité de celle-ci (R=0,5 pour chaque facteur avec l'ICU).

Cependant l'analyse mensuelle permet de mettre en évidence les situations favorables. Du 8 au 10 avril l'ICU devient marqué ($\Delta T_n \geq 3,0^\circ\text{C}$) correspondant à des journées largement ensoleillées (avec environ 12h d'ensoleillement et R_g>2000 W/m²). Les conditions d'insolation

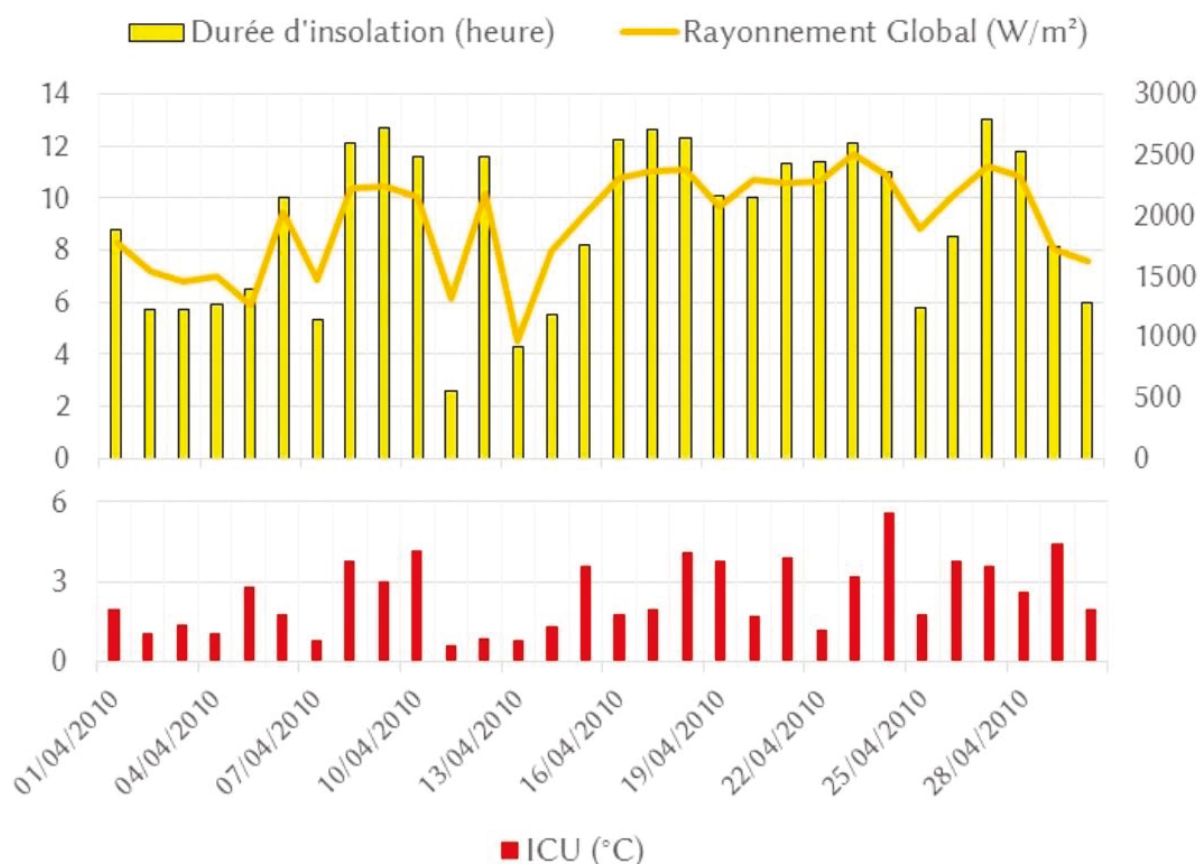


Figure 86, l'ensoleillement (ou durée d'insolation), le rayonnement global et ICU quotidien à Rennes en avril 2010.

sont à nouveau favorables à l'ICU à partir du 15 jusqu'au 24 avril, cependant l'intensité de la présence de l'ICU sur cet épisode n'est pas constante avec 6 nuits sur 10 où l'ICU est présent et marqué. La variabilité infra-journalière de la nébulosité (notamment nocturne) engendre cette incertitude.

c) L'amplitude thermique quotidienne

L'amplitude thermique quotidienne est définie par la différence entre les températures maximales et minimales observées. L'amplitude thermique témoigne indirectement également de la nébulosité, avec une valeur élevée lors d'un épisode de beau temps et inversement une valeur faible pour les épisodes perturbés. Ce signal thermique permet d'obtenir une variable avec un pas de temps quotidien pertinent pour l'évolution de l'ICU.

La figure 87 montre l'intensité de l'ICU mesuré et l'amplitude thermique associée durant le mois d'avril 2010. Ces variables sont plus fortement corrélées que les variables présentées précédemment pour ce même mois avec $R=0,82$. La variabilité de l'intensité de l'ICU est mieux prise en compte par l'amplitude thermique quotidienne.

d) Bilan

Les trois facteurs abordés précédemment sont présentés, en figure 88, selon trois classes d'écart des T_n entre les stations *Griffon* et *St-Jacques* en 2007-2010-2011, afin d'observer la variabilité des facteurs sous un ICU « faible », « marqué » et « intense ». La distinction des trois classes d'intensité d'ICU apparaît plus ou moins distinctement, conformément au coefficient de

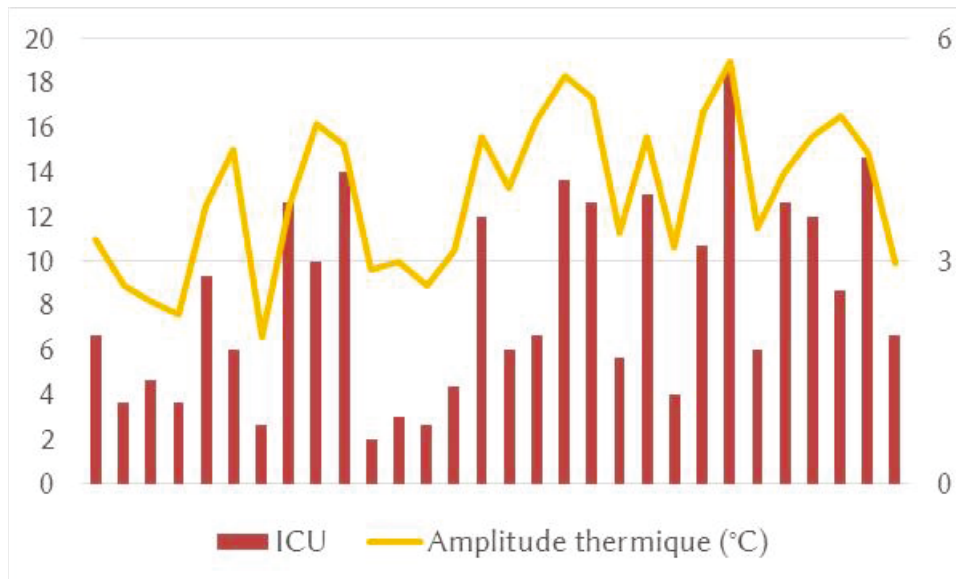


Figure 87, l'amplitude thermique et l'ICU quotidien à Rennes en avril 2010.

corrélation associé. Les boîtes à moustaches de l'amplitude thermique révèlent une discrimination plus efficace que celles du vent et du rayonnement global. Cependant, il est intéressant de constater que des valeurs seuils apparaissent pour ces observations. Le vent moyen ne dépasse pas les 6 m/s pour un ICU marqué et 5 m/s dans le cas d'ICU intense. Concernant l'amplitude thermique 5°C et 6°C semble être l'amplitude minimum constatée en situation d'ICU. Quant au rayonnement global, il ne s'agit pas d'un facteur limitant la présence de l'ICU par un seuil. Malgré la grande variabilité de l'ICU et l'explication partielle de ces facteurs, ils présentent un intérêt pour la construction d'un modèle au pas de temps quotidien.

7.2. L'analyse infra-journalière

L'analyse de la relation entre la variabilité de l'ICU et des facteurs météorologiques à l'échelle temporelle journalière met en évidence l'incertitude liée à la succession des types de temps à l'échelle horaire. L'objectif de l'analyse à l'échelle horaire est de définir les journées où l'ICU est présent et reflète bien une situation où l'écart de température minimale correspond bien au phénomène d'ICU.

7.2.1. Les données METAR

Les données de type *METAR* (Meteorological Aerodrome Report) sont des rapports d'observations météorologiques émis à destination des activités aériennes. La fréquence d'émission de ces rapports varie selon la station entre 30 min et 60 min. Le contenu de ces informations permet de connaître l'état de l'atmosphère à partir des facteurs suivant : la température, le vent (sens et direction), la nébulosité (fraction de ciel couverte), la visibilité, les précipitations... Ces informations sont disponibles auprès de la station météorologique Météo France *St-Jacques*, correspondant à la station METAR de l'aéroport. Les informations extraites des données METAR sont le vent et la nébulosité, donc pertinentes pour qualifier plus précisément le type de temps rencontré en fonction de l'ICU observé.

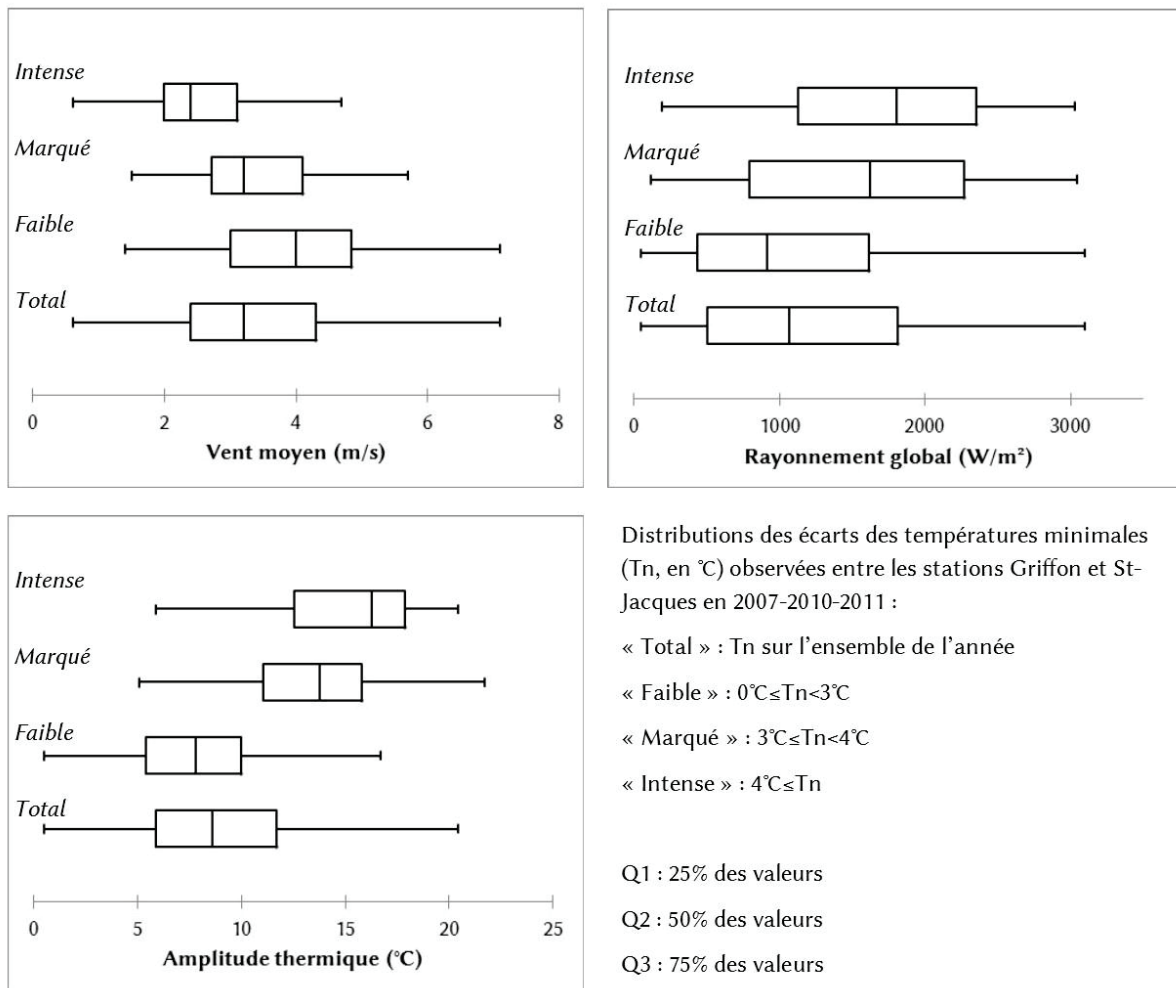


Figure 88, boîtes à moustaches des facteurs météorologiques quotidiens selon 3 classes d'intensité d'ICU observé à Rennes en 20107-2010-2011. Les boîtes à moustaches sont construites selon les quantiles Q_1 , Q_2 et Q_3 .

7.2.2. Les conditions météorologiques requises pour la mise en place de l'îlot de chaleur urbain

Afin de définir plus précisément les situations avec un ICU présent, l'analyse des données horaires METAR permet de déterminer les conditions météorologiques au moment de l'enregistrement des T_n définissant l'ICU. L'analyse est réalisée sur l'année 2011 avec pour définir l'ICU l'écart des T_n entre les stations *Griffon* et *Melesse* dont la distribution des écarts des températures minimales est représentée en figure 88. La classification des écarts des T_n est réalisée en trois catégories avec les intervalles suivant : $\Delta T_n < 3^\circ\text{C}$, $3^\circ\text{C} \leq \Delta T_n < 5^\circ\text{C}$ et $\Delta T_n \geq 5^\circ\text{C}$. Selon cette classification, pour l'année 2011 la fréquence des jours est respectivement de 63%, de 26% et 11%.

Les variables retenues sont le vent moyen et la couverture nuageuse au moment où la T_n est enregistrée. Le tableau 7 indique la fréquence d'état du ciel observé à la station *St-Jacques* selon les 3 classes d'intensité d'ICU mesuré. Plus l'intensité de l'ICU est élevée, plus l'état du ciel au moment de la mesure est clair et inversement, ce qui est conforme aux attentes. Cependant, on peut constater la présence de jours où le ciel est fragmenté, couvert ou bouché au moment de la mesure. Ces trois états du ciel (fragmenté, couvert et bouché) sont définis comme

		<i>Etat du ciel (fraction en octas)</i>				
		Clair (0/8)	Épars (3/8 à 4/8)	Fragmenté (5/8 à 7/8)	Couvert (8/8)	Bouché (brouillards...)
<i>Ecart des Tn</i>	$\Delta Tn < 3^{\circ}C$	28%	8%	10%	52%	2%
	$3^{\circ}C \leq \Delta Tn < 5^{\circ}C$	51%	5%	11%	26%	7%
	$\Delta Tn \geq 5^{\circ}C$	83%	5%	2%	7%	2%

Tableau 7, état du ciel (observé à St-jacques) selon l'intensité de l'ICU observé en 2011 (écart des Tn entre la station Griffon et Melesse).

incompatibles avec la présence de l'ICU, ce qui restreint le nombre de jour où $\Delta Tn \geq 3^{\circ}C$ de 138 jours à 92 jours (en 2011). La sélection de ces jours, où l'état de l'atmosphère est favorable à la mise en place de l'ICU, révèle que le vent moyen observé à l'heure de la mesure ne dépasse pas 4 m/s.

La sélection de jours, où l'ICU est présent, est réalisée en prenant en compte trois facteurs : l'écart des Tn entre les stations *Griffon* et *Melesse* est supérieur ou égal à $3^{\circ}C$, le ciel est clair ou épars et le vent est inférieur à 5 m/s. Cette sélection totalise 89 journées dont 70% de celles-ci enregistrent l'heure de la Tn entre 5h et 7h UTC dont la majorité l'ont enregistré à 5h UTC. Cette sélection est réalisée afin de spatialiser l'ICU à Rennes et d'écarter les situations particulières engendrant un écart de l'heure d'enregistrement entre les Tn.

7.3. Prédiction de l'îlot de chaleur urbain par régression linéaire

La construction des modèles est réalisée dans le but de projeter l'ICU à Rennes à l'aide de sorties des modèles régionalisées par le CERFACS. Les sorties de modèles du CERFACS sont produites à un pas de temps journalier à partir des résultats issus de la partie précédente (cf. partie 7.1.4). Les facteurs analysés sont l'amplitude thermique (différence entre Tx et Tn), le rayonnement global, le vent moyen, la présence de pluie dans la journée et les températures minimales (Tn) et maximales (Tx) relevées à *St Jacques*. Le seuil de présence de pluie est défini par $P \geq 0,1mm$ car ce facteur traduit de l'état potentiel du ciel indirectement (nuageux).

La matrice de corrélation entre les variables permet de mesurer l'intensité de la liaison entre les paramètres afin de réduire le phénomène de colinéarité lors de la sélection de ceux-ci (tableau 8). Les variables les mieux corrélées avec ΔTn (soit l'ICU) sont l'amplitude thermique et le vent moyen, de plus ces deux variables sont plus faiblement corrélées entre-elles. Les autres variables n'apportent pas d'informations supplémentaires car elles sont trop interdépendantes au regard des degrés de corrélation.

<i>Variables</i>	ΔTn	Amplitude thermique	Rayonnement global	Vent	Jour de pluie	Tn	Tx
ΔTn	1	0,730	0,319	-0,517	-0,373	-0,386	0,151
Amplitude thermique	0,730	1	0,725	-0,418	-0,476	-0,059	0,587
Rayonnement global	0,319	0,725	1	-0,152	-0,409	0,330	0,728
Vent	-0,517	-0,418	-0,152	1	0,281	0,169	-0,129
Jour de pluie	-0,373	-0,476	-0,409	0,281	1	0,071	-0,245
Tn	-0,386	-0,059	0,330	0,169	0,071	1	0,774
Tx	0,151	0,587	0,728	-0,129	-0,245	0,774	1

Tableau 8, matrice de corrélation entre les écarts des Tn (ΔTn) observés entre les stations Griffon et St-Jacques et les facteurs météorologiques à Rennes en 2007-2010-2011.

7.3.1. *Modèle à deux variables*

La construction du modèle s'effectue avec ΔT_n comme variable à expliquer (définie ici comme intensité de l'ICU) et les variables explicatives sont l'amplitude thermique et le vent moyen pour les années 2007, 2010 et 2011, c'est-à-dire 1095 observations. Le résultat de la régression (1) est détaillé par la figure 89. Ce modèle possède un R_2 ajusté de 0,59 (et largement significative avec $F=778$), il décrit environ 60% de la variabilité relative l'ICU avec une erreur-type de 0,8°C. Les résidus suivent une loi normale et ils ne semblent pas présenter de structure particulière avec les descripteurs (le vent moyen et l'amplitude thermique) (figure 89).

$$\Delta T_n = 0,92 - 0,22 \times \text{Vent moyen} + 0,19 \times \text{Amplitude thermique} \quad (1)$$

En revanche, le modèle présente un biais, les résidus en fonction de ΔT_n observé montrent une structure selon laquelle plus l'ICU est intense plus les résidus sont importants : le modèle sous-estime l'ICU. Plusieurs essais de modèles introduisant un paramètre non-linéaire dans le modèle de régression ne permettent pas de corriger ce phénomène et l'analyse des résidus partiels avec les variables descriptives confirme l'absence d'une relation non-linéaire. L'origine de ce biais est lié à la structuration temporelle des résidus comme le confirme le test de Durbin-Watson ($DW=1,49$) indiquant une autocorrélation positives des résidus (figure 89) avec une valeur inférieure au seuil de 1,89 (Cornillon and Matzner-Lober 2010). Le graphique en figure 90 révèle la structure temporelle des résidus issus de la régression. L'usage d'un lisseur est recommandé dans ce cas présent, cependant la structure formée par les résidus apparaît en opposition de phase avec la température minimale (T_n). En intégrant cette variable dans le modèle, la structuration temporelle des résidus peut être réduite. L'analyse des autocorrélogrammes partiels des variables indique une autocorrélation présente avec les jours suivants. L'autocorrélation partielle de l'amplitude thermique et du vent moyen est d'environ 0,6 avec un décalage $J+1$ et diminue significativement à partir du 2^{ème} jour avec $R=0,2$. Ce phénomène résulte de l'homogénéité des types de temps d'une journée à l'autre.

7.3.2. *Modèle à trois variables*

Afin de réduire la structuration temporelle des résidus, la température minimale observée à *St Jacques* est ajoutée au modèle précédent (1) ce qui mène à un second modèle de régression multiple (2). Cependant il est à noter que l'amplitude thermique est une variable composée de la différence entre T_x et T_n , par conséquent l'apport de T_n dans la régression équivaut à retenir distinctement T_x et T_n comme variables descriptives, soit une régression décrite par T_x , T_n , et le vent moyen. Il est à préciser que l'ajout de la variable T_x ne peut se justifier car elle apparaît comme peu corrélée avec l'ICU selon la matrice de corrélation du tableau 8. En revanche, l'ajout de la variable T_n à la régression (1) permet d'apporter une information non-redondante à la description de l'ICU.

$$\Delta T_n = 1,3 - 0,17 \times \text{Vent moyen} + 0,19 \times \text{Amplitude thermique} - 0,073 \times T_n \quad (2)$$

Les résultats de la seconde régression montrent l'ajustement du modèle par l'absence d'un biais saisonnier visible, notamment par l'observation de la moyenne mobile des résidus sur 30 jours (figure 91). Le graphique représentant les résidus en fonction de l'ICU observé révèle une structure moins marquée selon laquelle : plus l'ICU observé est important, plus il est sous-estimé par le modèle. Ce meilleur ajustement par ce second modèle se traduit par une variabilité expliquée à 68% contre 59% par le modèle précédent, en revanche l'indice de Durbin-Watson est inférieur au seuil de 1,89 ce qui valide l'hypothèse de structuration temporelle des résidus.

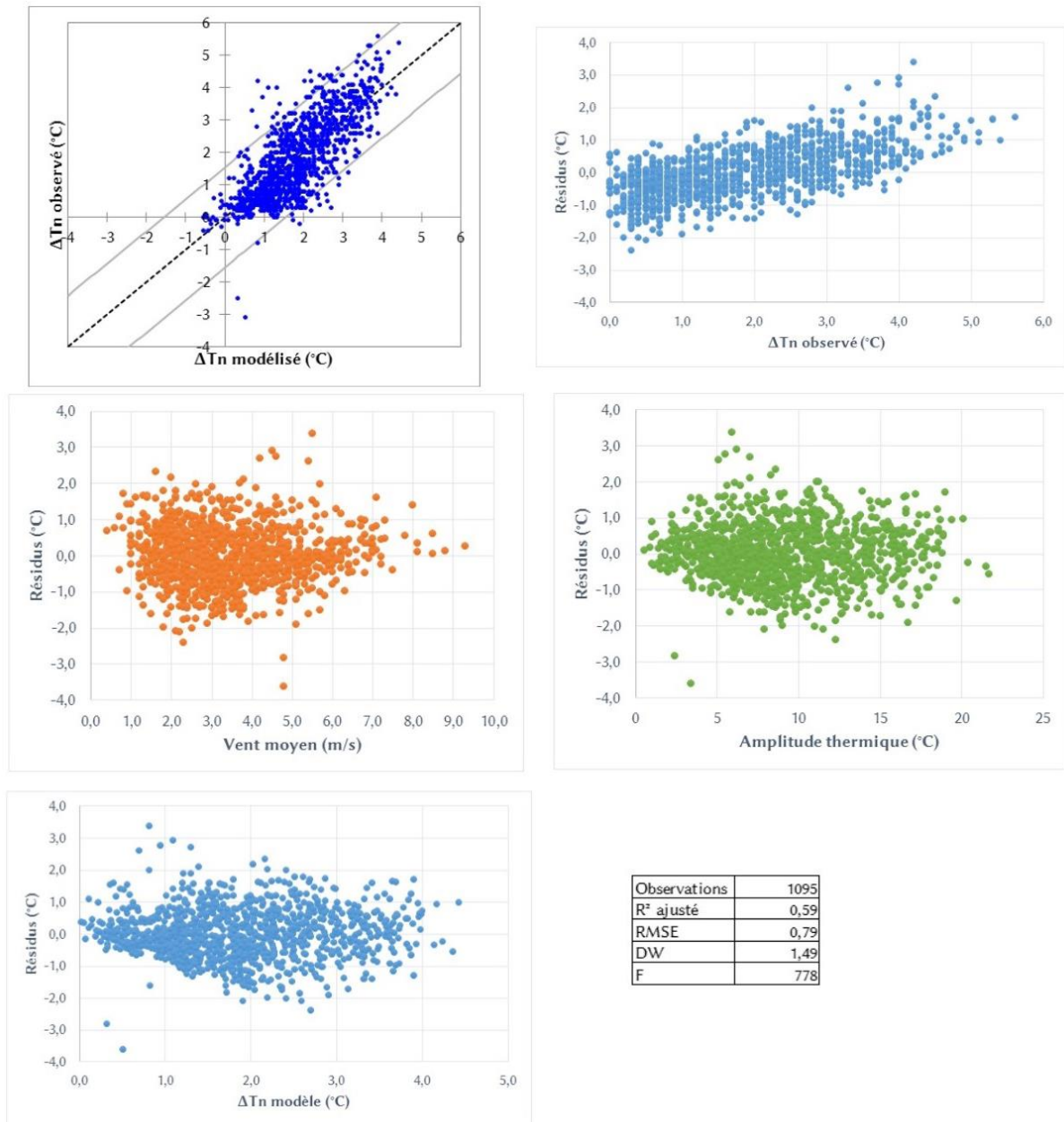


Figure 89, résultat de la régression linéaire de ΔTn décrit par le vent moyen et l'amplitude thermique pour les années 2007-2010-2011.

Une validation croisée est réalisée sur le modèle à trois variables, 90 observations (soit 8% du total des observations) sont soustraites aléatoirement puis la régression est appliquée. L'erreur-type (RMSE, pour *Root-Mean-Square Error*) est de 0,5°C pour ces 90 observations, contre 0,7°C pour l'application de la régression sur l'ensemble des observations. A partir de ces 90 jours de validation, trois journées avec une erreur d'estimation supérieure à 1°C sont retenues : 18/01/2011, 08/07/2007 et le 11/05/2011.

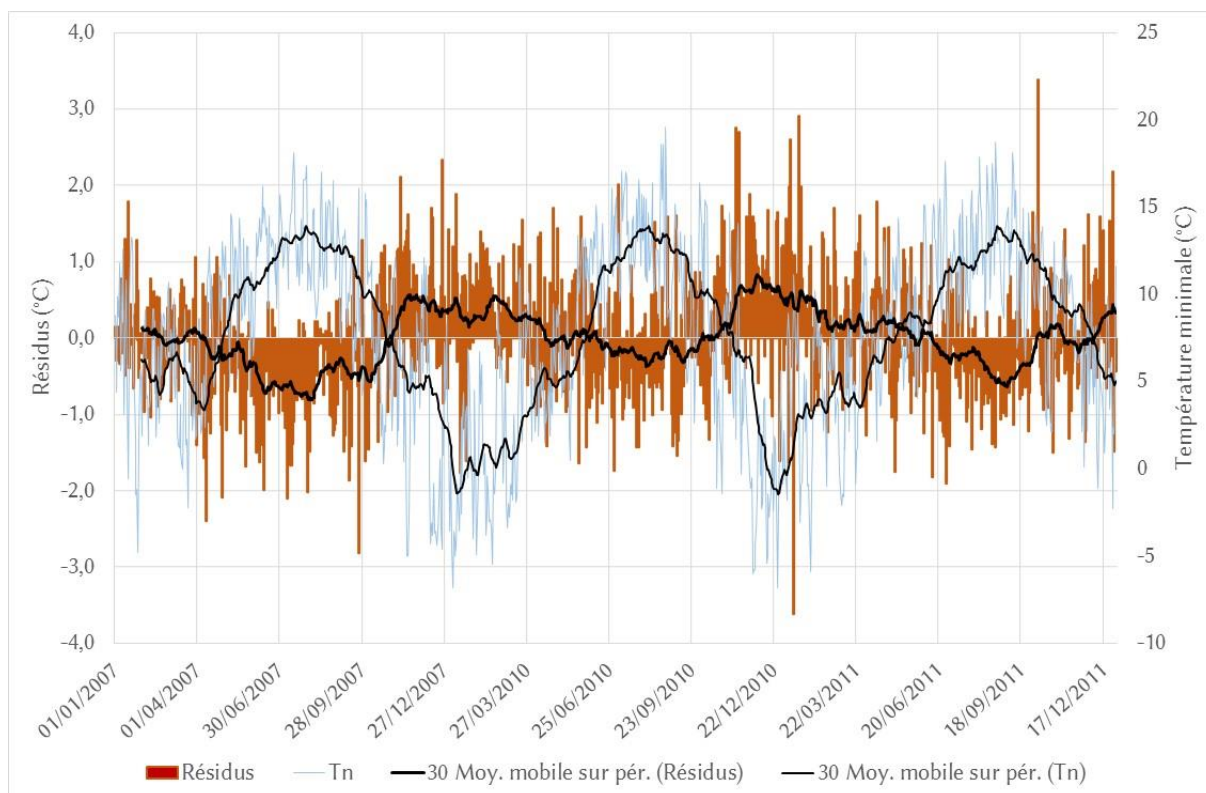


Figure 90, résidus (en rouge) issus du premier modèle (1) avec sa moyenne mobile de 30 jours, température minimale (en bleu) avec sa moyenne mobile de 30 jours des années 2007-2010-2011.

Le 18 janvier 2011, l'écart des Tn enregistré entre les stations *Griffon* et *St-Jacques* est de 4,0°C cependant la prévision est de 1,4°C, soit une sous-estimation de 2,6°C, c'est-à-dire le résidu le plus élevé des 90 observations de la validation. L'heure de l'enregistrement des Tn a lieu à 18h (UTC), ce qui ne correspond pas à la présence l'ICU. Le relevé de la température avant le lever du soleil indique une différence de température de +0,4°C entre les deux stations et le l'écart instantané nocturne le plus grand est de +1,0°C. L'analyse horaire montre une diminution constante de la température sur l'ensemble de la journée du 18 janvier, avec un vent moyen fort (supérieur à 5m/s) jusqu'à 17h, puis il mollit (inférieur à 2 m/s). Le ciel est couvert sur l'ensemble de la première partie de la journée, puis la nébulosité devient très faible à partir de 16h et dans le même temps, l'écart de température s'accroît entre les deux stations météorologiques engendrant en fin de journée un écart entre les Tn de 4°C. Cette erreur de prévision ne traduit pas la sous-estimation de l'ICU mais du choix de l'intervalle de temps pour définir les Tn (de 18h la veille, à 18h le jour même).

Le 7 juillet 2007, l'observation de ΔTn est de -0,2°C cependant la valeur prédite par le modèle est de +1,4°C. Le faible écart de température enregistré entre les deux stations résulte de la présence d'une couverture nuageuse et d'averses sur l'ensemble de la nuit. Cependant à partir de 12h la nébulosité diminue et laisse place à un ciel dégagé, ce qui entraîne une augmentation de température pour atteindre une Tx de 20,5°C contre une Tn de 12,5°C. Cette amplitude thermique de 8°C ne révèle pas l'état du ciel au moment de la mesure des Tn où des averses ont atténué totalement l'ICU, engendrant une surestimation de l'ICU modélisé de +1,6°C.

Le 5 novembre 2011, l'intensité de l'ICU modélisé est faible avec ΔTn de 1,3°C, tandis que le ΔTn relevé est 2,7°C. Des brumes locales sont observées au moment de la mesure des Tn vers 3h. Le vent moyen au moment de la mesure de la Tn est de 3 m/s, puis s'accroît en fin de matinée pour atteindre 7 m/s dans l'après-midi, il en résulte une moyenne quotidienne à 4,7 m/s.

