



Université Paris-Est-Créteil

Master de Géographie « parcours Dynamique des Milieux et des Risques »

Analyse de la variabilité microclimatique urbaine au travers de la température et ses conséquences sur les communautés d'arthropodes

Alice Furet (21802824)

Sous la direction de Malika Madelin et d'Aline Garnier

Encadrants de stage : Hervé QuénoI et Vincent Dubreuil

Co-encadré par Valentin Cabon et Charlotte Brabant

Stage effectué au LETG dans l'Université Rennes 2

2022-2023

Table des matières

.....	1
Table des matières.....	3
Remerciements.....	5
Acronymes.....	6
Introduction.....	7
Partie 1 : La température urbaine : une variable sensible	8
I. Le climat urbain	8
1. Les échelles du climat.....	8
2. La couche urbaine de l'atmosphère	9
3. Dynamiques entre la température de l'atmosphère et de l'air au-dessus du sol.....	11
II. Le rôle de l'occupation du sol	13
1. L'occupation du sol : un facteur impactant les températures	13
2. La classification ou la typologie des <i>Local Climate Zones</i>	14
III. L'îlot de chaleur urbain (ICU).....	16
1. Qu'est-ce que l'îlot de chaleur urbain	16
2. Les études sur les îlots de chaleurs urbains dans l'agglomération rennais	17
IV. Présentation de la zone d'étude	22
1. Présentation générale	22
2. Le climat rennais.....	23
Partie 2 : Matériels et méthode utilisées	28
I. Design expérimental.....	28
1. Les 2 réseaux de stations.....	28
2. Présentation des sites choisis	30
II. Méthode.....	39
1. Les températures.....	39
2. Comparaison entre les températures atmosphériques et de surface.....	40
3. Occupation du sol.....	41
Partie 3 : Résultats	43
I. Les différences entre les températures atmosphériques et de surface sur la période des relevés	43
1. Variations temporelles.....	43
2. Variations spatiales.....	46
3. Relation entre les températures et l'occupation du sol.....	46
II. Les différences entre les températures atmosphériques et de surface sur de courtes périodes	

1. Variations temporelles.....	52
2. Variations spatiales.....	56
Partie 4 : Discussion des résultats	66
I. Les différences entre les stations atmosphériques et de surface sur la période des relevés ...	66
1. Variations temporelles et spatiales	66
2. Relations avec l'occupation du sol.....	67
II. Les différences entre les températures atmosphériques et de surface sur de courtes périodes	69
1.. Variations temporelles et spatiales	69
2.. Discussion des résultats sur l'ICU	69
Conclusion	71
Bibliographie.....	72
Table des figures.....	75
Table des tableaux	76
Résumé	77
Abstract	77
Annexe.....	78

Remerciements

Je remercie Hervé Quénot, Vincent Dubreuil et Charlotte Brabant pour leur accueil chaleureux au sein du LETG ainsi que pour leurs précieux conseils.

Je remercie particulièrement Valentin Cabon, qui m'a de nombreuses fois accompagnée et mise sur la bonne voie de la réalisation de cette étude.

Je remercie Malika Madelin et Aline Garnier de m'avoir encadrée.

Je remercie mes parents de leur soutien et leur patience.

Je remercie enfin Maelle Hevin et Matteo Yvars d'avoir découvert Rennes à mes côtés et de m'avoir soutenue.

Acronymes

CLA : Couche Limite de l'Atmosphère

CLU : Couche Limite Urbain

CS : Couche de Surface

ECOBIO : Ecosystèmes, Biodiversité, Evolution. Il s'agit d'un laboratoire géré par le CNRS, l'Université de Rennes et l'Observatoire de Rennes

ECORURB : Ecologie du Rural vers l'Urbain. Il s'agit d'un programme de recherche pluridisciplinaire mené par le CNRS, l'INRA, les Universités de Rennes 1 et 2 ainsi qu'Agrocampus Ouest

ICU : Ilot de Chaleur Urbain

LETG : Littoral, Environnement, Télédétection et Géomatique. Il s'agit d'un laboratoire géré en partie par le CNRS et l'Université Rennes 2

ONU : Organisation des Nations Unies

Introduction

Depuis le milieu du XIX^e siècle l'augmentation de la population mondiale s'accompagne d'un exode rural toujours en cours. Cette augmentation soudaine de la démographie urbaine, accompagnée de l'intensification des activités industrielles ont forcé les villes à s'étendre et à se développer. En 2014, l'ONU comptait 54 % de la population mondiale vivant dans une zone urbaine. D'après les prédictions, ce chiffre serait amené à atteindre 66 % en 2050 (Nations Unies). La concentration d'activités humaines (chauffage, transports, industrie, etc.) et de surfaces artificialisées dans les zones urbaines provoque un réchauffement des températures moyennes, qui contraste par rapport aux conditions thermiques rurales plus froides. Cela est dû à un phénomène climatique propre aux villes : les îlots de chaleur urbain (ICU).

Aggravée par des vagues de chaleurs plus nombreuses et intenses suite au réchauffement climatique, l'intensification des ICU pose de nombreux problèmes sanitaires. En effet, de nombreuses études se sont intéressées aux liens entre une hausse de la mortalité et des températures urbaines particulièrement élevées, lors de la canicule de 2003. En revanche un nombre bien plus réduit d'études s'intéresse aux effets de ce réchauffement sur les espèces animales des villes. Si des études montrant un lien entre réchauffement urbain et phénologie chez les arbres ont émergé ces dix dernières années encore peu d'études ont mesuré l'impact de ce réchauffement sur la faune, notamment à une échelle fine correspondant aux d'organismes de taille réduite, comme les arthropodes. La température de l'air à l'échelle microlocale, mesurée juste au-dessus de la surface du sol, est une variable encore peu étudiée en climatologie urbaine, pourtant déterminante pour un grand nombre d'organismes. S'il est bien connu que les températures de surface (mesurées par imagerie thermique) et les températures atmosphériques diffèrent significativement, les relations entre température de l'air au niveau de la surface et la température atmosphérique (communément mesurée à une hauteur de deux mètres au-dessus de la surface) sont beaucoup moins renseignées. Ces températures microlocales peuvent être influencées par la température atmosphérique, mais aussi par l'occupation du sol à fine échelle.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un stage au laboratoire LETG (Université Rennes 2) ayant pour sujet l'analyse de la variabilité microclimatique urbaine au travers de la température et ses conséquences sur les communautés d'arthropodes. Ce mémoire a été réalisé en lien avec les thèses de Valentin Cabon (ECOBIO et LETG), portant sur l'effet de la variabilité microclimatique sur la faune en milieu urbain dans un contexte de changement climatique, et de Charlotte Brabant, portant sur l'étude par télédétection des interactions entre îlots de chaleur urbain et phénologie végétale de la ville.

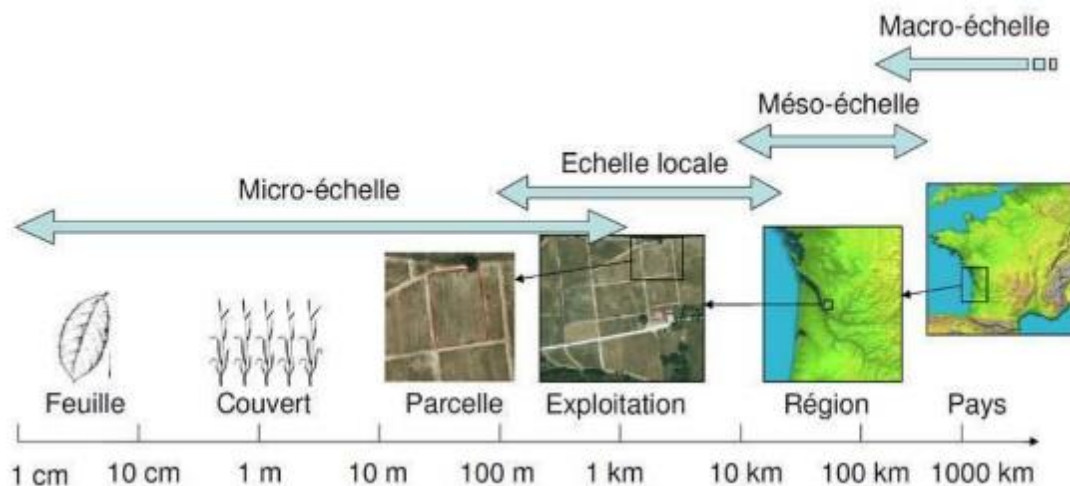
Les données étudiées ont été recueillies dans le cadre de ces deux thèses, et proviennent de deux réseaux de capteurs de températures, déployés sur le même territoire, mais à deux échelles distinctes : à l'échelle locale avec des données de températures atmosphériques (mesurées deux mètres au-dessus du sol) et à l'échelle microlocale avec des données de températures de l'air en surface (mesurées deux centimètres au-dessus du sol). Le stage compte trois objectifs. Premièrement, nous souhaitons comparer les variabilités temporelles et spatiales des températures acquises aux deux échelles. Le deuxième objectif s'articule autour des mêmes enjeux, mais au regard de données d'ICU, dérivées des données brutes. Enfin, le troisième objectif consiste à déterminer s'il existe un effet des facteurs microlocaux d'occupation du sol, sur les températures microlocales et ICU associés.

Partie 1 : La température urbaine : une variable sensible

I. Le climat urbain

1. Les échelles du climat

Pour étudier le climat d'une ville, il est important de se positionner sur le choix de l'échelle de l'étude car diverses possibilités sont disponibles. En effet, plus l'échelle se réduit, plus le nombre de facteurs influençant le climat augmente (Quénol, 2002). Il est difficile de bien déterminer une distance pour chaque échelle puisque chaque auteur en présente une différente, mais on peut définir les différentes échelles de climats comme ceci (Figure 1) :



Source : Cambertin

Figure 1 : Les différentes échelles du climat

Tout d'abord la macro-échelle, qui représente l'échelle du pays (+ 200 km) (Pincebourde et Woods, 2020). A cette distance on retrouve les principaux climats du globe impactés par la latitude (tempéré, polaire, tropical...).

La méso-échelle s'applique lorsqu'on étudie le climat à l'échelle régionale (quelques centaines de kilomètres à quelques dizaines de kilomètres). On y retrouve les climats impactés par la circulation atmosphérique et les principaux phénomènes météorologiques (tempêtes, pluies, brise de la mer...) (Anderson *et al.*, 2021 ; Wong *et al.*, 2020 ; Quénol, 2012 ; Quénol, 2002).

Ensuite, on retrouve l'échelle locale qui détermine le climat à l'échelle de la ville (quelques kilomètres à quelques dizaines de mètres). Le climat local est lié au climat régional mais il est modifié par la topographie, la forêt, les lacs et cours d'eau, la géométrie des villes et bien sûr par l'activité anthropique (*ibid*).

Enfin l'échelle microclimatique est consacrée au microclimat. C'est une échelle très fine qui peut aller de quelques dizaines de mètres à quelques centimètres. Il s'agit du climat à l'échelle du sol. Il dépend

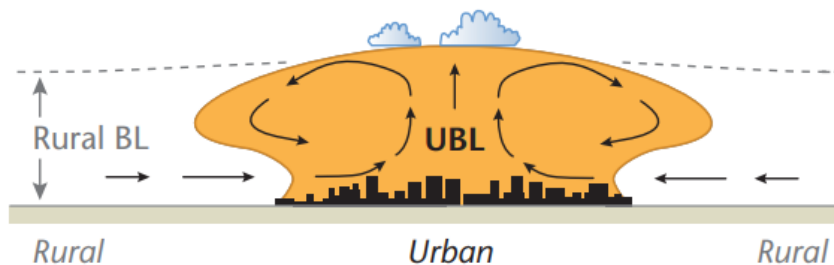
du climat des échelles supérieures mais il est modifié par des perturbations à fine échelle, par exemple par un bâtiment ou une haie brise-vent (Anderson *et al.*, 2021 ; Wong *et al.*, 2020 ; Lauffenburger, 2010 ; Quénol, 2002). Cette résolution est utilisée dans le cas d'étude sur des espèces animales (insectes), végétales et autres micro-organismes (Pincebourde et Salle, 2020 ; Lembrechts *et al.*, 2019 ; Potter *et al.*, 2013).

2. La couche urbaine de l'atmosphère

La partie la plus basse de l'atmosphère s'intitule la couche limite de l'atmosphère (CLA) (Oke *et al.*, 2017). Elle s'étend entre 100 et 3000 m de hauteur et impacte le mélange thermique, l'humidité et les polluants atmosphériques (*ibid*). La partie inférieure de la couche limite de l'atmosphère se nomme la couche de surface (CS). Cette couche exerce une influence directe sur la surface terrestre car elle permet son réchauffement et son refroidissement (*ibid*). En ville, la chaleur et les polluants émis par celle-ci se situent au-dessus de la zone urbaine : il s'agit de la couche limite urbaine (CLU). L'ICU au niveau de la CLA est caractérisée par de l'air plus chaud. Cette différence entre l'air chaud de la ville et l'air rural plus frais engendre des vents locaux comme la brise de campagne (Fallot *et al.*, 2008). On retrouve deux formations de la CLU : soit il n'y a pas de vent ambiant rural et la CLU forme un « dôme urbain » au-dessus de la zone urbaine ; soit le vent rural déplace la CLU qui peut se faire ressentir jusqu'à des centaines de kilomètres plus loin dans la campagne (dans le cas d'une grande zone urbaine) et forme une « Plume urbaine » (Oke *et al.*, 2017) (Figure 2).

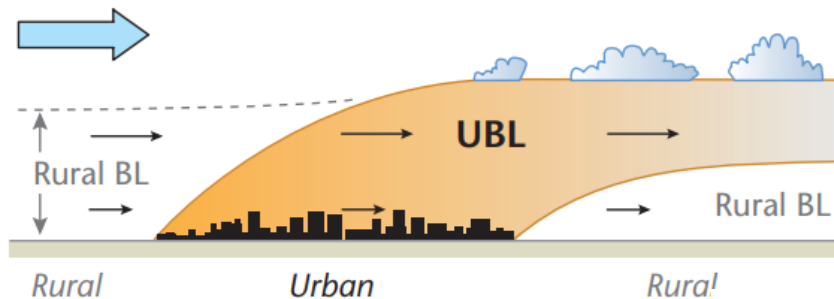
(a) Urban 'dome'

No ambient wind



(b) Urban 'plume'

Ambient wind



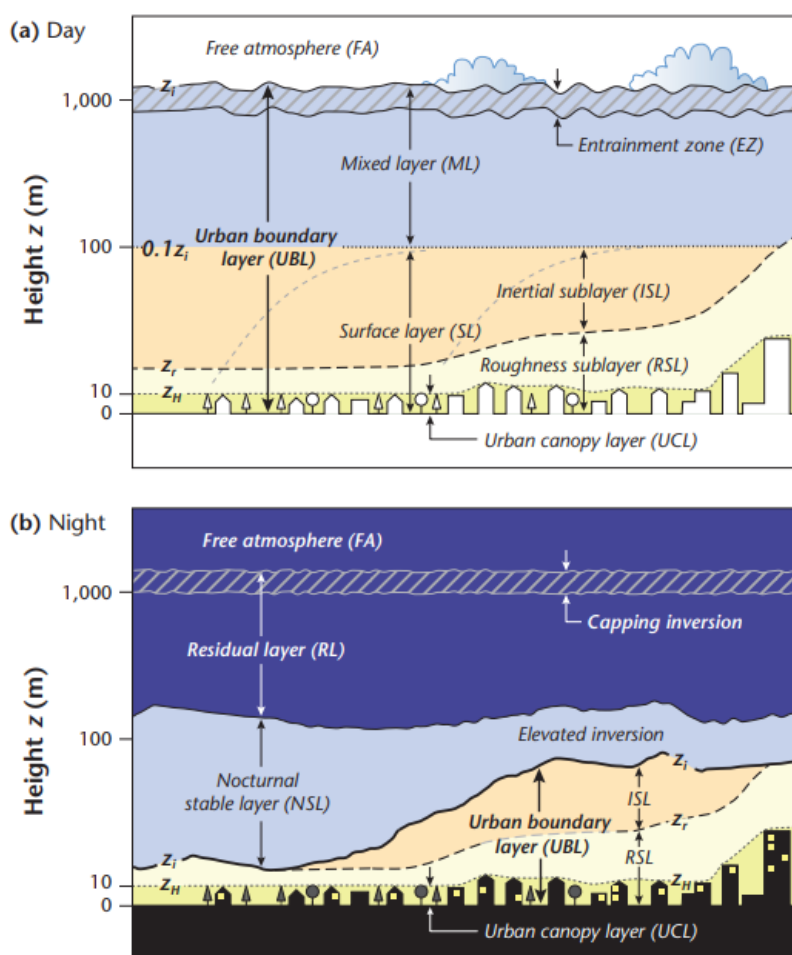
Source : Oke *et al.*, 2017

Figure 2 : Formes générales typiques des couches limites urbaines à mésoéchelle

a. « Dôme » urbain formé lorsque le vent régional est calme

b. « Plume » urbaine formé lorsque le vent régional est fort

La CLU se forme à partir de la limite de la ville. Sa limite inférieure se nomme la canopée urbaine et se positionne sous les toits (Oke, 1987). Au-dessus de la CLU se forme un « panache urbain », constitué des apports thermiques et humides ainsi que des polluants provenant de la ville qui peuvent être transportés par le vent dans le cas d'une « plume urbaine » (Oke *et al.*, 2017). Ce rejet de polluants favorise notamment la nébulosité et les précipitations au-dessus des villes (Fallot *et al.*, 2008). La couche de surface constitue une partie de la CLU et est elle-même séparée en deux couches : la sous-couche inertielle et la sous-couche de rugosité (Oke *et al.*, 2017) (Figure 3). Cette dernière sous-couche est directement perturbée par la nature urbaine (*ibid*). En effet, si par exemple la ville comporte des bâtiments hauts, alors la sous-couche de rugosité prendra une plus grande proportion dans la couche de surface (*ibid*). La partie supérieure de la CLU est la limite mixte, qui comporte tous les polluants émis par la ville dans la journée. Durant le jour, la CLU est épaisse car l'air est plus turbulent, notamment à cause de la rugosité, du réchauffement des différentes surfaces... (*ibid*). En revanche la nuit la CLU est plus basse car il y a moins d'échanges thermiques et de vent.