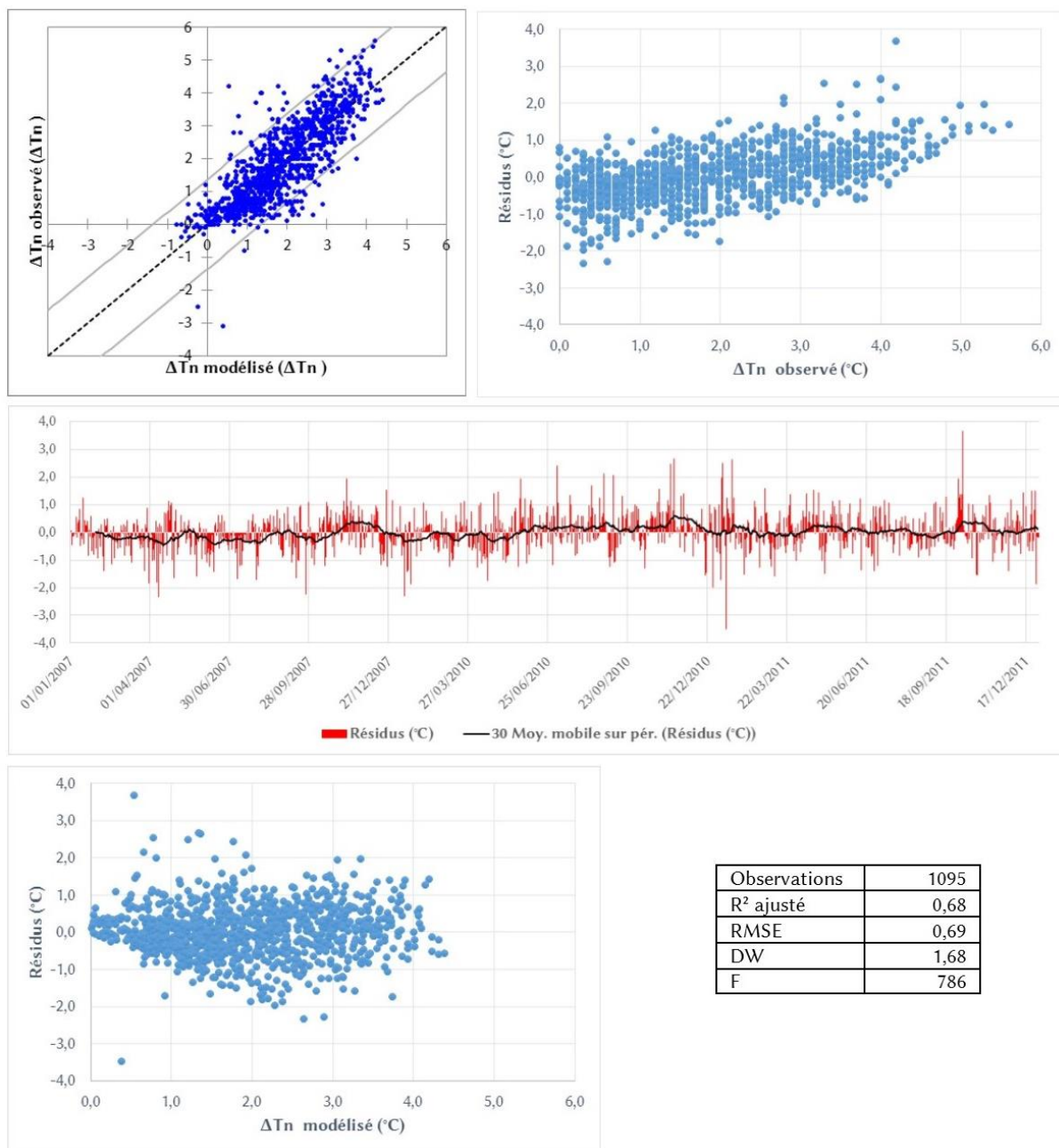


Figure 91, résultats de la modélisation par régression linéaire de l'équation (2) sur les années 2007-2010-2011.

Le modèle sous-estime l'intensité de l'ICU par la présence d'un vent moyen fort cependant cette mesure ne révèle pas l'intensité au moment de la mesure.

Pour l'ensemble de ces trois journées où l'erreur de prédiction de l'ICU est supérieure à 1°C, il apparaît que l'erreur est liée à la variabilité intra-quotidienne des facteurs météorologiques. Le modèle repose sur l'hypothèse de relative homogénéité des types de temps dans la journée. A partir des 90 observations modélisées pour la validation croisée, 62 des ΔT_n modélisés (69%) présentent une erreur inférieure au seuil de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ (figure 93), ce qui permet de distinguer les journées avec un ICU marqué ($\Delta T_n \geq 3^\circ\text{C}$) d'un faible ICU.

7.3.3. Modèles quotidiens à trois variables, comparaison mensuelle

Afin de visualiser les périodes où l'ICU est le mieux modélisé, un découpage mensuel du modèle par régression linéaire multiple (à trois variables) est opéré. Les variables sont : l'amplitude thermique, le vent moyen et la température minimale. Les régressions sont appliquées distinctement en adaptant la combinaison de variables descriptives afin d'obtenir selon trois critères ($R^2_{\text{ajusté}}$, l'erreur type et Durbin-Watson) la meilleure régression mensuelle. Compte-tenu du faible nombre de possibilités, la sélection est réalisée manuellement ; les quatre combinaisons de variables pour les régressions utilisées sont indiquées et numérotées en figure 92. Les résultats de chaque régression sont indiqués par les critères du $R^2_{\text{ajusté}}$ et l'erreur type. Le critère de Durbin-Watson valide l'hypothèse d'absence d'autocorrélation des résidus pour l'ensemble des mois à l'exception de février, mai et octobre.

La variabilité expliquée par le modèle fluctue selon les mois, on peut classer le mois de mars avec un $R^2_{\text{ajusté}}=0,81$ (le score le plus élevé), puis les trois mois avec un $R^2_{\text{ajusté}}\geq 0,75$: mai, juin et juillet. Un troisième groupe se distingue avec un score proche de $R^2_{\text{ajusté}}=0,65$ et enfin le mois de janvier apparaît comme le mois le dont la variabilité est la moins bien prise en compte avec $R^2_{\text{ajusté}}=0,51$. Ces différences d'ajustement du modèle selon le mois ne sont pas à attribuer à des excédents/déficits d'ensoleillement par rapport aux normales, ni aux valeurs absolues. Les mois les plus largement ensoleillés laissent présager des situations plus longtemps stables (voire anticycloniques) dont l'ICU est mieux discriminé par le modèle. Les situations stables sont plus fréquentes et plus durables l'été que l'hiver, ce qui se traduit par une variabilité mieux décrite dès le printemps. Ainsi, le mois de mars est bien modélisé avec une variabilité décrite à 81%.

L'erreur type (RMSE) obtenu par mois révèle un résultat similaire avec cependant des nuances, ainsi le mois d'août apparaît avec l'erreur type la plus faible (RMSE=0,5°C). A l'inverse, les mois avec une erreur type la plus élevée sont les mois de janvier (RMSE=0,9°C), avril et octobre (RMSE=0,8°C), ce qui indique que malgré une bonne prise en compte de la variabilité pour ces deux derniers mois il apparaît que la prédiction présente une erreur plus élevée. Si l'on considère l'erreur type par saison, le modèle est meilleur l'été (RMSE=0,6°C) et plus faible l'hiver (RMSE=0,7°C) ce qui est cohérent avec le critère $R^2_{\text{ajusté}}$.

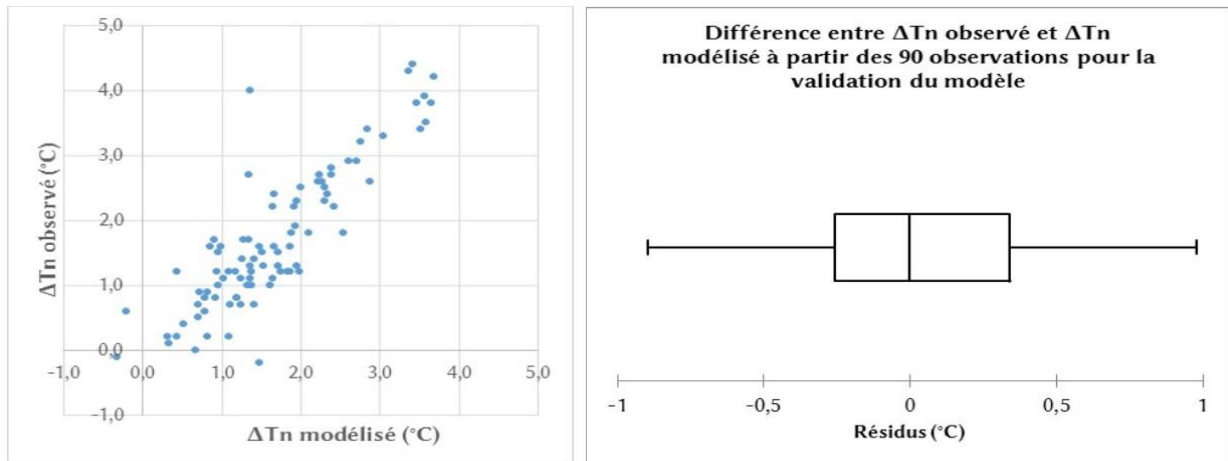
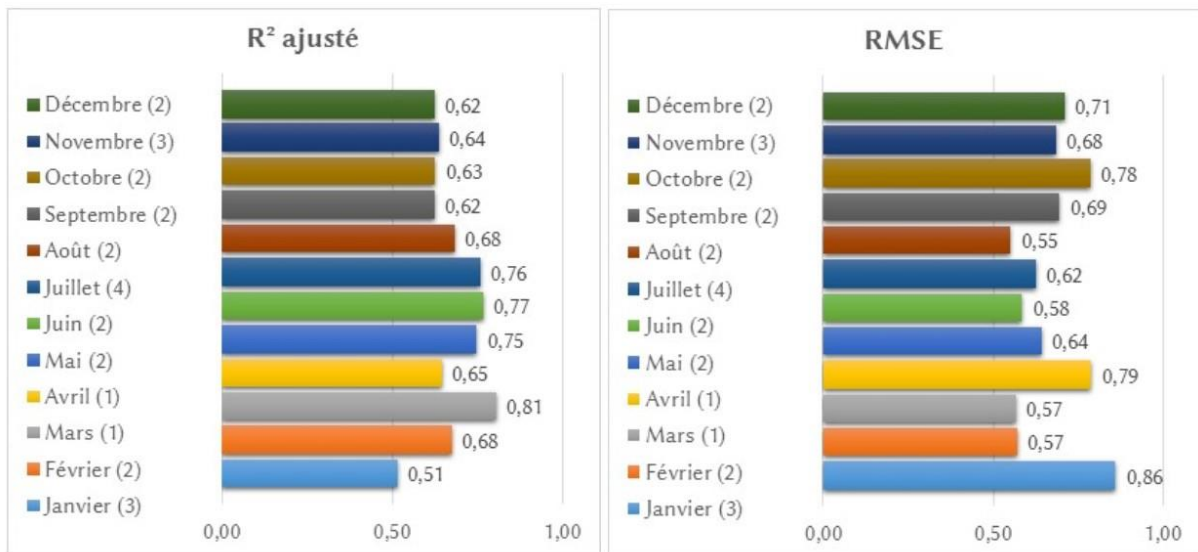


Figure 93, résultats de la validation croisée du modèle à trois variables sur 90 observations (sélectionnées aléatoirement). Pour la boîte à moustache, le choix des quantiles est $Q1=25\%$, $Q2=50\%$ et $Q3=75\%$.



Modèles	Variables descriptives utilisées		
(1)	Amplitude Thermique	Vent	
(2)	Amplitude Thermique	Vent	Tn
(3)	Amplitude Thermique		Tn
(4)	Amplitude Thermique		

Figure 92, le R^2 ajusté et l'erreur type (RMSE) du modèle à trois variables par régression linéaire multiple appliquée pour chaque mois des années 2007-2010-2011. Les variables descriptives utilisées pour la régression mensuelle sont numérotées (#).

Conclusion du chapitre 7

La variabilité temporelle de l'ICU a été définie par des conditions météorologiques spécifiques (vent et état du ciel). L'analyse quotidienne et horaire a permis d'établir trois intensités d'ICU : faible, marqué et intense. Ainsi en 2011, l'ICU était présent pour 89 nuits et pour 1 nuit sur 10 l'ICU était identifié comme intense.

L'analyse temporelle de l'ICU quotidien en fonction de plusieurs facteurs météorologiques sur les années 2007-2010-2011 a mis en évidence deux facteurs : l'amplitude thermique et le vent moyen. A partir de ces variables un modèle de régression linéaire est construit. Dans un premier temps, une structure temporelle des résidus est constatée et corrigée par l'introduction de la température minimale. Le modèle de prévision de l'ICU quotidien permet d'expliquer 68% de la variabilité temporelle. Les biais constatés montrent une relation avec les saisons où les mois les plus ensoleillés sont mieux simulés. Une analyse des journées avec une erreur résiduelle importante correspondent à des événements météorologiques infra-journaliers (orages...). Le modèle pourrait donc être amélioré avec des données tri-horaires.

En revanche, le modèle se révèle adapté pour la détermination de l'ICU moyen annuel. Ce résultat permet d'envisager l'application de cette régression linéaire à des sorties des modèles du changement climatique, afin de projeter l'ICU moyen annuel selon les types de temps simulés pour le XXIème siècle.

Chapitre 8 : Le changement climatique à Rennes : analyse et application des sorties de modèles

L'analyse de la variabilité temporelle a permis d'établir des modèles de prévision de l'ICU quotidien dans le chapitre 7. L'intensité de l'ICU (ΔT_n) est définie par l'écart de température minimale observé entre le centre-ville (*Griffon*) et la campagne (*St-Jacques*). Ce modèle permet d'expliquer que 68% de la variabilité temporelle, cependant l'ICU moyen annuel simulé est identique à l'observation. A partir de ce modèle, l'ICU peut être projeté à partir des sorties de modèles du changement climatique. L'objectif de ce chapitre est de projeter l'ICU (observé actuellement à Rennes) à moyen et à long terme selon les facteurs météorologiques des modèles régionalisés. L'urbanisation future de Rennes Métropole n'est donc pas prise en compte par cette démarche.

Plusieurs modèles issus de deux méthodes de régionalisation ont été présentés dans le chapitre 2.2. Dans un premier temps, la sélection des modèles régionalisés les plus pertinents est réalisée par analyse de l'ICU projeté par application de la régression sur les variables simulées et observées à St-Jacques sur les périodes de contrôle. Puis dans un second temps, l'ICU est projeté à partir des variables des modèles régionalisés retenus. Ces projections de l'ICU permettent d'établir d'éventuelle variabilité temporelle de l'ICU futur selon différents scénarios du changement climatique.

8.1. Analyses des sorties de modèles régionalisés

La construction du modèle de l'ICU à partir des facteurs météorologiques est réalisée précédemment dans le chapitre 7. Dans ce chapitre, l'objectif est de projeter l'ICU à partir des sorties de modèles simulant le changement climatique à l'échelle régionale. La sélection des modèles régionalisés du changement climatique est une étape préparatoire à la projection de l'ICU. Il existe deux méthodes de régionalisation des modèles globaux : la descente d'échelle dynamique et la descente d'échelle statistique (*cf.* le chapitre 2).

8.1.1. Les modèles régionalisés selon la méthode des régimes de temps

Les modèles régionalisés sont spatialisés sur l'ensemble de la France avec une grille de 8km de résolution ; dans le cadre de cette thèse seule la maille correspondante à la station météorologique *Saint-Jacques* (Météo-France) est retenue. Le choix de cette maille correspond au site de référence « campagne » (par exemple : la station Météo-France, Rennes Saint-Jacques)

pour la mesure de l'ICU et la relation avec les types de temps rencontrés. De plus, cette station bénéficie d'une série d'observation complète à partir de 1945, ce qui permet une comparaison entre l'observation et la même période simulée par les modèles (qualifiée de « période de contrôle »).

Deux méthodes de régionalisation des modèles sont disponibles, la méthode dynamique et la méthode statistique. Le modèle Aladin (développé par le laboratoire CNRM/GAME de Météo-France) issu du projet SCAMPEI est retenu comme modèle de régionalisation dynamique avec deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre : A1B et A2. La méthode des régimes de temps réalisée par le CERFACS est retenue comme méthode de régionalisation statistique pour deux modèles : ARPEGE V4 CERFACS (un parmi les quatre produits par le CERFACS, noté ici arpege1) et RETIC (produit par le CNRM, noté ici retic) (Pagé 2010b). Les scénarios A1B et A2 sont utilisés pour le modèle retic et seul le scénario A1B est employé pour le modèle arpege1. Ces informations relatives aux modèles sont résumées ci-dessous (tableau 9).

Laboratoire	Régionalisation	Modèles	Scénarios	Période de référence
CERFACS	Statistique	arpege1	A1B	1950-2000
		retic	A1B / A2	1950-2000
CNRM/GAME	Dynamique	aladin	A1B / A2	1961-1990

Tableau 9, récapitulatif des modèles régionalisées et des scénarios d'émission de gaz à effet de serre utilisés.

Les sorties de modèles issues de la méthode de régionalisation du CERFACS sont produits selon une grille de 8 km de résolution sur l'ensemble de la France métropolitaine (et la Corse) et une partie des pays limitrophes (Pagé 2010b). Cette grille de 9892 points correspond à la grille SAFRAN (de 8585 points, car elle n'inclue pas les pays limitrophes) dont les données servent de jeu de données d'observation pour la méthode régionalisation par régime de temps. La grille SAFRAN comporte 8585 points et elle couvre exclusivement la France métropolitaine et la Corse (hors territoire maritime). La figure 94 illustre l'organisation des points et des mailles associées aux sorties de modèles du CERFACS. La localisation des deux stations météorologiques utilisées pour la mesure de l'ICU à Rennes met en évidence l'échelle d'observation de l'ICU. Cette localisation justifie le choix du point de la maille correspondant à la station de Météo-France *St Jacques*. Les sorties des modèles Aladin sont sélectionnées de la même manière, c'est-à-dire par la superposition de la maille à la station météorologique *St Jacques*.



Figure 94, projection sur l'espace d'étude de la grille de 8 km de résolution de sorties de modèles produit par le CERFACS.

8.1.2. Analyses des modèles régionalisés : comparaisons des données SAFRAN et des observations de la station St-Jacques

a) Le choix des modèles de régionalisation par régimes de temps

L'étape suivante est d'analyser les modèles afin de retenir celui dont les variables simulées reproduisent le mieux l'ICU quotidien projeté par le modèle de régression linéaire. Afin de comparer les modèles issus de la régionalisation statistique (arpege1 et retic) et dynamique (Aladin), leurs périodes références (cf. tableau 9) vont permettre de comparer l'ICU projeté entre ces périodes et la période d'observation projetée (1961-2010).

Le modèle à trois variables de l'ICU obtenu par régression linéaire (décrit dans le chapitre 7) est appliqué aux trois sorties de modèles régionalisés (arpege1, retic et Aladin) sur leur période de référence respective et sur la période d'observation de la station *St Jacques*. L'équation de ce modèle est :

$$\Delta T_n = 1,3 - 0,17 \times \text{Vent moyen} + 0,19 \times \text{Amplitude thermique} - 0,073 \times T_n \quad (2)$$

Les résultats de l'ICU modélisé (noté ΔT_n mod.) sont recensés sur le tableau 10. Il apparaît que les modèles issus de la méthode de régionalisation par régimes de temps (arpege1 et retic

arpege) semblent mieux reproduire l'intensité moyenne de ΔT_n avec un écart de $-0,3^\circ\text{C}$. Le modèle de l'ICU issu des données Aladin semble moins approprié avec un écart de $-0,5^\circ\text{C}$ avec le ΔT_n issu de la projection à St-Jacques (1961-1990). Cependant, on peut remarquer que l'écart-type issu des trois modèles est proche de celui issu de la projection à St Jacques (1981-2010), ce qui indique une dispersion similaire autour de la moyenne. Le modèle Aladin est donc écarté car l'intensité de l'ICU estimé présente une sous-estimation plus importante que les modèles issus de la régionalisation par régime de temps.

Statistique	ΔT_n mod. St Jacques	ΔT_n mod. arpege1	ΔT_n mod. St Jacques	ΔT_n mod. retic	ΔT_n mod. St Jacques	ΔT_n mod. aladin
Période d'observations	1981-2010	1981-2010	1971-2000	1971-2000	1961-1990	1961-1990
Moyenne ($^\circ\text{C}$)	1,8	1,5	1,8	1,5	1,8	1,3
Ecart-type	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9

Tableau 10, comparaisons de la modélisation de l'ICU à partir des sorties des trois modèles (arpege1, retic et Aladin) et leur période de référence.

- b) Comparaison des variables descriptives de l'ICU entre les sorties des modèles arpege1 et retic avec l'observation à St Jacques et SAFRAN

Les deux méthodes de régionalisation utilisent comme base d'observation les données de la maille SAFRAN : la régionalisation statistique pour l'analyse des régimes de temps (Boé et al. 2009; Pagé 2010b) et la méthode dynamique pour la correction quantile-quantile des sorties du modèle Aladin-Climat (Déqué 2007; Piazza et al. 2011). L'analyse SAFRAN est une interpolation optimisée au pas de temps horaire des observations réalisées par 3675 stations météorologiques pour les précipitations et entre 465 et 1062 stations pour la mesure de la température, du vent moyen et de l'humidité relative (Le Moigne 2002; Quintana-Seguí et al. 2008). Par conséquent l'analyse des biais des modèles est réalisée parallèlement avec les données SAFRAN et les observations de la station *St Jacques*.

L'équation (2) utilisée pour la modélisation de l'ICU utilise les trois variables suivantes au pas de temps journalier : l'amplitude thermique (notée $T_x - T_n$), le vent moyen et la température minimale (T_n). L'analyse de ces variables produites par les modèles régionalisés arpege1 et retic est réalisées. La figure 95 montre la distribution des trois variables pour le modèle arpege1, la station *St Jacques* et la maille SAFRAN correspondante (exceptée pour le vent moyen, les données sont indisponibles) pour la période 1981-2010. De même, la figure 96 illustre la distribution de ces trois variables pour le modèle retic, la station *St Jacques* et la maille SAFRAN pour la période 1971-2000.

A partir de la figure 95, il apparait un écart entre l'observation de l'amplitude thermique à la station *St Jacques* et les sorties du modèle arpege1. L'écart entre l'amplitude thermique moyenne observée et modélisée est de $-0,9^\circ\text{C}$ (moyenne $T_x - T_n$: *St Jacques*= $8,5^\circ\text{C}$; arpege1= $7,4^\circ\text{C}$). L'amplitude thermique moyenne simulée par arpege1 est plus proche de celle de la base d'observation SAFRAN (moyenne $T_x - T_n$: SAFRAN= $7,1^\circ\text{C}$). Cependant les boîtes à moustache présentent une structure similaire de la variabilité de l'amplitude thermique simulée

pour arpege1 et SAFRAN et la sous-estimation de celle-ci par rapport aux relevés de la station *St Jacques*.

Concernant la température minimale, elle apparaît surestimée de $+0,3^{\circ}\text{C}$ en moyenne entre l'observation *St Jacques* et la simulation arpege1 (figure 95). Cependant la base d'observation (à la modélisation) SAFRAN surestime de $+0,6^{\circ}\text{C}$ par rapport à la Tn constatée. Quant à la variabilité, elle est mieux reproduite par SAFRAN dont l'écart-type est identique avec *St Jacques* ($\sigma=5,4$, contre $\sigma=5,2$ simulé par arpege1).

La simulation du vent moyen par arpege1 sous-estime de $-0,3$ m/s en moyenne pour la période 1981-2010 (3,4 m/s simulé contre 3,7m/s observé), dont la variabilité est proche avec un écart-type simulé de 1,6 contre 1,5 observé à *St Jacques* (figure 95).

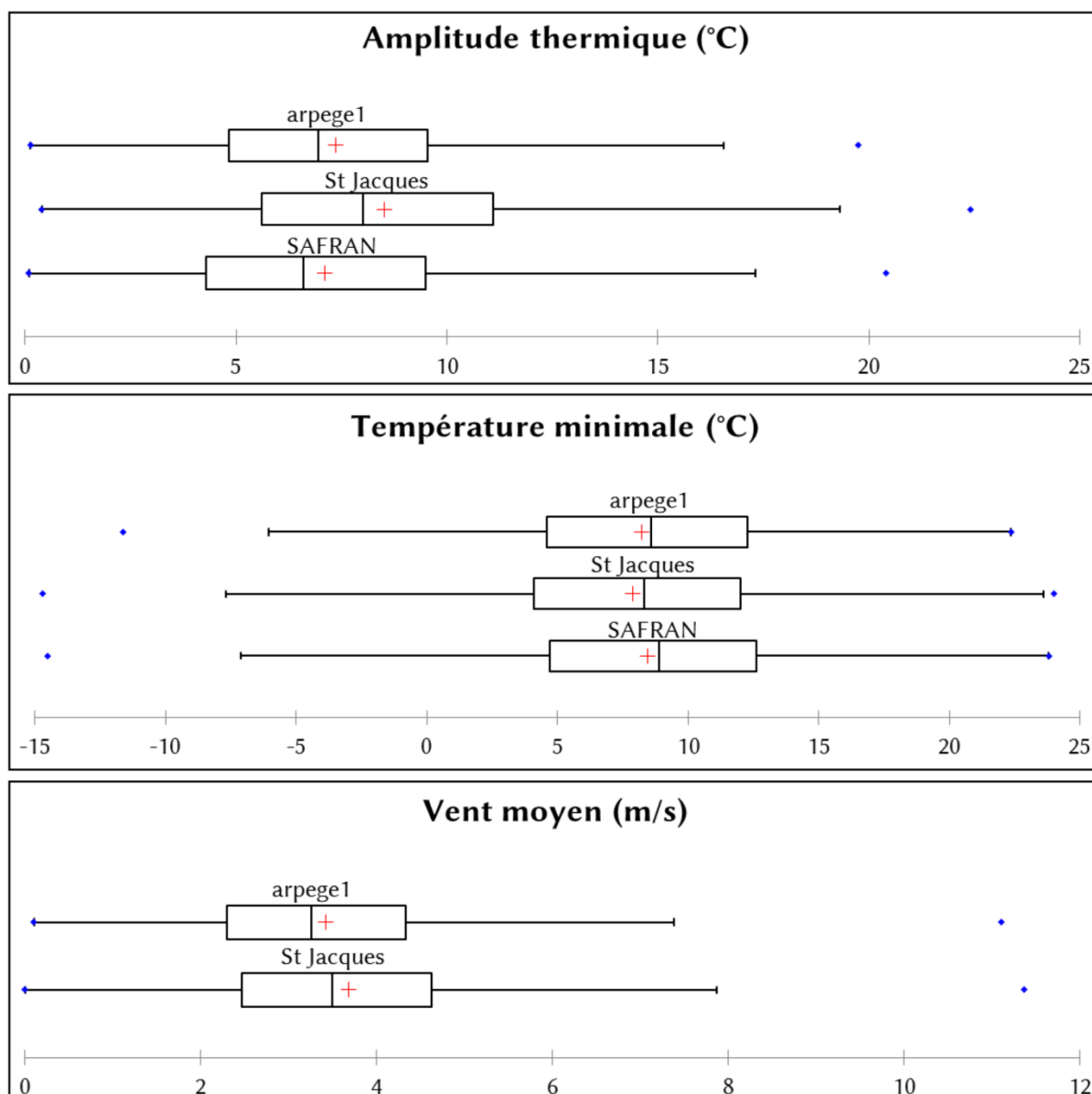


Figure 95, comparaisons des sorties du modèle arpege1 du CERFACS, de la station *St Jacques* et de la maille SAFRAN sur la période 1981-2010. Les boîtes à moustaches suivent les quantiles suivant : $Q1=25\%$, $Q2=50\%$ et $Q3=75\%$. Les points bleus indiquent la valeur minimum et maximum, la croix rouge correspond à la moyenne.

La figure 96 présente les résultats de la simulation retic pour la période 1971-2000, mais les particularités sont sensiblement identiques à celles constatée précédemment pour le modèle arpege1. L'amplitude thermique simulée est également sous-estimée par retic de $-0,9^{\circ}\text{C}$ avec un écart-type de 3,4 contre 3,9 pour l'observation à *St Jacques*. De même, la température minimale présente une surestimation de $+0,3^{\circ}\text{C}$ avec l'observation (moyennes : $T_n=7,9^{\circ}\text{C}$ contre $T_n=7,6^{\circ}\text{C}$ observée). Le vent moyen simulé par retic possède les mêmes caractéristiques que le vent observé avec une moyenne de 3,4 m/s contre 3,7 m/s observé à *St Jacques*.

Les sorties de ces deux modèles pour leur période d'observations respective sont satisfaisantes pour la projection de l'ICU pour le XXIème. Néanmoins il est important de

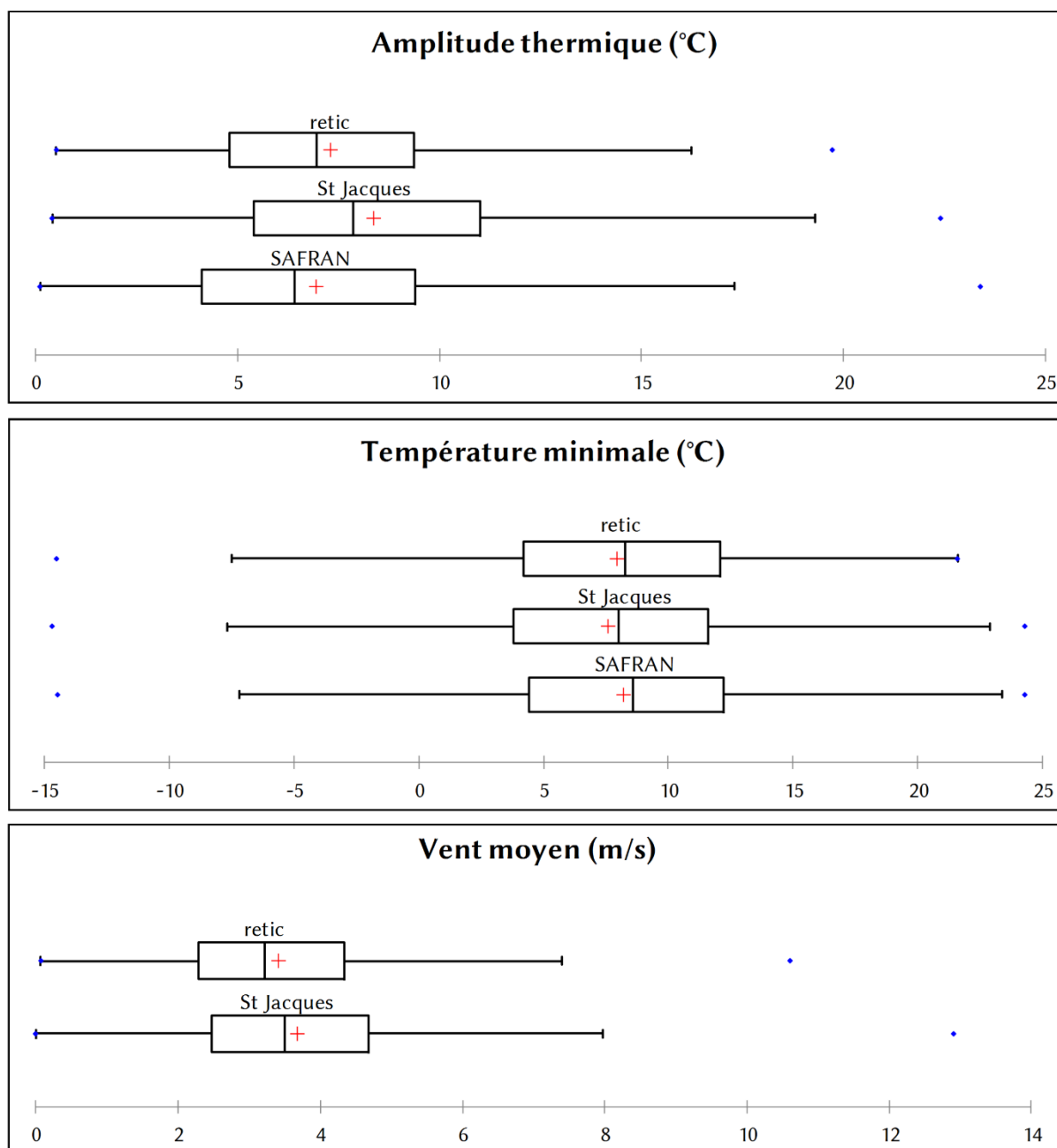


Figure 96, comparaisons des sorties du modèle retic du CERFACS, de la station *St Jacques* et de la maille SAFRAN sur la période 1971-2000. Les boîtes à moustaches suivent les quantiles suivant : $Q1=25\%$, $Q2=50\%$ et $Q3=75\%$. Les points bleus indiquent la valeur minimum et maximum, la croix rouge correspond à la moyenne.

souligner l'incertitude du modèle de régression (*cf.* équation (2)), il n'explique que 62% de la variabilité quotidienne de l'ICU sur les trois années étudiées (2007-2010-2011). Cependant l'ICU moyen annuel est bien modélisé. La capacité des modèles retic et arpege à simuler les trois variables (l'amplitude thermique, température minimale et le vent moyen) ajoute une incertitude supplémentaire.

8.2. Application des modèles de régression de l'ICU à Rennes

Ce sous-chapitre présente les sorties de modèles régionalisés (arpege1 et retic) pour deux horizons : moyen (2041-2070) et lointain (2071-2100). Dans un premier temps, une analyse des variables simulées est réalisée afin d'évaluer l'évolution de chaque paramètre de la régression. Puis dans un second temps, la régression est appliquée sur les mêmes périodes. Au total, deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre du GIEC sont utilisés : le scénario « médian » A1B et le scénario « pessimiste » A2 (voir le tableau 9).

8.2.1. Analyse des facteurs météorologiques

a) Le modèle arpege1

Le modèle arpege1 est forcé selon le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B dont les sorties sont résumés dans le tableau 11 pour trois périodes : actuelle (1981-2010), l'horizon moyen (2040-2069) et l'horizon lointain (2070-2099). La projection des températures moyennes est de +2,4°C à la fin du XXIème siècle et la température minimale augmente de +2,2°C. L'amplitude thermique sur l'ensemble de la période projetée augmente de +0,4°C et le vent moyen reste constant avec -0,1m/s.