Source : Oke *et al.*, 2017

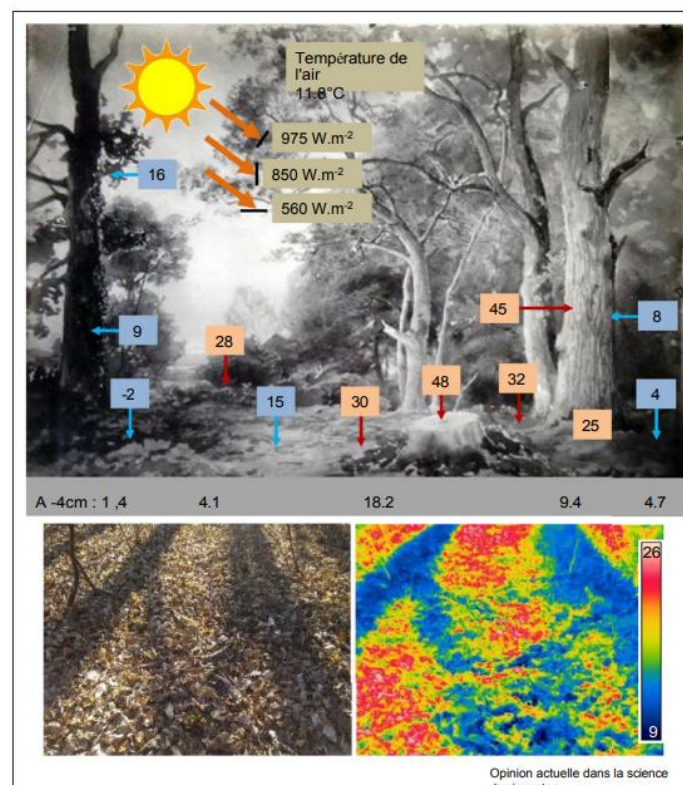
Figure 3 : Etalement typique de l'atmosphère au-dessus de la ville. a. en journée et b. la nuit

Ainsi la CLU entraîne des répercussions sur le climat urbain, notamment sur les précipitations et la température qui est plus élevée qu'en milieu rural. Elle joue également un rôle sur la circulation de l'air et la dispersion des polluants émis par la zone urbaine.

3. Dynamiques entre la température de l'atmosphère et de l'air au-dessus du sol

De nombreuses études s'intéressent à la comparaison dans différents microhabitats entre la température de l'air (mesurée entre 1,5 m et 3 m de hauteur) et la température au-dessus du sol (Pincebourde et Woods, 2020). De multiples facteurs génèrent des différences de température entre l'air et le sol. Par exemple, la surface du sol est plus sensible au rayonnement solaire et à la nébulosité, contrairement à la vitesse du vent qui y est plus faible par rapport à l'air à 2 m de hauteur (Pincebourde et Salle, 2020; Sears *et al.*, 2011). La température au niveau du sol est très hétérogène. Elle est impactée par l'ensoleillement, la topographie, la couverture végétale et l'évapotranspiration, par la composition du sol et le type de roche (Pincebourde et Woods, 2020; Pincebourde *et al.*, 2016). Cette température est souvent plus élevée et bien différente de la température de l'air (Pincebourde et Woods, 2020).

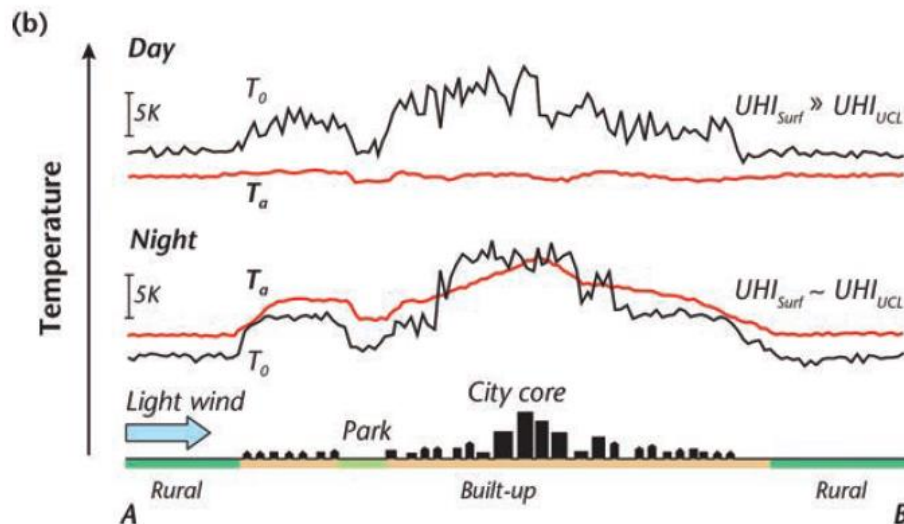
Les variations de température de la surface sont plus importantes que celles à proximité du sol, à l'échelle temporelle et spatiale. Pour donner un exemple, la température atmosphérique possède une variation assez faible à l'échelle d'une journée contrairement à la température de la surface qui peut dépasser les 30°C de différence entre le jour et la nuit (Renard et Alonso, 2020). Dans le cas de l'échelle spatiale, la température de l'air au niveau du sol est bien plus variable que celle de l'atmosphère (Pincebourde et Salle, 2020). En effet des capteurs situés à quelques dizaines de centimètres d'écart peuvent enregistrer des différences de plusieurs degrés (*ibid*). Pour donner un exemple, la température d'une feuille peut varier de quelques degrés en quelques centimètres en fonction de sa microtopographie, de l'effet du vent et de la stomate de la feuille (Pincebourde *et al.*, 2016). Ainsi, un arthropode est sujet à une grande variation de température sur une courte distance (*ibid*). La figure 4 illustre bien ce propos puisqu'alors que la température atmosphérique est de 11,8°C, la température au sol varie de 30°C au soleil à -2°C à l'ombre.



Source : Pincebourde et Woods, 2020

Figure 4 : Ecart de la température de l'air à la surface à travers un microhabitat (mesures effectuées le 3 mars à 1976 à 4 cm du sol)

La nature et la géométrie des villes jouent un rôle important dans la température que ce soit à l'échelle locale et microlocale. En milieu urbain à l'échelle locale, la température de l'air est en moyenne de 3°C supérieure par rapport à la température rurale (Pincebourde *et al.*, 2016). Les températures de l'air à la surface sont aussi plus importantes en zone urbaine et diminuent à mesure que l'on s'éloigne du centre-ville, mis à part pour les îlots de végétation qui ont un effet rafraîchissant (*ibid*). La figure 5 montre la différence de variabilité entre la température de l'atmosphère et la température de l'air à la surface sur l'échelle spatiale, selon le jour et la nuit. La variabilité de la température de surface est plus importante selon le changement d'occupation du sol par rapport à la température de l'atmosphère (par exemple entre un parc et une zone densément bâtie).



Source : Oke *et al.*, 2017

Figure 5 : Exemple de la différence de température entre l'atmosphère (ligne rouge) et l'air au niveau du sol (ligne noire) selon le changement d'occupation du sol

Ainsi, la température microlocale est très hétérogène puisqu'elle est impactée par de nombreux facteurs : la géométrie des villes, les apports thermiques et radiatifs, l'humidité et enfin l'aérodynamisme avec le vent (Oke *et al.*, 2017). Il pourrait être intéressant de se préoccuper plus précisément de l'effet de l'occupation du sol sur les températures, qu'elles soient locales et microlocales.

II. Le rôle de l'occupation du sol

L'anthropisation est un facteur important jouant sur la température. En effet, les activités anthropiques, notamment les activités industrielles, la consommation domestique (chauffage, gaz, électricité...) et les transports sont responsables du CO₂ émis dans l'atmosphère qui occupent une grande place dans l'effet de serre additionnel (Beltrando, 2016; Dubreuil *et al.*, 2011). Mais l'activité humaine n'est pas l'unique facteur affectant la température : la morphologie de la ville possède de nombreux aspects qui sont à prendre en compte dans l'étude de la température.

1. L'occupation du sol : un facteur impactant les températures

Un milieu urbain est un système complexe composé d'une multitude de matériaux qui possèdent chacune des propriétés radiatives, humides, thermiques et aérodynamiques qui leur sont propres (Oke *et al.* 2017). Ces différentes facettes créent donc une abondance de microclimats dans une même ville. Voici les principales occupations du sol qui jouent un rôle important pour la température à l'échelle locale et microlocale (Oke *et al.* 2017; Yang *et al.* 2016; Levy 2016) :

- La densité et la forme du bâti

Un tissu urbain développé notamment au niveau de la verticalité du bâti réfléchit davantage les rayonnements solaires. De plus, cette morphologie modifie la circulation atmosphérique. Ainsi le vent est freiné, dévié et canalisé entre les bâtiments, par exemple l'effet Venturi (Hu *et al.*, 2016). Les différents types du bâti n'ont pas le même effet sur la température. L'étude de Renard et Alfonso (2020) a, par exemple, mesuré une température diurne de surface plus basse au milieu de bâti dispersé et ouvert à l'inverse du bâti compact.

Une morphologie urbaine particulière est à retenir en raison de son abondance, notamment en centre-ville : il s'agit du « canyon de rue ». Il se définit par deux rangées de bâtiments parallèles, relativement hauts, qui bordent une rue et est souvent présent dans les zones densément peuplées (Oke *et al.* 2017; Bright, Bloss, et Cai 2013). Comme il s'agit d'une rue étroite avec des bâtiments hauts, le vent y est canalisé, l'ombrage y est important mais surtout le rayonnement solaire se réfléchit sur les multiples façades et provoque des réflexions multiples (Battista *et al.*, 2021). Ainsi, tout comme pour les polluants émis par les voitures (Caton *et al.*, 2003), la chaleur se retrouve emprisonnée dans la rue et ne s'évacue pas. Le canyon de rue est donc un « piège thermique » qui maintient un air surchauffé par rapport à un espace ouvert, notamment la nuit (Battista *et al.*, 2021).

- Une occupation du sol imperméable et sombre

Les surfaces imperméables et sombres possèdent un albédo faible, c'est-à-dire que leur pouvoir réfléchissant des rayonnements solaires est faible, l'énergie est moins réfléchie, donc plus absorbée et possède un pouvoir réchauffant important la nuit (Hu *et al.*, 2016; Dubreuil *et al.*, 2011).

- La surface végétalisée et les plans d'eau

Ces occupations du sol ont un pouvoir rafraîchissant : l'eau possède un albédo faible et la végétation, avec son effet d'évapotranspiration, rafraîchit l'air. Ces occupations du sol sont plus rares en milieu

urbain que rural. Dans une ville, elles forment ce qu'on appelle des « îlots de fraîcheur » (Foissard, 2015).

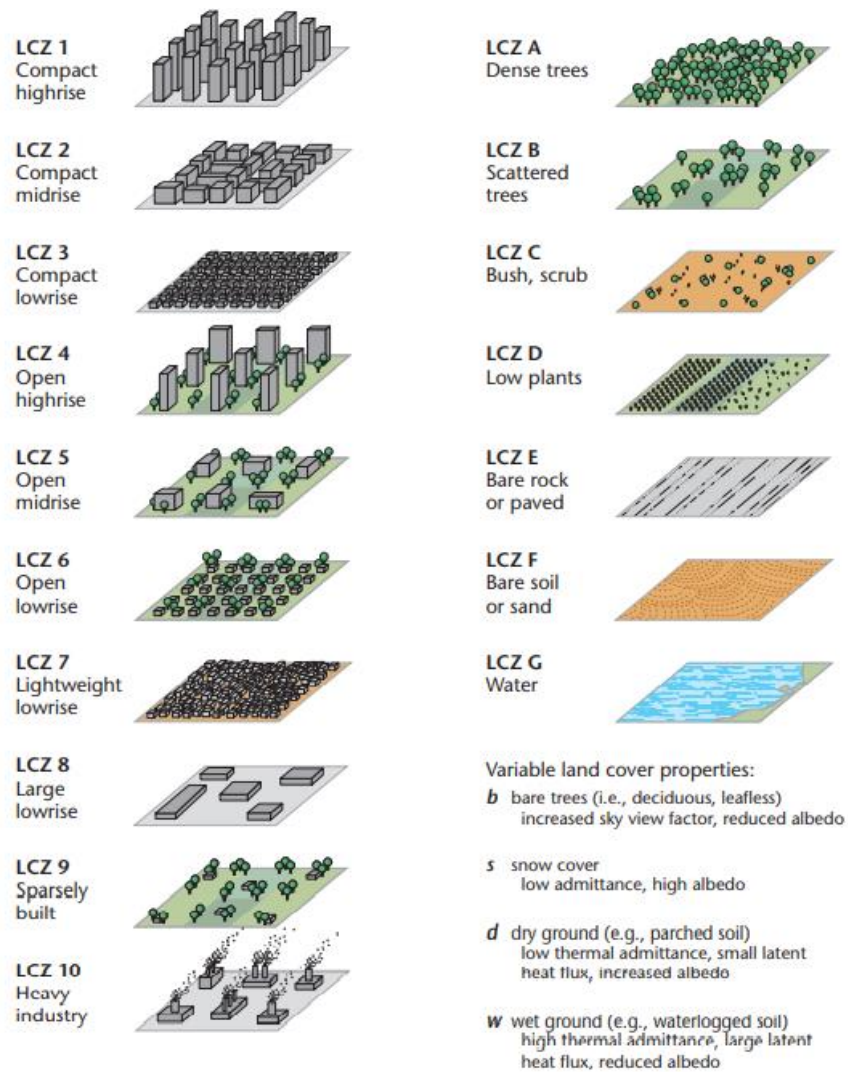
La végétation rafraîchit la température à plusieurs niveaux. Par exemple, l'étude de Renard et Alonso (2020) a déterminé qu'une strate arborée (dense ou clairsemée) possède un effet plus rafraîchissant qu'une strate herbacée. Une surface située sous un ombrage issu d'un couvert végétal peut voir sa température réduite de 5°C par rapport à l'air ambiant (Pincebourde et Woods 2020). Cet écart de température microlocal peut être encore plus important avec une végétation rase ou un sol nu (Renard et Alonso, 2020).

L'eau présente dans le sol permet non seulement une meilleure diffusion de la chaleur en son sein, mais permet aussi, via l'évapotranspiration de la chaleur latente, de refroidir la température de la surface le jour (Oke, 1987).

En résumé, un paysage urbain se définit par la présence de bâtiments tridimensionnels (qui absorbent les rayonnements et limitent la circulation de l'air), l'usage de matériaux denses, la diminution du couvert végétal ainsi que la concentration des activités humaines qui causent de la chaleur supplémentaire (Pincebourde et al. 2016).