Ces éléments indiquent une projection favorable à l'intensité de l'ICU pour deux variables : une diminution du vent moyen et une augmentation de l'amplitude thermique. Seule la température minimale dans l'équation (2) peut limiter l'ICU.

arpege1 [A1B]	1981-2010	<i>différences</i>	2040-2069	<i>différences</i>	2070-2099
Température moyenne (°C)	11,9	+1,8	13,7	+2,4	14,3
Amplitude thermique (°C)	7,4	+0,3	7,6	+0,4	7,7
Température minimale (°C)	8,2	+1,7	9,9	+2,2	10,5
Vent moyen (m/s)	3,4	-0,1	3,3	-0,1	3,3

Tableau 11, moyennes et différences des sorties du modèle arpege1 (scénario A1B) pour les périodes : actuelles, horizon moyen et horizon lointain.

b) Le modèle retic

Le modèle retic partage la même période de référence de 1971 à 2000 pour les scénarios A1B et A2. Le scénario A1B présente une augmentation moyenne de la température de +1,7°C à un horizon moyen (2040-2069) et atteint +2,4°C à long terme (2070-2099), ce qui est proche de la simulation arpege1 avec le même scénario (tableau 12). L'amplitude thermique évolue favorablement à une intensité de l'ICU avec +0,3°C d'augmentation. De même, le vent moyen reste constant à -0,2 m/s, ce qui apparaît comme favorable à l'ICU à terme, une situation globalement comparable donc à celle du modèle arpege1.

retic [A1B]	1971-2000	<i>différences</i>	2040-2069	<i>différences</i>	2070-2099
Température moyenne (°C)	11,6	+1,7	13,3	+2,4	13,9
Amplitude thermique (°C)	7,3	+0,2	7,5	+0,3	7,6
Température minimale (°C)	7,9	+1,7	9,6	+2,3	10,2
Vent moyen (m/s)	3,4	-0,1	3,3	-0,2	3,3

Tableau 12, moyennes et différences des sorties du modèle retic (scénario A1B) pour les périodes : actuelles, horizon moyen et horizon lointain.

Le modèle retic (selon le scénario A2) simule une projection de la température moyenne de +3,1°C pour l'horizon 2070-2099, avec une augmentation de +2,9°C de la température minimale (tableau 13). L'amplitude thermique suit la même augmentation que pour les simulations précédentes, c'est-à-dire une augmentation de +0,4°C au XXIème siècle. De même pour le vent moyen dont la tendance et la diminution de son intensité est semblable aux autres simulations sur l'ensemble de la période projetée.

retic [A2]	1971-2010	<i>différences</i>	2040-2069	<i>différences</i>	2070-2099
Température moyenne (°C)	11,6	+1,7	13,3	+3,1	14,6
Amplitude thermique (°C)	7,3	+0,3	7,6	+0,4	7,7
Température minimale (°C)	7,9	+1,6	9,5	+2,9	10,8
Vent moyen (m/s)	3,4	-0,1	3,3	-0,2	3,2

Tableau 13, moyennes et différences des sorties du modèle retic (scénario A2) pour les périodes : actuelles, horizon moyen et horizon lointain.

Les sorties de ces modèles (arpege1, retic [A1b] et [A2]) indiquent pour l'amplitude thermique et le vent moyen une évolution similaire et elles semblent favorables à une augmentation de l'intensité de l'ICU à moyen et à long terme. En revanche la température minimale est une variable de l'équation (2) dont l'augmentation impliquerait à terme une diminution de l'ICU.

8.2.2. Application du modèle par régression à trois variables

A partir de l'équation (2) de modélisation de l'ICU (ΔT_n), la projection est réalisée pour les trois simulations arpege1, retic [A1B] et [A2]. Le modèle par régression employé correspond à un modèle à trois variables appliquées sur l'ensemble des mois de l'année (modèle annuel). Les résultats de l'application de ce modèle par régression projeté pour trois périodes sont illustrés par la figure 97.

Comme indiqué précédemment (voir le tableau 10), le ΔT_n moyen simulé est de 1,5°C sur la période actuelle (1981-2010) pour le modèle arpege1. Puis pour les périodes suivantes 2040-2069 et 2070-2099, la moyenne de ΔT_n passe de 1,5°C à 1,4°C. Ces résultats montrent qu'il n'y a pas de changements significatifs de l'ICU à partir des variables issues du modèle arpege1, soit une diminution de -0,1°C (-0,07°C plus exactement) de ΔT_n moyen entre 1981-2010 et 2070-2099. Quant à la distribution de ΔT_n , elle conserve la même structure avec un écart-type égale à 0,8 pour la période actuelle contre 0,9 pour la période 2070-2099. L'écart-type augmente précisément de +0,04 entre les deux périodes, ce qui peut être considéré comme négligeable.

L'utilisation de la température minimale par l'équation explique cette constante de l'ICU projeté. En effet, à terme l'augmentation de la température minimale diminue ΔT_n inévitablement selon l'équation (2), la normale climatique évolue de la période actuelle à l'horizon moyen à l'horizon lointain (+2,2°C). Dans le même temps, l'amplitude thermique et le vent sont eux favorables à l'augmentation de l'ICU. Afin d'évaluer, l'augmentation de ΔT_n

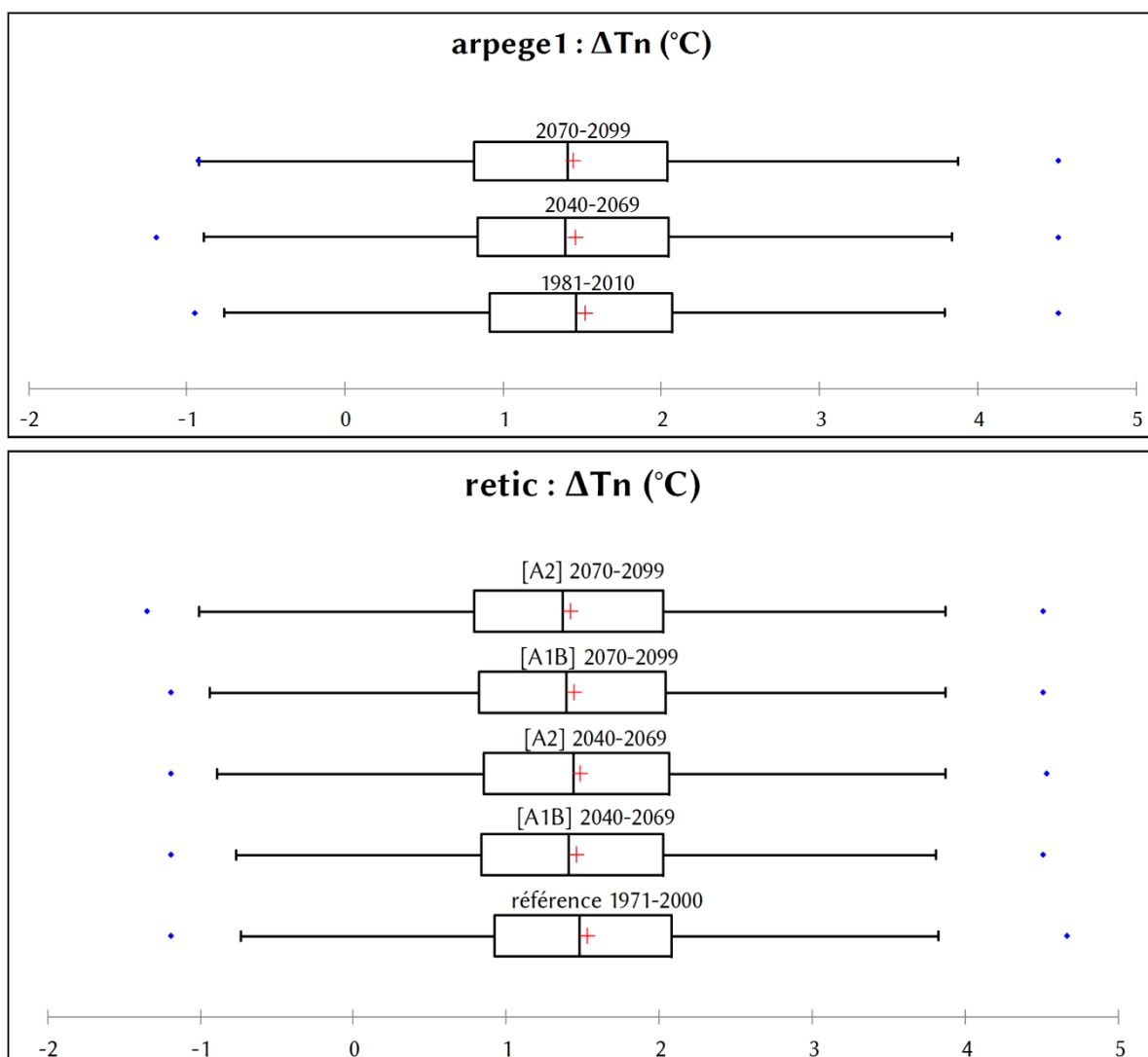


Figure 97, projections de l'ICU (ΔT_n , en °C) à partir des modèles arpege1 (scénario A1B) et retic (scénarios A1B et A2) pour trois périodes : actuelle (1981-2010), l'horizon moyen (2040-2069) et l'horizon lointain (2070-2099). Les boîtes à moustaches suivent les quantiles suivant : $Q1=25\%$, $Q2=50\%$ et $Q3=75\%$. Les points bleus indiquent la valeur minimum et maximum, la croix rouge correspond à la moyenne.

moyen sans la variable température minimale, la projection de l'ICU est réalisée à partir de l'équation (1) (voir la partie 7.3.1 du chapitre 7) utilisant seulement les variables suivantes : l'amplitude thermique et le vent moyen. L'écart constaté de ΔT_n entre 1981-2010 et 2070-2099 montre une augmentation de $+0,1^\circ\text{C}$ (soit $+0,09^\circ\text{C}$ précisément), ce qui révèle un résultat similaire avec le modèle initial.

La projection de l'ICU est également réalisée à partir du modèle retic pour deux scénarios A1B et A2 (voir la figure 97). Comme pour le modèle retic, le ΔT_n moyen augmente faiblement avec $+0,1^\circ\text{C}$ pour les deux scénarios. De même pour la distribution, l'écart-type demeure quasiment inchangé avec $+0,04$ pour retic [A1B] et $+0,05$ pour retic [A2]. Au regard de ces résultats, l'ICU projeté à partir des sorties du modèle retic selon l'équation (2) ne présente pas de variations significatives pour l'horizon moyen et lointain, selon deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre.

8.2.3. Application du modèle mensuel par régression à trois variables

L'analyse de la variabilité de l'ICU en fonction de facteurs météorologiques dans le chapitre 7 (partie 7.5.3) a mené à la construction de modèles de régression pour chaque mois de l'année. La construction de ces modèles mensuels est réalisée à partir de la combinaison d'une ou plusieurs variables parmi les trois facteurs météorologiques retenus : l'amplitude thermique, le vent moyen et la température minimale. Ainsi pour chaque mois de l'année, une régression linéaire multiple est effectuée en retenant les variables les plus pertinentes. Les variables utilisées pour chaque mois de l'année sont récapitulées sur la table de la figure 92 du chapitre 7.

Les régressions sont appliquées pour chaque mois pour les trois modèles arpege1, retic [A1B] et retic [A2]. Les résultats des projections de l'ICU sont renseignés dans le tableau 14. L'évolution de ΔT_n moyen annuel apparaît similaire aux résultats précédents (partie 7.2.2) pour l'ensemble des modèles. Pour les modèles arpege1 et les modèles retic, le ΔT_n diminue de $-0,1^\circ\text{C}$ entre les périodes actuelles (1971-2000 pour les modèles retic et 1981-2010 pour arpege1) et l'horizon lointain (2070-2099).

L'analyse de ΔT_n moyen mensuel montre une disparité entre les saisons. Pour l'ensemble des modèles l'ICU apparaît plus faible l'hiver et augmente dès le mois de février (sur leur période de référence). Le ΔT_n est plus élevé pour les mois correspondants au printemps (mars, avril et mai) et à l'automne (septembre, octobre et novembre). Ces projections correspondent à la variabilité saisonnière de l'ICU observé (sur les années 2007, 2008 et 2011), cependant le ΔT_n du mois de juillet apparaît curieusement sous-estimé pour l'ensemble des trois modèles.

Pour le modèle arpege1, la projection de l'ICU pour l'horizon moyen et lointain révèle de faibles évolutions de l'ICU pour l'ensemble des mois, comme l'indique l'anomalie annuelle de $-0,1^\circ\text{C}$. Cependant une tendance peut être dégagée : une diminution de ΔT_n en hiver de $-0,2^\circ\text{C}$ pour les deux horizons. Les modèles retic [A1B] et [A2] projettent l'ICU de manière similaire sur l'ensemble des saisons. Les anomalies constatées pour différentes saisons sont similaires pour les deux modèles A1B et A2 avec une diminution de ΔT_n de $-0,2^\circ\text{C}$ en hiver, une anomalie positive pour les mois de mars, septembre et octobre (environ $+0,1^\circ\text{C}$). Ces variations de ΔT_n pour les horizons moyen et lointain demeurent faibles voire absentes pour l'ensemble des modèles utilisés, ce qui permet de conclure sur une stabilité de l'ICU projeté.

Ces résultats concordent avec d'autres travaux menés à Hambourg, Paris, Bruxelles, ou (Hoffmann 2012; Hamdi et al. 2015). L'intensité de l'ICU moyen resterait constant au cours du XXIème siècle, selon les sorties des modèles du changement climatiques. Cependant cette étude ne prend pas en compte l'évolution future de la ville, elle ne porte que sur l'évolution des facteurs météorologiques influents sur l'ICU. L'ICU projeté correspond à l'agglomération rennaise actuelle (2010-2013). Au regard de ces résultats actuels, l'ICU futur dépend uniquement des choix des futurs aménagements.

référence arpege1	1981-2010	janv 81-10	fev 81-10	mars 81-10	avril 81-10	mai 81-10	juin 81-10	juil 81-10	aout 81-10	sept 81-10	oct 81-10	nov 81-10	dec 81-10	an 81-10
	ΔTn moyen	1,3°C	1,5°C	1,7°C	1,8°C	1,6°C	1,5°C	1,4°C	1,6°C	1,7°C	1,5°C	1,4°C	1,3°C	1,5°C
arpege1 [A1B]	2040-2069	janv 40-69	fev 40-69	mars 40-69	avril 40-69	mai 40-69	juin 40-69	juil 40-69	aout 40-69	sept 40-69	oct 40-69	nov 40-69	dec 40-69	an 40-69
	ΔTn moyen	1,1°C	1,4°C	1,5°C	1,7°C	1,7°C	1,5°C	1,3°C	1,6°C	1,8°C	1,5°C	1,2°C	1,2°C	1,5°C
	<i>anomalies</i>	-0,3	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,1	0,0	-0,2	-0,1	-0,1
	2070-2099	janv 70-99	fev 70-99	mars 70-99	avril 70-99	mai 70-99	juin 70-99	juil 70-99	aout 70-99	sept 70-99	oct 70-99	nov 70-99	dec 70-99	an 70-99
	ΔTn moyen	1,2°C	1,4°C	1,7°C	1,9°C	1,6°C	1,4°C	1,4°C	1,5°C	1,6°C	1,5°C	1,2°C	1,0°C	1,4°C
	<i>anomalies</i>	-0,2	-0,1	0,1	0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0	-0,3	-0,3	-0,1

référence retic	1971-2000	janv 71-00	fev 71-00	mars 71-00	avril 71-00	mai 71-00	juin 71-00	juil 71-00	aout 71-00	sept 71-00	oct 81-00	nov 81-00	dec 71-00	an 71-00
	ΔTn moyen	1,3°C	1,6°C	1,7°C	1,8°C	1,7°C	1,5°C	1,3°C	1,6°C	1,6°C	1,4°C	1,5°C	1,3°C	1,5°C
retic [A1B]	2040-2069	janv 40-69	fev 40-69	mars 40-69	avril 40-69	mai 40-69	juin 40-69	juil 40-69	aout 40-69	sept 40-69	oct 40-69	nov 40-69	dec 40-69	an 40-69
	ΔTn moyen	1,2°C	1,5°C	1,8°C	1,7°C	1,6°C	1,4°C	1,3°C	1,4°C	1,7°C	1,5°C	1,2°C	1,1°C	1,5°C
	<i>anomalies</i>	-0,2	-0,1	0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,1	0,1	-0,3	-0,2	-0,1
retic [A2]	2040-2069	janv 40-69	fev 40-69	mars 40-69	avril 40-69	mai 40-69	juin 40-69	juil 40-69	aout 40-69	sept 40-69	oct 40-69	nov 40-69	dec 40-69	an 40-69
	ΔTn moyen	1,1°C	1,4°C	1,6°C	1,8°C	1,6°C	1,4°C	1,4°C	1,5°C	1,8°C	1,5°C	1,3°C	1,2°C	1,5°C
	<i>anomalies</i>	-0,2	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,1	0,2	-0,1	-0,1	-0,1
retic [A1B]	2070-2099	janv 70-99	fev 70-99	mars 70-99	avril 70-99	mai 70-99	juin 70-99	juil 70-99	aout 70-99	sept 70-99	oct 70-99	nov 70-99	dec 70-99	an 70-99
	ΔTn moyen	1,2°C	1,4°C	1,8°C	1,7°C	1,6°C	1,4°C	1,3°C	1,4°C	1,7°C	1,6°C	1,2°C	1,1°C	1,4°C
	<i>anomalies</i>	-0,2	-0,2	0,1	-0,2	-0,1	0,0	-0,1	-0,2	0,0	0,2	-0,2	-0,2	-0,1
retic [A2]	2070-2099	janv 70-99	fev 70-99	mars 70-99	avril 70-99	mai 70-99	juin 70-99	juil 70-99	aout 70-99	sept 70-99	oct 70-99	nov 70-99	dec 70-99	an 70-99
	ΔTn moyen	1,1°C	1,4°C	1,8°C	1,7°C	1,6°C	1,4°C	1,2°C	1,4°C	1,8°C	1,5°C	1,2°C	1,0°C	1,4°C
	<i>anomalies</i>	-0,2	-0,1	0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	0,1	0,1	-0,3	-0,3	-0,1

Tableau 14, projections de l'ICU (ΔT_n) moyen mensuel à partir des modèles de régression mensuels appliqués aux sorties des modèles arpege1 (scénario A1B) et retic (scénarios A1B et A2) pour trois périodes : actuelle (1971-2000 et 1981-2010), l'horizon moyen (2040-2069) et l'horizon lointain (2070-2099). Les anomalies d'ICU moyen sont calculées à partir des périodes de références.

Conclusion du chapitre 8

L'analyse des sorties de modèles montre que les modèles régionalisés selon la méthode par régimes de temps sont plus appropriés pour la projection de l'ICU (ΔT_n). L'ICU moyen projeté sur les périodes d'observation est de 1,8°C, contre 1,5°C par les modèles retic et arpege1. Les projections sont réalisées à partir du modèle arpege1 selon le scénario A1B et les modèles retic pour les scénarios A1B et A2. L'ensemble des projections n'indiquent pas de variations de l'ICU moyen annuel sur l'ensemble de la période 1950-2100. Dans un second temps, les projections sont réalisées par les modèles de régression par mois. L'ICU moyen mensuel ne présente pas de tendance significative pour l'ensemble des projections selon les scénarios A1B et A2.

Ces résultats sont évidemment à considérer avec prudence compte tenu du nombre important d'incertitudes. Ces projections de l'ICU montrent l'absence de variabilité temporelle de l'ICU à partir des modèles régionalisés du changement climatique. L'évolution de l'ICU est à attribuer en premier lieu à l'urbanisation à l'échelle locale, ce qui permet de considérer l'aménagement futur comme le principal facteur de l'ICU futur.

Chapitre 9 : Les outils d'adaptation du territoire rennais à l'îlot de chaleur urbain

Ce chapitre aborde dans un premier temps les moyens mis en œuvre et à mettre en œuvre afin d'atténuer l'ICU. L'adaptation des études climatiques urbaines aux règles de l'aménagement est une étape complexe. Néanmoins plusieurs villes dans le monde intègrent déjà en partie l'évaluation du climat dans leurs documents d'urbanismes. Plusieurs études sur l'évaluation de moyens visant à réduire l'ICU sont recensées. L'intégration de ces moyens dans les documents d'urbanisme français est discutée. Puis à partir des résultats du chapitre 6, des indices sont construits afin de limiter l'intensité de l'ICU. Les indicateurs de formes de la végétation développés dans le chapitre 4.1 sont mis en relation avec l'ICU, puis les résultats sont interprétés. Les travaux de spatialisation de l'ICU à l'échelle intra-urbaine (*cf.* chapitre 6) sont appliqués à un projet de ZAC à partir des plans masses. Cette démarche est prospective car l'objectif est d'évaluer l'ICU engendré par le futur projet.

Dans un second temps, ce chapitre met en perspective les effets potentiels du changement climatique sur l'agglomération rennaise. Les vagues de chaleur, les besoins potentiels en chauffage et en climatisation futurs sont projetés à partir des modèles régionalisés du changement climatique (*cf.* chapitre 2.2). Ces éléments ont un impact en ville d'autant plus important que l'ICU associé est intense. Plusieurs de ces impacts sur la gestion du territoire sont présentés et discutés.

9.1. Les indices d'occupation du sol et leurs applications potentielles sur le territoire de Rennes Métropole

9.1.1. *Exemples et propositions vers l'aménagement d'une ville climatiquement intégrée*

a) Quelques exemples de villes précurseurs et éléments d'adaptation

Une connaissance exhaustive du contexte topographique de la ville et la planification urbaine raisonnée au regard du confort climatique sont les deux principes de la ville utopique de Landsberg H. nommée *Metutopia* ; cette ville possède de nombreuses vertus, dont la capacité de réduire le phénomène d'ICU par la présence de parcs composés d'arbres mûres, l'absence de parkings en extérieur et de vastes dégagements entre les bâtiments pour permettre la circulation

de brises rafraîchissantes (Landsberg 1981). Cette description d'une ville utopique pose les questions relatives à la réalisation d'une ville climatiquement agréable et compatible avec l'environnement existant. Plus concrètement, des travaux ont été menés à Stuttgart (Allemagne) afin de définir un *Klimaatlas* (1987) ; ces travaux sont précurseurs d'études climatiques urbaines appropriées et appliquées par la municipalité. Cet inventaire climatique est construit à la suite de nombreux travaux portant sur l'analyse du contexte topographique, l'établissement des températures de surfaces, la connaissance de la circulation des brises, l'exposition aux vents, *etc.* A partir de ces informations, différentes cartes et recommandations sont réalisées dans le cadre du projet *Stuttgart 21* : l'ouverture ou le maintien de plusieurs axes dégagés afin de permettre la mise en circulation des brises rafraîchissantes, la définition des espaces où les besoins en surfaces végétalisées sont prioritaires... (*cf.* Stuttgart 21) (Baumüller et al. 2008; Baumüller et al. 2009). Ces informations sont également diffusées sous la forme d'un service de cartographie via internet (stadtklima-stuttgart.de). Ce format de diffusion est également retenu pour les travaux réalisés à Berlin (Allemagne), par le programme *Berlin Digital Atlas* (Vogt 2002).

Parmi les recommandations, une méthode repose sur la définition de *climatope*. Il s'agit de définir la caractérisation des types de quartiers (morphologie) et la capacité des quartiers à permettre la circulation des brises (ventilation) (Scherer et al. 1999). Ainsi, un *climatope* forme des ensembles de quartiers climatiquement homogènes au regard de ces deux critères. Le concept de *climatope* est employé pour la réalisation de cartes à destination des aménageurs, avec notamment des applications aux villes de Lisbonne (Portugal), Bilbao (Espagne) et à Pékin (Chine) (Alcoforado et al. 2009; Acero et al. 2013; He et al. 2015).

Plus récemment, l'IAU (Institut d'Aménagement d'Urbanisme, Île-de-France) a mis à disposition, via internet, une cartographie des quartiers selon la classification *LCZ* des îlots à l'échelle de la région Île-de-France (Cordeau 2014). Cette classification permet de hiérarchiser les quartiers selon leur typologie et par extension, l'ICU potentiel.

Des recommandations ont été proposées pour l'aménagement de deux quartiers dans les villes hollandaises de Ondiep et Traansvaal (Kleerekoper et al. 2012). Parmi ces préconisations, une distance minimale de 200 m est observée entre la trame verte et les bâtiments. L'emprise de ces parcs est d'au moins 0,15 ha. Cette recommandation est issue de l'observation d'une diminution de la température entre -1,0°C et -4,7°C sur une distance comprise entre 100 m et 1000 m (Schmidt 2006). Les bâtiments dont la distance au parc est supérieure à 200 m, les toitures et les façades sont végétalisées. L'effet de ces façades végétalisées permettrait de diminuer la température au sol de -0,2°C à -1,2°C et elles engendreraient une économie de 4 à 40% pour les besoins en climatisation du bâtiment (Kikegawa et al. 2006). Les arbres à feuilles caduques sont préférés car ils permettent d'ombrager le sol lors de journées chaudes et diminuer la température localement. A l'inverse, l'hiver ceux-ci laisse passer le rayonnement direct permettant l'échauffement des façades des bâtiments. Ces résultats proviennent de travaux menés par McPherson E.G., dont les conclusions s'adressent directement aux aménageurs à l'échelle de l'îlot (c'est-à-dire microlocale). Ainsi, il suggère un alignement des arbres sur les parkings selon un axe nord-sud, afin d'optimiser la durée des ombres portées et réduire l'ICU (McPherson 1994).

La présence d'eau peut également diminuer la température de 1°C à 3°C sur une distance de 30 à 35 m en journée. Des capteurs de température ont été installés à proximité de la rivière dans différents quartiers de Sheffield (Royaume-Uni). Il apparaît un rafraîchissement à proximité de la rivière d'environ 1°C lors de journées où la température est supérieure à 20°C (Hathway and Sharples 2012).

b) Les outils du SCOT et du PLUI

Dans le cadre de cette thèse, les analyses spatiales menées sur l'ICU et l'occupation du sol ont permis de définir leur relation et la mise en place d'une méthode de spatialisation de l'ICU. Les résultats peuvent constituer des éléments de discussion pour des outils d'aménagement. Ces outils doivent pouvoir être intégrables et être applicables au sein des documents d'urbanisme. Le SCOT (schéma de cohérence territoriale), et PLU (plan local d'urbanisme) et plus récemment le PLUI (plan local d'urbanisme intercommunal) sont des documents d'urbanisme identifiés comme des leviers d'action potentiels pour intégrer les enseignements des études climatiques et appliquer des recommandations adaptées.

Le SCOT est composé notamment d'un rapport de présentation dans lequel un état des lieux du territoire est dressé, ce qui pourrait être le lieu pour inventorier les éléments influents sur le climat et leur organisation générale, tels que la cartographie des *climatopes* (Scherer et al. 1999; Colombert 2008). Dans le DOO (document d'orientation et d'objectifs) pourraient figurer les structures à préserver ou à modifier, ce qui permettrait le maintien d'îlot de fraîcheur identifié par des cartes ou croquis.

Le PLUI est un document d'urbanisme dont Rennes Métropole est éligible en tant qu'EPCI (établissement public de coopération intercommunale), il s'agit d'un PLU étendu sur l'ensemble de son territoire ce qui inclue plusieurs communes. Le PLUI est composé également d'un rapport de présentation dont les choix doivent être justifiés par un diagnostic territorial. Ce document pourrait également définir les îlots de chaleurs et de fraîcheur identifiés par des cartes à l'échelle intra-urbaine. L'OAP (orientation d'aménagement et de programmation) permet la définition des formes urbaines notamment la densité, la hauteur... A travers cet outil, il peut être envisagé de fixer des indices sur les bâtiments à l'échelle d'un quartier permettant de limiter la mise en place de l'ICU. A l'image du coefficient de biotope employé dans plusieurs villes d'Europe dont Berlin, cet indicateur détermine des coefficients selon des normes écologies par type de surfaces. Ce coefficient est inscrit dans le règlement (outil du PLUI). Les dispositions du règlement seraient le moyen de d'imposer des seuils de végétation minimale à pondérer selon le contexte du quartier et de la morphologie urbaine envisagée.

A l'échelle de la ZAC, les actions pour prendre en compte le confort climatique sont les plus fortes (Colombert 2008). Cependant, il s'agit de moyens bioclimatiques à mettre en œuvre étant donnée l'échelle d'intervention en question (microlocale). Elles concernent des éléments tels que le choix de l'orientation des bâtiments (l'exposition solaire et la circulation de brise), la végétalisation des façades, l'organisation spatiale des arbres et bosquets, la végétalisation des parkings (surfaces perméables et arbres)...

Les observations réalisées à l'échelle des quartiers (voir le chapitre 6.2) ont permis de mettre en évidence la variabilité de l'ICU à l'échelle microlocale. Dans le quartier de la ZAC de Longs Champs, le capteur placé dans la cour de la résidence fortement imperméabilisée mesure un écart de 1,0°C avec la station à proximité *Les Gallets*. Cet écart montre l'imbrication des échelles : la station *Gallets* est représentative du quartier, c'est à dire de l'échelle locale et le capteur (installé dans la cour de la résidence) indique la température à une échelle microlocale. A l'échelle de la ZAC les moyens mis en œuvres ont en premier lieu une action à l'échelle microlocale. Puis dans un second temps, ces moyens ont une influence éventuelle sur les quartiers environnants.

9.1.2. Fractions d'occupation du sol et Sky View Factor : les enseignements

Pour cette partie, l'objectif est de constituer des indices d'occupation du sol visant à maintenir l'ICU malgré la construction de nouveaux bâtiments. Ces seuils d'occupations du sol sont issus des observations préalables.

Les observations réalisées à l'échelle intra-urbaine pendant l'été 2013 (*cf.* chapitre 6.2) ont permis d'évaluer les relations entre l'occupation du sol et l'ICU. Le SVF, la hauteur moyenne des bâtiments, la fraction bâtie dans un rayon de 200 m et la fraction de végétation dans un rayon de 400 m sont corrélés significativement avec l'ICU. Ces éléments décrivent en partie l'environnement proche des différents sites de mesures et la relation entre l'ICU et ces indicateurs. Ils rendent possible la définition d'un site selon un seuil d'ICU. La définition d'un seuil maximum d'ICU pertinent est complexe, car elle dépend des objectifs fixés en termes de confort. Afin d'illustrer la méthode une préconisation est simulée pour le seuil de $\Delta T_n \leq 3,0^\circ\text{C}$ pour les 12 jours d'ICU observé durant l'été 2013. L'ICU maximum observé est enregistré par la station *Les Champs Libres* avec $\Delta T_n = 4,0^\circ\text{C}$.

A partir des variables suivantes : le SVF moyen dans un rayon de 200 m, la fraction bâtie dans un rayon de 200 m et la fraction de végétation dans un rayon de 400 m, trois valeurs seuils sont déterminées. Le seuil du SVF est défini à partir du quartier où l'ICU atteint $\Delta T_n = 3^\circ\text{C}$ pour la valeur du SVF la plus faible. Ainsi ce seuil est fixé par le site *Hôtel de RM* avec un SVF=0,8 pour $\Delta T_n = 3^\circ\text{C}$ (figure 98). De la même manière, pour $\Delta T_n = 3^\circ\text{C}$ la fraction bâtie la plus importante est observée par les sites *Kennedy* et *Bvd. Roosevelt*, ce qui fixe le seuil à 25%. Enfin, le seuil de 30% de fraction de végétation est fixé par le site *Hotel RM* pour $\Delta T_n = 3^\circ\text{C}$. La préconisation, pour limiter l'ICU à $\Delta T_n = 3^\circ\text{C}$, pourrait être formulée :

- le SVF moyen ne doit pas être inférieur à 0,8 dans un rayon de 200 m ;
- la fraction bâtie ne doit pas dépasser le seuil de 25% dans un rayon de 200 m ;
- la fraction de végétation doit être maintenue à au moins à 30% dans un rayon de 400m.

Les seuils définis forment un ensemble permettant de fixer des objectifs pour l'élaboration d'un quartier. Le SVF permet d'intégrer la hauteur des bâtiments mais également leur espacement. La combinaison de ces deux paramètres permet pour un SVF similaire d'obtenir des formes de bâtiments variées. Par exemple le site de *Beauregard* et le site du *Cimetière Nord* ont un SVF de 0,8, cependant le premier est composé de bâtiments récents (R+5) avec des cours végétalisées et ouvertes et le second de maisons de villes (R+1) dont les maisons sont mitoyennes accolées le long de la chaussée avec des jardins individuels en arrière-cours. La préconisation simulée indique de ne pas dépasser 25% de la fraction bâtie dans un rayon de 200 m et dans le même temps de maintenir au moins 30% de la fraction de végétation dans un rayon de 400 m (soit 15ha).

Ces recommandations sont issues de mesures qui demeurent valables sur l'échantillon de quartiers pris en compte et sous la réserve des incertitudes de mesures (effets microlocaux et précision des capteurs). Plus un grand nombre de quartiers avec des morphologies différentes est mesuré, plus l'évaluation est exhaustive et le choix du seuil est renforcé. Ces seuls indicateurs ne permettent pas de constituer un moyen d'atténuer le phénomène d'ICU. Ceux-ci doivent être complémentaires à une analyse du contexte du quartier (par exemple la topographie) et être intégrés à un dispositif de recommandation multiscalaire (de l'agglomération aux bâtiments) adapté à celles des documents d'urbanisme.

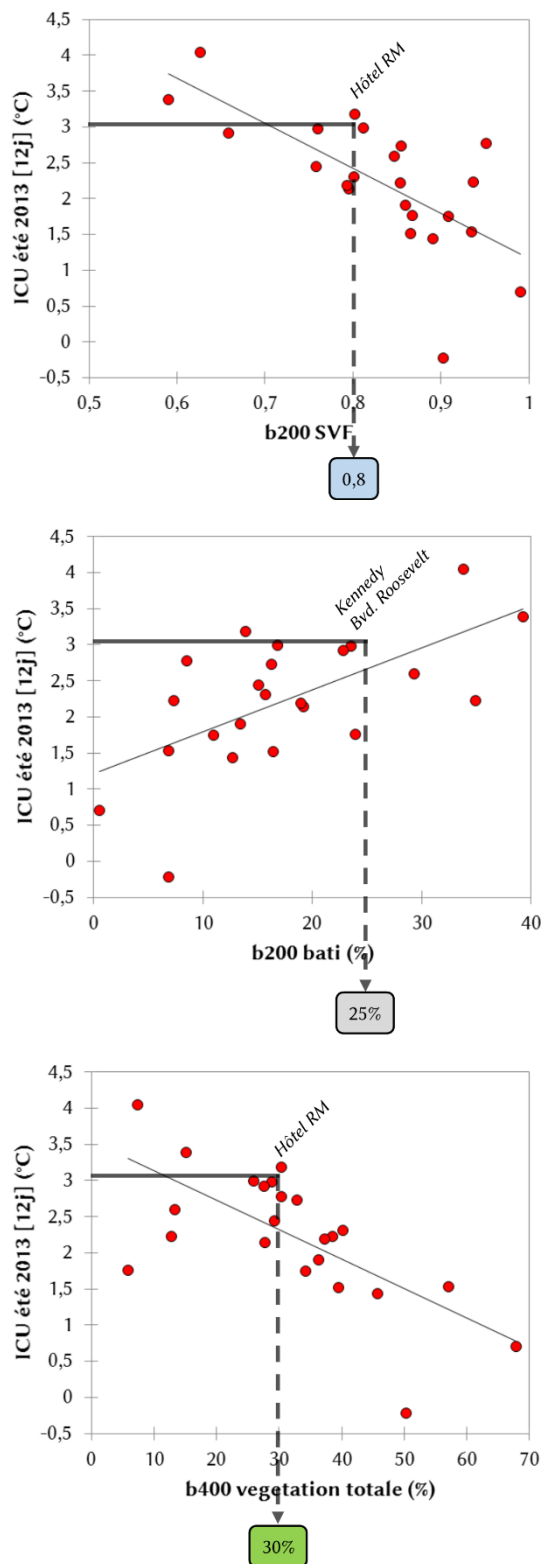


Figure 98, ICU (moyen de 12 jours) par quartier en fonction de trois indices : B200 SVF, B200 bâti et B400 végétation totale. L'ICU est issu de la campagne de mesures intra-urbaine de l'été 2013. Les seuils des trois indices sont définies par l'ICU ($\Delta T_n=3^\circ\text{C}$).

9.1.3. Les descripteurs de la structure de la végétation

Le SVF décrit la forme des bâtiments, cependant la végétation n'est pas incluse dans le calcul. D'autres indicateurs de formes et de géométries des paysages existent, notamment pour la description de la végétation. Ces indices sont essentiellement employés en écologie pour identifier les habitats et les flux des espèces et peuvent servir pour l'évaluation des trames vertes et bleues (Crocchi 2007). Dans le cas présent, les indices utilisés sont : Total Edge (TE), Mean Patch Edge (MPE), Mean Patch Size (MPS) et Area Weighted Shape Index (AWMSI) ; dont les calculs sont détaillés dans le chapitre 4.1.2.c.

Ces indices sont calculés à partir de la végétation totale dans des zones tampons de 900 m environnantes les stations météorologiques. À partir de ces indices, une matrice de corrélation est réalisée avec l'ICU intense observé lors de 8 journées en mai 2011. Le choix de la moyenne de 8 journées permet de lisser les éventuels déplacements de l'ICU lié aux brises. L'ICU moyen sur l'ensemble de l'année 2011 n'a pas été retenu, car les stades phénologiques de la végétation en hiver ou en automne n'aurait pas permis d'en évaluer les effets (par exemple les arbres à feuilles caducs). L'influence de la végétation sur l'ICU est liée aux propriétés d'évapotranspiration de celle-ci, donc les espèces et les stades phénologiques ont une importance (Cameron et al. 2014; Doick et al. 2014). Dans le cas présent, l'analyse de la végétation porte uniquement sur sa géométrie en considérant l'hypothèse où les communautés végétales sont identiques et homogènes sur l'ensemble du territoire. Deux échelles emboîtées sont mises en œuvre : à l'échelle de l'agglomération l'ensemble des 22 stations météorologiques sont utilisées et à l'échelle intra-urbaine avec 13 stations météorologiques.

L'ICU est pour les deux échelles étudiées, le plus corrélé avec la fraction de végétation, ce qui indique qu'il s'agit du meilleur descripteur parmi les indices employés (voir le tableau 15). À l'échelle de l'agglomération, les indices AWMSI et MPS sont les plus corrélés avec l'ICU (après la fraction de végétation). L'indice AWMSI indique que plus l'ICU observé est faible plus la végétation observée autour de la station a une forme allongée et étirée. L'indice MPE montre que la forme de la végétation est d'autant plus complexe, c'est-à-dire ayant un périmètre important, que l'ICU observé est faible. Enfin, le MPS informe que plus la taille moyenne des éléments composant la végétation est importante, plus l'ICU observé par les stations est faible, ce qui est cohérent avec la présence de parcs de grandes tailles pour les sites les plus frais. Cependant cet indice apparaît moins corrélé que le AWMSI et le MPE indiquant la complexité de la forme des unités paysagères associée à la végétation.

À l'échelle intra-urbaine, l'indice TE est corrélé avec l'ICU, ce qui peut être expliqué par la fragmentation de la végétation plus importante dans l'espace intra-urbain. Les espaces où l'ICU est le plus faible, la présence de la végétation est plus importante (en surface et en nombre) ce qui augmente la somme des périmètres associées à la végétation. Cet indicateur ne renseigne pas directement sur la configuration de la végétation observée selon le gradient de température liée à l'ICU. Cependant l'indice AWMSI indique que les formes étirées et peu agglomérées sont également observées autour des stations avec un ICU faible. L'indice MPS montre une augmentation de la surface moyenne des parcs et non une augmentation du nombre d'espaces verts pour les quartiers les plus frais. Ces deux indices AWMSI et MPS mettent en évidence que la présence de parcs dont les formes sont étirées et non circonscrites dans un cercle semble favorable pour réduire l'ICU. De plus, l'ICU diminue alors que les espaces verts augmentent en surface (sans pour autant être plus nombreux), avec une superficie en moyenne supérieure à 400 m² pour un ICU inférieur à $\Delta T_n \leq 3^\circ\text{C}$ (l'ICU observé dans le centre-ville est de $\Delta T_n = 5^\circ\text{C}$, lors de 8 jours d'ICU intense en mai 2011, cf. chapitre 6.4.1.a.

Variables	ΔT_n ICU 8j (agglomération)	ΔT_n ICU 8j (intra-urbaine)
B900 végétation totale	-0,91	-0,77
Area Weighted Mean Shape Index	-0,79	-0,66
Mean Patch Edge	-0,79	-0,56
Mean Patch Size	-0,58	-0,60
Total Edge	0,14	-0,68

Tableau 15, corrélations entre l'ICU moyen sur 8 journées et des indices morphométriques de la végétation environnantes (900 m), pour l'ensemble des stations météorologiques (agglomération) et pour les seules stations intra-urbaines.

A partir de ces premiers résultats, une ébauche de configurations morphométriques des espaces verts optimisés pour atténuer l'ICU peut être envisagée :

- Les parcs et espaces verts dont la forme est allongée et insérée dans le tissu bâti sont à favoriser. Cette forme s'oppose aux parcs isolés et avec une forme compacte. Par ailleurs, ce constat concorde avec les préconisations d'organisation de la trame verte en ville (cf. SCOT 2013).
- La surface des espaces verts est à favoriser, il semblerait que le seuil de l'unité de surfaces moyen est de 400 m².
- La somme des espaces verts ne permettrait pas de diminuer l'ICU pour une surface totale équivalente. Ce troisième point peut accorder les deux points précédents : l'organisation de larges structures de végétation liées entre-elles et de formes complexes en pénétrant le tissu bâti.

Ces premiers éléments de préconisations sont à approfondir et l'interprétation des indices ne permet pas de conclure définitivement sur l'organisation optimale de la végétation en ville.

9.1.4. Applications du modèle de spatialisation à la ZAC Baud-Chardonnet

La ZAC Baud-Chardonnet occupe 35 ha à l'est du centre-ville, le long de la Vilaine (figure 99). Elle est actuellement une friche industrielle partagée entre des jardins au nord-ouest et des entrepôts et des parkings de la compagnie de bus à l'est. La ZAC est délimitée au sud par la gare de triage. Le projet s'inscrit dans la volonté de la commune de réinvestir les « dents creuses » de la ville et dans le même temps d'avoir l'ambition de densification du bâti. La collectivité annonce un objectif de construction de 2580 logements, de 90 000 m² de surfaces dédiées aux activités tertiaires et de 8500 m² de commerces... Dans le même temps, le projet annonce la présence d'un grand parc urbain, d'une « rambla » et d'une roselière. Le projet évoluant au cours des années, les éléments utilisés sont issus du cahier de prescription daté de juin 2010. Les objectifs de densification sont réalisés par la mise en place de bâtiments élevés dont les tours les plus hautes atteignent 50 m (R+17). L'essentiel des bâtiments sont structurés en barres dont la hauteur moyenne est 22 m (R+8). Ces hauteurs sont importantes au regard de la ZAC Beauregard dont la hauteur moyenne actuellement est d'environ 15 m (R+5).

Les bâtiments élevés et l'échelle de la ZAC sont intéressants car ils caractérisent l'élaboration d'un projet dont l'objectif est de répondre aux besoins en construction tout en limitant l'étalement urbain, ce qui est une des problématiques d'aménagement actuelles. L'application du modèle de spatialisation à cette échelle (35ha) permet d'évaluer l'évolution de l'ICU potentiel pour une ZAC de taille moyenne. La figure 99 montre le changement d'occupation du sol et les choix opérés par le projet. La fraction de surfaces bâties augmente de 10%, avec une forte diminution du SVF de 0,84 à 0,77 (voir en figure 100). L'indice SVF est lié à

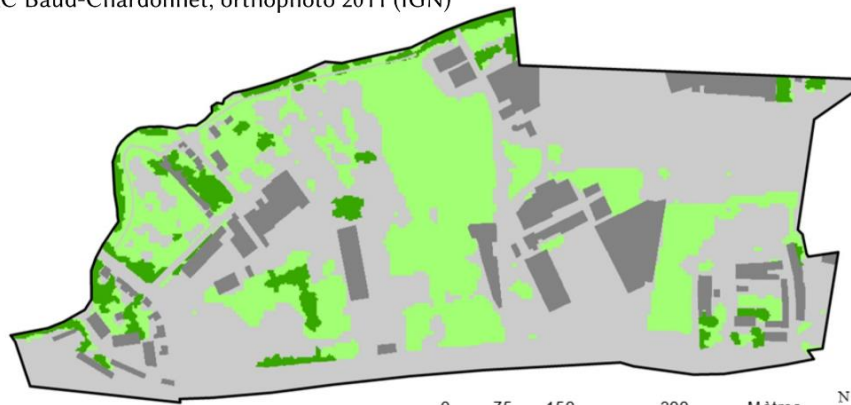
la hauteur des bâtiments envisagés et principalement à leur espacement, ce qui engendre des canyons urbains. Le remplacement des grands parkings par la construction de bâtiments et de parcs (notamment une « rambla » au nord), la fraction de surfaces imperméables diminue de 15% tandis que la fraction de végétation (totale) augmente de 3%.

La modélisation est réalisée à partir du site *Baud-Chardonnet* et des mesures issues de la campagne de mesures de l'été 2013 (voir le chapitre 6.3.1). L'ICU moyen observé sur 12 journées est de +2,8°C sur ce site et l'ICU modélisé est de +2,6°C. Le modèle utilisé explique 89% de la variabilité avec une RMSE de 0,2°C. L'occupation du sol du projet est intégrée au modèle de spatialisation et appliqué. L'ICU modélisé pour le point de mesure est de +3,1°C, une fois le projet abouti, soit une augmentation de l'intensité de l'ICU de +0,5°C avec l'ICU modélisé avant le projet. L'ICU modélisé correspond à la température à l'échelle du quartier et ne tient pas compte des effets microlocaux. Cependant, il permet de montrer l'effet d'une ZAC de 35 ha ayant pour ambition d'accueillir 5200 personnes au sein de 2600 logements. La densité envisagée dans ce projet montre que l'effet de canyon urbain avant le projet est proche du quartier pavillonnaire *Cesson-Parc* puis il est proche à celui observé dans des quartiers composés de barres d'immeubles et de tours tels que *Hotel de RM* et *Place Europe*.

Ce projet seul n'augmente pas beaucoup l'ICU à l'échelle du quartier, cependant l'ensemble des réalisations sur le territoire constitue une empreinte plus importante de l'ICU. L'objectif virtuel d'un ICU maximum +3°C fixé précédemment (partie 9.1.2) est déjà atteint selon le modèle. Cependant, seul ce projet est pris en compte, les autres projets en périphérie ne sont pas intégrés. La notion d'échelle est également à considérer car à l'échelle microlocale des disparités sont à envisager entre le parc et le cœur des îlots. La modèle de spatialisation employée n'appréhende pas ces phénomènes microlocaux.



ZAC Baud-Chardonnet, orthophoto 2011 (IGN)



ZAC Baud-Chardonnet actuel (2013)

ZAC Baud-Chardonnet projet



Occupation du sol	Actuel	Projet	Evolution
Bâtiments	9%	18%	+10%
Surfaces imperméables	43%	28%	-15%
Végétation totale	24%	27%	+3%
Végétation haute	4%	8%	+4%
Végétation basse	20%	19%	-1%

Occupation du sol

-  Bâtiments
-  Végétation basse
-  Végétation haute
-  Surfaces imperméables

Figure 99, la ZAC Baud-Chardonnet actuelle (2011 et 2013), le projet envisagé et l'évolution de la fraction d'occupation du sol.

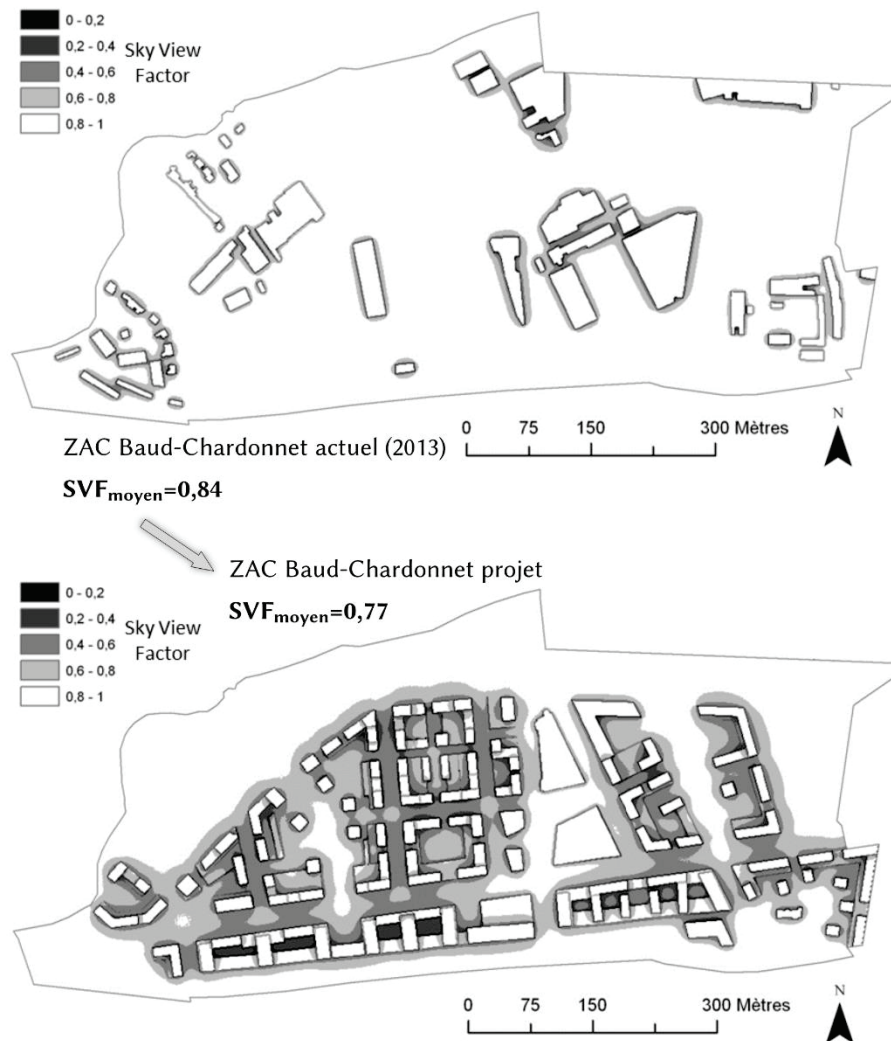


Figure 100, évolution du sky view factor (SVF) entre la ZAC Baud-Chardonnet actuel (2013) et le projet.

9.2. L'exposition de la ville au changement climatique

La présence de l'ICU accroît l'exposition des habitants aux vagues de chaleurs. La canicule de 2003 est un épisode marquant des conséquences des vagues de chaleurs intenses sur la population. En Europe, la surmortalité est estimée entre 35 000 et 55 000 décès (Endlicher et al. 2008) et en France la surmortalité a atteint +60% avec 15 000 décès attribué à la canicule (Institut de Veille Sanitaire 2003). Ces conséquences sanitaires graves constituent un exemple marquant dans la mémoire collective, cependant d'autres canicules ont déjà par le passé engendré une surmortalité. L'année 1976 est célèbre pour sa sécheresse durable et intense, et la vague de chaleur de juin à juillet 1976 a engendré une surmortalité de +30%. En 1983, une forte canicule sévit dans le sud-est de la France, ce qui entraîne 300 décès dans les Bouches-du-Rhône (Besancenot 2002; Hémon et al. 2003; Bessemoulin et al. 2004). Plusieurs études épidémiologiques sur ces vagues de chaleur ont montré le rôle aggravant de l'ICU sur la mortalité, par des températures minimales plus élevées en ville (Stéphan et al. 2005; Rousseau 2005; Gabriel and Endlicher 2011). Dans le contexte du changement climatique, une augmentation des vagues de chaleurs est observées, ce qui associée à l'ICU accroît la vulnérabilité des habitants en ville (Revi et al. 2014).

Dans un premier temps, l'analyse est réalisée sur les vagues de chaleurs observées et les vagues de chaleurs issues des modèles du changement climatique. L'objectif est de comparer, selon deux scénarios SRES du GIEC (A1B et A2), l'exposition du territoire rennais aux canicules. Puis une première approche est menée sur un des aspects liés à la problématique de l'ICU, les besoins en climatisation des bâtiments. Ces besoins peuvent être abordés à partir des observations de l'ICU à Rennes, puis être associés aux populations sensibles aux vagues de chaleur. Ces éléments permettent de constituer, une analyse préliminaire des impacts liés à l'ICU à Rennes.

9.2.1. Les vagues de chaleur à Rennes

- a) L'occurrence des « journées d'été » et des « journées très chaudes »

L'analyse des vagues de chaleurs est décomposée par le dénombrement du nombre de « journées d'été », jour où $T_x \geq 25^\circ\text{C}$ et le nombre de « journées très chaudes », jour où $T_x \geq 30^\circ\text{C}$. Ces indices permettent d'évaluer indirectement l'occurrence des vagues de chaleurs et ils ont l'avantage d'être simples et intuitifs pour la caractérisation du changement climatique. Bien d'autres indices existent et sont développés afin d'approcher au plus près de la température ressentie. Ces indices intègrent différents facteurs météorologiques pour mesurer le confort climatique, tel que l'UTCI (Universal Thermal Climate Index) (Endlicher et al. 2008; Jendritzky et al. 2012). La difficulté d'évaluer la température ressentie est due à sa grande variabilité selon la personne : lieu de vie, âge, état de santé...

Les modèles régionalisés du changement climatique employés ont déjà été utilisés précédemment pour la projection de l'ICU (voir le chapitre 8.1). Ces modèles permettent par apprentissage des caractéristiques climatiques locales d'améliorer la résolution des modèles climatiques globaux, tel que ARPEGE (résolution de 50 km). En sortie, la grille des données régionalisées est définie à une résolution de 8 km. Au total trois modèles sont comparés :

- Le modèle ALADIN utilise la méthode de descente d'échelle dynamique (produit par le laboratoire CNRM/GAME).
- Les modèles RETIC (proposé par le CNRM) et ARPEGE V4 (noté arpege1 et développé par le CERFACS) utilisent tous les deux la méthode de désagrégation statistique par types de circulations.

La comparaison des modèles est réalisée sur la période de contrôle de 1961 à 1990 avec la grille de référence SAFRAN. Cette grille correspond à la source de données des modèles, sa comparaison permet d'évaluer la part d'erreur inhérente aux modèles et la part liée à l'analyse SAFRAN. Ces modèles sont confrontés avec les données observées à Rennes de la station Météo-France (St Jacques).

Le nombre moyen de journées d'été observés à Rennes (par la station St Jacques) entre les périodes 1961-1990 est de 29,5 contre 38,8 journées pour la période contemporaine 1981-2010 (voir la figure 101). Le nombre de ces journées double si l'on compare les décennies des années 60 et celles des années 2000 avec respectivement 21,3 et 40,8 jours par an. Pour la période 1961-1990, les trois modèles et l'analyse SAFRAN sous-estiment le nombre de journées d'été et la variabilité interannuelle est également sous-estimée. Le modèle Aladin reproduit le mieux cette variabilité avec un écart-type de 14,1 contre 14,6 pour la station *St Jacques*. La moyenne du nombre de journées d'été est sous-estimée (24,8 jours) par le modèle Aladin mais cela est proche avec la moyenne issue de l'analyse SAFRAN (21,3 jours), ce qui indique que le biais apparaît dès l'étape d'analyse par SAFRAN.

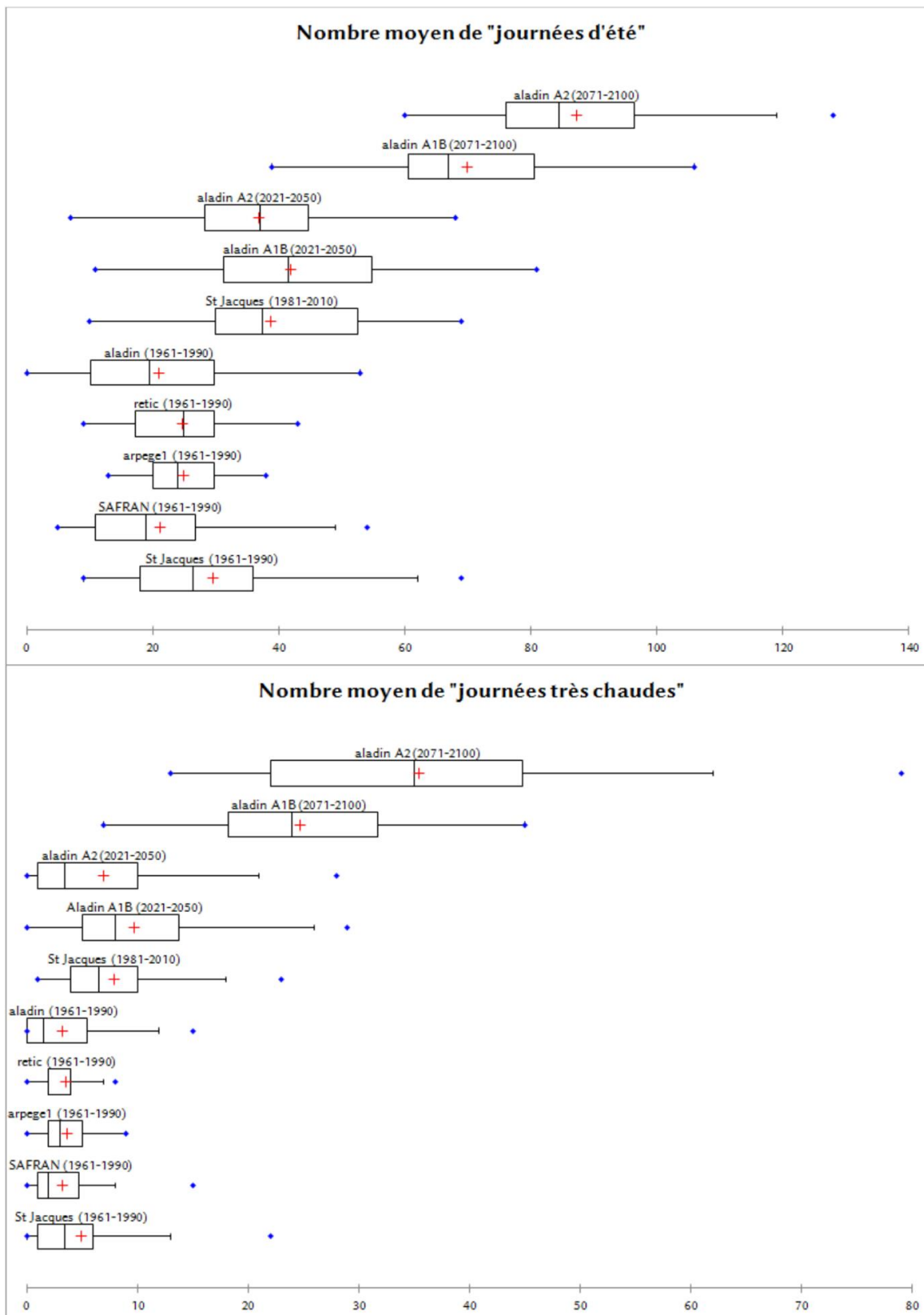


Figure 101, nombre de journées d'été ($T_x \geq 25^\circ\text{C}$) et de journées très chaudes ($T_x \geq 30^\circ\text{C}$) moyen annuel observés à la station St Jacques (Météo-France), observés par l'analyse SAFRAN et projetés par les modèles suivant : arpege1, retic et Aladin. Les périodes comparées sont : la période de contrôle (1961-1990), la période actuelle (1981-2010), l'horizon proche (2021-2050) et l'horizon lointain (2071-2100). Les boîtes à moustaches suivent les quantiles suivant : $Q1=25\%$, $Q2=50\%$ et $Q3=75\%$. Les points bleus indiquent la valeur minimum et maximum, la croix rouge correspond à la moyenne.

Le modèle Aladin est retenu pour la projection malgré la sous-estimation du nombre moyen de journées d'été. La comparaison pour la période actuelle observée à St Jacques (1981-2010) et les projections Aladin pour la période 2021-2050 montrent des écarts peu importants, avec 38,8 jours pour l'observation, 41,8 jours pour le scénario A1B et 36,9 jours pour le scénario A2. Ce résultat peut paraître contradictoire, mais il correspond aux champs des possibles comprenant l'aspect stochastiques du climat (la variabilité naturelle). Pour l'horizon lointain (2071-2100), les projections présentent une forte augmentation du nombre moyen de journées d'été avec 69,9 jours pour le scénario A1B (+67%) et 87,4 jours pour le scénario A2 (+137%). Quant à la variabilité interannuelle, elle apparaît quasiment constante sur l'ensemble de la période projetée avec un écart-type moyen de 15.

Le seuil de $T_x \geq 30^\circ\text{C}$ désigne des journées peu fréquentes à Rennes au regard des situations observées sur l'ensemble de l'année, avec en moyenne 7,9 jours (soit 2%) observés à St Jacques. Depuis la période 1961-1990, la moyenne a augmenté de +2,9 journées, ce qui est sous-estimée par les modèles et l'analyse SAFRAN. L'écart-type est mieux simulé par le modèle Aladin avec 4,0 contre 5,5 observé. Ici encore, le biais semble apparaître dès l'analyse réalisée par SAFRAN.

Les projections adoptées sont issues du modèle Aladin, car la variabilité de ces journées particulières est la mieux conservée sur la période de contrôle. Pour le scénario A1B, le nombre de journées très chaudes (9,7 jours) est supérieur à celui constaté pour le scénario A2 (7,0 jours) pour l'horizon proche. Puis pour l'horizon lointain, le modèle projette selon le scénario A2 une augmentation très importante de ces journées avec 35,4 jours (soit plus du triple des journées observées actuellement), ce qui engendre une fréquence annuelle d'environ 10% des situations. Concernant le scénario A1B, le modèle projette un doublement du nombre de journées entre l'horizon proche et lointain avec 24,7 jours. Pour les deux scénarios, le modèle simule une augmentation de la variabilité interannuelle de ces journées très chaudes avec des écarts-types de 7,0 à 9,5 entre les deux horizons pour le scénario A1B et des écarts-types de 7,6 à 15,3 entre ces deux périodes (contre 5,9 pour l'observation actuelle 1981-2010).

Ces indices illustrent l'augmentation des températures simulées. A titre de comparaison, l'année 2003 comptabilise 69 journées d'été et 23 journées très chaudes. Selon le modèle Aladin cette situation n'est constatée qu'une seule fois à l'horizon proche (2021-2050) et elle est observée un été sur quatre à l'horizon 2071-2100 selon le scénario A1B. Dans le cas du scénario A2, ce nombre de jour n'est pas observé sur la première période, par contre pour l'horizon 2071-2100 les trois-quarts des années possèdent au moins le même nombre de journées d'été et de journées très chaudes que l'année 2003.

Depuis la canicule de 2003, des mesures d'alertes existent tel que le Plan Canicule. Il est composé de plusieurs niveaux d'alerte dont la gestion et le déclenchement dépendent de la Préfecture (Laaidi et al. 2012). Le seuil d'alerte thermique dépend de l'indicateur bio-météorologique combiné suivant pour l'Ille-et-Vilaine, la moyenne glissante pour trois jours mesurée ou prévu à St Jacques (par Météo-France) : $T_n \geq 19^\circ\text{C}$ et $T_x \geq 34^\circ\text{C}$.

Ce seuil biométéorologique est appliqué aux sorties du modèle Aladin. Pour le scénario A1B, le seuil d'alerte est franchi en moyenne pour 2,0 jours/an pour la période 2021-2050 et 5,7 jours/an pour la période 2071-2100. Selon le scénario A2, il est atteint en moyenne pour 1,0 jour/an sur la première période et 10,9 jours/an pour la seconde. Ces résultats illustrent l'augmentation des vagues de chaleur simulée et les moyens futurs à mettre en œuvre pour ces scénarios. A l'heure actuelle, le seuil bio-météorologique est franchi en moyenne 0,2 jour/an (1981-2010), soit une journée en 1983 et 1990, puis pour 5 journées en août 2003.

Le seuil est indicatif car il intervient dans un processus d'alerte faisant appel à d'autres indicateurs telle que la surmortalité constatée et d'autres facteurs bio-météorologiques aggravant

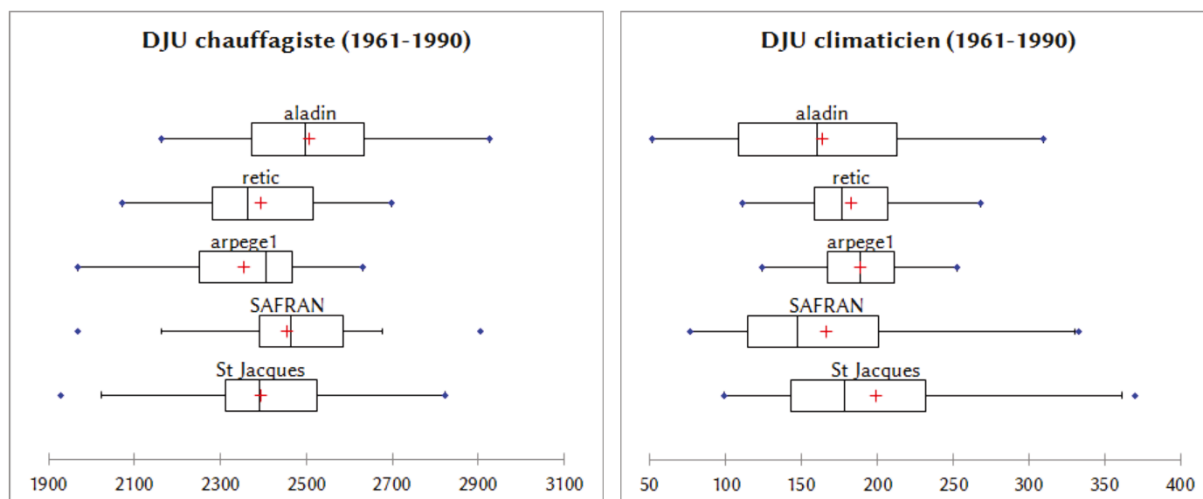


Figure 102, Degrés-Jours Unifiés chauffagiste et climaticien de 1961-1990, calculés pour la station St Jacques (Météo-France), l'analyse SAFRAN et les modèles régionalisés Aladin, retic et arpege1. Les boîtes à moustaches suivent les quantiles suivant : $Q1=25\%$, $Q2=50\%$ et $Q3=75\%$. Les points bleus indiquent la valeur minimum et maximum, la croix rouge correspond à la moyenne.