2. La classification ou la typologie des *Local Climate Zones*

Définie par Stewart et Oke en 2012, la typologie des *Local Climate Zones* (LCZ) est une manière de classer l'occupation du sol en milieu urbain selon 3 critères : la couverture du sol (imperméable, végétalisée, plan d'eau...), la dimension et l'espacement des éléments urbains (hauteur, largeur et proximité) et la structure de ces éléments (étages, matériaux de construction, design...). Ce sont ces trois critères qui vont définir la capacité radiative et la circulation de l'air. Ainsi Stewart et Oke (2012) ont pu mettre en place une classification basée sur ces critères, allant pour les constructions du LCZ 1 (Bâtiments hauts et compacts) au LCZ 10 (industrie) et du LCZ A (arbres denses) au LCZ G (eau) (Figure 6). (Stewart et Oke 2012)



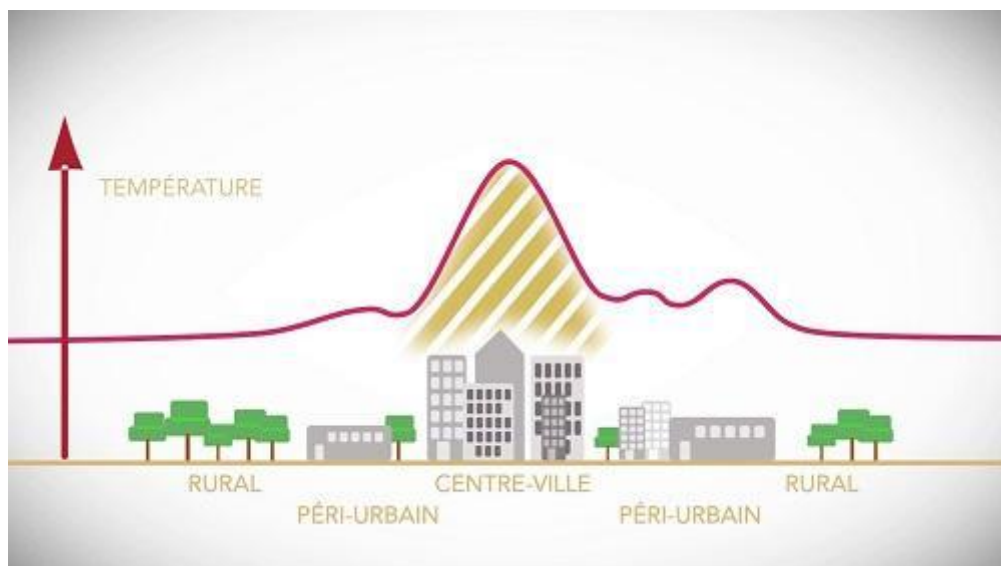
Source : Oke *et al.*, 2012

Figure 6 : Classification des Local Climat Zones

III. L'îlot de chaleur urbain (ICU)

1. Qu'est-ce que l'îlot de chaleur urbain

L'Îlot de Chaleur Urbain (ICU) est un phénomène climatique nocturne marqué par une différence de température supérieure entre le centre-ville et la campagne proche (Figure 7) (Oke et al. 2017), autrement dit, la différence entre une zone densément peuplée et une zone rurale (Levy 2016). L'ICU est majoritairement dû aux rayonnements solaires captés par la morphologie de la ville et le matériel utilisé, dont l'énergie est stockée durant la journée et est restituée la nuit, ce qui provoque ainsi un réchauffement de la température de l'air (Levy, 2016; Stewart et Oke, 2012; Dubreuil *et al.*, 2011). L'écart des températures est essentiellement ressenti durant l'été, notamment entre avril et septembre (V. Dubreuil et al. 2020) mais il est aussi présent, dans une moindre mesure, l'hiver, en raison de l'utilisation du chauffage et autres consommations anthropiques en ville et de l'évapotranspiration de la végétation dans les milieux ruraux. L'ICU moyen annuel entre le centre-ville et la campagne proche est compris entre 2 et 3 °C, mais il peut atteindre 8 à 10°C lors d'une vague de chaleur (Levy 2016).



Source : ©Cerema

Figure 7 : Exemple typique d'un ICU entre le centre-ville et la campagne proche

Un ICU fort nécessite des conditions climatiques particulières pour pouvoir se former. Tout d'abord un vent dominant faible. En effet le vent pourrait homogénéiser la température de l'air en le brassant. Néanmoins, des rafales fortes peuvent « déplacer » l'ICU qui peut alors se faire ressentir à des kilomètres vers la campagne (Yang *et al.*, 2016; Vincent Dubreuil *et al.*, 2011). Le second facteur est un ciel clair et une absence de précipitation qui rafraîchit la température de l'air. Un ciel nébuleux, tout comme pour le vent, est moins favorable à la formation d'un ICU car il ne remplit pas les conditions radiatives contrairement à un ciel dégagé (Foissard *et al.*, 2013). L'exemple de la figure 8 dévoile les moments où les conditions sont réunies pour la formation d'un ICU à savoir une partie de la première nuit. S'en est suivi une météo défavorable qui a rafraîchi la température jusqu'au jour suivant, même si une météo optimale a été présente le reste de la nuit.

Facteurs de la variabilité temporelle de l'ICU



Source : Dubreuil *et al.*, 2011

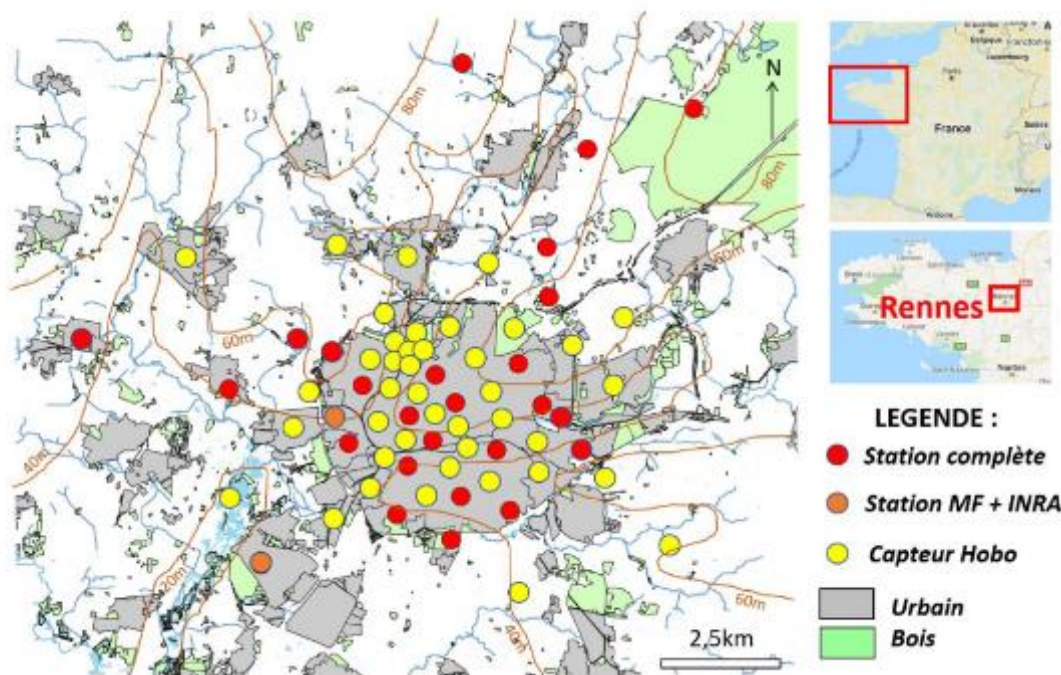
Figure 8 : Schéma présentant les facteurs de la variabilité temporelle de l'ICU

2. Les études sur les îlots de chaleurs urbains dans l'agglomération rennaise

2.1. Le réseau de stations

Rennes est la première ville moyenne de France à faire l'objet d'une étude sur son ICU. Cette étude est issue du programme de recherche ECORURB (écologie rurale et urbaine) (Vincent Dubreuil *et al.*, 2022). En 2004, le premier réseau de stations météorologiques est installé. 12 stations d'appareils *Weather Monitor II*, puis 22 progressivement remplacées par des stations *Vantage Pro 2* de *DAVIS Instrument*, sont posées dans Rennes et ses alentours (*ibid*). Ces stations ne sont ni connectées ni automatiques, c'est-à-dire qu'il faut régulièrement vérifier tout le réseau afin de récupérer les données et prévenir d'éventuels problèmes techniques. Il faudra attendre 2016 pour que le réseau devienne progressivement automatique avec un accès aux données directement par internet (V. Dubreuil *et al.* 2020).

En 2019, ce réseau comporte 25 stations en plus des deux stations gérées par Météo France et l'INRA, réparties à travers Rennes et sa métropole (Figure 9). Cela permet de collecter des informations sur un large panel d'occupation du sol parmi les 10 LCZ urbaines déterminées (Dubreuil *et al.*, 2020). 25 autres capteurs HOB0 et TINYTAG ont été posés en complément du réseau principal durant des campagnes hivernales et estivales, réalisées en 2011, 2016 et 2019 (*ibid*). Ce second réseau permet de compléter les données en couvrant un plus grand espace.

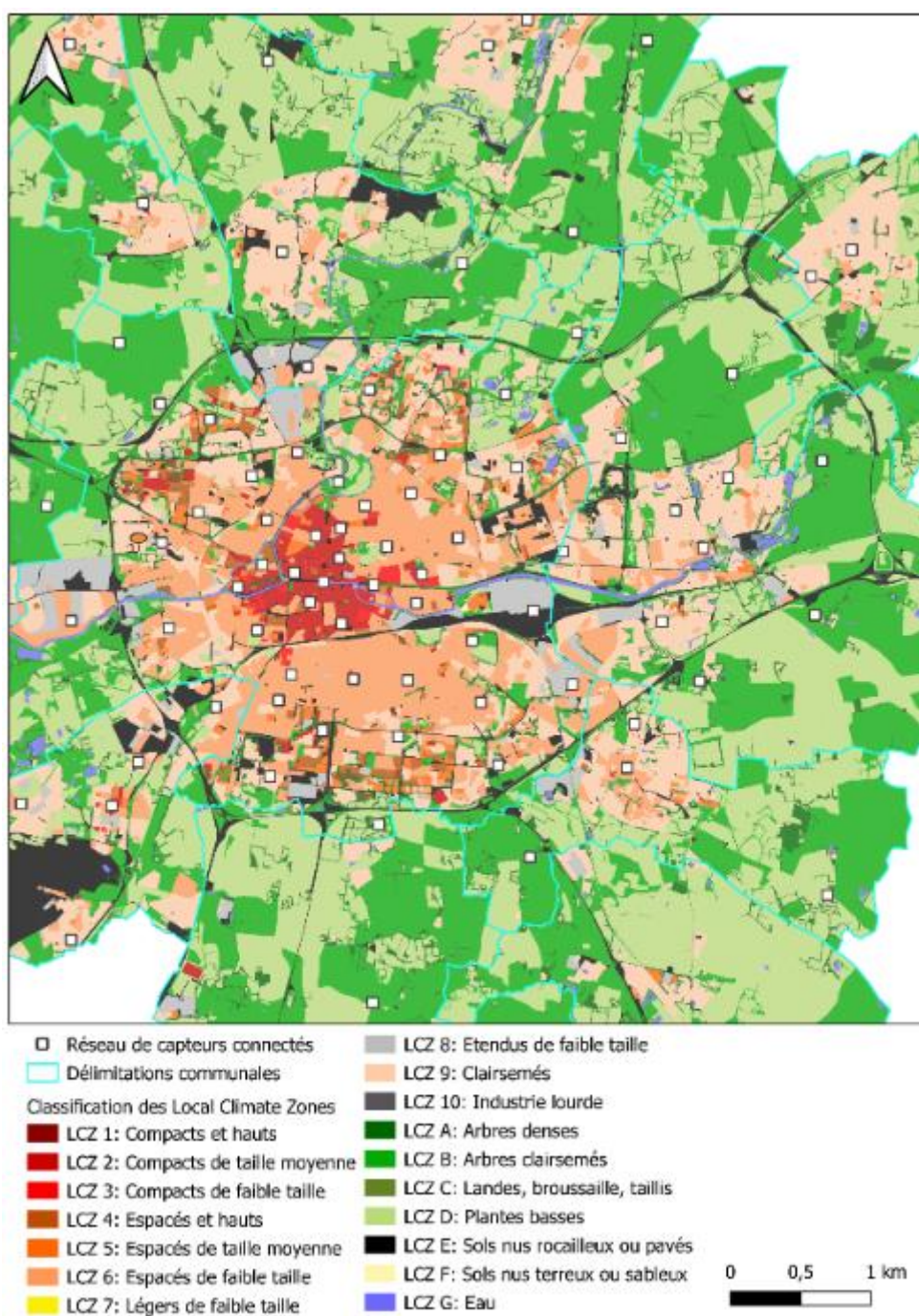


Source : Dubreuil *et al.*, 2020

Figure 9 : Réseau de mesures météorologiques dans l'agglomération rennaise en 2019

En 2020, un nouveau réseau de 95 capteurs connectés est installé en tenant compte de la classification des LCZ (figure 10) (Dubreuil *et al.*, 2022). Ce réseau utilise la technologie LoRaWan, qui permet notamment un suivi en temps réel des températures par des ondes radios et une cartographie plus précise de l'ICU (*ibid*). Il est particulièrement utile pour son alerte immédiate lors d'un problème technique, sa faible consommation électrique et son capteur à bas coût (*ibid*). Ce réseau Lora est géré par le LETG. Une recherche sur des abris antiradiations a été effectuée en parallèle permettant de garder les capteurs¹ à l'abri des rayonnements directs et de mesurer plus précisément et de manière homogène la température et l'humidité de l'air (*ibid*). Certaines stations sont également munies d'anémomètres pour mesurer la vitesse du vent.

¹ Concerne les capteurs de température, placés à 2m du sol



Source : Dubreuil et al., 2022

Figure 10 : Localisation des capteurs connectés dans l'agglomération rennaise en fonction de la classification des LCZ

2.2. Les résultats obtenus de 2004 à 2020

En 17 années d'étude, de nombreux résultats ont été obtenus malgré quelques données manquantes dues à des erreurs techniques et au remplacement du premier réseau de stations (V. Dubreuil et al. 2020). Entre 2004 et 2019, l'ICU est calculé selon les températures minimales horaires de quatre stations : Griffon et Champs Libres, situées au centre-ville et qui enregistrent les températures les plus élevées, et Melesse (dans la commune du même nom à 11 km au nord de Rennes) et Morinais (commune de Betton au nord de Rennes), entourées de terres agricoles et captant les températures les plus basses (*ibid*).

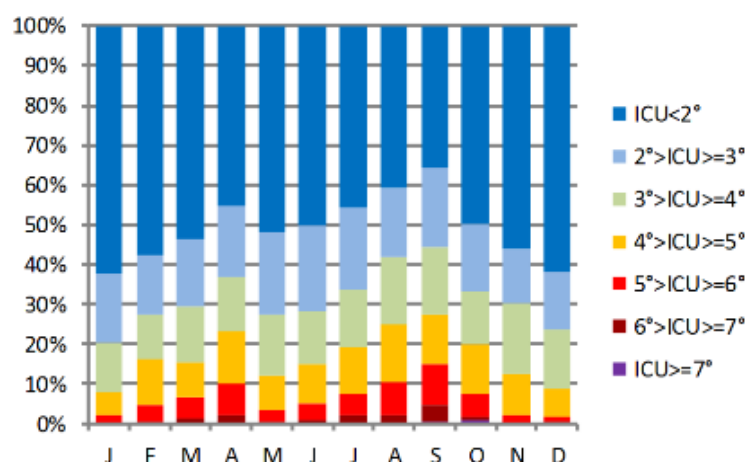
Il a été remarqué selon les résultats obtenus une différence d'humidité entre les deux zones avec un relevé d'humidité plus sec en ville qu'à la campagne (*ibid*). De plus, il s'avère qu'un ICU est présent toute l'année avec une différence moyenne de +1.3°C entre Griffon et Melesse en 2011 (X. Foissard, Dubreuil, et Quénel 2019). Mais il est tout d'abord important de prendre en compte deux échelles temporelles. La première est la saisonnalité avec un ICU plus marqué à la fin de l'été qu'en hiver où on peut observer un écart moyen de près de 3°C en septembre (figure 11).