(humidité, pollution...). Le seuil de $T_n \geq 19^\circ\text{C}$ observé à la station St Jacques est un indicateur fixé à l'échelle du département, cependant la variabilité spatiale de l'ICU pourrait amener à reconsidérer l'échelle de celui-ci.

b) Les besoins énergétiques potentiels

L'augmentation des températures amène à considérer une diminution des besoins en chauffage dans un premier temps et des besoins en climatisation dans un second temps. L'indice Degré Jour Unifié (DJU) permet d'évaluer ces besoins par les professionnels de l'énergie à partir des températures minimales et maximales observées. Le calcul repose sur l'écart de la température moyenne journalière observée avec le seuil de 18°C (la méthodologie est détaillée par Météo-France (cf. la climathèque)).

Le calcul est appliqué pour la période d'observation 1961-1990 à St Jacques, à l'analyse SAFRAN et aux modèles arpege1, retic et Aladin (voir la figure 102). L'analyse SAFRAN et les modèles Aladin et arpege1 surestiment les besoins en chauffage, seul le modèle retic est similaire à la moyenne observée à St-Jacques de 2392 DJU. Cependant l'écart-type est mal évalué par le modèle retic avec 180 contre 190 pour l'observation. Ce biais ne semble pas être lié à SAFRAN car l'écart-type est similaire à l'observation avec 191. Concernant les DJU climaticien, le modèle retic sous-estime les besoins avec 164 DJU contre 199 DJU observé à St Jacques. Le modèle arpege1 évalue mieux la moyenne avec 188 DJU mais l'écart-type est largement sous-estimé avec 30 contre 72 observé. Le modèle retic est retenu car il simule le mieux les DJU chauffagiste et il présente l'avantage de permettre la projection selon deux scénarios A1B et A2.

Les résultats des projections des DJU sont présentés en figure 103. La projection est identique pour la période de contrôle (1950-2000) des scénarios A1B et A2. La comparaison entre l'observation à St Jacques et le modèle retic pour la période actuelle (1981-2010) montre la sous-estimation des besoins en climatisation et la surestimation des besoins en chauffage. La part de besoin en chauffage est de 89% contre 11% de besoin en climatisation à St Jacques (1981-2010), tandis que le modèle retic simule la répartition 92%/8%.

Les projections selon les deux scénarios révèlent une diminution des besoins sur l'ensemble de la période 1950-2100. Pour le scénario A1B, la diminution des besoins totaux s'élève à -452 DJU de 1981-2010 à 2071-2100, avec -13% des besoins en chauffage et dans le même temps une augmentation de +18% des besoins en climatisation. Le scénario A2, pour les mêmes périodes, simule une augmentation des besoins en climatisation plus importante avec +21% contre -18% de besoin en chauffage, ce qui totalise une diminution de -587 DJU. Par conséquent, la part de besoin en chauffage/climatisation devient à l'horizon 2021-2050 89%/11%, puis 84%/16% pour l'horizon 2071-2100.

Ces résultats indiquent une diminution des besoins d'énergie sur l'ensemble de la période simulée et pour les deux scénarios, cependant les besoins en climatisation augmentent significativement (environ +20%). Ces projections présentent indirectement les besoins énergétiques auxquels pourraient être soumis les bâtiments, cependant ils n'intègrent pas le phénomène d'ICU. L'ICU peut potentiellement augmenter les besoins en climatisation en ville, car sur la même période l'urbanisation est susceptible d'amplifier sensiblement ce phénomène. Une problématique apparaît par ces résultats, les besoins énergétiques tendent vers des besoins en climatisation (rafraîchissement) ; cependant les bâtiments actuels pourront-ils y répondre tout en satisfaisant l'objectif de la diminution des consommations d'énergie ? La réduction de l'ICU peut répondre en partie à la problématique des vagues de chaleurs en ville et des consommations d'énergie associées.

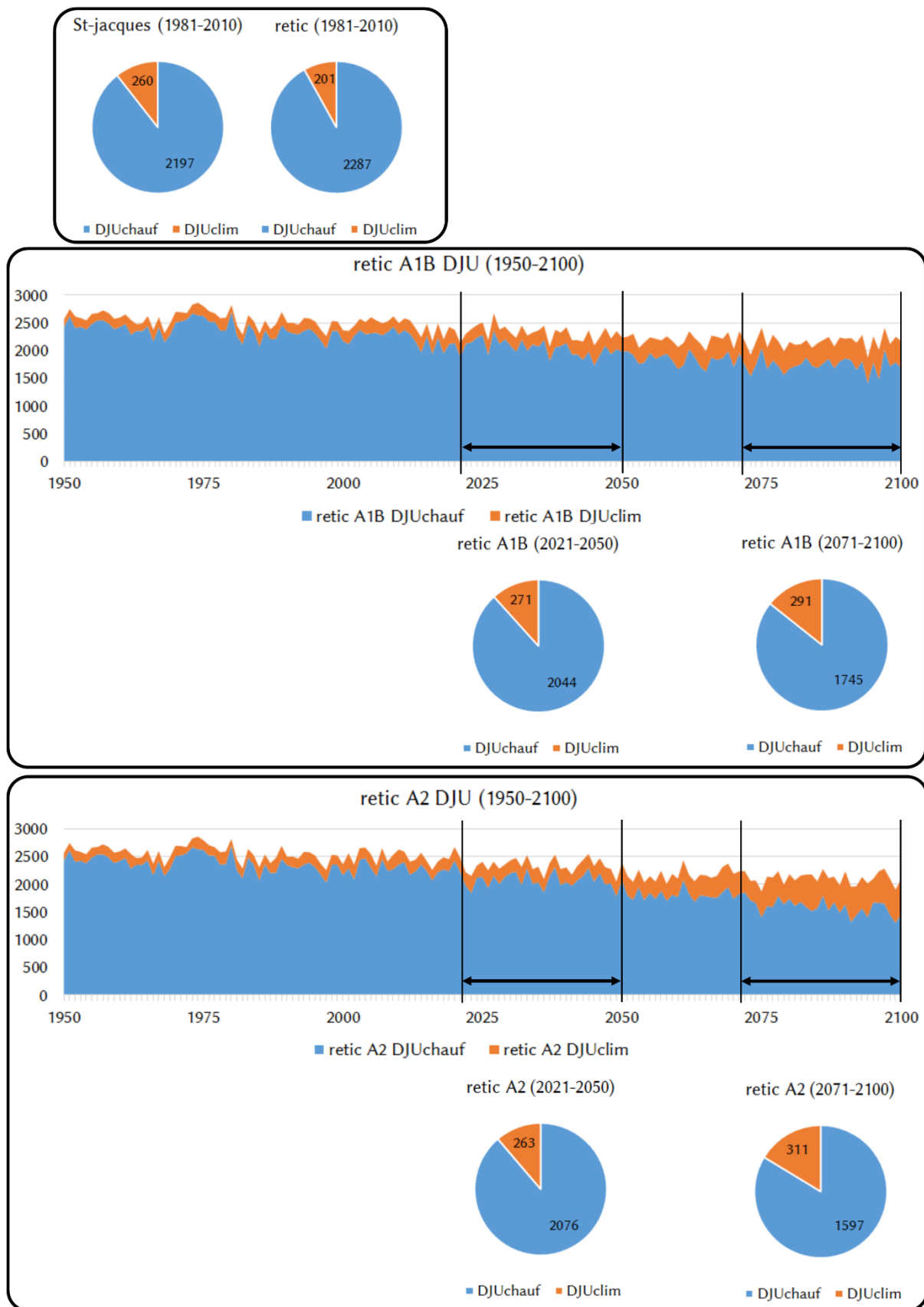


Figure 103, DJU (chauffagiste et climaticien) à St Jacques et projections des DJU à partir du modèle retic de 1950 à 2100 pour les scénarios A1B et A2.

9.2.2. Les quartiers faces à l'îlot de chaleur

- a) L'exposition des quartiers aux températures minimales élevées : quels impacts sur la biodiversité en ville et sa gestion ?

La présence de l'ICU modifie localement le climat, des disparités spatiales s'observent notamment par des écarts de températures minimales. Les observations réalisées à partir du réseau de stations météorologiques permettent d'évaluer ces nuances (voir le chapitre 5). Les journées sont réparties selon 7 intervalles de températures minimales à partir des observations réalisées par les 22 stations météorologiques en 2011 (voir la figure 104). Ces intervalles mettent en évidence l'exposition à l'ICU des quartiers à l'échelle de l'agglomération pour une année.

Le classement des journées suit un gradient du centre-ville vers la périphérie. Pour l'année 2011, le nombre de jour de gel ($T_n < 0^\circ\text{C}$) est très faible dans le centre-ville avec seulement 3 journées pour les stations *Griffon* et *Les Champs Libres* contre une dizaine de jours dans les quartiers suburbains (tels que *Cleunay*, *Cimetière de l'Est*, *Villejean*, *Thabor*, *Square Villeneuve*, *Gallets*, *Binquenaïs*, *Poterie*, *Beaulieu* et *Bréquigny*) et environ 20 jours pour les autres stations situées à la campagne dans l'espace périurbain. Ces écarts peuvent présenter un avantage pour des besoins en chauffage en ville. Cependant la part du chauffage urbain fait partie des facteurs énergétiques intervenant dans la mise en place de l'ICU, même s'il n'est pas le principal (Stewart and Oke 2012). L'économie de chauffage apparente est donc à pondérer. L'absence ou le faible nombre de jours de gel affecte la phénologie des espèces en ville, ce qui peut constituer un avantage ou un inconvénient selon le cas étudié. Par exemple, la maladie de l'encre (*Phytophthora cinnamomi*) est un parasite qui s'attaque à plusieurs espèces d'arbres dont plus récemment le chêne pédonculé. Ce champignon, originaire des milieux tropicaux, est sensible au gel, ce qui explique sa présence et sa progression en France dans les régions les moins exposées au gel (Bergot et al. 2011). Les espaces urbains peuvent constituer des réservoirs écologiques potentiels pour les parasites sensibles au gel et dans le cas de ce champignon engendrer des dégâts sur des espaces verts en ville.

En 2011, le nombre de jours avec une température minimale supérieure à 15°C est de 40 jours en moyenne pour les stations en ville contre 25 jours pour les stations en périphérie. Ainsi, suite à une journée très chaude ($T_x=34,3^\circ\text{C}$), le 27 juin 2011 la température n'est pas descendue en-dessous de 20°C pour trois stations dans le centre-ville (*Griffon*, *Les Champs Libres* et *le Cimetière de l'Est*). Ces températures nocturnes élevées, associées aux vagues de chaleurs, peuvent engendrer un inconfort en ville voir engendrer une surmortalité pour les épisodes caniculaires extrêmes.

- b) L'exposition de personnes sensibles à l'ICU à Rennes

La canicule de 2003 est par son ampleur un exemple récent et bien documenté pour évaluer le risque lié aux vagues de chaleur. A Rennes, la surmortalité constatée entre le 1^{er} et le 20 août 2003 est évaluée entre +20% et +36% (selon l'étude) par rapport à la mortalité constatée en Bretagne (Institut de Veille Sanitaire 2003). Les causes sont multiples, mais l'analyse de la température moyenne observée sur cette période montre une accalmie observée à Rennes le 6 et 8 août avec des températures plus clémentes ($T_m = 22,5^\circ\text{C}$). Ce répit laisse supposer qu'il a contribué à limiter la surmortalité, d'autant que les régions concernées observe deux phases de surmortalité (Hémon et al. 2003).

L'analyse de la surmortalité révèle que sur territoire français, l'ensemble des tranches d'âges est touché à partir de 15 ans avec une surreprésentation des plus de 75 ans (particulièrement les femmes de plus de 75 ans). Les lieux de décès recensés sont dans l'ordre

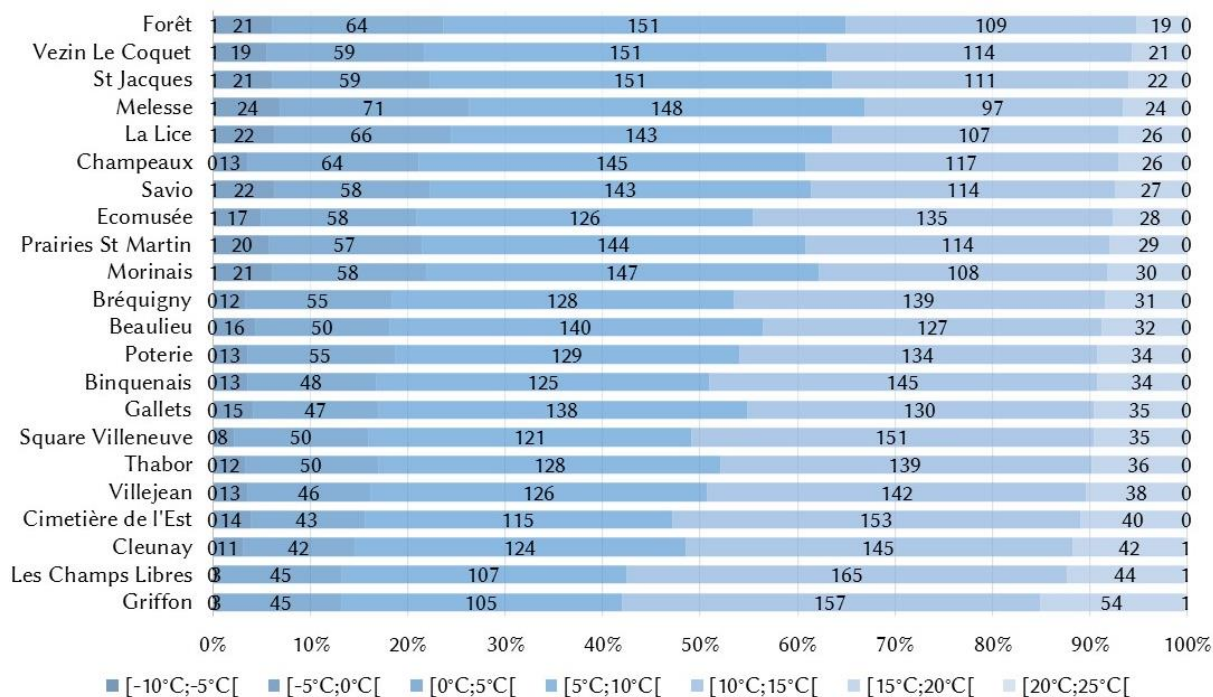


Figure 104, répartition des journées de 2011 observées à l'échelle de l'agglomération rennaise selon 7 intervalles de températures minimales.

d'importance : les maisons de retraite, le domicile, les hôpitaux et les cliniques (Hémon et al. 2003).

Ces éléments mettent en évidence que parmi les personnes les plus vulnérables aux épisodes de canicules, les personnes de plus de 75 ans sont les plus représentées. La construction d'une première carte peut mettre en évidence l'aspect spatial du risque lié aux canicules figure 105. Cette carte superpose l'ICU moyen observé en 2011 (cf. chapitre 5) et la répartition de la population des personnes de plus de 75 ans à Rennes Métropole (carroyage de 200m).

A partir de cette carte, il apparaît que sur les 45 991 personnes de plus de 75 ans vivant à Rennes Métropole, 2283 habitent dans la zone où l'ICU est supérieur à +4°C et 20 372 personnes vivent dans la zone où l'ICU est compris entre +2°C et +4°C. Cette carte peut constituer une ébauche pour l'évaluation de la vulnérabilité des quartiers. Cependant au regard de l'ICU, la variabilité microlocale et la capacité thermique des bâtiments peuvent pondérer ou aggraver ses effets. Il convient évidemment de prendre également en considération la composante sociale de l'exposition face au risque caniculaire.

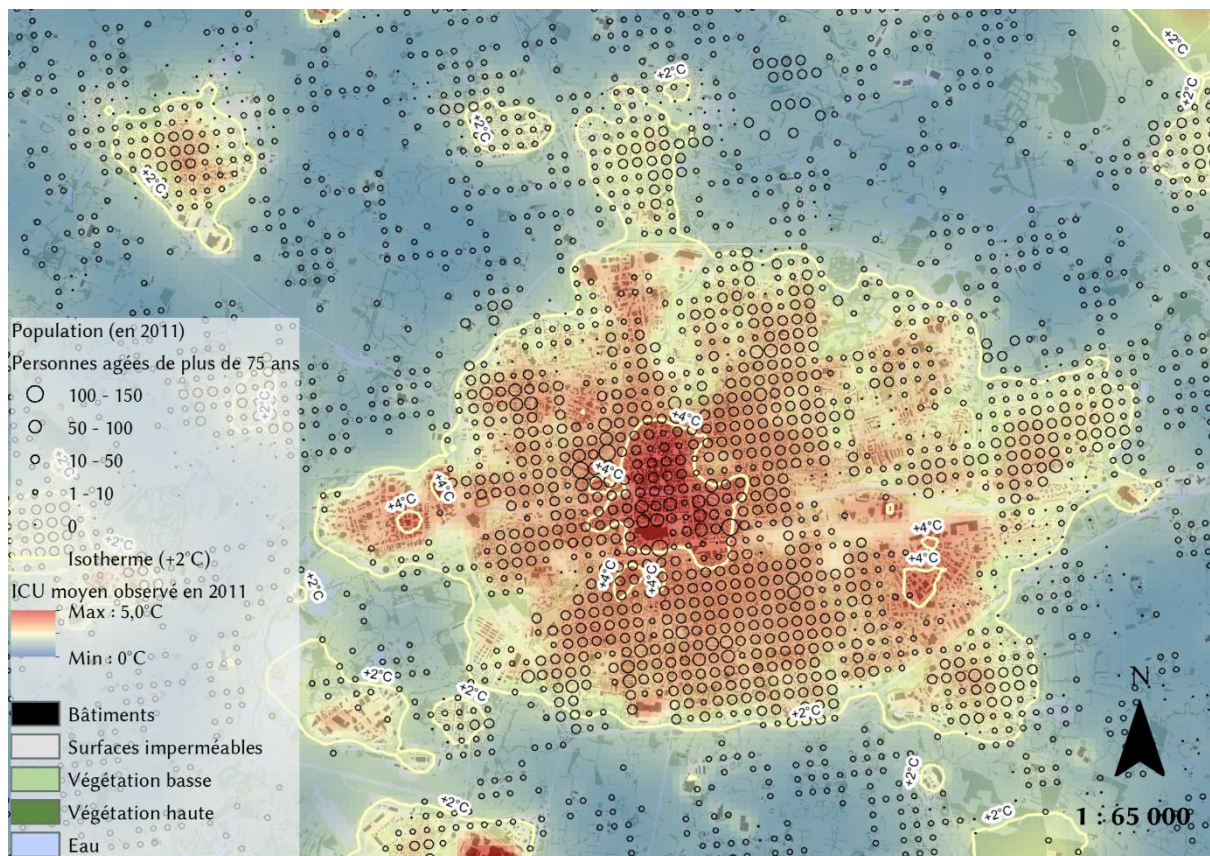


Figure 105, population de plus de 75 ans et îlot de chaleur urbain moyen en 2011 à Rennes Métropole. Source : données IRIS de l'INSEE, 2011.

Conclusion du chapitre 9

L'analyse bibliographique de la littérature scientifique et des exemples d'aménagement intégrant l'ICU permettent de mettre en évidence des moyens d'atténuation de l'ICU adossés aux documents d'urbanismes. Des propositions de préconisations sont élaborées dans ce chapitre à partir des analyses et des modélisations précédentes. Une réflexion est menée pour définir l'échelle de l'outil et l'échelle d'intervention des documents d'urbanisme. Un des outils est construit selon des seuils d'occupation du sol afin de limiter l'ICU. A partir des indices morphométriques paysagers observés, l'organisation spatiale des parcs favorables à réduire l'ICU est proposée. Ces préconisations constituent une étape préliminaire, elles permettent d'établir une première méthodologie adaptée au territoire de Rennes Métropole.

L'exposition du territoire au changement climatique est établie à partir des modèles régionalisées pour deux scénarios A1B et A2. Les modèles simulent une augmentation des vagues de chaleur, notamment par l'augmentation de l'occurrence des « journées d'été » et des « journées très chaudes ». Selon ces classes de journées, l'été 2003 est simulé pour un été sur quatre à trois étés sur quatre pour l'horizon lointain (2071-2100) selon le scénario. Ces canicules mettent en évidence la question de la gestion sanitaire. Le Plan Canicule est actuellement déclenché en Ille-et-Vilaine en moyenne pour 0,6 jours par an. Les projections indiquent à long terme (2071-2100), le déclenchement théorique du Plan Canicule en moyenne entre 5,7 jours par an et 10,9 jours par an selon le scénario. A titre de comparaison, ce Plan Canicule serait déclenché actuellement en moyenne 10,8 jours/an à Toulouse (selon la station météorologique Toulouse-Blagnac pour la période 1981-2010). Dans le même temps, les besoins en chauffage et en climatisation projetés par les modèles révèlent conjointement une diminution des besoins totaux. Cependant, les besoins en climatisation simulés augmentent de +13% et +21% entre les périodes 1981-2010 et 2071-2100 selon le scénario. Ces tendances révèlent les besoins futurs en climatisation des bâtiments d'aujourd'hui. Or, dans un contexte de diminution des consommations d'énergie fixée par les collectivités, l'usage de la climatisation est à limiter. L'apport de la végétation et des formes urbaines adaptées pourrait concilier la limitation des besoins en climatisation et la consommation d'énergie associée.

L'exposition de la ville aux vagues de chaleurs associées à la présence d'un ICU intense pose plusieurs questions pour la gestion du territoire. La modification locale du climat (par le faible nombre jour de gel par exemple) peut engendrer une modification profonde de la gestion des espaces verts et de la biodiversité en ville. Les cartes produites proposent une évaluation de l'exposition des quartiers pour la gestion des risques climatiques en ville lié à l'ICU. Cette évaluation est illustrée par une carte des personnes potentiellement sensibles aux vagues de chaleur et l'intensité de l'ICU à Rennes. Les cartes de l'ICU constituent une première étape vers la gestion du risque associé aux phénomènes d'ICU.

Conclusion générale

Les travaux menés au cours de cette thèse ont pour objectifs d'analyser et de modéliser la variabilité spatio-temporelle de l'ICU sur le territoire de Rennes Métropole dans le contexte du changement climatique. A partir de ces résultats des outils d'aide à la décision sont développés afin de limiter les impacts du changement climatique au regard de l'ICU dans l'agglomération rennaise. Pour y répondre, cette thèse s'articule sur trois axes. Le premier concerne la variabilité spatiale de l'ICU, l'analyse porte sur la température observée entre les différents quartiers en fonction de l'occupation du sol. Le deuxième axe porte sur la variabilité temporelle de l'ICU, une relation entre les types de temps constatés et l'intensité de l'ICU est établi. Enfin, le troisième axe s'intéresse aux développements d'outils pour l'aménagement du territoire à partir des résultats des deux parties précédentes.

Tout d'abord, le contexte de l'agglomération rennaise est présenté. L'agglomération est située dans une cuvette aux reliefs très modérés, ce qui correspond à un contexte topographique peu influent sur l'ICU. Le changement climatique est observé à Rennes par la station Météo-France localisée à l'aéroport de Rennes-Saint-Jacques. Les premiers enregistrements de la station débutent en 1879, ce qui constitue une série suffisamment longue pour observer le changement climatique sur l'ensemble du XXème siècle. Il apparaît que la température moyenne a augmenté de +0,9°C en un siècle et dans le même temps le nombre de vagues de chaleurs a également augmenté. Entre 1950-1979 et 1981-2010, le nombre de « journées d'été » ($T_x \geq 25^\circ\text{C}$) en moyenne étaient de 26,6 jours/an contre 38,8 jours/an actuellement. Sur ces mêmes périodes le nombre de « journées très chaudes » ($T_x \geq 30^\circ\text{C}$) a doublé avec 3,9 jours/an contre 7,9 jours/an actuellement. Ces éléments traduisent l'augmentation des journées observées où l'ICU est sensible en ville. Dans le même temps, la dynamique démographique à Rennes Métropole engendre un besoin croissant en logements ; entre 3 000 et 4 000 logements sont construits par année depuis 2005 à l'échelle du SCOT du Pays de Rennes. Cette tendance se poursuit avec des projections démographiques de 97 000 habitants supplémentaires d'ici 30 ans, soient entre 3 800 et 4 600 logements à construire selon l'AUDIAR. La politique d'aménagement actuelle a pour objectif de réduire la consommation de l'espace agricole périphérique afin de réduire le phénomène d'étalement urbain. La stratégie d'aménagement retenue vise à densifier le cœur d'agglomération déjà urbanisé, ce qui est favorable à l'intensification du phénomène d'ICU. Ainsi, ces projections engendrent des situations où l'ICU est de plus en plus marqué et plus sensible par l'augmentation des vagues de chaleur. Dans ce contexte, l'étude de l'ICU est réalisée afin d'en établir la variabilité spatio-temporelle et de la modéliser.

Dans un premier temps, l'objectif est d'identifier et d'évaluer l'ICU dans l'agglomération rennaise. Un réseau de 21 stations météorologiques a été mis en place dans le but d'observer les gradients de température relatifs à l'ICU. A partir de ces mesures, l'intensité de l'ICU est définie par l'écart de température minimale observée entre la station de référence rurale (*Melesse*) et la station dans le centre-ville de Rennes (*Griffon*). En 2011, l'ICU est observé pour 135 jours dont 40 jours où l'ICU est intense avec $\Delta T_n \geq 5^\circ\text{C}$. L'analyse est réalisée sur l'ensemble du réseau de mesures, ce qui permet d'établir une relation entre les types de quartiers et l'ICU observé. D'une

manière générale, l'ICU observé à l'échelle de l'agglomération correspond aux classes de quartiers définis : urbain, suburbain et péri-urbain (du plus chaud au plus frais). Cependant, des particularités apparaissent pour plusieurs sites.

Le premier axe de la thèse concerne la variabilité spatiale de l'ICU. L'analyse spatiale de l'ICU est réalisée à l'échelle de l'agglomération à partir des écarts de températures minimales observés par les stations météorologiques avec la station rurale (*Melesse*) en 2011 et de l'occupation du sol environnant les stations. Plusieurs facteurs d'occupations du sol apparaissent corrélés avec l'ICU, telles que la fraction bâtie, la hauteur moyenne des bâtiments, la fraction de surfaces imperméables, la fraction de végétation totale et basse. Une méthode statistique de spatialisation est établie par régression linéaire multiple. Les modèles sont construits à partir de variables d'occupation du sol avec des zones tampons variables afin de prendre en compte la variabilité des aires de représentativité des stations météorologiques. Cette méthode de spatialisation est automatisée et elle permet de produire des cartes de l'ICU pour plusieurs périodes : annuel, mensuel, quotidien. Les modèles construits expliquent la variabilité spatiale de l'ICU quotidien en moyenne à 71% selon la situation en 2011. La fluctuation de la qualité des modèles dépend en partie de la présence du vent. Cependant concernant les situations où l'ICU est intense et en l'absence de vent, le modèle explique jusqu'à 87% de la variabilité. L'analyse des résidus révèle la difficulté du modèle à estimer l'intensité pour un site spécifique en ville. Il s'agit d'un parc urbain avec un îlot de fraîcheur marqué, cette station (*Les Prairies*) située à proximité du centre-ville est comparable aux stations périurbaines. La méthode de spatialisation a également permis de mettre en évidence la forme de l'ICU en fonction des saisons.

La variabilité spatiale de l'ICU est associée à plusieurs échelles emboîtées de l'échelle locale à microlocale. L'analyse spatiale de l'ICU est réalisée dans un premier temps à l'échelle de l'agglomération par le réseau de stations météorologiques. Afin d'observer cette variabilité à l'échelle des quartiers, un réseau de capteurs a été mis en place dans le milieu intra-urbain durant l'été 2013. La méthode de spatialisation est adaptée à cette échelle par l'ajout d'une variable permettant de mesurer l'effet de « canyon urbain ». Cette méthode permet d'expliquer la variabilité spatiale de l'ICU entre 74% et 84% selon la situation. Cependant, le parc urbain (*Les Prairies*) présente un résidu important comme dans le cas de la spatialisation à l'échelle de l'agglomération. La spatialisation à l'échelle intra urbaine est exécutée pour plusieurs heures de la nuit du 14 au 15 juillet 2011 et elle met en évidence la mise en place progressive de l'ICU sur l'ensemble des quartiers. La méthode de spatialisation présente des résultats satisfaisants pour l'échelle de l'agglomération et l'échelle intra-urbaine. L'analyse spatiale de l'ICU est effectuée à une troisième échelle emboîtée plus fine, à l'échelle d'un quartier. Les observations menées sur trois sites ont montré la présence d'un ICU dans une petite ville de moins de 5 000 habitants et des effets microlocaux liés à l'environnement proche des points de mesures. Ces éléments soulignent l'imbrication des échelles de l'ICU.

Le second axe de cette thèse concerne l'aspect temporel de l'ICU, c'est-à-dire son occurrence en fonction des types de temps. L'ICU est observé à Rennes pour les trois années complètes 2007, 2010 et 2011. À partir de l'analyse des conditions météorologiques favorables à la mise en place de l'ICU, les nuits où l'ICU est en place sont identifiées. En 2011, l'ICU est présent pour 24% des situations et, pour 1 nuit sur 10, l'ICU observé est intense. L'analyse des facteurs météorologiques et l'intensité de l'ICU quotidien a permis d'établir un modèle statistique de prévision de l'ICU quotidien. Ce modèle explique 68% de la variabilité temporelle de l'ICU sur trois années. Malgré des biais observés pour des situations particulières, l'ICU moyen annuel est conforme aux observations. À partir de ce modèle statistique et des sorties régionalisées de modèles du changement climatique, l'ICU quotidien est projeté sur la période 1950-2100. Cette étape est réalisée afin d'observer l'évolution des types de temps influents sur l'ICU à Rennes. Il correspond à l'ICU issu de l'occupation du sol de Rennes Métropole

actuellement (2011-2014). Malgré les incertitudes liées aux modèles statistiques de l'ICU quotidien et aux capacités des modèles régionalisés du changement climatique à les simuler d'une part sur la période actuelle et d'autre part sur l'incertitude liée au changement climatique en lui-même. La projection de l'ICU sur la période de contrôle est similaire avec les observations de l'ICU actuelles. Cette méthode permet de projeter l'ICU pour les horizons moyens (2040-2069) et lointains (2070-2099). Les résultats révèlent l'absence de variations de l'ICU moyen annuel sur l'ensemble des périodes projetées pour les deux scénarios A1B et A2. Cette stabilité de l'ICU sur l'ensemble des projections indiquent que l'ICU futur dépend des choix opérés pour l'aménagement. L'occupation du sol est le facteur déterminant pour agir sur l'intensité futur de l'ICU.

Le troisième axe de la thèse concerne la mise en place d'outils d'aide à la décision. Les travaux menés au cours de la thèse ont permis de mettre en évidence des facteurs d'occupation du sol pertinent pour décrire la variabilité spatiale de l'ICU à Rennes. Une méthodologie est mise en place afin d'établir à partir d'indice descriptif des formes urbaines des seuils afin de limiter la présence de l'ICU. Ces points montrent le besoin auparavant d'établir un objectif d'ICU maximum à ne pas franchir et une étape de transposition vers les documents d'urbanisme. La question de l'échelle de l'ICU est également importante à préciser pour établir des actions d'atténuation adaptée aux documents concernés : SCOT, PLUI ou ZAC.

Enfin, l'exposition du territoire au changement climatique est analysée à travers la présence de l'ICU. A partir des modèles régionalisés du changement climatique, une projection des « journées d'été » et des « journées très chaudes » met en évidence l'augmentation du nombre de jours où l'ICU devient sensible. Selon ces critères, l'été 2003 est simulé pour un été sur quatre à trois étés sur quatre pour l'horizon lointain (2071-2100). Dans le même temps, le nombre de jours, où le Plan Canicule serait déclenché, augmente sur l'ensemble de la projection. Pour l'horizon lointain (2071-2100), il est respectivement simulé pour les scénarios A1B et A2 pour 5,7 jours/an et 10,9 jours/an. Ces résultats montrent les besoins potentiels croissants de mettre en place de moyens pour réduire les effets des canicules en ville. Parmi ces moyens, le recours à la climatisation apparait de plus en plus important, au regard des températures projetées par les modèles régionalisés. Par ailleurs, le recours à la climatisation engendre une augmentation théorique de la température en ville, d'autant que ce procédé n'apparait pas compatible aux objectifs de diminutions des consommations d'énergie fixés par le PCET. L'élaboration d'aménagements adaptés à ces besoins en rafraîchissement en ville concorde à la présence de la végétation et à des formes urbaines optimisées. Ces préconisations sont conciliables à la stratégie énergétique envisagée par la collectivité.