ICU	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	Moy.
J	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	0.9	0.7	0.5	0.4	0.4	0.4	0.7	1.1	1.4	1.5	1.6	1.6	1.5	1.5	1.2
F	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.4	1.0	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.8	1.3	1.6	1.8	1.9	1.9	1.8	1.2
M	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.7	1.3	0.6	0.2	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.5	1.0	1.6	1.9	2.1	2.1	2.1	1.3
A	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.1	1.7	0.8	0.2	0.1	0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.4	0.9	1.4	2.0	2.2	2.3	2.4	1.3
M	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.8	1.6	1.2	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.7	1.2	1.6	1.9	2.0	2.1	1.2
J	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	1.6	1.0	0.5	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.7	1.1	1.5	1.9	2.1	2.1	1.2
J	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.0	1.5	0.9	0.4	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.9	1.4	1.8	2.1	2.3	2.4	1.2
A	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	2.0	1.4	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	1.0	1.6	2.0	2.3	2.4	2.5	1.4
S	2.9	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6	2.4	1.9	1.1	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.7	1.2	1.9	2.5	2.8	2.9	2.8	2.8	1.8
O	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5	0.9	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.5	1.1	1.6	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.3
N	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.4	1.0	0.7	0.5	0.3	0.3	0.4	0.5	0.8	1.3	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.3
D	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	0.9	0.6	0.4	0.3	0.4	0.5	0.8	1.3	1.5	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.2
Moy	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.7	1.4	1.0	0.6	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.5	0.8	1.2	1.6	1.9	2.0	2.0	2.1	1.3

Source : Dubreuil et al., 2020

Figure 11 : Variabilité horaire et saisonnière de l'ICU à Rennes de 2004 à 2019 entre la station de référence rurale (Melesse) et celle du centre-ville (Griffon)

Dubreuil et al. (2020) ont répertorié 62 jours en moyenne par an avec un ICU de plus de 4°C mais cela représente 20 % des nuits de janvier contre plus de 40 % des nuits de septembre (figure 12). Les auteurs recensent également 5 jours en moyenne par an qui possèdent un ICU de plus de 6°C de mars à octobre à l'exception de mai qui est plus pluvieux (*ibid*). En 17 ans, seulement 10 journées ont été répertoriées avec un ICU de plus de 7°C (Vincent Dubreuil et al. 2022). Le plus fort ICU jamais enregistré a été de plus de 9°C le 18 juillet 2022, battant le précédent record qui avait eu lieu le 1^{er} octobre 2011 avec un écart de plus de 7°C (*ibid*).



Source : Dubreuil *et al.*, 2022

Figure 12 : Fréquences mensuelles des classes d'intensité d'ICU nocturne quotidien à Rennes de 2004 à 2019 entre les stations de Melesse et de Griffon

La seconde échelle temporelle est le pas de temps horaire. En effet, l'ICU est très faible durant la journée entre 10-11h et 15-16h (Dubreuil *et al.*, 2020). C'est en fin d'après-midi (18-20h) que la différence apparaît (*ibid*). Cet écart est le plus prononcé en fin de nuit (6-7h). L'intensité moyenne de l'ICU à Rennes est généralement autour de 2°C par nuit (*ibid*).

À la suite de cette première partie plusieurs hypothèses d'études apparaissent. Nous nous attendons à observer des variations de températures plus importantes et instables dans le cadre des températures microlocales par rapport aux températures locales à l'échelle journalière. Les températures des sites choisis (atmosphérique et de surface) devraient également diminuer à mesure que les relevés s'éloignent du centre-ville à l'exception des sites situés dans un « îlot de fraîcheur ». Les températures observées (principalement pour l'échelle microlocale) devraient montrer des différences en fonction de l'occupation du sol aux alentours (plus élevé si proche d'un bâtiment et plus basse si situé dans une zone végétalisée). Nous nous attendons enfin à avoir un effet lié aux ICU différenciés selon la localisation, à l'exception, tout comme pour les températures, d'ICU microlocaux faibles dans les espaces végétalisés.

Ce travail s'articule autour de trois objectifs. Le premier est de déterminer s'il existe des différences de variations spatiales et temporelles entre les températures mesurées aux échelles locale et microlocale. Le deuxième objectif est d'établir un comparatif des dynamiques d'ICU aux échelles locales et microlocales. Le troisième objectif est de mettre en relation l'occupation du sol et les données de températures et d'ICU à l'échelle microlocale, dans le but d'identifier les facteurs locaux influents.

IV. Présentation de la zone d'étude

1. Présentation générale

Ce travail concerne l'étude de la variation de la température de l'atmosphère et de l'air à la surface au travers de l'échelle spatiale et temporelle de la ville de Rennes. Rennes est la préfecture du département de l'Ille-et-Vilaine, située en Bretagne orientale, à une cinquantaine de kilomètres de la mer (Figure 13). C'est une ville moyenne de 50,39 km² pour 220 488 habitants (INSEE-2019). Rennes occupe la place de la 11^e plus grande ville de France, et de la 1^{re} ville bretonne.

Depuis 2015, une communauté d'agglomération s'est formée sous le nom de Rennes Métropole Elle regroupe la ville de Rennes, ainsi que 43 autres communes réparties, d'après l'INSEE (2020), sur 705 km² comprenant 462 580 habitants.

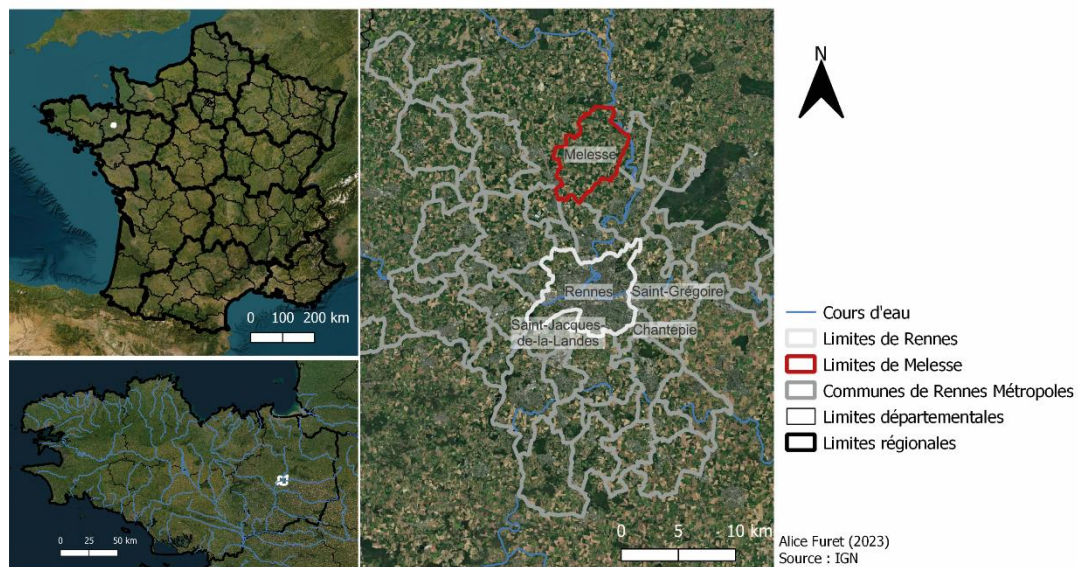


Figure 13 : Localisation de la zone d'étude

Rennes possède un centre-ville historique et un tissu urbain assez dense, dont la rocade démarque la limite avec d'autres villes plus petites, des forêts et des bocages. La commune est marquée par une occupation du sol constituée de bâtiments espacés de faible taille ainsi que de bâtiments compacts de taille moyenne dans son centre (Figure 10). La ville comporte un grand nombre de parcs et espaces verts qui occupent 10,79 km² (Figure 14), dont les prairies Saint-Martin par exemple qui, bordées par l'Ille et le canal d'Ille-de-Rance, constituent un milieu humide (Foissard *et al.*, 2019). Bien qu'on retrouve des parcs dans le centre-ville comme le parc du Thabor, ils sont majoritairement situés sur les bordures au nord, nord-est, sud et sud-ouest. La ville possède un réseau hydrique assez important, puisqu'elle est traversée par La Vilaine, l'Ille ainsi que d'autres canaux. Quelques plans d'eau sont localisés au nord-est et au sud-ouest. Ces milieux créent des îlots de fraîcheur, qui contrastent par rapport à la température du centre-ville.

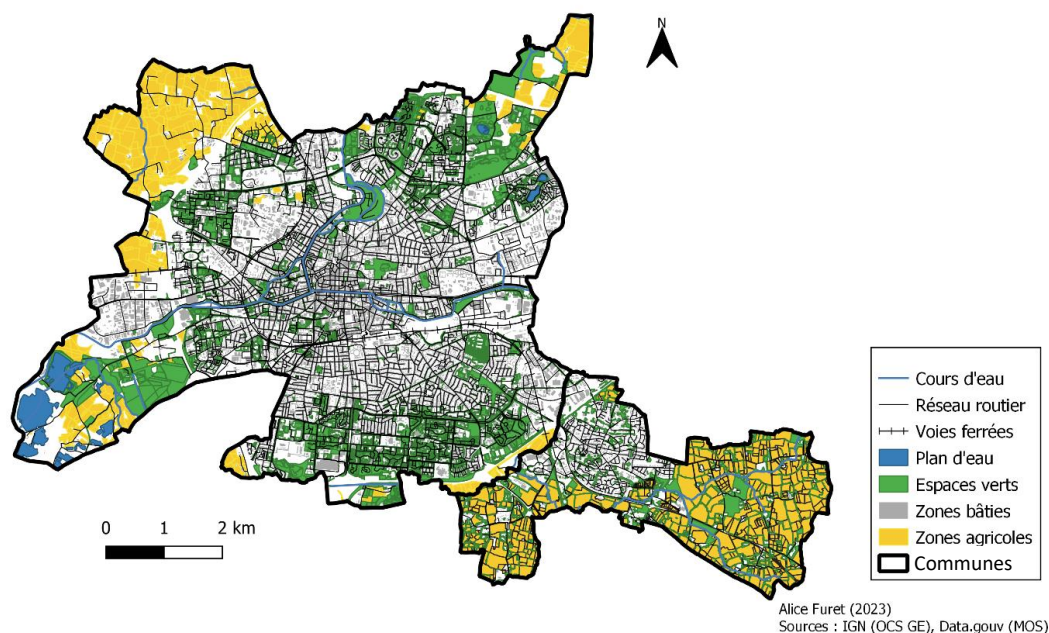


Figure 14 : Occupation du sol de Rennes et de Chantepie

La ville s'est récemment fortement urbanisée avec une surface artificialisée qui a doublé entre 1982 et 2010 (Foissard, 2015), pour une démographie qui a été multipliée par 1,07 sur la même période (194 656 habitants en 1982 et 208 033 habitants en 2011 (INSEE)).

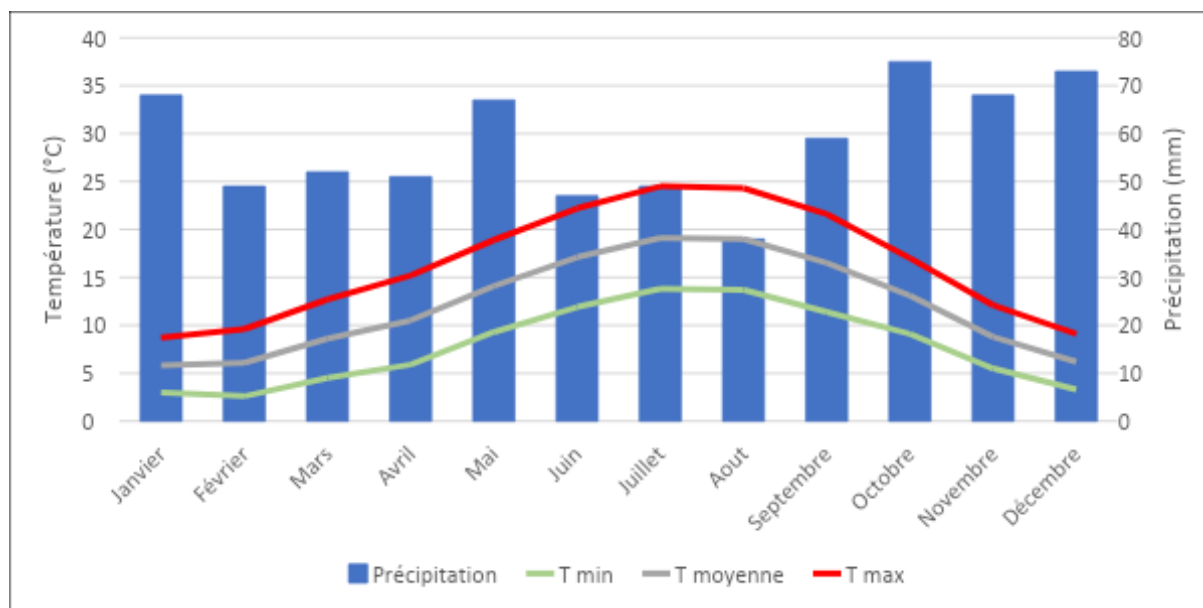
La zone d'étude se situe en partie sur la commune de Chantepie, située au sud-ouest de Rennes. Cette commune a une superficie de 11,98 km² pour 10 236 habitants (INSEE – 2020) et possède une plus grande proportion de zones agricoles que de surfaces imperméabilisées.

2. Le climat rennais

Rennes possède un climat tempéré de type océanique qui est dégradé par l'éloignement de l'océan, qui fait que ses étés sont plus chauds que sur le littoral. La station météorologique Rennes-Saint Jacques² a une température moyenne annuelle de 12,1°C et une pluviométrie d'environ 694 mm par an, d'après la station météorologique Rennes-Saint Jacques (Météo-France) (Figure 15). L'ensoleillement annuel cumule à 1717 h (Météo-France). Rennes connaît environs 40 jours/an de jours chauds (température supérieure à 25 °C) et environs 8 jours/an de journées tropicales (température

² La station météorologique Rennes-Saint Jacques, située à Saint-Jacques (sud-ouest de Rennes), est la station météorologique de référence de Rennes. Elle est gérée par Météo France.

supérieure à 30°C) (Foissard et al., 2019). Le climat océanique entraîne très peu de jours de neige et environ 40 jours de gel par an à Rennes.



Source : Alice Furet (2023)

Figure 15 : Diagramme ombrothermique des données moyennes à la station Rennes-Saint Jacques

En raison des influences de l’Océan Atlantique et de la topographie de la Bretagne, la majorité des vents atteignant Rennes proviennent du littoral (Sud-Ouest et Nord-Ouest). Le vent dominant vient du Sud-Ouest et du Sud-Sud-Ouest (Figure 16).

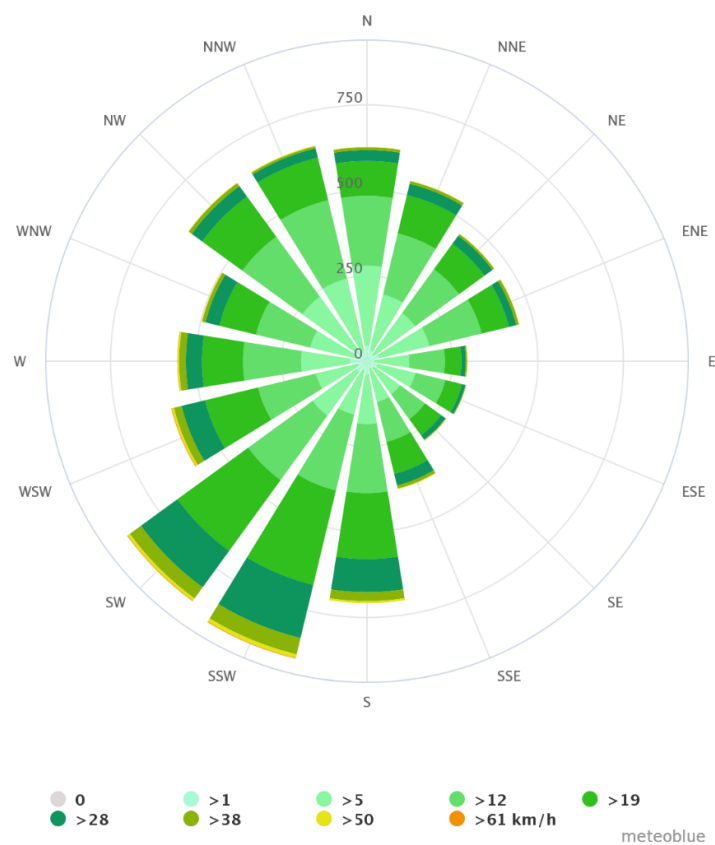


Figure 16 : Rose des vents de Rennes (la rose des vents montre la direction d'où provient le vent : pour N le vent vient du nord vers le sud

Depuis les années 90, les températures sont plus élevées que la moyenne enregistrée entre 1980 et 2010 (Figure 17). Rennes connaît de plus en plus de vagues de chaleurs importantes, notamment celles de 2019 ou encore de 2022.

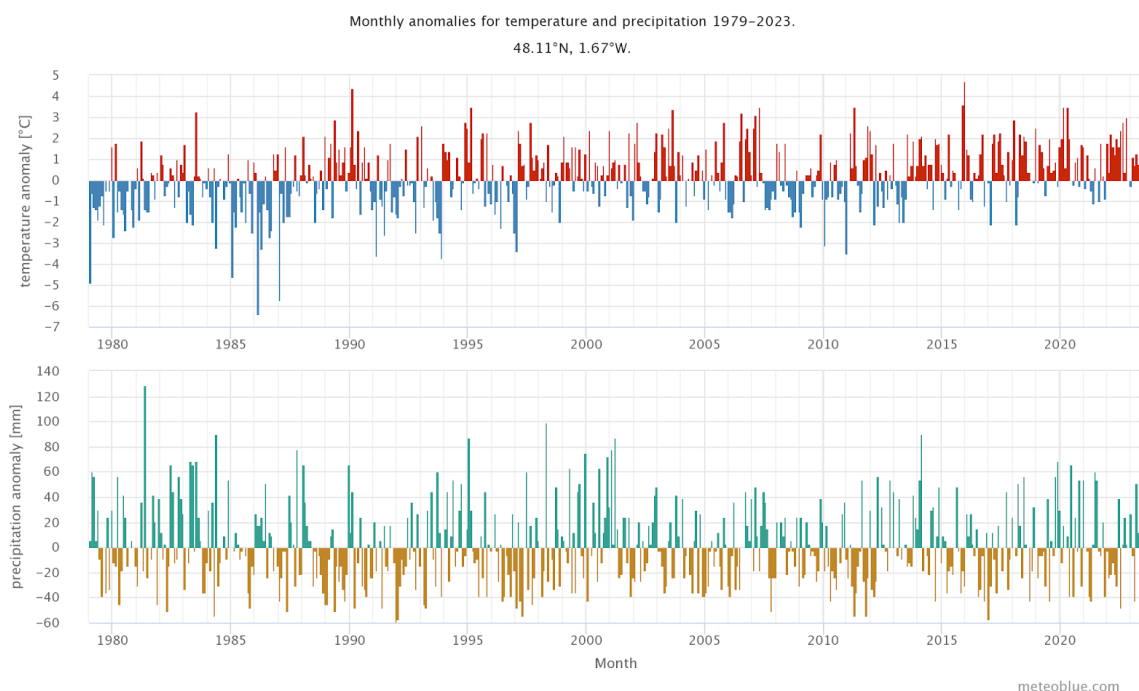


Figure 17 : Anomalies mensuelles des températures et des précipitations de 1979 à 2022 (anomalies par rapport à la moyenne mensuelle des températures et des précipitations entre 1980 et 2010)

L'année 2022 a marqué la première année sans gel dans la ville. Le record d'ICU enregistré a aussi été battu le 18 juillet avec 9°C d'écart entre le centre-ville et la campagne. La température moyenne de l'année a crû à 13,6°C et la pluviométrie a diminué à 578,6mm (météo-bretagne) (Figure 18). En 2022, un stress hydrique a été très important durant l'été, surtout en juillet qui n'a pas connu de précipitation. Habituellement Rennes connaît un léger stress hydrique durant le mois d'août.

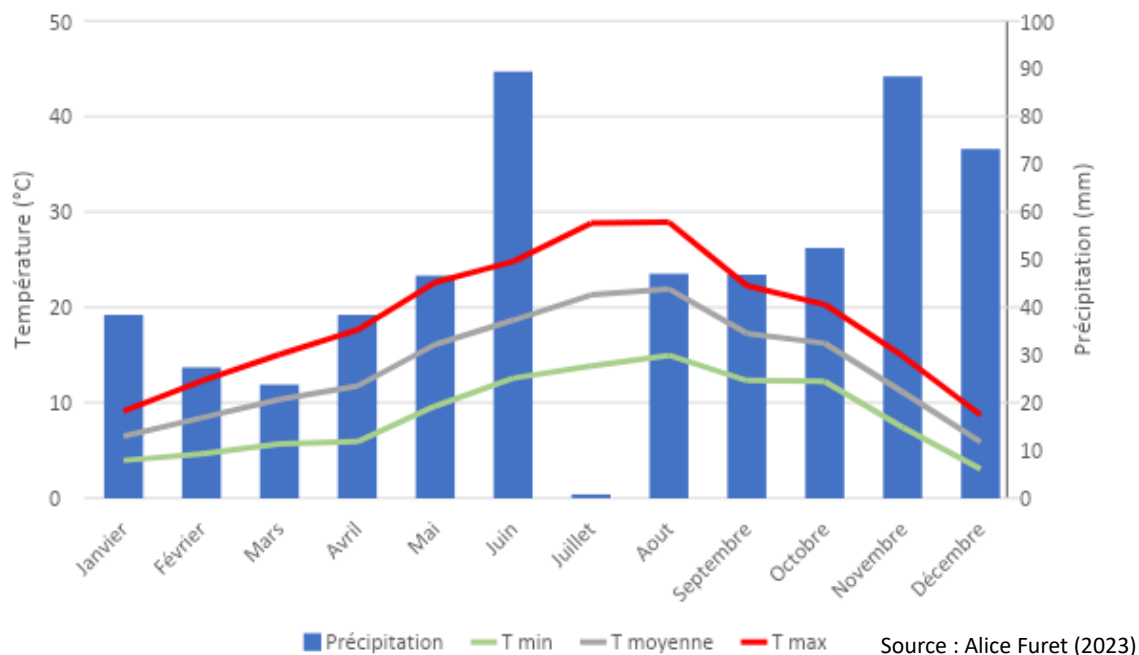


Figure 18 : Diagramme ombrothermique des données de la station Rennes-Saint Jacques en 2022

Bien que le climat océanique ne favorise pas la formation d'un ICU à cause du climat variable et des précipitations plus abondantes (Foissard *et al.*, 2019), Rennes connaît chaque année de nombreuses nuits d'ICU (dubreuil *et al.*, 2019).

Partie 2 : Matériels et méthode utilisées

I. Design expérimental

1. Les 2 réseaux de stations

L'objectif de ce mémoire est de comparer les températures provenant de deux réseaux de capteurs : un premier installé à 3 m de hauteur avec pour but d'étudier la variabilité spatiale de l'air en milieu urbain et un second disposé au niveau de la surface du sol, dont l'ambition est d'évaluer l'influence du microclimat sur le comportement des araignées.

4.1. Mesure des températures atmosphériques

Le réseau de stations météorologiques et capteurs enregistrant la température de l'air atmosphérique est géré par le laboratoire LETG-Rennes. Il est notamment utilisé dans le cadre de la thèse de Charlotte Brabant. Il s'agit d'un réseau de 95 stations réparties sur le territoire de Rennes Métropole et mis en place depuis 2020. Il est toujours actif à l'heure actuelle. Ce réseau enregistre la température selon un pas de temps de 15 min (heure UTC). Chaque capteur est situé à 3m de hauteur, dans un abri anti-radiation qui le protège des rayonnements solaires directs, du vent et de la pluie.

4.2. Mesure des températures de surface

On retrouve dans la ville un nombre important de jardins partagés, gérés par l'association des Jardins Familiaux de la Ville de Rennes. Contrairement aux grands espaces verts, ces jardins ne possèdent pas une grande superficie, mais ils peuvent impacter la température à une échelle microlocale.

Dans le cadre d'un projet de thèse portant sur l'effet de la variabilité microclimatiques sur la faune arthropode en milieu urbain, un réseau de capteurs mesurant les températures à la surface du sol a été mis en place en 2022 sur 39 sites d'étude répartis sur les communes de Rennes, Saint-Jacques-de-la-Landes, Chantepie et Cesson-Sévigné. Afin de correspondre aux périodes exactes des relevés biologiques (piégeage d'arthropodes) réalisés dans le cadre de ce projet, les données acquises à l'aide de ce réseau de capteurs couvrent une période de 15 jours consécutifs chaque mois, de mars à septembre 2022 (Figure 19). Les températures de surface ont été enregistrées toutes les 15 min et les capteurs suivent le fuseau horaire de la France (heure d'hiver et heure d'été)

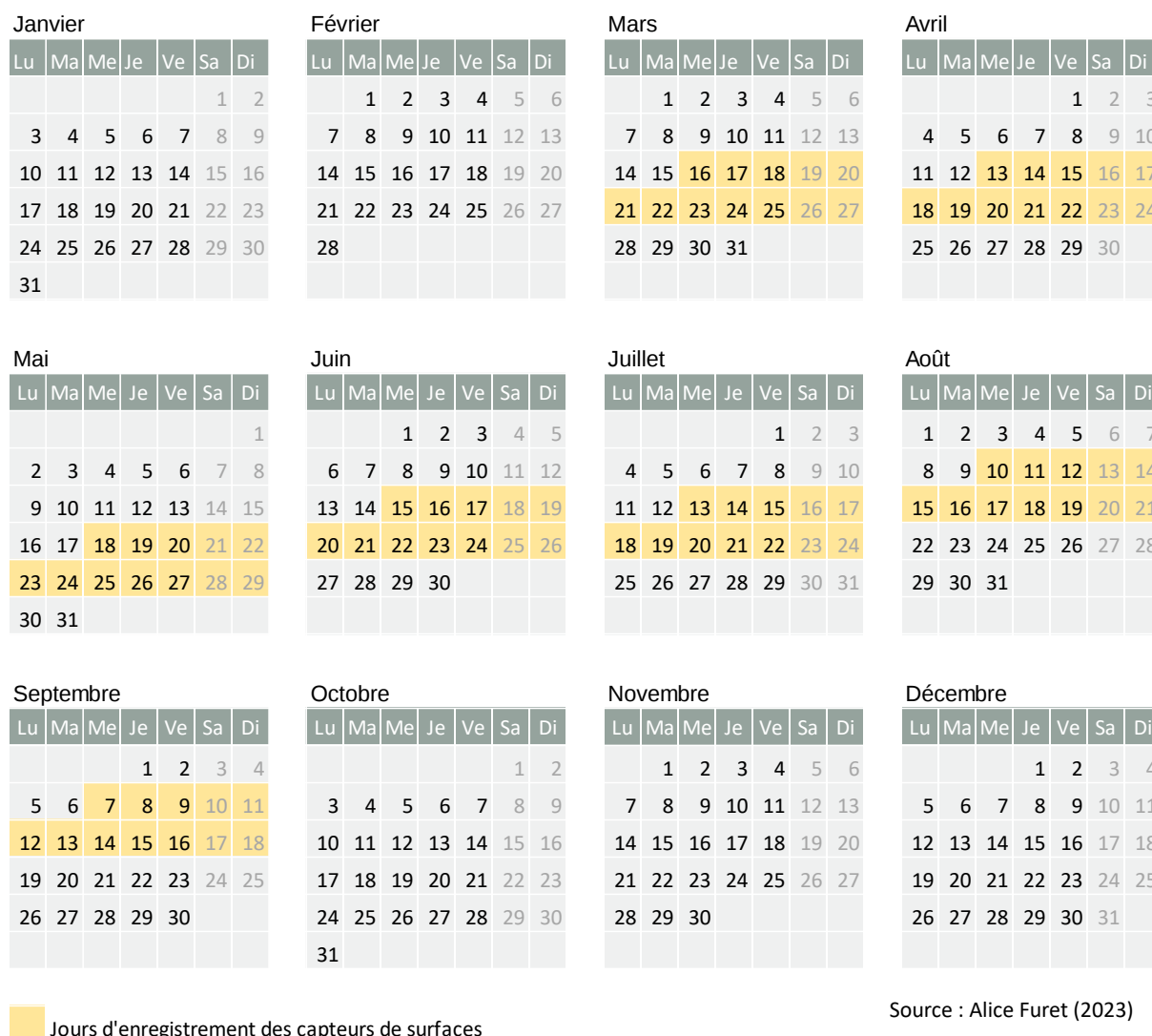


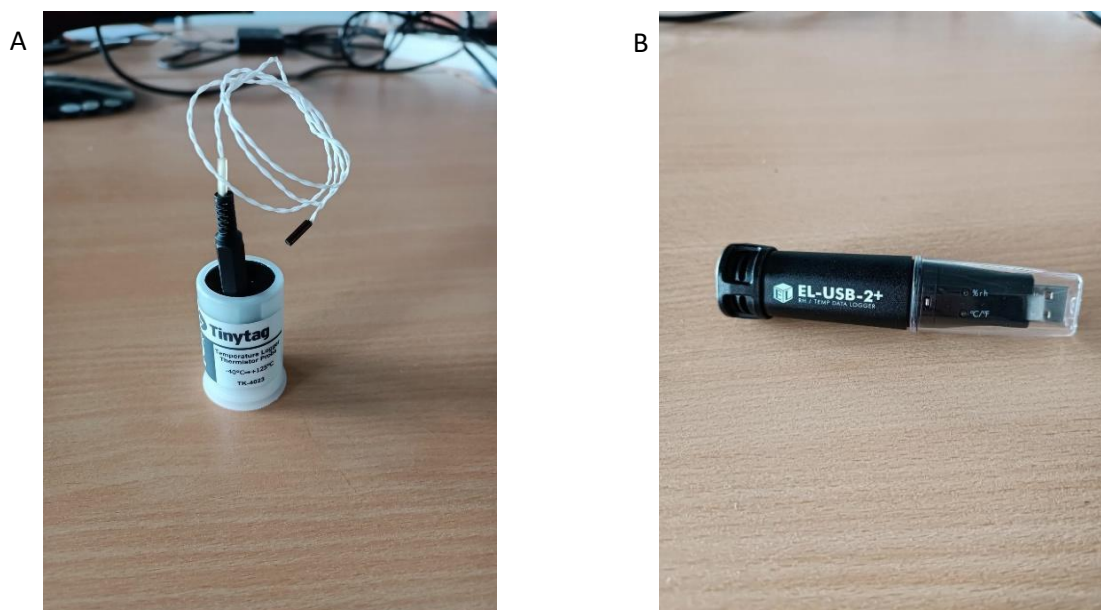
Figure 19 : Calendrier des jours enregistrés par les stations de surface

Les stations de surface sont toutes situées dans une prairie ou sur une pelouse. Elles présentent toutes une végétation herbacée dans leur environnement proche. Chaque site est composé d'un capteur de type Tinytag ou Lascar (Figure 20). L'objectif de ce réseau étant d'enregistrer la température ressentie par les arthropodes vivant au niveau du sol, les capteurs sont disposés dans la végétation, à 2 cm au-dessus de la surface du sol. Deux types de capteurs ont été déployés pour mesurer les températures de surface :

- Les Tinytag sont composés d'un enregistreur et d'une sonde (thermistance) déportée (Figure 20a). Ils présentent l'avantage de pouvoir être installés de manière discrète dans les zones urbaines particulièrement fréquentées. Pour cela, l'enregistreur est enterré dans un boîtier hermétique, laissant uniquement la sonde dépasser de 2 cm au-dessus de la surface du sol.
- Les Lascar, quant à eux, sont composés d'un boîtier contenant directement la sonde de température (Figure 20b) et sont disposés à 2 cm de la surface du sol à l'aide d'un tuteur.

Dans le but de mesurer directement les températures ressenties par les arthropodes au niveau du sol, les sondes des capteurs de surface ne sont pas équipées d'abris. Elles sont de fait exposées, ce qui peut

générer des températures aberrantes durant la journée ainsi que des variations importantes lors de changements de temps.



Source : Alice Furet (2023)

Figure 20 : Les deux capteurs de surface (A. Tinytag, B. Lascar)

Du fait que le réseau microlocal soit composé de deux types de capteur, une analyse comparative a été effectuée. L'objectif est de voir si les deux capteurs réagissent de la même manière aux changements de température à un pas de temps de 10 min (dans l'objectif d'observer les variations plus précisément que toutes les 15 min). Les capteurs ont été placés la nuit à l'extérieur, puis ont fait plusieurs aller retours (1h, 30 min et 1h) entre une température ambiante et un réfrigérateur (5°C).