La variabilité spatiale de l'ICU observé entre les différents quartiers révèle une exposition différente sur le territoire aux vagues de chaleur. Les cartes de l'ICU produites à différentes échelles permettent d'identifier selon la problématique la vulnérabilité à l'ICU. Dans le cas des vagues de chaleur, les quartiers les plus exposés à l'ICU ont été mis en relation avec la tranche d'âge la plus sensible à Rennes Métropole (habitants de plus de 75 ans). L'analyse spatiale peut être adaptée à plusieurs problématiques liées au phénomène d'ICU, à l'aide des cartes constituées.

A partir de ces différents axes développés, plusieurs perspectives d'études apparaissent suite à cette thèse :

- La spatialisation de l'ICU est réalisée par régression linéaire multiple, cependant quelques variables n'ont pas une relation linéaire avec l'ICU. Cet aspect doit être approfondi par d'autres outils statistiques. Le biais observé dans le parc urbain *Les Prairies* est à étudier par une analyse à l'échelle de l'îlot de fraîcheur spécifique à ce site. Dans le cadre de l'observatoire des Prairies Saint Martin, un réseau de capteurs a été implanté depuis 2014. Un couplage avec l'observation intra-urbaine pourrait apporter une meilleure compréhension de ce phénomène local.
- Les facteurs d'occupation du sol sont essentiellement des descripteurs par fractions. L'analyse de la morphologie de la ville est surtout observée par l'indice *Sky View Factor* extrait à partir des bâtiments. Cet indice pourrait être développé pour la végétation à partir de la volumétrie obtenue par l'imagerie LIDAR.
- La circulation des brises en ville est un des aspects qui n'a pas été abordée au cours de cette thèse. Les brises favorables à l'apport d'air frais est à envisager par l'analyse de la topographie et des formes urbaines. De même, le déplacement de l'ICU observé par vent faible mériterait d'être développé. L'advection de l'air chaud dans le centre-ville semble atteindre les quartiers limitrophes, ce qui intensifie l'ICU dans ces quartiers. L'analyse des brises et des vents en ville concerne également les couches atmosphériques supérieures, telle que la couche limite urbaine. Les profils verticaux liés à la circulation des vents peuvent être observés par un SODAR. Ils permettraient une observation plus complète des circulations liées à la formation du dôme urbain.
- La modélisation de l'ICU est réalisée à partir de données quotidiennes et l'analyse des résidus les plus importants montrent qu'ils sont liés à des phénomènes infra-journaliers. La variabilité temporelle de l'ICU est soumise aux types de temps dont la variabilité possède un pas de temps horaire. Le modèle de prévision de l'ICU quotidien pourrait être amélioré par l'usage de données tri-horaires.
- Les indices et les seuils développés au cours de cette thèse évaluent les formes urbaines et la végétation d'un quartier au regard de l'ICU. Ces travaux requièrent une adaptation vers les documents d'urbanismes, notamment entre l'échelle du document et celle la préconisation envisagée. L'exposition des vagues de chaleurs et de l'ICU associée a été abordée selon un aspect thermique. Une étude sur le ressenti des vagues de chaleurs selon le quartier et le profil social pourrait apporter une précision sur l'exposition du territoire à l'échelle microlocale.

Bibliographie

- Acero, J. a., J. Arrizabalaga, S. Kupski, and L. Katschner, 2013: Deriving an Urban Climate Map in coastal areas with complex terrain in the Basque Country (Spain). *Urban Clim.*, doi:10.1016/j.uclim.2013.02.002.
- Aguejda, R., 2009: Etalement urbain et évaluation de son impact sur la biodiversité, de la reconstitution des trajectoires à la modélisation prospective . Application à une agglomération de taille moyenne : Rennes Métropole. Université Rennes 2, 372 pp.
- Akaike, H., 1973: Maximum likelihood identification of Gaussian autoregressive moving average models. *Biometrika*, **60**, 255–265.
- Alcoforado, M.-J., and H. Andrade, 2005: Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): main features and modelling attempts. *Theor. Appl. Climatol.*, **84**, 151–159, doi:10.1007/s00704-005-0152-1.
- Alcoforado, M.-J., H. Andrade, A. Lopes, and J. Vasconcelos, 2009: Application of climatic guidelines to urban planning. *Landsc. Urban Plan.*, **90**, 56–65, doi:10.1016/j.landurbplan.2008.10.006.
- Allain, R., 2004: *Morphologie urbaine. Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Armand Col. Université des Sciences et Technologies de Lille, 254 pp.
- Amorim, M. C. de C. T., 2000: Clima urbano de Presidente Prudente /SP. Universidade de São Paulo, 374 pp.
- , V. Dubreuil, H. Quenol, and J. L. S. Neto, 2009: Características das ilhas de calor em cidades de porte médio: exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França). *Confin. Rev. Fr. géographie/Revista Fr. Geogr.*
- Arnaud, M., and X. Emery, 2000: *Estimation et interpolation spatiale: méthodes déterministes et méthodes géostatistiques*. Hermes science publications,.
- Arnfield, a. 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, doi:10.1002/joc.859.
- Bailey, W. G., T. R. Oke, and W. R. Rouse, 1997: *The Surface Climates of Canada*. McGill-Queen's Press - MQUP, 369 pp.

- Baldinelli, G., S. Bonafoni, R. Anniballe, A. Presciutti, B. Gioli, and V. Magliulo, 2015: Spaceborne detection of roof and impervious surface albedo: Potentialities and comparison with airborne thermography measurements. *Sol. Energy*, **113**, 281–294, doi:10.1016/j.solener.2015.01.011.
- Bariou, R., L. Hubert-Moy, and F. Le Hénaff, 1988: Apport des satellites de deuxième génération à l'analyse urbaine; Le cas d'une ville moyenne, Rennes. *Photo-Interprétation*, 33–40.
- Baumüller, J., U. Hoffmann, and U. Stuckenbrock, 2009: Urban framework plan hillsides of stuttgart. *7th International Conference on Urban Climate*.
- Baumüller, J., U. Reuter, U. Hoffmann, H. Esswein, and others, 2008: Klimaatlas Region Stuttgart. *Schriftenr. Schriftenr. Verb. Reg. 26th edn. Verband Reg. Stuttgart, Stuttgart*.
- Beltrando, G., and L. Chémery, 1995: *Dictionnaire du climat*. Larousse,
- Bergot, M., B. Marcais, V. Perarnaud, M.-L. Desprez-Loustau, and A. Levy, 2011: Géographie de l'impact du gel sur la maladie de l'encre du chêne. *La Météorologie [ISSN 0026-1181]*, 2001, Série 8, N° 34; p. 45-52.
- Besancenot, J.-P., 2002: Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. *Environnement, risques & santé*, **1**, 229–240.
- Bessemoulin, P., 2000: Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. *La Météorologie*, **8**, 42–59.
- , N. Bourdette, P. Courtier, and J. Manach, 2004: La canicule d'août 2003 en France et en Europe. *La Météorologie*, **8**, 25–33.
- Blennow, K., and P. Persson, 1998: Modelling local-scale frost variations using mobile temperature measurements with a GIS. *Agric. For. Meteorol.*, **89**, 59–71, doi:10.1016/S0168-1923(97)00057-9.
- Bock, M., J. Bohner, O. Conrad, R. Kothe, and A. Ringeler, 2008: Saga: System for the automated geoscientific analysis. *Dept. Phys. Geogr. Hamburg, Ger.*
- Boé, J., 2007: Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France.
- Boé, J., L. Terray, E. Martin, and F. Habets, 2009: Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resour. Res.*, **45**, 1–15, doi:10.1029/2008WR007437.
- Böhner, J., and O. Antonić, 2009: *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications*. Elsevier, 195-226 pp.
- Bonnefoy, C., 2013: Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique. Université Rennes 2, 319 pp.

- Bonnefoy, C., H. Quenol, V. Bonnardot, G. Barbeau, M. Madelin, O. Planchon, and E. Neethling, 2013a: Temporal and spatial analyses of temperature in a French wine-producing area: the Loire Valley. *Int. J. Climatol.*, **33**, 1849–1862, doi:10.1002/joc.3552.
- Bonnefoy, C., H. Quénol, and M. Madelin, 2013b: Modélisation spatiale de la température dans un site viticole des Coteaux du Layon. *SAGEO*.
- Bottyan, Z., and J. Unger, 2003: A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island. *Theor. Appl. Climatol.*, **75**, 233–243, doi:10.1007/s00704-003-0735-7.
- Bourget, E., 2011: Télédétection et atlas de paysages: approche multiscalaire des paysages en Bretagne. Université Rennes 2, .
- Bowler, D. E., L. Buyung-Ali, T. M. Knight, and A. S. Pullin, 2010: Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landsc. Urban Plan.*, **97**, 147–155, doi:10.1016/j.landurbplan.2010.05.006.
- Bruse, M., 2004: ENVI-met 3.0: Updated Model Overview. 1–12.
- , and H. Fler, 1998: Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **13**, 373–384.
- Cameron, R. W. F., J. E. Taylor, and M. R. Emmett, 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, doi:10.1016/j.buildenv.2013.12.005.
- Cantat, O., 1989: Contribution à l’étude des variations du bilan d’énergie en région parisienne : Essai sur les bilans d’énergie dans les grandes métropoles. 2 vol. (365 p., 254 pl.) pp.
- , 2004: L’îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, **191**, 1–37.
- Cantat, O., E. Savouret, and B. Abdelkrim, 2012: La régionalisation des types de temps en France métropolitaine. *colloque international "Les climats régionaux: observation et modélisation de l'Association Internationale de Climatologie*, Vol. 25 of, 165–170.
- Carrega, P., 1992: Topoclimatologie et habitat. Université de Nice - Sophia Antipolis, .
- , 2003: Le climat aux échelles fines. *Publ. l'Association Int. Climatol.*, **15**, 19–30.
- , 2008a: Le changement climatique: incertitudes structurelles et incertitudes propagées. *Allard P., Fox D., Picon B.(2008). Incert. environnement. La fin des certitudes Sci. Aix-en-Provence Édisud, coll. Écologie Hum.*, 37–46.
- , 2008b: *Information géographique et climatologie*. Hermes Science Publications,
- Chadule, G., H. Chamussy, J. Charre, and P. Dumolard, 1987: *Initiation aux pratiques statistiques en géographie*. Masson. Masson,.

- Chandler, T. J., 1962: Temperature and humidity traverses across London. *Weather*, **17**, 235–242, doi:10.1002/j.1477-8696.1962.tb05125.x. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1477-8696.1962.tb05125.x>.
- Charabi, Y., 2001: L'îlot de chaleur urbain de la Métropole Lilloise : mesures et spatialisation. Université des sciences et technologies de Lille, 237 pp.
- Chen, F., and Coauthors, 2011: The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *Int. J. Climatol.*, **31**, 273–288, doi:10.1002/joc.2158.
- Chen, L., E. Ng, X. An, C. Ren, M. Lee, U. Wang, and Z. He, 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. Climatol.*, **32**, 121–136, doi:10.1002/joc.2243.
- Chesnais, M., O. Cantat, and P. Hamel, 1992: Le district urbain de Caen à travers l'imagerie satellitaire. *Noroi*, **155**, 349–359, doi:10.3406/noroi.1992.6439.
- Clarke, J. F., 1969: NOCTURNAL URBAN BOUNDARY LAYER OVER CINCINNATI, OHIO. *Mon. Weather Rev.*, **97**, 582–589, doi:10.1175/1520-0493(1969)097<0582:NUBLOC>2.3.CO;2.
- Clergeau, P., 2011: Ville et biodiversité. *Les Enseign. d'une Rech. Pluridiscip. Rennes, Press. Univ. Rennes.*
- Colombert, M., 2008: Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. .
- Colombert, M., J. Salagnac, and D. Morand, 2012: Le climat et la ville : la nécessité d'une recherche croisant les disciplines. **12**.
- Cordeau, E., 2014: Caractériser les zones sujettes aux îlots de chaleur urbains. *Les Cah. I'IAU IdF*, 80–81.
- Cornillon, P.-A., and E. Matzner-Lober, 2010: *Régression avec R*. Springer,.
- Cosnier, C., and A. Héland, 1999: *Rennes et Dreyfus en 1899: une ville, un procès*. Pierre Horay,.
- Cotte, L., 1774: *Traité de météorologie*. L'imprimerie Royale, 707 pp.
- Coutts, A., and R. Harris, 2012: A multi-scale assessment of urban heating in Melbourne during an extreme heat event: policy approaches for adaptation.
- Croci, S., 2007: Urbanisation et biodiversité traits biologiques et facteurs environnementaux associés à l'organisation des communautés animales le long d'un gradient rural-urbain. Université de Rennes 1, 1 vol. (214 p.) pp.

- Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Glob. Planet. Change*, **57**, 16–26, doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030.
- , C. Drevet, A. Braun, and D. Cariolle, 1994: The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Clim. Dyn.*, **10**, 249–266.
- Doick, K. J., A. Peace, and T. R. Hutchings, 2014: The role of one large greenspace in mitigating London's nocturnal urban heat island. *Sci. Total Environ.*, **493**, 662–671, doi:10.1016/j.scitotenv.2014.06.048.
- Dousset, B., and F. Gourmelon, 2003: Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 58 of, 43–54.
- Dozier, J., and J. Frew, 1990: Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. *Geosci. Remote Sensing, IEEE Trans.*, **28**, 963–969.
- Dubreuil, V., 1994: La Sécheresse dans la France de l'ouest: étude d'après les bilans hydriques et les données des satellites NOAA-AVHRR. Rennes 2, .
- , 1996: Synthèse géographique de la sécheresse dans les régions océaniques. *La Météorologie*, **8**, 22–34.
- , H. Florence, and C. Lejeune, 1995: Les précipitations intenses en Bretagne. *Norois*, **43**, 395–406.
- , C. Delahaye, and A. Le Strat, 2010: Changements d'occupation du sol et leurs impacts climatiques au Mato Grosso, Brésil. *Confin. Rev. Fr. géographie/Revista Fr. Geogr.*, .
- , H. Quénot, X. Foissard, and O. Planchon, 2011: Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain à Rennes. *Ville et biodiversité : les enseignements d'une recherche pluridisciplinaire*, 137–159
- , O. Planchon, C. Lamy, V. Bonnardot, and H. Quénot, 2012: Le changement climatique dans la France de l'Ouest: observations et tendances. *Chang. Clim. dans l'Ouest*, 19–30.
- Eliasson, I., 1996: Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmos. Environ.*, **30**, 379–392, doi:10.1016/1352-2310(95)00033-X.
- Eliasson, I., and M. K. Svensson, 2003: Spatial air temperature variations and urban land use — a statistical approach. *Meteorol. Appl.*, **10**, 135–149, doi:10.1017/S1350482703002056.
- Emeis, S., 2010: *Surface-based remote sensing of the atmospheric boundary layer*. Springer Science & Business Media, .
- Endlicher, W., 1981: L'îlot de chaleur urbain d'Annecy. Quelques remarques sur le climat local d'une ville alpine. *Rev. géographie Alp.*, **69**, 407–420, doi:10.3406/rga.1981.2468.

- , G. Jendritzky, J. Fischer, and J. Redlich, 2008: Heat Waves , Urban Climate and Human Health. *Weather*, 269–278.
- Escourrou, G., 1991: *Le climat et la ville*. Géographie. Nathan Université, 190 pp.
- Foissard, X., O. Cantat, V. Dubreuil, E. Savouret, H. Quénot, A. Bensaid, O. Planchon, and others, 2012: Climat urbain, changement climatique et types de temps dans le Grand Ouest de la France. *Changement climatique dans l'Ouest*, 73–92.
- Gabriel, K. M. a, and W. R. Endlicher, 2011: Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environ. Pollut.*, **159**, 2044–2050, doi:10.1016/j.envpol.2011.01.016.
- Gál, T., and Rzepa, 2007: Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment. 17–26.
- Goldreich, Y., 2006: Ground and top of canopy layer urban heat island partitioning on an airborne image. *Remote Sens. Environ.*, **104**, 247–255, doi:10.1016/j.rse.2005.08.018. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425706001866> (Accessed January 17, 2015).
- Gratton, Y., 2002: Le krigeage: La méthode optimale d'interpolation spatiale. *Les Artic. l'Institut d'Analyse Géographique*.
- Grimmond, C. S. B., S. K. Potter, H. N. Zutter, and C. Souch, 2001: Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. *Int. J. Climatol.*, **21**, 903–913, doi:10.1002/joc.659. <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.659>.
- Guégan-Roué, A., 1994: Dynamique spatiale de l'agglomération rennais : la télédétection, un outil d'analyse et de gestion de l'espace. Université Rennes 2, 1 vol. (359-[13] p.) pp.
- Hamdi, R., O. Giot, R. De Troch, A. Deckmyn, and P. Termonia, 2015: Future climate of Brussels and Paris for the 2050s under the A1B scenario. *Urban Clim.*, **12**, 160–182, doi:10.1016/j.uclim.2015.03.003.
- Häntzschel, J., V. Goldberg, and C. Bernhofer, 2005: GIS-based regionalisation of radiation, temperature and coupling measures in complex terrain for low mountain ranges. *Meteorol. Appl.*, **12**, 33–42, doi:10.1017/S1350482705001489.
- Hartmann, D. L., A. Tank, and M. Rusticucci, 2013: IPCC fifth assessment report, climate change 2013: The physical science basis. *IPCC AR5*, 31–39.
- Hartz, D. A., L. Prashad, B. C. Hedquist, J. Golden, and A. J. Brazel, 2006: Linking satellite images and hand-held infrared thermography to observed neighborhood climate conditions. *Remote Sens. Environ.*, **104**, 190–200, doi:10.1016/j.rse.2005.12.019.
- Hathway, E. a., and S. Sharples, 2012: The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Build. Environ.*, **58**, 14–22, doi:10.1016/j.buildenv.2012.06.013.

- He, X., S. Shen, S. Miao, J. Dou, and Y. Zhang, 2015: Quantitative detection of urban climate resources and the establishment of an urban climate map (UCMap) system in Beijing. *Build. Environ.*, doi:10.1016/j.buildenv.2015.05.044.
- Hémon, D., E. Jouglu, C. J. F. Laurent, S. Bellec, and G. Pavillon, 2003: Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 en France. *Bull. Épidémiologique Hebd.*, **45-46**, 1–5, doi:10.1016/S0398-7620(05)84659-0.
- Hoffmann, P., 2012: Quantifying the influence of climate change on the urban heat island of Hamburg using different downscaling methods. .
- Howard, L., 1818: *The climate of London*. W. Phillips, sold also by J. and A. Arch, 770 pp.
- Hufty, A., 1997: Les climats urbains. Le climat et la santé. *Le Clim. l'eau les hommes-ouvrage en Honn. à Jean Mounier*. Rennes/France Press. Univ. Rennes, 113–128.
- Institut de Veille Sanitaire, 2003: *Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 en France*. 63 pp.
- IPCC, 2007: IPCC Fourth Assessment Report (AR4). *IPCC*, **1**, 976.
- IPCC, I. P. O. C. C., 2001: IPCC Third Assessment Report. *Assessment*, **5**, 1–29.
- Jáuregui, E., 1996: Bibliography of Urban Climatology for the Period 1992-1995 Including a Special Section on Urban Climate in Tropical/Subtropical Areas.
- Jendritzky, G., R. de Dear, and G. Havenith, 2012: UTCI—Why another thermal index? *Int. J. Biometeorol.*, **56**, 421–428.
- Jochner, S., and A. Menzel, 2015: Urban phenological studies - Past, present, future. *Environ. Pollut.*, doi:10.1016/j.envpol.2015.01.003.
- Johnson, G., and I. Watson, 1984: The determination of view-factors in urban canyons. *J. Clim. Appl. ...*, **25**, 329–335.
- Joly, D., T. Brossard, H. Cardot, J. Cavailhès, M. Hilal, and P. Wavreski, 2007: Densité de points de mesure, types et limites des modèles d'interpolation. *Journée Climatol.*, 22–23.
- , —, —, J. Cavailhès, and P. Wavreski, 2012: Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo Eur. J. Geogr.*.
- Kastendeuch, P., G. Najjar, P. Lacarrère, and J. Colin, 2010: Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg. *Climatologie*, 20–37.
- Kikegawa, Y., Y. Genchi, H. Kondo, and K. Hanaki, 2006: Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning. *Appl. Energy*, **83**, 649–668, doi:10.1016/j.apenergy.2005.06.001.

- Kim, Y.-H., and J.-J. Baik, 2002: Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul. *Am. Meteorol. Soc.*, 651–659.
- , and —, 2005: Spatial and Temporal Structure of the Urban Heat Island in Seoul. *J. Appl. Meteorol.*, **44**, 591–605, doi:10.1175/JAM2226.1.
- Kleerekoper, L., M. van Esch, and T. B. Salcedo, 2012: How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resour. Conserv. Recycl.*, **64**, 30–38, doi:10.1016/j.resconrec.2011.06.004.
- Kratzer, P. A., 1956: *Das stadtklima*. F. Vieweg & Sohn,.
- Krige, D. G., 1951: A Statistical Approach to Some Mine Valuation and Allied Problems on the Witwatersrand: By DG Krige. University of the Witwatersrand, .
- Kubiak, M., and A. Stach, 2014: The use of motor-glider in topoclimatic studies. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, **32**, 186–198, doi:10.1016/j.jag.2014.04.013.
- Laaidi, K., A. Ung, V. Wagner, P. Beaudeau, and M. Pascal, 2012: *Système d'Alerte Canicule et Santé: principes, fondements et évaluation*. 22 pp.
- Lamy, C., 2014: Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne. Université Rennes 2, 287 pp.
- Landsberg, H. E., 1981: *The urban climate*. Academic press,.
- Landsberg, H. E., and T. N. Maisel, 1972: Micrometeorological observations in an area of urban growth. *Boundary-Layer Meteorol.*, **2**, 365–370.
- Laughlin, G. ., and J. . Kalma, 1987: Frost hazard assessment from local weather and terrain data. *Agric. For. Meteorol.*, **40**, 1–16.
- Leconte, F., J. Bouyer, R. Claverie, and M. Pétrissans, 2015: Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements. *Build. Environ.*, **83**, 39–49, doi:10.1016/j.buildenv.2014.05.005.
- Lee, S.-H., and J.-J. Baik, 2010: Statistical and dynamical characteristics of the urban heat island intensity in Seoul. *Theor. Appl. Climatol.*, **100**, 227–237, doi:10.1007/s00704-009-0247-1.
- Li, J., and A. D. Heap, 2014: Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environ. Model. Softw.*, **53**, 173–189, doi:10.1016/j.envsoft.2013.12.008.
- Lombardo, M. A., 1985: *Ilha de calor nas metr{ó}poles: o exemplo de São Paulo*. Editora Hucitec com apoio de Lalekla SA Comércio e Indústria,.
- Madelin, M., 2004: L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : Modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air. *Thèse Dr.*.

- Masson, V., C. S. B. Grimmond, and T. R. Oke, 2002: Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities. *Am. Meteorol. Soc.*, 1011–1026.
- , and Coauthors, 2013: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geosci. Model Dev.*, **6**, 929–960, doi:10.5194/gmd-6-929-2013.
- Mayer, H., 1988: Results from the research program “STADTKLIMA BAYERN” for urban planning. *Energy Build.*, **11**, 115–121, doi:10.1016/0378-7788(88)90027-8.
- McGarigal, K., and B. J. Marks, 1995: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. *Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. US Dep. Agric. For. Serv. Pacific Northwest Res. Stn.*
- , S. Tagil, and S. A. Cushman, 2009: Surface metrics: An alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure. *Landsc. Ecol.*, **24**, 433–450, doi:10.1007/s10980-009-9327-y.
- Mcpherson, E. G., 1994: Cooling urban heat islands with sustainable landscapes.
- Memon, R. A., D. Y. C. Leung, and C.-H. Liu, 2009: An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmos. Res.*, **94**, 491–500, doi:10.1016/j.atmosres.2009.07.006.
- Mendonça, F., 1995: O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno: Proposição metodológica e sua aplicação à cidade de Londrina/PR. USP, .
- , and V. Dubreuil, 2002: L'étude du climat urbain au Brésil: état actuel et contribution de la télédétection. *Environ. télédétection au Brésil*, 135–146.
- Meyer, J., 1984: *Histoire de Rennes*. Privat.
- Miller, A., 2002: *Subset selection in regression*. CRC Press,.
- Mills, G., 2008: Luke Howard and The Climate of London. *Weather*, **63**, 153–157, doi:10.1002/wea.195.
- Le Moigne, P., 2002: Description de l'analyse des champs de surfaces sur la France par le système SAFRAN. **2002**, 1–45.
- Moisselin, J.-M., M. Schneider, and C. Canellas, 2011: Les changements climatiques en France au XX^e siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie [ISSN 0026-1181]*, 2002, Série 8, N° 38; p. 45-56.
- Morris, C., and I. Simmonds, 2001: Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *J. Appl. ...*, 169–182.
- Moss, R. H., and Coauthors, 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, **463**, 747–756. <http://dx.doi.org/10.1038/nature08823>.

- Mounier, J., 1980: Fluctuations climatiques récentes en Bretagne. *Norois*, **107**, 460–463.
- De Munck, C., and Coauthors, 2012: How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *Int. J. Climatol.*, **227**, n/a – n/a, doi:10.1002/joc.3415.
- Myers, D. E., 1994: Spatial interpolation: an overview. *Geoderma*, **62**, 17–28, doi:10.1016/0016-7061(94)90025-6.
- Ng, E., L. Chen, Y. Wang, and C. Yuan, 2012: A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Build. Environ.*, **47**, 256–271, doi:10.1016/j.buildenv.2011.07.014.
- Nicholas, J. V., D. R. White, and J. Wiley, 2001: *Traceable temperatures: an introduction to temperature measurement and calibration*. Wiley New York,.
- Oke, T. R., 1973: City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.*, **7**, 769–779, doi:10.1016/0004-6981(73)90140-6.
- , 1976: The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere (Basel)*, **14**, 268–277.
- Oke, T. R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **108**, 1–24, doi:10.1002/qj.49710845502. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49710845502>.
- Oke, T. R., 1987: *Boundary Layer Climates*. Routledge, 435 pp.
- Oke, T. R., 1990: Bibliography of urban climate, 1981-1988.
- Oke, T. R., 2004: Siting and Exposure of Meteorological Instruments at Urban Sites. *Exposure*, 615–631.
- Oke, T. R., 2006: *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. 47 pp.
- , and G. B. Maxwell, 1975: Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmos. Environ.*, **9**, 191–200, doi:10.1016/0004-6981(75)90067-0.
- Pachauri, R. K., and Coauthors, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Pagé, C., 2010a: dsclim : A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology.
- , 2010b: Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii.
- , and L. Terray, 2010: *Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle: les scénarii SCRATCH2010*.

- Pagney, P., 1988: *Climats et cours d'eau de France*. Masson, 248 pp.
- Péguy, C. P., 1970: *Précis de climatologie*. Masson, Paris, 468 pp.
- Pellissier, V., F. Rozé, R. Aguejdad, H. Quénot, and P. Clergeau, 2008: Relationships between soil seed bank, vegetation and soil fertility along an urbanisation gradient. *Appl. Veg. Sci.*, **11**, 325–334, doi:10.3170/2008-7-18448.
- Perrin de Brichambaut, C., 1994: Instruments et stations de mesures météorologiques pour amateurs. *La Météorologie*, **8**, 48–51.
- Peterson, T., 2003: Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found. *J. Clim.*, **16**, 2941–2960.
- Pettitt, A. N., 1979: A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Stat.*, 126–135.
- Piazza, M., and Coauthors, 2011: Evaluation du changement climatique sur les zones de montagne en France à partir des méthodes de régionalisation. *L'eau en Mont. mieux Obs. pour mieux prévoir*, **8**.
- Pigeon, G., 2007: Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - Projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOU.
- Quénot, H., 2011: Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique. Université Rennes 2.
- , 2012a: Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique. Université Rennes 2, 90 pp.
- , 2012b: *Observation et modélisation spatiale du climat des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique ANR-JC07194103 TERVICLIM*.
- , and G. Beltrando, 2008: Impact of a new railway line embankment (Mediterranean TGV) on the frequency of spring frosts in a fruit-growing area of the Durance Valley (south of France). *Meteorol. Appl.*, **15**, 389–398, doi:10.1002/met.81.
- , V. Dubreuil, A. Mimet, V. Pellissier, R. Aguejdad, P. Clergeau, and S. Bridier, 2010: Climat urbain et impact sur la phénologie végétale printanière. 50–57.
- , J. Nabucet, S. Croci, and X. Foissard, 2014: Devenir métropole soutenable : des stratégies territoriales partagées. *Climat et biodiversité en ville : mise en place de l'observatoire d'écologie urbaine des Prairies Saint-Martin (Rennes)*, Rennes, Académie d'Agriculture de France, 2.
- Quintana-Seguí, P., and Coauthors, 2008: Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **47**, 92–107, doi:10.1175/2007JAMC1636.1.
- R Core Team, 2014: R: A Language and Environment for Statistical Computing.

- Radu, R., M. Déqué, and S. Somot, 2008: Spectral nudging in a spectral regional climate model. *Tellus A*, **60**, 898–910, doi:10.1111/j.1600-0870.2008.00341.x.
- Rempel, R. S., D. Kaukinen, and A. P. Carr, 2012: Patch analyst and patch grid. *Ontario Minist. Nat. Resour. Cent. North. For. Ecosyst. Res. Thunder Bay, Ontario*.
- Renou, E., 1855a: *Annuaire de la Société Météorologique de France*. Tome Trois. 593 pp.
- Renou, E. J., 1855b: *Instructions météorologiques*.
- Revi, A., D. E. Satterthwaite, F. Aragón-Durand, J. Corfee-Morlot, R. B. R. Kiunsi, M. Pelling, D. C. Roberts, and W. Solecki, 2014: Urban areas. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*, C.B. Field et al., Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 535–612.
- Ringenbach, N., 2009: Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg. Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, 180 pp.
- Robert-Bobée, I., 2007: Projections de population 2005-2050: vieillissement de la population en France métropolitaine. *Econ. Stat.*, **408**, 95–112.
- Rousseau, D., 2005: Analyse fine des surmortalités pendant la canicule 2003 : L'évènement météorologique de la nuit du 11 au 12 août 2003 en Île-de-France. *La Météorologie*, **8**, 16–22.
- Rowell, D. P., 2006: A demonstration of the uncertainty in projections of UK climate change resulting from regional model formulation. *Clim. Change*, **79**, 243–257.
- Scherer, D., U. Fehrenbach, H. Beha, and E. Parlow, 1999: Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmos. Environ.*, **33**.
- Schlünzen, K. H., P. Hoffmann, G. Rosenhagen, and W. Riecke, 2010: Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. *Int. J. Climatol.*, 1121–1136, doi:10.1002/joc.1968.
- Schmid, H. P., H. Cleugh, C. S. B. Grimmond, and T. R. Oke, 1991: Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain. 249–276.
- Schmidt, M., 2006: The contribution of rainwater harvesting against global warming. *Tech. Univ. Berlin, IWA Publ. London, UK*.
- Schwarz, G., 1978: Estimating the dimension of a model. *Ann. Stat.*, **6**, 461–464.
- Seity, Y., P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, and V. Masson, 2011: The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Mon. Weather Rev.*, **139**, 976–991, doi:10.1175/2010MWR3425.1.

- Shashua-bar, L., and M. E. Hoffman, 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.*,
- Stéphan, F., S. Ghiglione, F. Decailliot, L. Yakhou, P. Duvaldestin, and P. Legrand, 2005: Effect of excessive environmental heat on core temperature in critically ill patients. An observational study during the 2003 European heat wave. *Br. J. Anaesth.*, **94**, 39–45, doi:10.1093/bja/ae291.
- Stewart, I. D., 2011: Redefining the Urban Heat Island. The University of British Columbia, 352 pp.
- Stewart, I. D., and T. R. Oke, 2012: Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **93**, 1879–1900, doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- Sundborg, Å., 1951: *Climatological Studies in Uppsala: With Special Regard to the Temperature Conditions in the Urban Area*. Appelbergs Boktryckeriaktiebolag.,
- Suomi, J., J. Hjort, and J. Käyhkö, 2012: Effects of scale on modelling the urban heat island in Turku, SW Finland. *Clim. Res.*, **55**, 105–118, doi:10.3354/cr01123.
- Svensson, M. K., 2004: Sky view factor analysis – implications for urban air temperature differences. *Meteorol. Appl.*, **11**, 201–211, doi:10.1017/S1350482704001288.
- Taleghani, M., M. Tenpierik, A. van den Dobbelen, and D. J. Sailor, 2014: Heat in courtyards: A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands. *Sol. Energy*, **103**, 108–124, doi:10.1016/j.solener.2014.01.033.
- Theys, J., and E. Vidalenc, 2013: *Repenser les villes dans la société post carbone*. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et ADEME, 305 pp.
- Unger, J., 2004: Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island : review and new approach. *Clim. Res.*, **27**, 253–264, doi:10.3354/cr027253.
- , 2009: Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. **36**, 59–80.
- , S. Savić, and T. Gál, 2011: Modelling of the Annual Mean Urban Heat Island Pattern for Planning of Representative Urban Climate Station Network. *Adv. Meteorol.*, **2011**, 1–9, doi:10.1155/2011/398613.
- United Nations, 2013: World Population Prospects: The 2012 Revision. *World Popul. Prospect. 2012 Revis.*, 1, doi:21 February 2014.
- Upmanis, H., I. Eliasson, and S. Lindqvist, 1998: The Influence of Green Area on Nocturnal Temperatures in a High Latitude City (Goteburg, Sweden). *Int. J. Climatol.*, **700**, 681–700.
- Vitruvius, M. P., C. Perrault, and E. Tardieu, 1859: *Les dix livres d'architecture de Vitruve*. A. Morel, 703 pp.