2. Présentation des sites choisis

Dans le cadre de cette étude, des sites des deux réseaux ont été sélectionnés selon trois zones (Figure 21 et 22). Chaque zone est composée d'une station atmosphérique et de deux stations microlocales (un lascar et un tinytag). Ces sites ont été choisis selon plusieurs raisons. Le premier souhait est de comparer les sites selon trois zones urbaines bien distinctes : centre-ville, péri-urbain et rural. Le second critère est d'avoir des capteurs des deux échelles proches géographiquement, ce qui permettrait une comparaison fiable. Ce sous-échantillon est nécessaire afin de dégager des tendances qui pourront par la suite être confrontées au reste des stations. De plus, les sites de surface choisis sont constitués d'un capteur différent par zone et proposent un panel de paysage urbain important et intéressant.

Deux autres stations ont également été sélectionnées pour servir de référence lors du calcul ultérieur des indices d'ICU. Ces sites ont été choisis parmi les stations rurales les plus froides : Melesse (atmosphérique), située dans la commune de Melesse au Nord de Rennes, plus précisément à

proximité d'une ferme au sud-est de la commune. La station de surface choisie est Monniais, situé dans le parc du même nom à Cesson-Sévigné à l'est de Rennes. Le capteur est situé dans une prairie avec une strate herbacée dépassant les 1,50m. Du fait de cet environnement, le site de Monniais enregistre des températures aussi basses que la station de référence atmosphérique, bien qu'elle ne se situe pas loin de Rennes (Tableau 1 et 2).



Source : Valentin Cabon (2023)

Figure 21 : Les deux réseaux de capteurs (en noir les stations atmosphériques et en blanc les stations de surface)

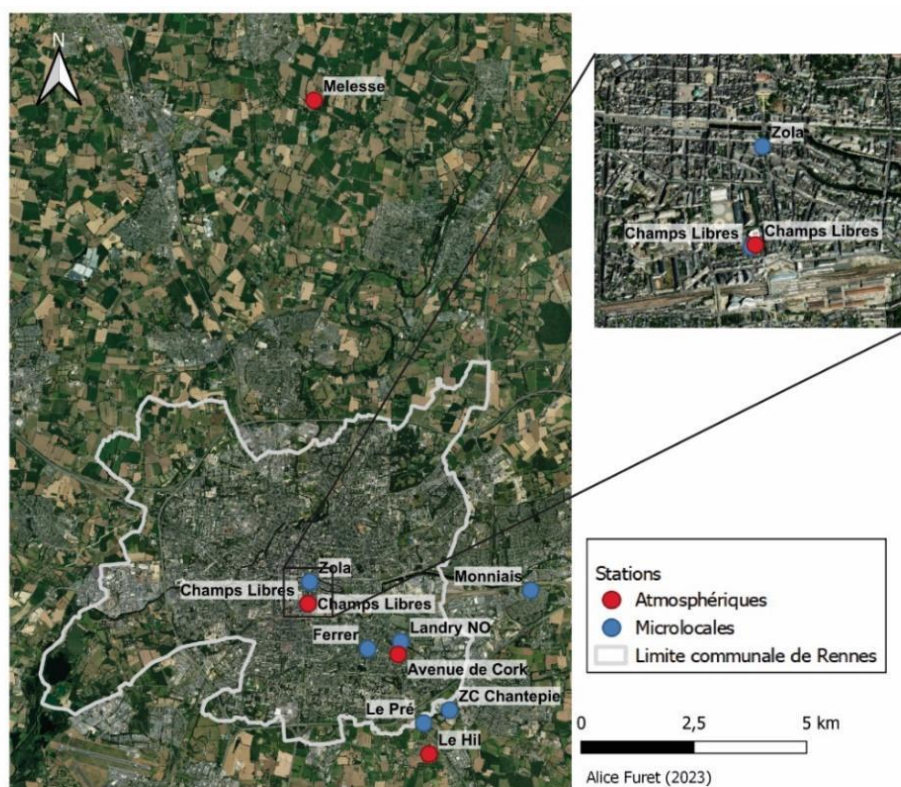


Figure 22 : Localisation des stations atmosphériques et de surface sélectionnées

Tableau 1 : Récapitulatif des stations atmosphériques sélectionnées

Nom	Type capteur	Latitude	Longitude	Localisation	Emplacement
Champs Libres	LoRaWAN	48.10479	-1.67401	Centre-ville (Rennes)	Espace vert public
Avenue de Cork	LoRaWAN	48.09579	-1.6465	Périurbain (Rennes)	Zone pavillonnaire
Le Hil	LoRaWAN	48.0763776	-1.6353612	Périphérie (Chantepie)	Champs
Melesse	LoRaWAN	48.20503	-1.68134	Chantepie (Melesse)	Ferme

Tableau 2 : Récapitulatif des stations de surface sélectionnées

Nom	Type capteur	Latitude	Longitude	Localisation	Emplacement
Zola	Lascar	48.10919	-1.67412	Centre-ville (Rennes)	Etablissement d'enseignement
Champs Libres	Tinytag	48.10473	-1.67444	Centre-ville (Rennes)	Jardin associatif
Ferrer	Lascar	48.09658	-1.65564	Périurbain (Rennes)	Espace vert public
Landry NO	Tinytag	48.09836	-1.64601	Périurbain (Rennes)	Espace vert public
Le Pré	Lascar	48.08241	-1.63778	Périphérie (Chantepie)	Jardin associatif
ZC Chantepie	Tinytag	48.08531	-1.63019	Périphérie (Chantepie)	Espace vert public
Monniais	Tinytag	48.11009	-1.60825	Périphérie (Cesson-Sévigné)	Espace vert public

2.1. Zone du centre-ville

On retrouve trois sites en centre-ville, une zone densément artificialisée, peuplée et peu végétalisée (Figure 23).

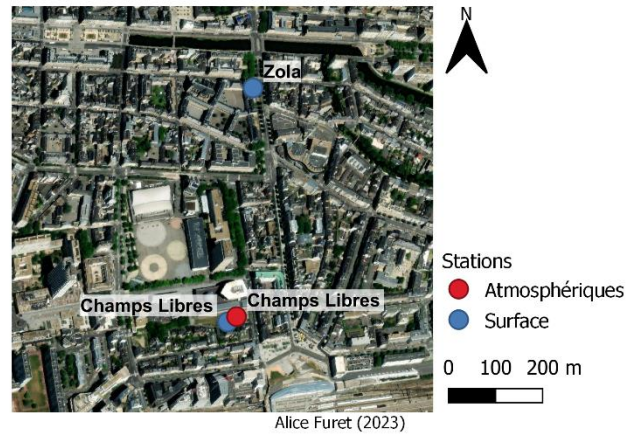


Figure 23 : Localisation des stations atmosphérique et de surface du centre-ville

Le site de Zola est situé dans la cour du lycée d'Emile Zola. Il est positionné à moins de 5m d'une façade exposée à l'est ainsi que de la rue qui forme un canyon urbain (Figure 24). Une pelouse de 88 m² ainsi qu'un arbre situé à 2m au sud sont l'unique végétation qui entoure les capteurs. Quelques arbres situés sur le trottoir longent la route.



Source : Alice Furet (2023)

Figure 24 : Emplacement de la station de surface Zola (vue direction ouest, la flèche montre l'emplacement précis)



Source : Alice Furet (2023)

Figure 25 : Station atmosphérique de Champs Libres (centre-ville)

Deux stations sont situées sur un même site. Les capteurs Champs Libres (atmosphérique et surface) sont localisés au sud-est de l'esplanade Charles-de-Gaulle, à l'arrière du bâtiment des Champs Libres. La station atmosphérique est située du côté de la rue (Figure 25), alors que le capteur au niveau de la surface est positionné dans un potager urbain. Ce dernier est entouré de maisons et de bâtiments (Figure 26).



Source : Alice Furet (2023)

Figure 26 : Emplacement de la station de surface Champs Libres (A. vue direction nord, B. vue direction sud)

2.2. Zone péri-urbaine

La deuxième zone est située à environ 2 km au sud-est, au sein de quartiers pavillonnaires et comprend les sites de Avenue de Cork (atmosphérique), Ferrer (surface) et Landry NO (surface) (Figure 27)

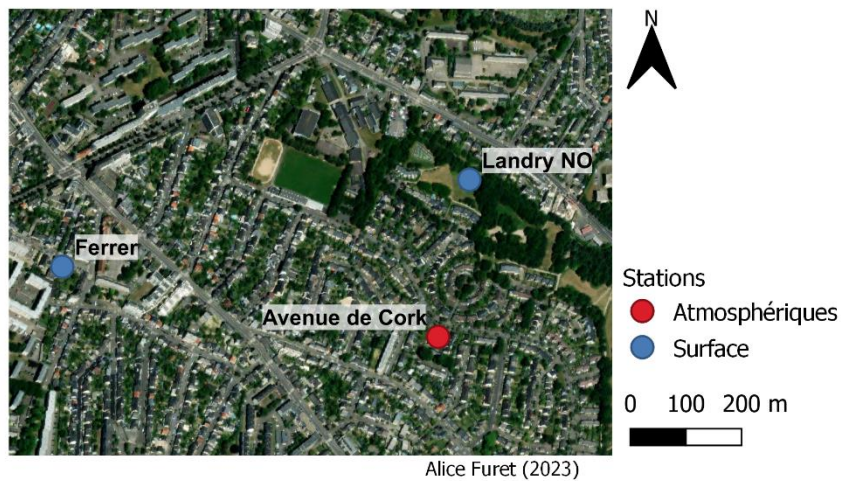


Figure 27 : Localisation des stations atmosphérique et de surface péri-urbaine



Source : Alice Furet (2023)

Figure 28 : Station atmosphérique péri-urbaine de Avenue de Cork

Le site de Ferrer se trouve dans le jardin de la maison de quartier Francisco Ferrer, une maison associative (Figure 29). Les capteurs sont situés en bordure du jardin sous une haie qui offre une protection à l'est et à environ 10m du mur de la maison à l'ouest.



Source : Alice Furet (2023)

Figure 29 : Emplacement de la station de surface Ferrer (vue direction sud)



Source : Alice Furet (2023)

Figure 30 : Emplacement de Landry (vue direction sud)

Le site de Landry NO se situe dans le parc du même nom dont la superficie est de 6,7 ha. Les capteurs sont disposés dans une grande prairie à herbe haute (Figure 30). Des arbres sont situés à 10 m au nord.

2.3. Zone rurale

Le site rural est localisé au sud-est, en périphérie de la ville. Il se situe sur la commune de Chantepie. On y retrouve les sites de Le Hill (atmosphérique), Le Pré (surface) et ZC Chantepie (surface) (Figure 31). La station atmosphérique borde une départementale au milieu des champs (Figure 32).

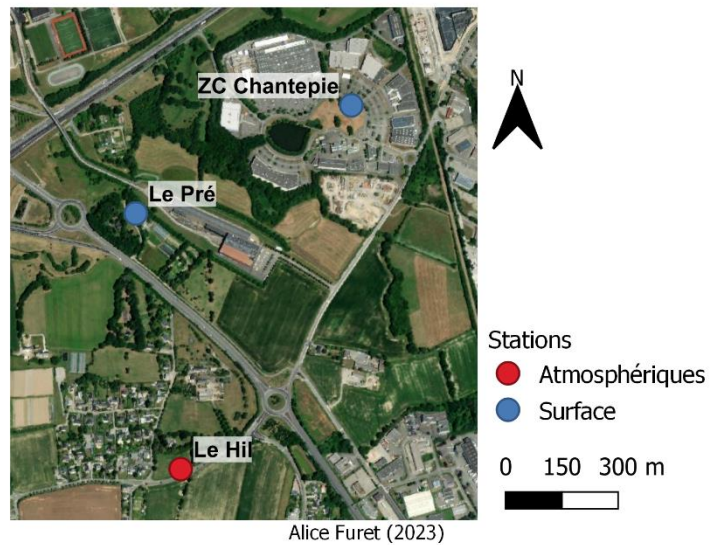


Figure 31 : Localisation des stations atmosphérique et de surface rurales



Source : Alice Furet (2023)

Figure 32 : Station atmosphérique rurale Le Hill

La station Le Pré est située dans le jardin d'une micro-ferme urbaine pédagogique nommée Les Cols Verts Rennes. Des arbres recouvrent une partie de la zone (figure 33a). Ce site possède la particularité d'être placé sur un sol quasi nu (Figure 33b).



Source : Alice Furet (2023)

Figure 33 : Emplacement de la station de surface Le Pré (A. vue direction sud, les encombrants n'étaient pas présents en 2022, B. Etat du sol)

Enfin, la station de ZC Chantepie se situe dans la zone commerciale de Chantepie. Le capteur a été installé dans une prairie à herbe haute de 11 456 m² bordée par un parking. Il est éloigné des bâtiments (environ 90m) (Figure 34). L'herbe haute est l'unique ombrage.



Source : Alice Furet (2023)

Figure 34 : Emplacement de la station de surface Chantepie (A. vue direction sud-ouest, B. vue direction nord-est)

II. Méthode

Cette étude tourne autour de trois objectifs. Le premier concerne l'analyse des données de température (atmosphérique et de surface) à deux échelles : l'échelle temporelle (de la saisonnalité à la journée), et l'échelle spatiale (entre les différents capteurs et les différentes zones choisies). Cet objectif constitue l'étape principale de cette étude, puisqu'il nous permettra de comprendre les liens et différences entre les variations des stations atmosphériques et de surface. Le deuxième objectif est de mettre en relation différentes variables environnementales (par exemple l'occupation et la structure du sol) avec les variations de températures de surface, dans le but d'identifier les potentiels facteurs influents. Enfin, Le dernier objectif est de comparer les dynamiques des ICU atmosphériques et de surface, à la fois à l'échelle temporelle et spatiale.

1. Les températures

1.1. Températures brutes

Avant de procéder à l'étude des variations des températures, un traitement des données des températures est nécessaire. Il faut tout d'abord les mettre sur le même fuseau horaire. En effet, à contrario des stations atmosphériques, les stations de surface sont réglées sur l'heure d'hiver. Il faut donc reculer toutes les heures de ce réseau d'une heure à partir du 27 mars. Un tri des jours où les données ne sont pas complètes ou aberrantes est aussi nécessaire afin d'obtenir un jeu de données propre. Pour donner un exemple, en début et en fin d'enregistrement des données de températures de surface, il arrive qu'un ou plusieurs capteurs n'aient enregistré qu'une partie de la nuit, laissant ainsi des heures sans données. De plus, le capteur de Monniais a connu une défaillance durant la nuit du 15 septembre, où la température enregistrée augmentait au lieu de se refroidir la nuit tombée.

1.2. Îlots de chaleur urbains

Un objectif supplémentaire de ce travail est de réaliser les comparaisons entre échelles en considérant l'ICU. Pour rappel l'ICU se calcule par la différence entre les températures d'une station et celle de la station de référence, plus froide en moyenne : Monniais (réseau de surface) et Melesse (réseau atmosphérique). Puisque l'ICU est un phénomène climatologique nocturne, la première étape consiste à sélectionner uniquement la plage horaire qui nous intéresse (20h-8h).

L'étape suivante est de calculer l'écart entre les températures des stations étudiées et des stations de référence associées au réseau de capteurs. Pour ce faire, on calcule une moyenne des températures par heure. Les jeux de données bruts ayant une résolution temporelle de 15 min, chaque valeur horaire est obtenue par la moyenne de quatre températures mesurées. Cette étape permet notamment de gommer l'effet de potentielles mesures ponctuellement faussées. Pour calculer l'ICU journalier (à l'échelle temporelle d'une journée), on sélectionne la température horaire (moyenne) minimale de la nuit. On soustrait ensuite cette valeur, avec la valeur de température horaire minimale de la station de référence à la même date.

Une fois ce calcul réalisé, la troisième étape consiste à déterminer les nuits à ICU. En effet, ce phénomène nécessite des conditions climatiques particulières pour se former. On sélectionne uniquement les jours présentant un vent inférieur ou égal à 5m/s car un vent plus puissant pourrait déplacer l'ICU. On retient également les nuits sans précipitations, qui possèdent un effet rafraîchissant sur l'air. Les données météorologiques permettant cette sélection proviennent de la station Rennes Saint-Jacques et sont obtenues via le site de l'ECAD ([Daily data \(ecad.eu\)](https://dailydata.ecad.eu)). Cette station est située dans la commune de Saint-Jacques-de-la-Lande, au sud-ouest de Rennes, et est gérée par Météo France. De plus, on retient uniquement les nuits où la station atmosphérique du centre-ville (Champs Libres) possède un écart d'au minimum 2°C avec la station de référence (Foissard *et al.*, 2019). En dessous de 2°C l'ICU est trop faible et nous avons fait le choix de ne pas en tenir compte. On effectue cette sélection à l'aide des stations du réseau atmosphérique car, à la différence du réseau de surface, elles ont été spécifiquement mises en place pour étudier l'ICU.

2. Comparaison entre les températures atmosphériques et de surface

2.1. Comparaison des dynamiques temporelles

L'intention de cet objectif est de comparer les variations temporelles et spatiales des températures atmosphériques et de surface au cours du temps et dans l'espace.

Dans un premier temps, on étudie les variations temporelles sur la totalité de la période (mars à septembre). Cette première étape permet d'observer les variations saisonnières. L'objectif est d'analyser les différences entre les courbes de températures atmosphériques et les courbes de température de surface de mars à septembre 2022. Pour cela, on observe l'évolution de la température indépendamment pour chaque capteur sur la saisonnalité.

Dans un second temps, deux périodes précises seront analysées afin d'observer ces variations à l'échelle journalière. Ainsi, cinq jours consécutifs ont été choisis en mars (du 21 au 25) et en juillet (du 15 au 19). Ces deux périodes ont été sélectionnées car elles représentaient une bonne étude de cas pour chaque site. Elles permettront également de différencier les variations printanières et estivales avec l'ensemble des capteurs.

2.2. Comparaisons dans l'espace

L'échelle spatiale consiste à analyser les températures enregistrées entre les différentes zones. Cette analyse se portera premièrement entre les stations atmosphériques et de surface, et secondement entre les capteurs de surface au sein d'une même zone. Les mêmes jours ont été sélectionnés pour cette échelle, puisque cette étude de cas est intéressante à la fois pour la variabilité temporelle mais aussi spatiale.

3. Occupation du sol

Ce dernier objectif consiste à déterminer les facteurs d'occupation du sol pouvant influencer les températures de surface. Pour ce faire, dans un premier temps, à l'aide des données d'occupation du sol OCS GE de l'IGN (Rennes Métropole), nous avons déterminé la proportion de différents types d'occupation du sol autour des capteurs de surface.

Plusieurs types d'occupation du sol ont été caractérisés afin de mettre en relation la température et la proportion de surface bâtie et végétalisée. Ainsi, on s'intéresse particulièrement à quatre types d'occupation du sol : la surface imperméabilisée (zones bâties et réseaux routier), la surface bâtie seule, la surface végétalisée (formation arbustive et sous arbrisseaux, pelouses et prairies urbaines, peuplements de conifères, peuplements de feuillus, peuplements mixtes et prairies naturelles) et enfin la surface de végétation herbacée (prairies naturelles et pelouses et prairies urbaines).

A l'aide des packages « *Raster* » du logiciel R, une carte raster a été créée pour chaque type d'occupation sélectionné. Des buffers ont également été définis autour de chaque site de 10, 20 et 50 m. Ces buffers correspondent aux distances auxquelles l'occupation du sol est la plus susceptible d'influencer les températures de surface. L'étape suivante consiste à calculer le pourcentage d'occupation du sol de chaque type, au sein des différents buffers sélectionnés. On obtient donc la proportion de bâti, de surface imperméable, végétale et herbacée dans un rayon de 10, 20 et 50 m autour de nos 6 stations microlocales. Cette étape a été réalisée sur R, à l'aide du package « *LandscapeMetrics* » (Hesselbarth et al. 2019).

Afin de compléter ces résultats à une échelle plus fine, des données complémentaires informant sur la structure de la strate herbacée à proximité directe des capteurs (1 m) ont été récoltées. Plus précisément, il s'agit de la hauteur de végétation, de la proportion de sol nu, celle de la végétation, l'état de la strate herbacée et enfin la fréquence d'entretien.

- L'étude de la texture du sol

Des échantillons de terre ont été prélevés sur chaque site de surface, afin d'estimer si la composition du sol peut influencer les températures de surface. Des tests simples de texture réalisés à la main ont été réalisés à proximité directe de l'emplacement de chaque capteur de surface inclus dans cette étude (Figure 35). Bien que ces analyses ne permettent pas une estimation exacte des proportions d'argile, de sable et de limon dans le sol, elles permettent de classer grossièrement un sol selon des estimations. La texture d'un sol définit sa capacité de rétention en eau. Or, un sol qui retient l'eau peut avoir un effet rafraîchissant en surface. Un sol argileux, par exemple, possède une grande capacité de rétention d'eau (Bruand *et al.*, 1996). Dans le cas d'un sol limoneux ou sableux la capacité de rétention d'eau est plus faible, ce qui provoque un sol plus sec, et donc des températures potentiellement plus hautes (*ibid*).



Source : Alice Furet (2023)

Figure 35 : Exemple de deux boudins (A. un boudin parfaitement rond qui montre un sol argileux, B. un boudin se cassant qui montre une grande proportion de sable et/ou de limon)

Partie 3 : Résultats

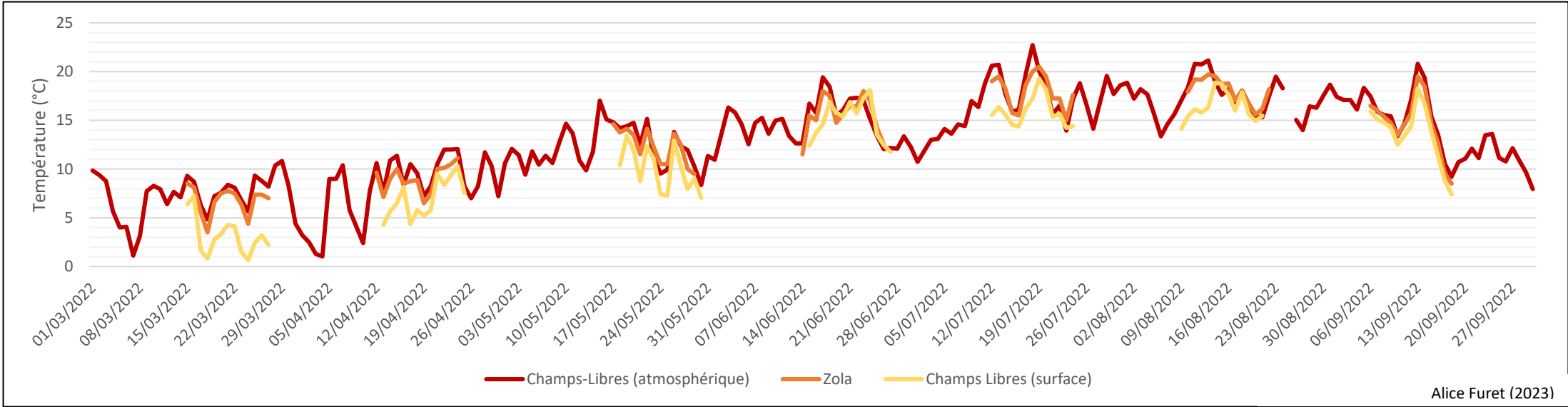
- I. Les différences entre les températures atmosphériques et de surface sur la période des relevés

Cette première partie aborde l'étude des températures mesurées entre les stations atmosphériques et de surface sur toute la période des enregistrements. Ces températures seront analysées selon la variabilité temporelle dans un premier temps : de mars à septembre 2022. Puis elles seront étudiées selon la variabilité spatiale, en abordant l'inter-zone des températures de surface par rapport aux températures atmosphériques. Elle abordera ensuite dans un troisième point l'occupation du sol influençant la variabilité des températures de surface.

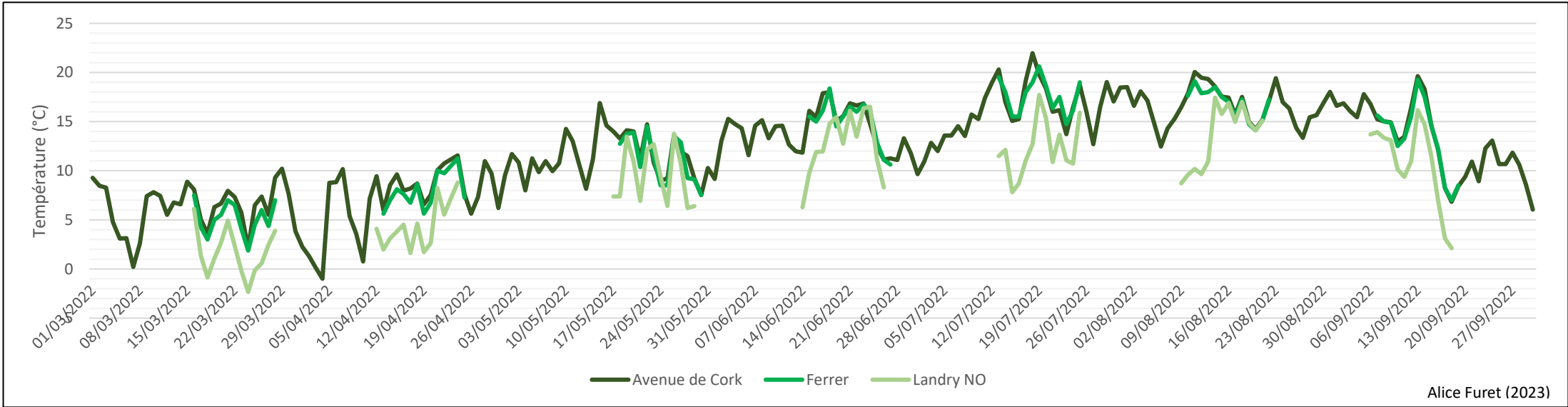
1. Variations temporelles

Les courbes des températures minimales journalières observées sur toute la durée de l'enregistrement en 2022, nous permettent de constater une évolution des températures entre les différents points de mesures lors de différentes saisons (figure 36). Les graphiques dévoilent des températures minimales journalières de surface plus basses que les températures atmosphériques au printemps. Cette tendance tend à s'atténuer à partir de mai, avec par exemple Le Pré qui enregistre des températures plus élevées que Le Hil (atmosphérique). Seuls deux sites de surface mesurent des températures minimales journalières plus basses que les stations atmosphériques. Il s'agit de Landry et de Chantepie, dont les températures peuvent être jusqu'à 5°C inférieures à celles mesurées par Avenue de Cork et Le Hil.

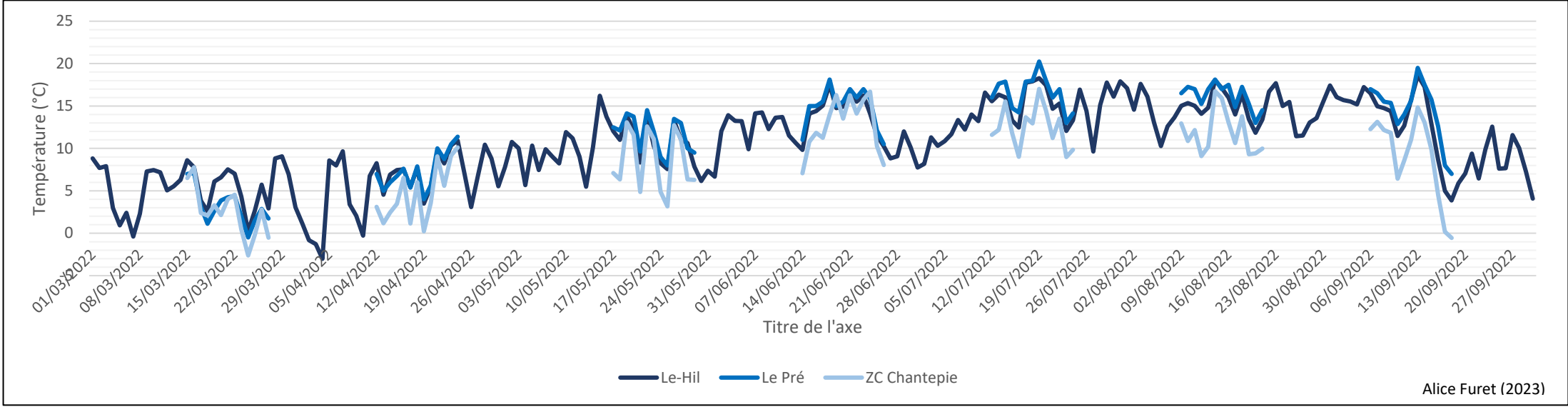
Des variations de plusieurs degrés sont également visibles sur une durée de quelques jours. Par exemple, la température atmosphérique du centre-ville baisse de près de 10°C entre le 29 mars et le 4 avril 2022 avant d'augmenter de 9°C trois jours plus tard. Les stations éloignées du centre-ville montrent une plus grande variabilité de températures sur quelques jours. Par exemple, du 13 au 17 septembre 2022, alors que les températures tendent à diminuer, la température de la station atmosphérique de Champs Libres baisse de 12°C alors que Avenue de Cork et Le Hil enregistrent une diminution de la température de 13°C et 15°C.



A : Evolution des températures minimales journalières du centre-ville de mars à septembre 2022



B : Evolution des températures minimales journalières périurbaines de mars à septembre 2022



C : Evolution des températures minimales journalières rurales de mars à septembre 2022

Figure 36 : Evolution des températures minimales journalières de mars à septembre 2022 sur les trois zones d'études (A. Centre-ville, B. Péri-urbain, C. Rural). Chacun des trois graphiques montre la température mesurée à l'aide de trois capteurs : un capteur de température atmosphérique et deux capteurs de température de surface. Pour des raisons méthodologiques, les températures de surface ne sont disponibles que sur des périodes de 15 jours consécutifs par mois.

2. Variations spatiales

Sur les figures 36, une différence est observable entre les différentes zones. En effet, plus les capteurs sont éloignés du centre-ville, plus la température enregistrée est basse. Dans une même zone, une station de surface semble se rapprocher des températures atmosphériques (Zola, Ferrer et Le Pré) alors que le second capteur (Champs Libres microlocal, Landry et Chantepie) enregistre une température plus basse la nuit. Par exemple, la température minimale de la journée la plus chaude de l'année 2022 (le 18 juillet) a atteint 22.7 °C pour Champs Libres (atmosphérique) contre seulement 19.3 °C pour Champs Libres (microlocal) pour le centre-ville. Cette amplitude varie de 21.9 °C pour Avenue de Cork à 17.7°C pour Landry pour la zone périurbaine. Pour les sites situés en périphérie, cette amplitude de température varie de 20.2 °C pour Le Pré à 17°C pour Chantepie. Les amplitudes de températures sur quelques jours sont aussi plus importantes pour les sites éloignés du centre-ville. Par exemple, entre le 19 et le 21 mars, le capteur microlocale Champs Libres verra sa température baisser de 4.6 °C, celle de Landry de 6.5 °C et enfin celle de Chantepie de 8.2 °C.

Ces différences de température de surface entre les zones amènent à penser que le climat local influence globalement la différence de température de surface sur les différentes zone (centre-ville / péri-urbain / rural). Mais des similitudes aux niveaux des températures de surface sur plusieurs zones (entre Landry et Chantepie) et la différence au sein d'une même zone (entre Le Pré et Chantepie) conduit à envisager l'influence de l'occupation du sol à l'échelle microlocale.

3. Relation entre les températures et l'occupation du sol

Cette sous-partie a pour objectif de déterminer les facteurs pouvant impacter la température à une échelle microlocale. La morphologie de la ville impacte la température à l'échelle locale mais quand est-il à une échelle encore plus fine ?

Le principal facteur pouvant impacter la différence de température est la distance par rapport au centre-ville. En effet, plus on s'éloigne du centre urbain, plus la température enregistrée la nuit est basse. Pour donner un exemple avec les stations atmosphériques, Champs Libres est située à environ 2 km d'Avenue de Cork et de 4 km de Le Hil. La station du centre-ville est séparée de la station de référence (Melesse) d'environ 11 km. A l'échelle locale, la distance par rapport au centre-ville possède un impact sur la température ressentie car l'occupation du sol change : des bâtiments et canyons de rue dans le centre, des maisons en zone périurbaine et des espaces végétalisés plus importants en périphérie.