- Vogt, J., 2002: Bericht über orientierende Voruntersuchungen zur lokalklimatischen Funktion der Flächen des Gleisdreiecks in Berlin.
- Voogt, J. a., and T. R. Oke, 2003: Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ.*, **86**, 370–384, doi:10.1016/S0034-4257(03)00079-8.
- Wong, N. H., and C. Yu, 2005: Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat Int.*, **29**, 547–558, doi:10.1016/j.habitatint.2004.04.008.
- , S. K. Jusuf, N. I. Syafii, Y. Chen, N. Hajadi, H. Sathyanarayanan, and Y. V. Manickavasagam, 2011: Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption. *Sol. Energy*, **85**, 57–71, doi:10.1016/j.solener.2010.11.002.
- World Meteorological Organization, 2010: *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation 2008*. 716 pp.
- , 2011: *Guide to Climatological Practices WMO-No. 100*.
- Yoshino, M., 1975: *Climate in a Small Area: An Introduction to Local Meteorology*. 549 pp.
- , 1990: Development of urban climatology and problems today. *Energy Build.*, **15**, 1–10, doi:10.1016/0378-7788(90)90109-V.
- Zhao, C., G. Fu, X. Liu, and F. Fu, 2011: Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China. *Build. Environ.*, **46**, 1174–1183, doi:10.1016/j.buildenv.2010.12.009.

Environnement des stations météorologiques à l'échelle de l'agglomération rennaise

Zones tampons de 100 m de rayon.

Source : Google Earth, 2015

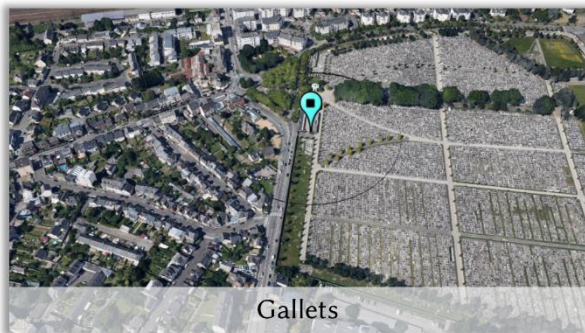




Bréquigny



Beaulieu



Gallets



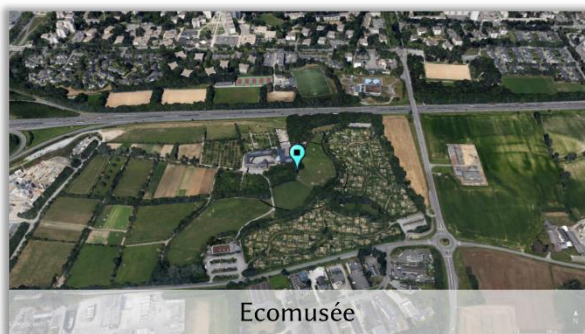
Vezin le Coquet



Cimetière de l'Est



Poterie



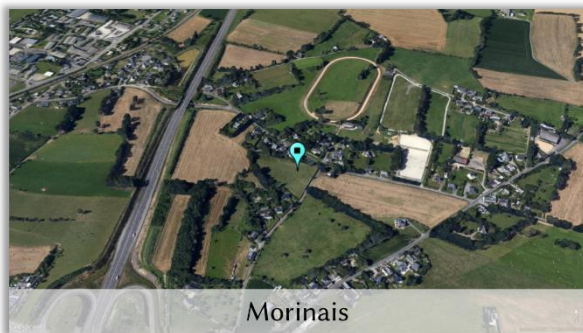
Ecomusée



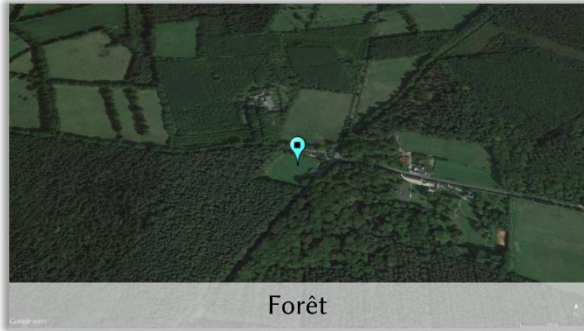
Champeaux



St Jacques



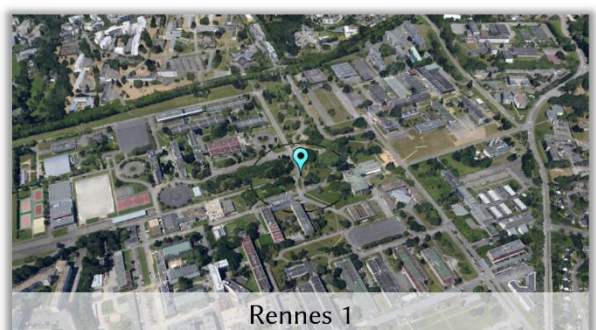
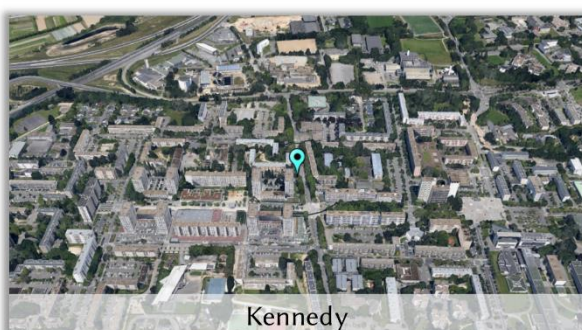
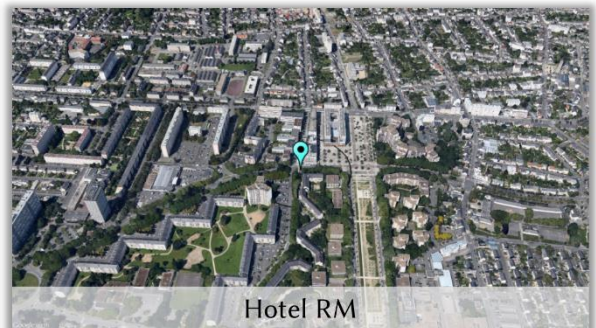
Morinai

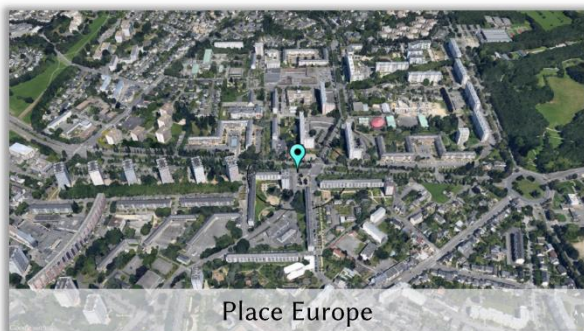


Environnement des capteurs installés lors de la campagne de mesures intra-urbaines à Rennes, juillet-août 2013

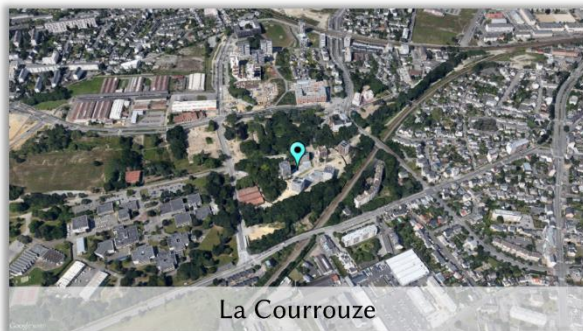
Zones tampons de 100 m de rayon.

Source : Google Earth, 2015

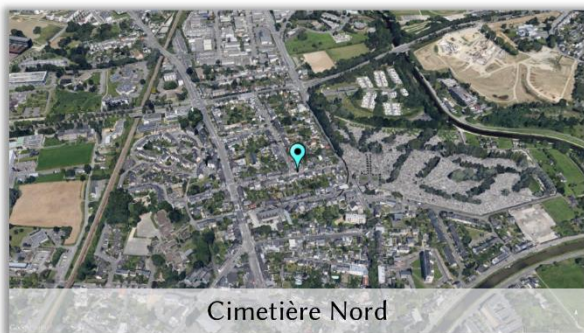




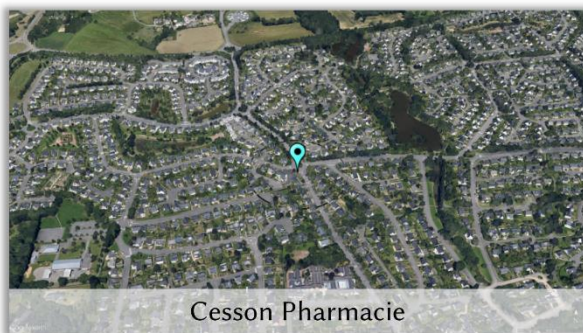
Place Europe



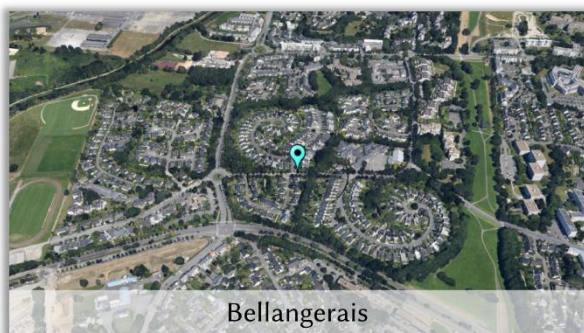
La Courrouze



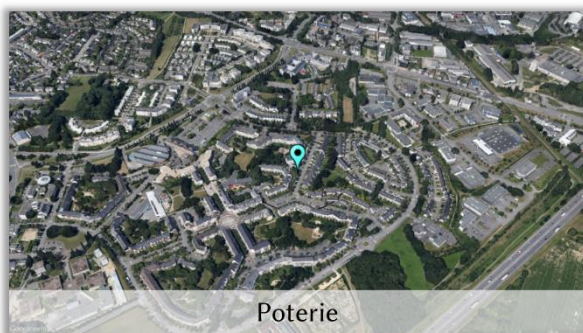
Cimetière Nord



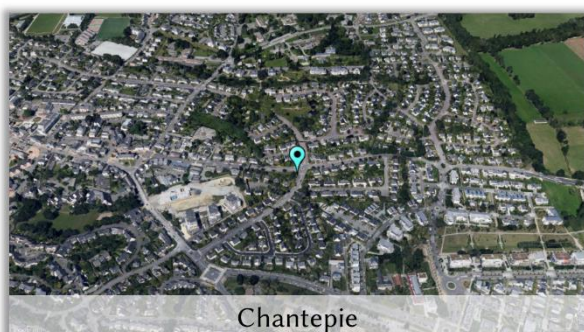
Cesson Pharmacie



Bellangerais



Poterie



Chantepie



Baud-Chardonnet



Cesson-Parc



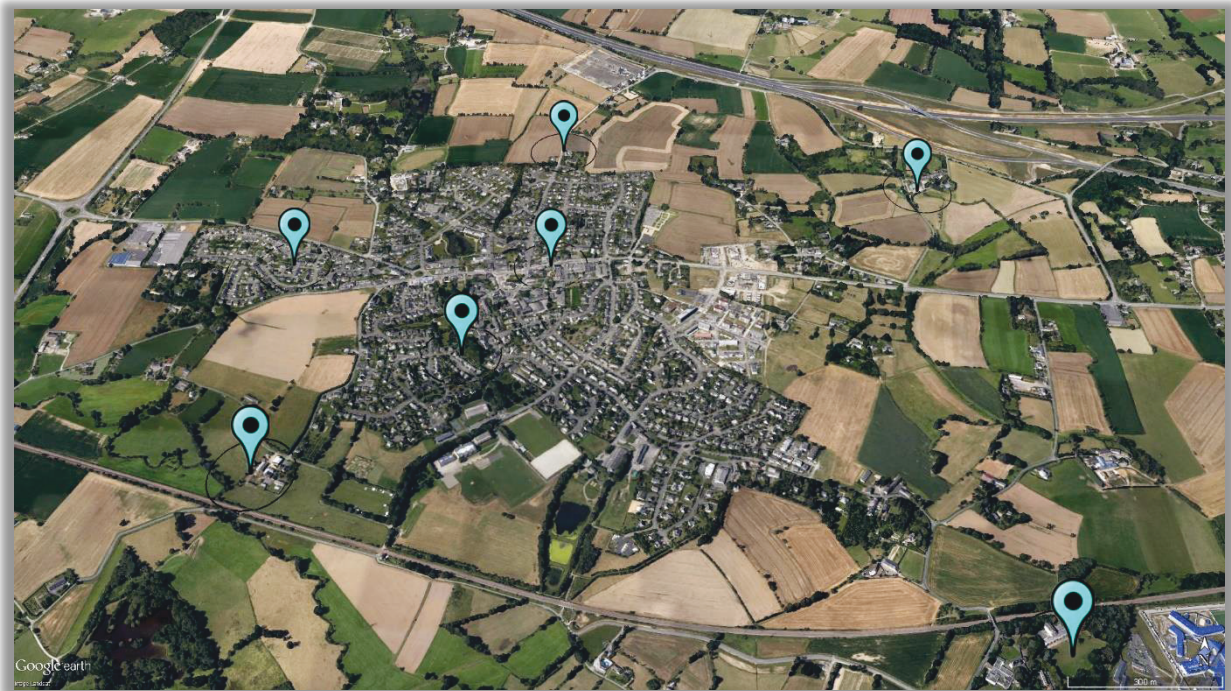
Beaugard



Environnement des capteurs installés dans la ville de Vezin-le-Coquet

Zones tampons de 100 m de rayon.

Source : Google Earth, 2015



Environnement des capteurs installés dans la ZAC Beauregard

Zones tampons de 100 m de rayon.

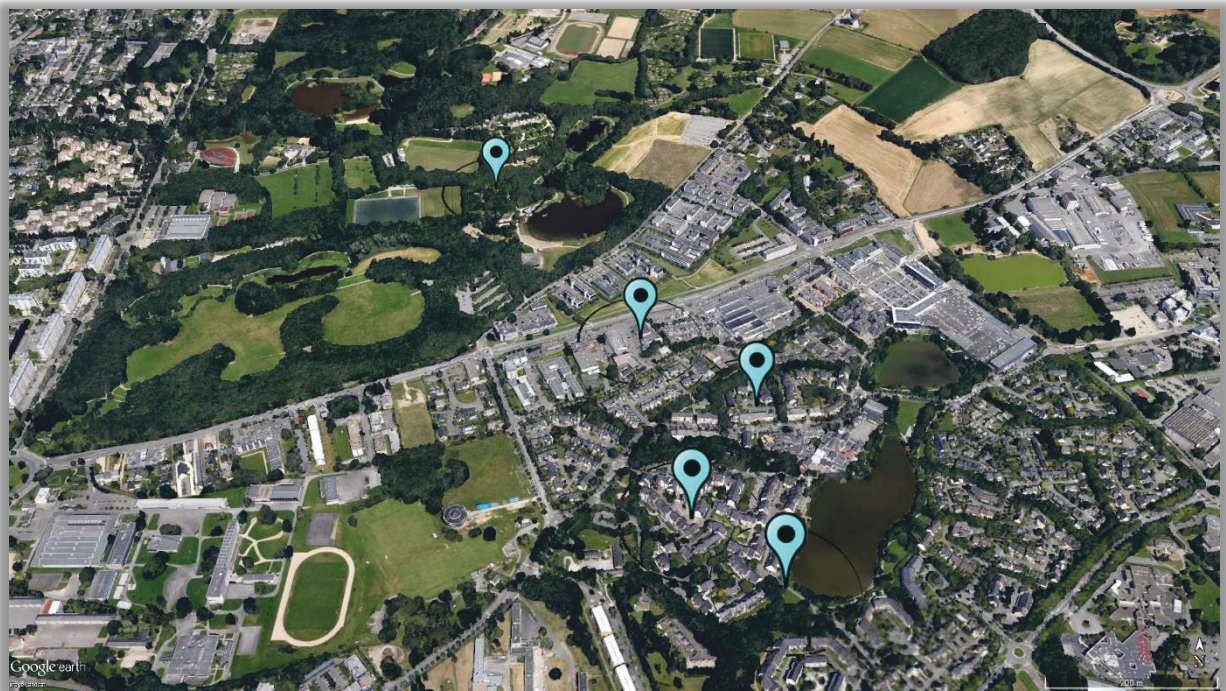
Source : Google Earth, 2015



Environnement des capteurs installés dans la ZAC Longs Champs

Zones tampons de 100 m de rayon.

Source : Google Earth, 2015



Liste des figures

FIGURE 1, SCHEMA RECAPITULATIF DU PLAN DE THESE	5
FIGURE 2, LES ECHELLES SPATIO-TEMPORELLES DES PHENOMENES DANS LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE (EN GRISES). D'APRES OKE T.R. (1987).....	12
FIGURE 3, ECARTS ET DIFFERENCE DE TEMPERATURE OBSERVES ENTRE LA VILLE ET LA CAMPAGNE PENDANT 24H EN CONDITION IDEALISEE D'OBSERVATION DE L'ICU. ADAPTEE DE OKE T.R. (1987).....	13
FIGURE 4, STRUCTURE DE LA COUCHE LIMITE URBAINE ET RURALE DE JOUR ET DE NUIT EN CONDITIONS FAVORABLES A LA MISE EN PLACE DE L'ICU. ADAPTEE DE OKE T.R. (1987) ET HUFTY A. (1997).....	15
FIGURE 5, COMPARAISON DU BILAN ENERGETIQUE MOYEN ENTRE LA VILLE ("SUBURBAN") ET LA CAMPAGNE ("RURAL") SUR 24H, REPARTI SELON LES FLUX SUIVANTS : LE RAYONNEMENT NET (Q^*), LE FLUX DE CHALEUR SENSIBLE (Q_H), LE FLUX DE CHALEUR LATENTE (Q_E) ET LE FLUX DE CHALEUR STOCKEE (ΔQ_S). D'APRES OKE T.R., 1987).....	18
FIGURE 6, LES RAYONNEMENTS EN VILLE : GLOBAL (ABSORBE $K\downarrow$ ET REFLECHI $K\uparrow$) ET INFRAROUGE ATMOSPHERIQUE $L\downarrow$ ET TERRESTRE $L\uparrow$). D'APRES OKE T.R. (1987) ET ADAPTEE DE RINGENBACH N. (2009).....	18
FIGURE 7, LES FLUX DE CHALEURS EN VILLE : Q_H : CHALEUR SENSIBLE ; Q_E : CHALEUR LATENTE ; Q_F : CHALEUR ANTHROPIQUE ; ΔQ_S : CHALEUR STOCKEE. SELON OKE, T.R. (1987) ET ADAPTEE DE RINGENBACH N. (2009).....	20
FIGURE 8, LES FACTEURS SPATIO-TEMPORELS INTERVENANT SUR L'ICU ET LES ECHELLES IMPLIQUEES. ADAPTEE DE QUENOL H. (2006).	22
FIGURE 9, LE CONTEXTE TOPOGRAPHIQUE DE RENNES METROPOLE. SOURCES : IGN, SERVICE SIG RENNES METROPOLE (2011).	28
FIGURE 10, EVOLUTION DE LA TACHE URBAINE A RENNES METROPOLE DE 1982 A 2008. SOURCE : LETG RENNES COSTEL, AUDIAR (2009).	29
FIGURE 11, NORMALES CLIMATIQUES OBSERVEES A LA STATION RENNES ST-JACQUES [1981-2010]. SOURCE : METEO- FRANCE, 2013. REALISATION : FOISSARD X., 2015.	31
FIGURE 12, TEMPERATURE OBSERVEE A RENNES DEPUIS 1879 (DONNEES HOMOGENEISEES).	33
FIGURE 13, L'ENSEMBLE DES MESURES EST REALISE DANS LA CANOPEE URBAINE, UNE DES COUCHES COMPOSANT LA COUCHE DE SURFACE URBAINE, ADAPTEE DE OKE T.R. (2006).	40
FIGURE 14, SCHEMA CONCEPTUEL DE L'EMPREINTE POTENTIELLE DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN SUR UN CAPTEUR DE TEMPERATURE PLACEE A 2,6 M. ADAPTEE DE KJUNG ET AL. 2002 ; SCHMID 2002 ; VOOGT 2002 ; OKE 2006. A) VUE DU CAPTEUR A L'ECHELLE MICROLOCALE. B) VUE A L'ECHELLE LOCALE PAR ABSENCE DE VENT, L'AIRE DE L'EMPREINTE DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN SUR LE CAPTEUR EST REPRESENTEE PAR UN DISQUE ROUGE. C) VUE A L'ECHELLE LOCALE AVEC UN VENT IMPORTANT (SYMBOLISEE PAR UNE FLECHE NOIRE), L'AIRE DE L'EMPREINTE DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN SUR LE CAPTEUR EST REPRESENTEE PAR UNE ELLIPSE ROUGE.	44
FIGURE 15, PHOTOGRAPHIES DES DEUX MODELES DE STATIONS METEOROLOGIQUES UTILISEES. SOURCE : FOISSARD X., SEPTEMBRE 2010.	45
FIGURE 16, SCHEMA DU DISPOSITIF DES STATIONS METEOROLOGIQUES MIS EN PLACE. FIGURES EXTRAITES ET ADAPTEES DE DAVIS®	46
FIGURE 17, TABLEAU DES ECARTS DE TEMPERATURE ET D'HUMIDITE RELATIVE MESUREE PAR 5 STATIONS METEOROLOGIQUES AVEC LA STATION DE REFERENCE. EXTRAIT DE L'OUVRAGE VILLE ET BIODIVERSITE, (DUBREUIL ET AL. 2011).	48
FIGURE 18, SCHEMA D'INSTALLATION DU CAPTEUR TINYTAG TALK 2, ADAPTE DE GEMINI ET ONSET COMPUTER CORPORATION. PHOTOGRAPHIE : FOISSARD X., FEVRIER 2012.....	49
FIGURE 20, FREQUENCE DES INTERVALLES DE CONFIANCE A 95% MESURES PAR 18 CAPTEURS TINYTAG PENDANT 96H. ..50	50
FIGURE 19, FREQUENCE DES ECARTS A LA MEDIANE DE 18 CAPTEURS TINYTAG PENDANT 96H.	50
FIGURE 21, RESEAU DE STATIONS METEOROLOGIQUES IMPLANTEES LORS DU PROGRAMME ECORURB A PARTIR DE 2004 A RENNES. SOURCES : SERVICE SIG VILLE DE RENNES, LABORATOIRE LETG RENNES COSTEL.....	52
FIGURE 22, CLASSEMENT DES STATIONS METEOROLOGIQUES TRIEES PAR FRACTION DE SURFACES BATIES SELON LES TROIS GRANDS TYPES D'ESPACE : URBAIN, SUBURBAIN ET PERIURBAIN.....	53

FIGURE 22, CLASSIFICATION DES QUARTIERS PAR TYPOLOGIE DES BATIMENTS, EXTRAITS DE OKE T.R. ET STEWART I.D. 2011.....	55
FIGURE 23, VUES EN PERSPECTIVES ET PHOTOGRAPHIES DES CONTEXTES DES STATIONS METEOROLOGIQUES DU GRIFFON, DE LA BINQUENAI ET DES GALLET. PHOTOGRAPHIES : FOISSARD X., SEPTEMBRE 2010 (BINQUENAI ET GALLET) ET NOVEMBRE 2011 (GRIFFON).....	56
FIGURE 24, VUES EN PERSPECTIVES ET PHOTOGRAPHIES DES CONTEXTES DES STATIONS METEOROLOGIQUES DE LA BINQUENAI ET DES LICES.....	57
FIGURE 25, RESEAU DE STATIONS METEOROLOGIQUES IMPLANTEES LORS DE LA THESE A PARTIR DE 2010 ET LES STATIONS METEOROLOGIQUES DISPONIBLES A RENNES. SOURCES : SERVICE SIG VILLE DE RENNES, LABORATOIRE LETG RENNES COSTEL.....	59
FIGURE 27, RESEAU DE CAPTEURS DE LA CAMPAGNE DE MESURES INTRA-URBAINES A RENNES JUILLET-AOUT 2013. SOURCES : SERVICE SIG VILLE DE RENNES, LABORATOIRE LETG RENNES COSTEL.....	61
FIGURE 28, QUADRANTS NORD DU RESEAU DE MESURES INTRA-URBAIN A RENNES, EXTRAITS DE LA FIGURE 27.....	62
FIGURE 29, CLASSEMENT DES CAPTEURS DE TEMPERATURE INSTALLES DANS L'ESPACE INTRA-URBAIN A RENNES, TRIE PAR FRACTION DE SURFACES BATIES.....	63
FIGURE 30, QUADRANTS SUD DU RESEAU DE MESURES INTRA-URBAIN A RENNES, EXTRAITS DE LA FIGURE 15.....	64
FIGURE 31, LES TROIS RESEAUX DE CAPTEURS INSTALLES A L'ECHELLE DU QUARTIER A RENNES.....	65
FIGURE 32, RESEAU DE CAPTEURS TINYTAG INSTALLES A L'ECHELLE DE LA VILLE DE VEZIN-LE-COQUET.....	66
FIGURE 33, RESEAU DE CAPTEURS TINYTAG INSTALLES A L'ECHELLE DE LA ZAC DE BEAUREGARD. PHOTOGRAPHIES : FOISSARD X., JUILLET ET AOUT 2011.....	67
FIGURE 34, RESEAU DE CAPTEURS TINYTAG INSTALLES A L'ECHELLE DE LA ZAC LES LONGS CHAMPS. PHOTOGRAPHIES : FOISSARD X., JANVIER ET FEVRIER 2012.....	68
FIGURE 35, EXTRAITS DU SIG DU QUARTIER DE LA BELLANGERAIS A RENNES SELON TROIS SOURCES DISPONIBLES.....	78
FIGURE 36, SCHEMA SIMPLIFIE DU CALCUL DU SKY VIEW FACTOR SELON LE MODELE EN "BASSIN", ADAPTE DE T.R. OKE.....	79
FIGURE 37, SCHEMA DE DETERMINATION DU SVF SELON LA METHODE ANALYTIQUE, ADAPTE DE L. CHEN.....	79
FIGURE 38, DISPONIBILITES ET LACUNES DES STATIONS METEOROLOGIQUES DU RESEAU DE MESURES A RENNES EN 2011. ADAPTEE DE DUBREUIL V., 2010.....	81
FIGURE 39, TEMPERATURE DU 22 AU 23 MAI 2011 DE LA STATION RURALE (MELESSE), DE LA STATION URBAINE (GRIFFON) ET LA DIFFERENCE.....	82
FIGURE 40, EMPRISES DES ZONES TAMPONS OU SONT REALISES LES TRAITEMENTS STATISTIQUES DES INDICES D'OCCUPATION DU SOL POUR CHACUNE DES STATIONS METEOROLOGIQUES.....	83
FIGURE 41, SCHEMA DE SPATIALISATION A PARTIR DE L'ANALYSE DE L'OCCUPATION DU SOL APPLIQUEE SELON DEUX METHODES : L'UNE SUPERVISEE (EN A), LA SECONDE AUTOMATISEE ET EXHAUSTIVE (EN B).....	84
FIGURE 42, SCHEMA RECAPITULATIF DE LA VARIANCE DE CHAQUE ELEMENT : DE L'OBSERVATION A LA MODELISATION, ADAPTE DU GROUPE CHADULE.....	86
FIGURE 43, SCHEMA DE CONSTITUTION DES RASTERS DES FACTEURS D'OCCUPATION DU SOL.....	89
FIGURE 44, SCHEMA DE L'APPLICATION DE LA REGRESSION : EXEMPLE DE SPATIALISATION AVEC DEUX VARIABLES DESCRIPTIVES RETENUES.....	90
FIGURE 45, CARTE DES STATIONS ET CAPTEURS RETENUS POUR LA SPATIALISATION A L'ECHELLE INTRA-URBAINE A RENNES.....	92
FIGURE 46, DENDROGRAMME DE LA CAH DES TN OBSERVEES PAR LES STATIONS METEOROLOGIQUES A RENNES EN 2011. LA CAH DISTINGUE TROIS CLASSES : C1 (ASSIMILEE A L'ESPACE URBAIN), C2 (ASSIMILEE A L'ESPACE PERIURBAIN) ET C3 (ASSIMILEE A L'ESPACE SUBURBAIN).....	97
FIGURE 47, RESEAU DE STATIONS METEOROLOGIQUES A RENNES. LES CLASSES (Cx) SONT ISSUES DE LA CAH REALISEE A PARTIR DES TN OBSERVEE EN 2011.....	98
FIGURE 48, DISTRIBUTIONS DES ECARTS DES TEMPERATURES MINIMALES (°C) AVEC LA STATION RURALE MELESSE EN PRESENCE DE L'ICU EN 2011. CHOIX DES QUANTILES : Q1=25% ; Q2 = 50% ET Q3=75%).....	99
FIGURE 49, DENDROGRAMME DE LA CAH DES TN OBSERVEES EN CONDITION D'ICU PAR LES STATIONS METEOROLOGIQUES A RENNES EN 2011. LA CAH DISTINGUE TROIS CLASSES : C1 (ASSIMILEE A L'ESPACE URBAIN), C3 (ASSIMILEE A L'ESPACE SUBURBAIN) ET C2 (ASSIMILEE A L'ESPACE PERIURBAIN) COMPOSEE DE DEUX SOUS-CLASSES A ET B.....	100
FIGURE 50, RESEAU DE STATIONS METEOROLOGIQUES A RENNES EN 2011. LES CLASSES (CXX) SONT ISSUES DE LA CAH REALISEE A PARTIR DES TN OBSERVEE EN CONDITION D'ICU. ECARTS DES TN MOYENNE OBSERVEE EN CONDITION D'ICU AVEC LA STAION DE REFERENCE EN CAMPAGNE MELESSE (°C).....	101
FIGURE 51, REPARTITION DE L'ICU MOYEN OBSERVE EN 2011 SELON LA DISTANCE AU CENTRE-VILLE.....	103
FIGURE 52, DEGRES DE CORRELATIONS (R) DES FACTEURS DE L'OCCUPATION DU SOL (POUR L'ENSEMBLE DES ZONES TAMPONS) AVEC LES TEMPERATURES RESULTANT DE L'OBSERVATION DE L'ICU SELON TROIS CRITERES : L'ICU MOYEN EN 2011, L'ICU MOYEN LORS 8 JOURNEES SPECIFIQUES ET L'ICU OBSERVE LE 23 MAI 2011. N.B. : LES ZONES TAMPONS ONT POUR RAYON : 100M, 200M, 300M, 400M, 500M, 600M, 700M, 800M, 900M.....	104

FIGURE 53, MATRICE DE CORRELATION DE L'ICU MOYEN EN 2011 ET DES VARIABLES D'OCCUPATION DU SOL CORRELEES SIGNIFICATIVEMENT.....	105
FIGURE 54, RESULTATS DE TROIS REGRESSIONS LINEAIRES DE L'ICU MOYEN OBSERVE EN 2011.....	108
FIGURE 55, CARTE DE L'ICU MOYEN EN 2011 ISSUE DE LA REGRESSION AVEC LA VARIABLE SUIVANTE : B900 VEGETATION TOTALE.....	109
FIGURE 56, CARTE DE L'ICU MOYEN EN 2011 ISSUE DE LA REGRESSION AVEC LES VARIABLES SUIVANTES : B200 BATI ET B900 VEGETATION BASSE.....	110
FIGURE 57, CARTE DE L'ICU MOYEN EN 2011 ISSUE DE LA REGRESSION AVEC LES VARIABLES SUIVANTES : B200 BATI ET B900 SURFACES IMPERMEABLES.....	111
FIGURE 58, SCHEMA RECAPITULATIF DE L'AUTOMATISATION DE LA METHODE DE SPATIALISATION DE L'ICU SOUS LE LOGICIEL R ET DES PRINCIPALES FONCTIONS UTILISEES.....	113
FIGURE 59, REPARTITION DES VALEURS DES R^2_{AJ} . DES MODELES DE REGRESSION REALISES POUR LES 89 JOURS AVEC ICU EN 2011. CHOIX DES QUANTILES : $Q_1=25%$; $Q_2 = 50%$ ET $Q_3=75%$	114
FIGURE 60, CARTE ET RESIDUS DU MODELE DE SPATIALISATION DE L'ICU MOYEN OBSERVE A RENNES LORS DE 8 SITUATIONS OU L'ICU EST INTENSE EN MAI ET JUIN 2011.....	117
FIGURE 61, CARTE ET RESIDUS DU MODELE DE SPATIALISATION DE L'ICU OBSERVE A RENNES LE 23 MAI 2011.....	118
FIGURE 62, CARTES ET RESIDUS DES MODELES DE SPATIALISATION DE L'ICU MOYEN SELON LES QUATRE SAISONS DE L'ANNEE 2011.....	121
FIGURE 63, TEMPERATURE MESUREE (°C) DU 27 A 12H (UTC) AU 28 SEPTEMBRE 2011 A 12H PAR LA STATION EN CENTRE-VILLE (GRIFFON), LA STATION DE REFERENCE CAMPAGNE (MELESSE) ET LA DIFFERENCE.....	125
FIGURE 64, ECARTS DE TEMPERATURE INSTANTANES AVEC LA STATION MELESSE (REFERENCE « CAMPAGNE ») POUR CHAQUE POINT DE MESURES DES TRANSECTS ET DES STATIONS METEOROLOGIQUES (A L'HEURE DE PASSAGE). L'ENREGISTREMENT DU TRANSECT A-B (ORIENTE NORD - SUD) DEBUTE LE 27 SEPTEMBRE A 22H57 (UTC) ET SE CONCLUT A 23H23 LE 28 SEPTEMBRE 2011. L'ENREGISTREMENT DU TRANSECT C-D (SUD-OUEST – NORD-EST) DEMARRE A 23H49 ET SE TERMINE A 00H19. LE TRANSECT E-F (ORIENTE EST - OUEST) EST DECLENCHE A 01H10 ET ARRETE A 01H41.....	126
FIGURE 65, PROFILS THERMIQUES ET PAR TYPOLOGIE DES QUARTIERS TRAVERSES PAR LES TROIS TRANSECTS LA NUIT DU 27 AU 28 SEPTEMBRE 2011. LES STATIONS METEOROLOGIQUES SONT INDIQUEES ET RELEVES AU PASSAGE A PROXIMITE DE CELLES-CI.....	127
FIGURE 66, SCHEMA DU PROFIL THERMIQUE OBSERVE A RENNES SELON UNE TYPOLOGIE DE QUARTIERS, ADAPTE DE OKE T.R., 1987.....	129
FIGURE 67, EMPLACEMENT DES TROIS SITES ETUDIES A L'ECHELLE D'UN QUARTIER : UNE PETITE VILLE (VEZIN-LE-COQUET), UNE ZAC RECENTE (BEAUREGARD) ET UNE ZAC A PROXIMITE D'UN PARC (LONGS CHAMPS).....	130
FIGURE 68, ICU OBSERVE A LA ZAC BEAUREGARD LA NUIT DU 17 AU 18 AOUT 2012.....	131
FIGURE 69, TEMPERATURE RELEVEE SUR LES SITES DE LA ZAC BEAUREGARD DU 17 AU 18 AOUT 2012.....	132
FIGURE 70, ICU OBSERVE A LA ZAC LONGS CHAMPS LA NUIT DU 17 AU 18 AOUT 2012.....	133
FIGURE 71, ICU OBSERVE A LA ZAC LONGS CHAMPS LA NUIT DU 2 AU 3 FEVRIER 2012.....	135
FIGURE 72, TEMPERATURE RELEVEE SUR LES SITES DE LA ZAC LONGS CHAMPS DU 17 AU 18 AOUT 2012.....	135
FIGURE 73, ICU OBSERVE A VEZIN-LE-COQUET LA NUIT DU 17 AU 18 AOUT 2012.....	136
FIGURE 74, TEMPERATURE RELEVEE SUR LES SITES DE VEZIN-LE-COQUET DU 17 AU 18 AOUT 2012.....	137
FIGURE 75, ICU MOYEN DE 12 JOURS DURANT L'ETE 2013 SPATIALISE A PARTIR DES VARIABLES SUIVANTES B200 SVF ET B900 SURFACES IMPERMEABLES.....	140
FIGURE 76, QUALITES ET RESIDUS DES MODELES DE REGRESSION UTILISEES POUR LES 25 SITES D'OBSERVATION DE L'ICU (HEURE PAR HEURE) DE LA NUIT DU 14 AU 15 JUILLET 2013.....	142
FIGURE 77, QUALITES ET RESIDUS DES MODELES DE REGRESSION UTILISEES POUR LES 24 SITES D'OBSERVATION (SANS LE SITE DES PRAIRIES) DE L'ICU (HEURE PAR HEURE) DE LA NUIT DU 14 AU 15 JUILLET 2013.....	144
FIGURE 78, ICU OBSERVE ET SPATIALISE (HEURE PAR HEURE) DE 23H A 05H LA NUIT DU 14 AU 15 JUILLET 2013.....	145
FIGURE 79, ICU OBSERVE ET SPATIALISE (HEURE PAR HEURE) DE 23H A 05H LA NUIT DU 14 AU 15 JUILLET 2013.....	146
FIGURE 80, BILAN CLIMATIQUE DE L'ANNEE 2007 A RENNES.....	154
FIGURE 81, BILAN CLIMATIQUE DE L'ANNEE 2010 A RENNES.....	155
FIGURE 82, BILAN CLIMATIQUE DE L'ANNEE 2011 A RENNES.....	156
FIGURE 83, BOITE A MOUSTACHE DES ECARTS DE TEMPERATURES MINIMALES ENTRE LA STATION URBAINE GRIFFON ET DE ST JACQUES (METEO FRANCE) DES ANNEES 2007-2010-2011. CHOIX DES QUANTILES : $Q_1=25%$; $Q_2 = 50%$ ET $Q_3=75%$	158
FIGURE 84, ECARTS DES TEMPERATURES MINIMALES OBSERVEES ENTRE LES STATIONS GRIFFON (CENTRE-VILLE) ET ST-JACQUES (CAMPAGNE, METEO-FRANCE) EN FONCTION DU VENT MOYEN OBSERVE A ST-JACQUES EN 2007-2010-2011.....	158
FIGURE 85, ROSES DES VENTS OBSERVEES SELON DIFFERENTS ECARTS DE TEMPERATURES MINIMALES ENTRE LA STATION URBAINE GRIFFON ET RURALE ST-JACQUES SUR TROIS ANNEES 2007-2010-2011.....	159
FIGURE 86, L'ENSOLEILLEMENT (OU DUREE D'INSOLATION), LE RAYONNEMENT GLOBAL ET ICU QUOTIDIEN A RENNES EN AVRIL 2010.....	160

FIGURE 87, L'AMPLITUDE THERMIQUE ET L'ICU QUOTIDIEN A RENNES EN AVRIL 2010.....	161
FIGURE 88, BOITES A MOUSTACHES DES FACTEURS METEOROLOGIQUES QUOTIDIENS SELON 3 CLASSES D'INTENSITE D'ICU OBSERVE A RENNES EN 2010-2010-2011. LES BOITES A MOUSTACHES SONT CONSTRUITES SELON LES QUANTILES Q1, Q2 ET Q3.	162
FIGURE 89, RESULTAT DE LA REGRESSION LINEAIRE DE ΔT_n DECRIT PAR LE VENT MOYEN ET L'AMPLITUDE THERMIQUE POUR LES ANNEES 2007-2010-2011.	165
FIGURE 90, RESIDUS (EN ROUGE) ISSUS DU PREMIER MODELE (1) AVEC SA MOYENNE MOBILE DE 30 JOURS, TEMPERATURE MINIMALE (EN BLEU) AVEC SA MOYENNE MOBILE DE 30 JOURS DES ANNEES 2007-2010-2011.	166
FIGURE 91, RESULTATS DE LA MODELISATION PAR REGRESSION LINEAIRE DE L'EQUATION (2) SUR LES ANNEES 2007-2010- 2011.	167
FIGURE 93, LE R^2 AJUSTE ET L'ERREUR TYPE (RMSE) DU MODELE A TROIS VARIABLES PAR REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE APPLIQUE POUR CHAQUE MOIS DES ANNEES 2007-2010-2011. LES VARIABLES DESCRIPTIVES UTILISEES POUR LA REGRESSION MENSUELLE SONT NUMEROTEES (#).	169
FIGURE 92, RESULTATS DE LA VALIDATION CROISEE DU MODELE A TROIS VARIABLES SUR 90 OBSERVATIONS (SELECTIONNEES ALEATOIREMENT). POUR LA BOITE A MOUSTACHE, LE CHOIX DES QUANTILES EST Q1=25%, Q2=50% ET Q3=75%.	169
FIGURE 94, PROJECTION SUR L'ESPACE D'ETUDE DE LA GRILLE DE 8 KM DE RESOLUTION DE SORTIES DE MODELES PRODUIT PAR LE CERFACS.	173
FIGURE 95, COMPARAISONS DES SORTIES DU MODELE ARPEGE1 DU CERFACS, DE LA STATION ST JACQUES ET DE LA MAILLE SAFRAN SUR LA PERIODE 1981-2010. LES BOITES A MOUSTACHES SUIVENT LES QUANTILES SUIVANT : Q1=25%, Q2=50% ET Q3=75%. LES POINTS BLEUS INDIQUENT LA VALEUR MINIMUM ET MAXIMUM, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE.	175
FIGURE 96, COMPARAISONS DES SORTIES DU MODELE RETIC DU CERFACS, DE LA STATION ST JACQUES ET DE LA MAILLE SAFRAN SUR LA PERIODE 1971-2000. LES BOITES A MOUSTACHES SUIVENT LES QUANTILES SUIVANT : Q1=25%, Q2=50% ET Q3=75%. LES POINTS BLEUS INDIQUENT LA VALEUR MINIMUM ET MAXIMUM, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE.	176
FIGURE 97, PROJECTIONS DE L'ICU (ΔT_n , EN °C) A PARTIR DES MODELES ARPEGE1 (SCENARIO A1B) ET RETIC (SCENARIOS A1B ET A2) POUR TROIS PERIODES : ACTUELLE (1981-2010), L'HORIZON MOYEN (2040-2069) ET L'HORIZON LOINTAIN (2070-2099). LES BOITES A MOUSTACHES SUIVENT LES QUANTILES SUIVANT : Q1=25%, Q2=50% ET Q3=75%. LES POINTS BLEUS INDIQUENT LA VALEUR MINIMUM ET MAXIMUM, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE.	179
FIGURE 98, ICU (MOYEN DE 12 JOURS) PAR QUARTIER EN FONCTION DE TROIS INDICES : B200 SVF, B200 BATI ET B400 VEGETATION TOTALE. L'ICU EST ISSU DE LA CAMPAGNE DE MESURES INTRA-URBAINE DE L'ETE 2013. LES SEUILS DES TROIS INDICES SONT DEFINIES PAR L'ICU ($\Delta T_n=3^\circ\text{C}$).	187
FIGURE 99, LA ZAC BAUD-CHARDONNET ACTUELLE (2011 ET 2013), LE PROJET ENVISAGE ET L'EVOLUTION DE LA FRACTION D'OCCUPATION DU SOL.	191
FIGURE 100, EVOLUTION DU SKY VIEW FACTOR (SVF) ENTRE LA ZAC BAUD-CHARDONNET ACTUEL (2013) ET LE PROJET.	192
FIGURE 101, NOMBRE DE JOURNEES D'ETE ($T_x \geq 25^\circ\text{C}$) ET DE JOURNEES TRES CHAUDES ($T_x \geq 30^\circ\text{C}$) MOYEN ANNUEL OBSERVES A LA STATION ST JACQUES (METEO-FRANCE), OBSERVES PAR L'ANALYSE SAFRAN ET PROJETES PAR LES MODELES SUIVANT : ARPEGE1, RETIC ET ALADIN. LES PERIODES COMPAREES SONT : LA PERIODE DE CONTROLE (1961-1990), LA PERIODE ACTUELLE (1981-2010), L'HORIZON PROCHE (2021-2050) ET L'HORIZON LOINTAIN (2071- 2100). LES BOITES A MOUSTACHES SUIVENT LES QUANTILES SUIVANT : Q1=25%, Q2=50% ET Q3=75%. LES POINTS BLEUS INDIQUENT LA VALEUR MINIMUM ET MAXIMUM, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE.	194
FIGURE 102, DEGRES-JOURS UNIFIES CHAUFFAGISTE ET CLIMATICIEN DE 1961-1990, CALCULES POUR LA STATION ST JACQUES (METEO-FRANCE), L'ANALYSE SAFRAN ET LES MODELES REGIONALISES ALADIN, RETIC ET ARPEGE1. LES BOITES A MOUSTACHES SUIVENT LES QUANTILES SUIVANT : Q1=25%, Q2=50% ET Q3=75%. LES POINTS BLEUS INDIQUENT LA VALEUR MINIMUM ET MAXIMUM, LA CROIX ROUGE CORRESPOND A LA MOYENNE.	196
FIGURE 103, DJU (CHAUFFAGISTE ET CLIMATICIEN) A ST JACQUES ET PROJECTIONS DES DJU A PARTIR DU MODELE RETIC DE 1950 A 2100 POUR LES SCENARIOS A1B ET A2.	198
FIGURE 104, REPARTITION DES JOURNEES DE 2011 OBSERVEES A L'ECHELLE DE L'AGGLOMERATION RENNAISE SELON 7 INTERVALLES DE TEMPERATURES MINIMALES.	200
FIGURE 105, POPULATION DE PLUS DE 75 ANS ET ILOT DE CHALEUR URBAIN MOYEN EN 2011 A RENNES METROPOLE. SOURCE : DONNEES IRIS DE L'INSEE, 2011.	201

Liste des tables

TABLEAU 1, INFORMATIONS SIG DISPONIBLES ET MOBILISEES AUPRES DU SERVICE SIG DE LA VILLE DE RENNES.	76
TABLEAU 2, PROPORTION DE SERIES COMPLETES ET STATION METEOROLOGIQUE UTILISEE POUR LA RECONSTITUTION DES DONNEES MANQUANTES PAR REGRESSIONS LINEAIRES.	96
TABLEAU 3, OCCURRENCE DES VARIABLES UTILISEES POUR LES REGRESSIONS DES 89 JOURNEES AVEC DE L'ICU EN 2011.	114
TABLEAU 4, MATRICE DE CORRELATION ENTRE L'ICU MOYEN DE 12 JOURS LES FACTEURS D'OCCUPATION DU SOL LES PLUS CORRELES AVEC CELUI-CI. NOTE : PLUS DE DEGRE DE CORRELATION EST ELEVE, PLUS LA COULEUR EST FONCEE. .	138
TABLEAU 5, OCCURRENCE DES COUPLES DE VARIABLES RETENUE POUR LA MODELISATION DE L'ICU HEURE PAR HEURE POUR LA NUIT DU 14 AU 15 JUILLET 2013.	142
TABLEAU 6, OCCURRENCE DES COUPLES DE VARIABLES RETENUE POUR LA MODELISATION DE L'ICU HEURE PAR HEURE SANS LE SITE LES PRAIRIES, POUR LA NUIT DU 14 AU 15 JUILLET 2013.	144
TABLEAU 7, RECAPITULATIF DES MODELES REGIONALISEES ET DES SCENARIOS D'EMISSION DE GAZ A EFFET DE SERRE UTILISES.	172
TABLEAU 8, COMPARAISONS DE LA MODELISATION DE L'ICU A PARTIR DES SORTIES DES TROIS MODELES (ARPEGE1, RETIC ET ALADIN) ET LEUR PERIODE DE REFERENCE.	174
TABLEAU 9, MOYENNES ET DIFFERENCES DES SORTIES DU MODELE ARPEGE1 (SCENARIO A1B) POUR LES PERIODES : ACTUELLES, HORIZON MOYEN ET HORIZON LOINTAIN.	177
TABLEAU 10, MOYENNES ET DIFFERENCES DES SORTIES DU MODELE RETIC (SCENARIO A1B) POUR LES PERIODES : ACTUELLES, HORIZON MOYEN ET HORIZON LOINTAIN.	178
TABLEAU 11, MOYENNES ET DIFFERENCES DES SORTIES DU MODELE RETIC (SCENARIO A2) POUR LES PERIODES : ACTUELLES, HORIZON MOYEN ET HORIZON LOINTAIN.	178
TABLEAU 12, PROJECTIONS DE L'ICU (ΔT_n) MOYEN MENSUEL A PARTIR DES MODELES DE REGRESSION MENSUELS APPLIQUES AUX SORTIES DES MODELES ARPEGE1 (SCENARIO A1B) ET RETIC (SCENARIOS A1B ET A2) POUR TROIS PERIODES : ACTUELLE (1971-2000 ET 1981-2010), L'HORIZON MOYEN (2040-2069) ET L'HORIZON LOINTAIN (2070- 2099). LES ANOMALIES D'ICU MOYEN SONT CALCULEES A PARTIR DES PERIODES DE REFERENCES.	181
TABLEAU 13, CORRELATIONS ENTRE L'ICU MOYEN SUR 8 JOURNEES ET DES INDICES MORPHOMETRIQUES DE LA VEGETATION ENVIRONNANTES (900 M), POUR L'ENSEMBLE DES STATIONS METEOROLOGIQUES (AGGLOMERATION) ET POUR LES SEULES STATIONS INTRA-URBAINES.	189

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

PARTIE I : CONTEXTE ET METHODE DE MESURES SUR LE TERRITOIRE DE RENNES METROPOLE

Chapitre 1 : L'îlot de chaleur urbain.....	9
1.1. LA CLIMATOLOGIE URBAINE, UNE PREOCCUPATION ANCIENNE ET UNE DISCIPLINE RECENTE	9
1.1.1. <i>La climatologie urbaine.....</i>	<i>9</i>
1.1.2. <i>L'îlot de chaleur urbain.....</i>	<i>10</i>
1.2. PRINCIPES ET MECANISMES DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN.....	12
1.2.1. <i>Structure de l'atmosphère urbaine</i>	<i>13</i>
a) Profils thermiques.....	13
b) Influence de l'ICU sur les brises et les précipitations.....	14
1.2.2. <i>Le bilan énergétique en ville.....</i>	<i>16</i>
a) A l'origine : un bilan radiatif modifié.....	16
b) Le bilan énergétique en ville.....	17
c) Le bilan énergétique diurne	19
d) Le bilan énergétique nocturne.....	19
e) Bilan général en ville	19
1.2.3. <i>La variabilité spatio-temporelle de l'ICU.....</i>	<i>20</i>
Chapitre 2 : Le territoire rennais et le changement climatique	25
2.1. LE CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE DE RENNES METROPOLE	25
2.1.1. <i>Les 43 communes de Rennes Métropole : situation générale et dynamiques urbaines 25</i>	
a) Les découpages territoriaux.....	25
b) Le contexte topographique.....	26
c) La gestion de la dynamique démographique de l'aire urbaine rennaise : de l'étalement urbain à la densification des extensions urbaines.....	26
2.1.2. <i>Normales climatiques et types de temps à Rennes</i>	<i>29</i>
2.1.3. <i>Le changement climatique mesuré à Rennes.....</i>	<i>32</i>
2.2. LES MODELES REGIONAUX DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	34
2.2.1. <i>La régionalisation statistique : la méthode par régime de temps.....</i>	<i>35</i>
2.2.2. <i>La régionalisation dynamique.....</i>	<i>36</i>
2.2.3. <i>Les incertitudes des modèles régionalisés.....</i>	<i>36</i>
2.2.4. <i>Les nouveaux scénarios d'émission de gaz à effet de serre.....</i>	<i>37</i>
Chapitre 3 : Les réseaux de mesures : de l'échelle de l'agglomération à l'échelle des quartiers	39
3.1. LES MESURES EN MILIEU URBAIN	39
3.1.1. <i>Guides et recommandations.....</i>	<i>40</i>
a) Quelle est la représentativité de la station ?.....	41
b) L'équilibre entre les contraintes du site et les variables mesurées	42
3.1.2. <i>Le matériel.....</i>	<i>45</i>
a) Les stations météorologiques.....	45
b) Les capteurs de température.....	47
c) L'enregistreur de température à sonde thermocouple.....	48
3.2. UN RESEAU DE STATION METEOROLOGIQUE A L'ECHELLE DE L'AGGLOMERATION	51
3.2.1. <i>Le réseau de stations météorologiques du programme ECORURB.....</i>	<i>51</i>

a) Les sites urbains	53
b) Les sites suburbains.....	53
c) Les sites périurbains.....	54
3.2.2. <i>Les nouvelles stations météorologiques</i>	58
3.3. LE RESEAU DE MESURES A L'ECHELLE DES QUARTIERS	59
3.3.1. <i>Le milieu intra-urbain : campagne de mesures juillet-août 2013</i>	59
3.3.2. <i>Quelle est la variabilité à l'échelle d'un quartier ? Campagne de mesures 2012</i>	65
a) Une petite ville en périphérie de Rennes : Vezin-le-Coquet.....	65
b) Un nouveau quartier : la ZAC de Beauregard	67
c) Du plan d'eau, au parc urbain : la ZAC Longs Champs.....	67

PARTIE II : ANALYSES SPATIALES ET MODELISATIONS DE L'ILOT DE CHALEUR URBAIN

Chapitre 4 : Spatialisation de l'îlot de chaleur urbain à Rennes Métropole par analyses multicritères	73
4.1. L'ANALYSE SPATIALE DE L'ENVIRONNEMENT DES STATIONS.....	73
4.1.1. <i>Le choix de l'analyse statistique multivariée</i>	73
a) Les modèles numériques (ou l'approche déductive)	73
b) Les modèles empiriques (ou l'approche inductive).....	74
4.1.2. <i>L'occupation du sol sur le territoire de Rennes Métropole</i>	75
a) La base de données disponible par le service SIG de la ville de Rennes.....	75
b) L'apport de la télédétection pour la végétation	76
c) La constitution d'indices morphométriques à l'échelle intra-urbaine.....	76
4.2. SPATIALISATION PAR LA METHODE MULTICRITERE : LA REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE..	80
4.2.1. <i>La variable à expliquer : sélection des gradients thermiques à spatialiser</i>	80
4.2.2. <i>Les variables explicatives : construction des modèles de régression</i>	81
a) La construction du modèle de régression.....	81
b) La sélection supervisée	85
c) La sélection automatique : la procédure de sélection exhaustive	86
4.2.3. <i>L'application de la régression par « fenêtres glissantes »</i>	88
4.3. L'ILOT DE CHALEUR URBAIN : DE L'ECHELLE DE L'AGGLOMERATION A L'ECHELLE INTRA-URBAINE.....	91
4.3.1. <i>Le réseau de stations intra-urbaines : 13 stations météorologiques retenues</i>	91
4.3.2. <i>La campagne de mesures intra-urbaine de l'été 2013 : 23 points de mesures</i>	92
Chapitre 5 : Cartographie de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle de l'agglomération	95
5.1. TRAVAUX PREALABLES DE RECONSTITUTIONS DES LACUNES AUX SERIES DE TEMPERATURE MINIMALE DE L'ANNEE 2011.....	95
5.2. CLASSIFICATIONS CLIMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE DES STATIONS METEOROLOGIQUES	97
5.2.1. <i>CAH des températures minimales en 2011</i>	97
5.2.2. <i>CAH des stations météorologiques en situation d'ICU à Rennes</i>	99
5.3. RELATION ENTRE L'ILOT DE CHALEUR URBAIN ET L'OCCUPATION DU SOL.....	102
5.3.1. <i>Choix des régresseurs et applications des modèles de régression</i>	102
5.3.2. <i>Exercices préalables supervisés</i>	104
a) Modélisation de l'ICU en 2011 : modèle à une variable.....	104
b) Modélisation de l'ICU moyen en 2011 : modèle à deux variables	106
c) Modélisation de l'ICU moyen en 2011 : modèle à deux variables sélectionnées parmi des critères caractérisant les surfaces artificialisées	107
5.3.3. <i>Automatisation de la méthode et application</i>	112
5.4. ANALYSE SPATIALE DE L'ICU.....	115
5.4.1. <i>L'ICU observé à Rennes</i>	115
a) Spatialisation de l'ICU intense (moyenne de 8 jours)	115
b) L'ICU de la nuit du 23 mai 2011	115
5.4.2. <i>Comparaisons saisonnières</i>	119

Chapitre 6 :	L'îlot de chaleur urbain à l'échelle des quartiers : spatialisation et limites scalaires..	123
6.1.	LES MESURES MOBILES PAR TRANSECTS.....	123
6.1.1.	<i>Le protocole de mesures itinérantes.....</i>	123
6.1.2.	<i>L'îlot de chaleur urbain du 27 au 28 septembre 2011.....</i>	125
a)	Le transect A-B (nord-sud).....	126
b)	Le transect C-D (sud-ouest – nord-est).....	128
c)	Le transect E-F (est-ouest).....	128
d)	Interprétations et conclusions.....	128
6.2.	LES MESURES PONCTUELLES A L'ECHELLE D'UN QUARTIER.....	130
6.2.1.	<i>La ZAC de Beaugard.....</i>	131
6.2.2.	<i>Les Longs Champs.....</i>	132
6.2.3.	<i>Vezin le Coquet.....</i>	136
6.3.	SPATIALISATION DE L'ICU A L'ECHELLE INTRA-URBAINE.....	138
6.3.1.	<i>L'ICU moyen de l'été 2013.....</i>	138
a)	Méthode de spatialisation et analyses préalables des variables descriptives.....	138
b)	Modélisation de l'ICU moyen (sur 12 jours) et application du modèle de régression 139	
c)	La relation entre l'ICU et la typologie des quartiers : premières observations.....	140
6.3.2.	<i>Cartographie de l'îlot de chaleur urbain heure par heure : la nuit du 14 au 15 juillet 2013.....</i>	141
a)	Spatialisation avec l'ensemble des sites de mesures (25).....	141
b)	Spatialisation sans le site <i>Les Prairies</i>	142

PARTIE III : LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LES MOYENS D'ADAPTATION EN VILLE

Chapitre 7 :	Occurrence de l'îlot de chaleur urbain rennais et types de temps.....	151
7.1.	ANALYSE TEMPORELLE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN DES ANNEES 2007-2010-2011....	151
7.1.1.	<i>L'année 2007.....</i>	151
7.1.2.	<i>L'année 2010.....</i>	152
7.1.3.	<i>L'année 2011.....</i>	152
7.1.4.	<i>Caractérisation des types de temps par des facteurs météorologiques.....</i>	157
a)	Le vent.....	157
b)	L'ensoleillement et le rayonnement global.....	159
c)	L'amplitude thermique quotidienne.....	160
d)	Bilan.....	160
7.2.	L'ANALYSE INFRA-JOURNALIERE.....	161
7.2.1.	<i>Les données METAR.....</i>	161
7.3.	PREVISION DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN PAR REGRESSION LINEAIRE.....	163
7.3.1.	<i>Modèle à deux variables.....</i>	164
7.3.2.	<i>Modèle à trois variables.....</i>	164
7.3.3.	<i>Modèles quotidiens à trois variables, comparaison mensuelle.....</i>	168
Chapitre 8 :	Le changement climatique à Rennes : analyse et application des sorties de modèles	171
8.1.	ANALYSES DES SORTIES DE MODELES REGIONALISEES.....	171
8.1.1.	<i>Les modèles régionalisés selon la méthode des régimes de temps.....</i>	171
8.1.2.	<i>Analyses des modèles régionalisés : comparaisons des données SAFRAN et des observations de la station St-Jacques.....</i>	173
a)	Le choix des modèles de régionalisation par régimes de temps.....	173
b)	Comparaison des variables descriptives de l'ICU entre les sorties des modèles arpege1 et retic avec l'observation à St Jacques et SAFRAN.....	174
8.2.	APPLICATION DES MODELES DE REGRESSION DE L'ICU A RENNES.....	177
8.2.1.	<i>Analyse des facteurs météorologiques.....</i>	177
a)	Le modèle arpege1.....	177

b) Le modèle retic	177
8.2.2. <i>Application du modèle par régression à trois variables</i>	178
8.2.3. <i>Application du modèle mensuel par régression à trois variables</i>	180
Chapitre 9 : Les outils d'adaptation du territoire rennais à l'îlot de chaleur urbain	183
9.1. LES INDICES D'OCCUPATION DU SOL ET LEURS APPLICATIONS POTENTIELLES SUR LE TERRITOIRE DE RENNES METROPOLE	183
9.1.1. <i>Exemples et propositions vers l'aménagement d'une ville climatiquement intégrée</i>	183
a) Quelques exemples de villes précurseurs et éléments d'adaptation	183
b) Les outils du SCOT et du PLUI	185
9.1.2. <i>Fractions d'occupation du sol et Sky View Factor : les enseignements</i>	186
9.1.3. <i>Les descripteurs de la structure de la végétation</i>	188
9.1.4. <i>Applications du modèle de spatialisation à la ZAC Baud-Chardonnet</i>	189
9.2. L'EXPOSITION DE LA VILLE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	192
9.2.1. <i>Les vagues de chaleur à Rennes</i>	193
a) L'occurrence des « journées d'été » et des « journées très chaudes »	193
b) Les besoins énergétiques potentiels	196
9.2.2. <i>Les quartiers faces à l'îlot de chaleur</i>	199
a) L'exposition des quartiers aux températures minimales élevées : quels impacts sur la biodiversité en ville et sa gestion ?	199
b) L'exposition de personnes sensibles à l'ICU à Rennes.....	199
Conclusion générale	203
Bibliographie	207
Annexes	221
Liste des figures	229
Liste des tables	233

L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : APPLICATION A L'AGGLOMERATION RENNAISE

Résumé

L'urbanisation engendre, par l'imperméabilisation des surfaces et la présence de bâtiments, une modification locale du climat et, plus spécifiquement, le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Ce phénomène se traduit par l'augmentation de la température en ville la nuit. Lors des vagues de chaleur ce phénomène peut causer un inconfort voire une surmortalité. Dans le contexte du changement climatique et d'une dynamique démographique importante, la thèse est réalisée sur le territoire de Rennes Métropole. Au cours de cette thèse, plusieurs objectifs sont poursuivis. Dans un premier temps, l'étude porte sur l'analyse de la variabilité spatiale de l'ICU selon l'occupation du sol et des formes urbaines. Afin d'observer ce phénomène sur le territoire de Rennes Métropole, plusieurs réseaux de mesures sont mis en place. Le premier réseau concerne l'échelle de l'agglomération avec 22 stations météorologiques. Le second réseau est établi à l'échelle intra-urbaine avec l'installation de 20 capteurs de température. Enfin, le troisième réseau de mesures vise à observer la variabilité de l'ICU au sein de deux quartiers rennais et d'une petite ville, Vezin-le-Coquet. Dans un second temps, des modèles de spatialisation de l'ICU sont construits à l'échelle de l'agglomération, puis, à l'échelle intra-urbaine. Ces modèles permettent de réaliser des cartes de l'ICU pour ces deux échelles emboîtées. Dans un troisième temps, l'analyse temporelle est établie par la relation entre les types de temps et l'ICU. Cette analyse permet de construire un modèle de prévision de l'ICU quotidien. A partir de ce modèle, l'ICU quotidien est projeté par les sorties régionalisées des modèles du changement climatique. Plusieurs outils d'aide à la décision sont proposés à partir des modèles développés de l'ICU. L'exposition de l'agglomération rennaise au changement climatique est évaluée à partir des cartes de l'ICU et de plusieurs indices projetés par les sorties régionalisées des modèles du changement climatique.

Mots clés : îlot de chaleur urbain, changement climatique, Rennes Métropole, modèle statistique, climat urbain, station météorologique.

URBAN HEAT ISLAND AND CLIMATE CHANGE: APPLICATION TO RENNES METROPOLITAN AREA

Abstract

Urban development, characterized by the presence of buildings and impervious surfaces, modify the local climate and in particular, enhance the urban heat island (UHI). This phenomenon raises temperatures in cities at night, which could cause discomfort and over-mortality during heat waves. In the context of climate change and important population dynamics, this thesis is carried out in the *Rennes Metropolitan* area (in Brittany). Firstly, this thesis focuses on the spatial analysis of UHI variability according to land use and urban forms. To observe UHI in the *Rennes Metropolitan* area, a network of multiple measurement types were implemented at various scale. 1) a network of 22 permanents weather stations located in urban/rural sites; 2) a network of 20 temperature sensors placed in intra-urban area; and 3) a network of temperature measurements in two neighborhoods of Rennes and a small town, *Vezin-le-Coquet*. Secondly, spatial models of UHI were designed in this thesis at both the urban agglomeration and intra-urban scale. This multi-scale approach produced UHI map for these nesting-scales. Thirdly, this thesis determined the temporal variability of UHI by looking at the interaction between weather types and UHI. This analysis produced a statistical model of daily UHI magnitude according to meteorological observations. This model combined with data from downscaled climate change scenarios provided future projections of UHI. Lastly, this study deals with tools for town planning to prevent intensive UHI. UHI maps and downscaled climate change scenarios defined the risk assessment in the *Rennes Metropolitan* area.

Key words: urban heat island, climate change, Rennes Métropole, statistical model, urban climate, weather station.

Laboratoire LETG Rennes COSTEL, UMR 6554 CNRS OSUR
Université Rennes 2
Place du recteur Henri Le Moal, CS 24307,
35043 RENNES cedex, France