Si la distance par rapport au centre-ville impact la température, c'est l'occupation du sol qui en est à l'origine. En effet, comme il a été vu dans la première partie, les rayonnements solaires sont réfléchis par les surfaces imperméables. La verticalité des surfaces imperméables sont plus présentes en ville, particulièrement dans le centre.

Dans chaque zone un site microlocal capte une température plus élevée, égale à celle enregistrée par les stations atmosphériques, et un second site plus froid. Avec des données complémentaires sur l'environnement proche des capteurs de surface, plusieurs hypothèses impactant la température à cette échelle peuvent être prises en compte.

3.1. Effet couverture d'artificialisation et de la végétation

L'occupation du sol possède un impact sur la température à l'échelle locale, mais qu'en est-il à une plus fine échelle ? Il se trouve que les sites possédant les températures les plus élevées sont situés à proximité d'un bâtiment (Tableau 3). Zola est situé à moins de 5 m d'un bâtiment, Champs Libres à environ 20 m et Ferrer à environ 10 m. Seul Le Pré ne possède pas de bâtiment à proximité (mise à part une cabane). Parmi les points froids on retrouve Landry qui est à environ 40 m d'un mur et Chantepie qui se situe à plus de 90 m d'un bâtiment. La distance par rapport à une surface imperméable, et surtout un bâtiment, est à prendre en compte dans l'effet sur la température puisque la surface verticale réfléchit les rayonnements solaires.

Tableau 3 : Distance et hauteur du bâtiment le plus proche de chaque station de surface

Stations	Distance du bâtiment le plus proche (m)	Hauteur du bâtiment le plus proche (m)
Zola	< 5	13.3
Champs Libres	~ 20	15.3
Ferrer	~ 10	7.3
Landry NO	~ 40	4.7
Le Pré	~ 25	NA
ZC Chantepie	~ 90	8.1

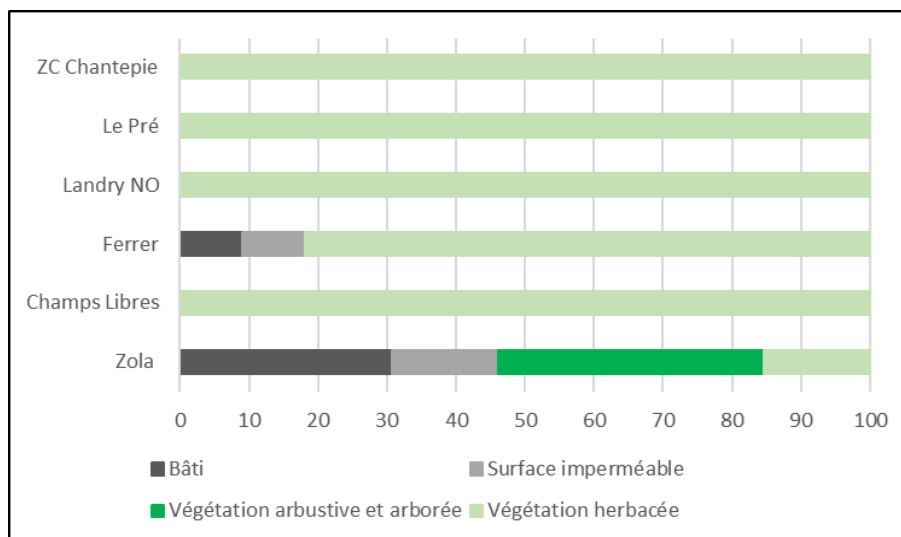
Alice Furet (2023)

Pour rappel, les capteurs de surface sont disposés sur des prairies ou pelouses, et ainsi à proximité directe de végétation herbacée. La végétation peut avoir un impact important sur les températures car elle permet de les rafraîchir via l'évapotranspiration et crée donc un îlot de fraîcheur. Certes une surface enherbée de petite taille ne possède pas un effet rafraîchissant très élevé, mais sa superficie peut avoir un impact, notamment au niveau de la réflexion des rayonnements solaires et de la circulation atmosphérique à une échelle microlocale. Ainsi les capteurs Champs Libres, Landry et Chantepie sont situés sur une grande zone enherbée avec respectivement 1 643 m², 6 894 m², 11 456 m² (Tableau 4). Au contraire, les trois autres sites possèdent une superficie en herbe beaucoup plus réduite avec 88 m² pour Zola, 148 m² pour Champs Libres et 494 m² pour Ferrer.

Tableau 4 : Taille et caractéristiques moyennes de la pelouse de chaque station de surface

Stations	Superficie pelouse site (m ²)	Hauteur moyenne de la végétation herbacée (cm)	Proportion moyenne du sol nu (%)
Zola	88	8.16	4
Champs Libres	1 643	15.28	0.7
Ferrer	148	5.28	0.1
Landry NO	6 894	23.57	0
Le Pré	494	8.28	27.7
ZC Chantepie	11 456	18.14	0

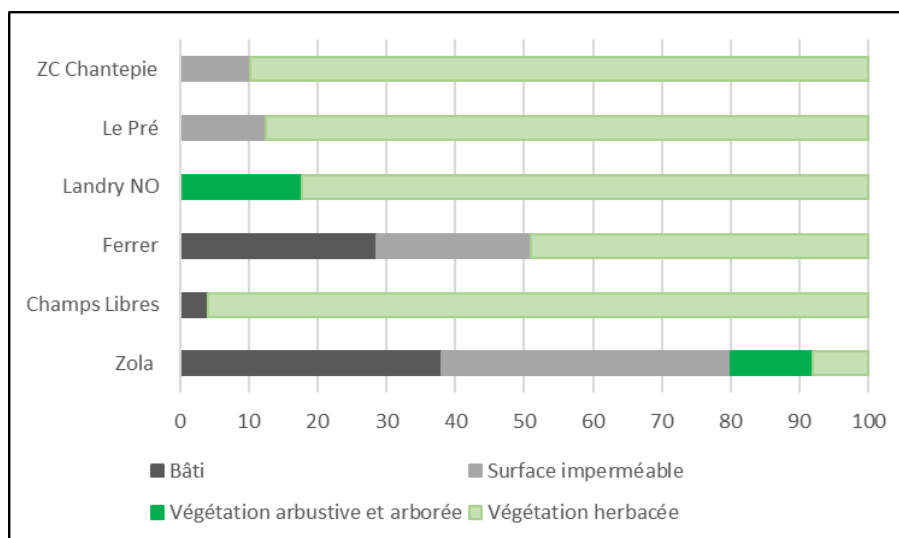
Selon la figure 37, dans un périmètre de 10 m autour des sites la végétation herbacée est présente à 100% à l'exception de deux sites : Zola et Ferrer. Dans le cas de Ferrer, moins de 20% de la surface est constituée de surface artificialisée. Dans le cas de Zola, le lycée occupe 30 % de la surface. Dans le cas de ce site, la végétation arbustive et arborée est une végétation de ville, c'est-à-dire que tout l'espace situé autour du tronc est bétonné. Ainsi le bâti et la surface imperméable occupent près de 80 % de la superficie dans un rayon de 10 m.



Alice Furet (2023)

Figure 37 : Proportion d'occupation du sol dans un rayon de 10m autour des stations de surface

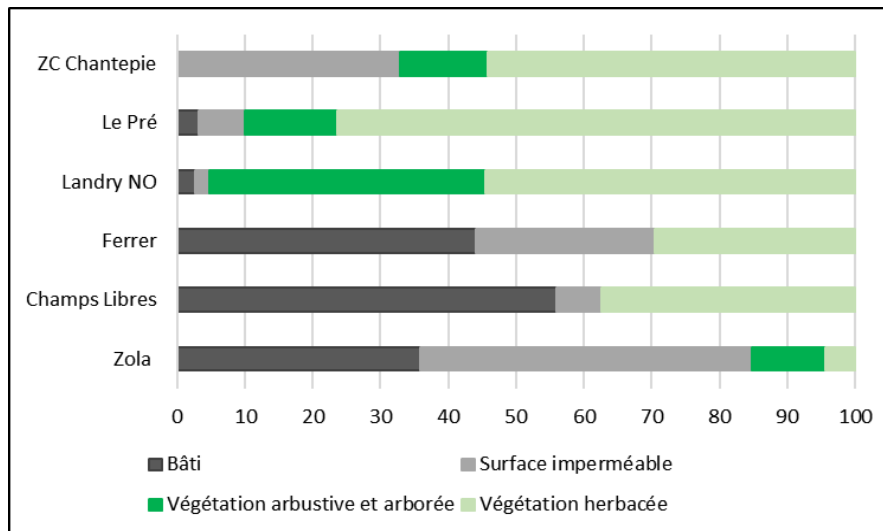
Dans un rayon de 20 m autour des sites, la végétation herbacée est encore une fois majoritairement présente mis à part pour Ferrer dont la proportion représente plus que la moitié alors que pour Zola, elle représente moins de 10 % (Figure 38). Les sites de "Chantepie" et "Le Pré" sont caractérisés par d'importantes surfaces artificialisées (ex : parkings, ...). Pour Champs Libres, une maison située au sud des capteurs fait son apparition dans le périmètre des 20m. Le site de Landry est très végétalisé sur l'ensemble de sa superficie.



Alice Furet (2023)

Figure 38 : Proportion d'occupation du sol dans un rayon de 20m autour des stations de surface

Enfin à 50 m (figure 39) autour des capteurs, la superficie de la végétation a été réduite au détriment des surfaces bâties et imperméables mis à part pour Le Pré qui a vu cette dernière catégorie se réduire. Pour Zola la surface herbacée représente moins de 5% de sa superficie, le bâti atteint 35% et la surface imperméable près de 50%. Champs Libres est l'unique site à atteindre plus de 50% de sa superficie occupée par le bâti. Chantepie se remarque par l'absence de bâti, le plus proche se situant à près du double de cette distance. Seul le Pré et Landry possèdent une superficie bâtie et imperméable faible, ne dépassant pas 10%.



Alice Furet (2023)

Figure 39 : Proportion d'occupation du sol dans un rayon de 50m autour des stations de surface

Si l'occupation du sol, notamment la distance par rapport aux bâtiments, possède un impact sur la température, le cas de Le Pré apparaît donc spécial, car malgré le fait qu'il est situé en périphérie de Rennes et n'a que peu de surface bâtie et imperméable, il mesure des températures fortes, parfois supérieures à celles de Le Hil. Les arbres qui recouvrent les capteurs peuvent expliquer la différence de variations de la température entre mars et juillet, puisqu'en mars les arbres ont moins de feuilles. Mais malgré cela, la température enregistrée reste élevée par rapport à une station en périphérie. Ce cas nous amène à nous questionner sur l'influence de la surface et de la composition du sol sur les températures de surface.

3.2. Effet de la structure de la végétation

L'objectif de cette partie est de se concentrer sur l'environnement très proche des sites. Les capteurs étant positionnés sur des zones enherbées, il est intéressant de regarder de plus près la nature de cette végétation et les facteurs pouvant avoir un effet sur la température enregistrée.

Tout d'abord, il est utile de se questionner sur le degré de végétalisation des zones enherbées, car un sol nu ne possède pas le même pouvoir rafraîchissant qu'un sol végétalisé (Renard et Alfonso, 2020). Ainsi d'après le tableau 5, il apparaît que les sites ne sont pas situés sur une zone herbacée à 100 %. Le Pré et Chantepie voit une proportion de végétation herbacée relativement basse durant plusieurs mois. En liant cette donnée avec le tableau des fréquences de fauches (tableau 6), la baisse de la proportion de la végétation herbacée devient plus claire avec par exemple le site Landry qui passe de 100% sur toute la durée de l'étude à 40% en septembre à la suite d'un fauchage ou encore Chantepie qui passe de 100 % en juillet à seulement 20% en juillet. Ferrer est le site le plus fauché, mais les capteurs étant situés sous une haie, la strate herbacée est donc protégée.

Tableau 5 : Proportion de la végétation autour des stations de surface par mois (1m)

Name	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Zola	NA	90	90	98	99	80	98
Champs Libres	100	99	100	100	100	50	75
Ferrer	99	100	100	100	100	90	95
Landry NO	100	100	100	100	100	100	40
Le Pré	40	50	80	70	60	50	70
ZC Chantepie	100	95	95	100	20	40	70

Valentin Cabon (2022)

Tableau 6 : Fréquence d'entretien des pelouses par mois

Name	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Zola	NA	no	fauché	fauché	no	no	no
Champs Libres	no	no	fauché	no	no	no	no
Ferrer	fauché	fauché	fauché	fauché	fauché	no	fauché
Landry NO	no	no	no	no	no	no	fauché
Le Pré	no	no	no	no	no	no	no
ZC Chantepie	fauché	no	no	no	fauché	fauché	no

Valentin Cabon (2022)

D'après les données concernant la proportion de sol nu (tableau 7), deux sites ressortent de la sélection : Zola et Le Pré. Dans le cas de Zola, il s'agit d'une végétation basse, située à proximité d'un chemin en gravier. Pour Le Pré, la part de sol nu est importante et atteint 40% pour les mois de mars, avril et juillet. De plus, le sol est piétiné au niveau de ces capteurs comme nous pouvons l'observer sur le tableau 8. Les sondes n'ayant aucun abri, même naturel, peut donc enregistrer des températures plus chaudes malgré sa localisation et son occupation du sol.

Tableau 7 : Proportion du sol nu autour des stations de surface par mois (1m)

Name	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Zola	NA	10	10	2	1	0	1
Champs Libres	0	0	0	0	0	0	5
Ferrer	1	0	0	0	0	0	0
Landry NO	0	0	0	0	0	0	0
Le Pré	40	40	10	20	39	30	15
ZC Chantepie	0	0	0	0	0	0	0

Valentin Cabon (2022)

Tableau 8 : Etat de la strate herbacée par stations de surface par mois (1m)

Name	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Zola	NA	no	no	no	sec	sec	no
Champs Libres	no	no	no	no	sec	sec	no
Ferrer	no	no	no	no	sec	no	no
Landry NO	no	no	no	no	sec	sec	no
Le Pré	piétiné	piétiné	piétiné	piétiné	piétiné	piétiné	piétiné
ZC Chantepie	no	no	no	no	sec	Résidus de fauche	no

Valentin Cabon (2022)

Enfin, le dernier facteur intéressant est la hauteur de la végétation herbacée. En effet, si l'herbe est assez haute pour recouvrir les sondes des capteurs, elle apporte un effet rafraîchissant supplémentaire sur les capteurs avec l'évapotranspiration. D'après le tableau 9, on retrouve deux sites avec une végétation basse : Zola et Ferrer dont la strate herbacée ne dépasse pas les 10 cm. Le Pré se fait remarquer par une hauteur basse (3-5 cm) qui atteint une hauteur de 20 cm en mai et 15 cm en juin. Ensuite le site Champs Libres apparaît avec une hauteur située entre 10 et 20 cm. Enfin, Landry et Chantepie se font remarquer avec une végétation atteignant les 40 cm en juin. Dans ce dernier cas, la hauteur de la végétation peut expliquer en partie la raison pour laquelle ces deux sites relèvent une température basse bien qu'elles soient situées au soleil.

Tableau 9 : Hauteur de la strate herbacée autour des stations de surface par mois (1m)

Name	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Zola	NA	10	5	10	10	7	7
Champs Libres	17	15	20	20	10	10	15
Ferrer	5	5	5	5	5	7	5
Landry NO	15	25	30	40	25	20	10
Le Pré	3	5	20	15	5	5	5
ZC Chantepie	17	15	25	40	10	10	10

Valentin Cabon (2022)

3.3. Effet de la structure du sol

Bien que la méthode utilisée ne soit pas précise, les échantillons prélevés sur le sol de chaque station de surface dévoile une tendance à un sol possédant un pourcentage élevé en argile pour les sites mesurant des températures plus basses (Champs Libres, Landry et Chantepie) (Annexe 1). Au contraire les sites captant des températures plus chaudes sont situés sur un sol à tendance moins argileuse et plus sableuse et limoneuse avec Le Pré. Zola reste l'unique site avec des températures de centre-ville à être sur un sol qui tend vers de l'argilo sableux. Cette partie permet d'élaborer l'hypothèse d'une occupation du sol ayant une influence plus ou moins forte, avec par exemple une influence de la texture du sol plus importante pour Le Pré et de l'occupation de sol pour Zola.

II. Les différences entre les températures atmosphériques et de surface sur de courtes périodes

Cette partie a pour objectif d'analyser les variations journalières des températures à une échelle temporelle plus fine, les données ne sont ainsi plus sur les minimales journalière mais sur les températures à pas de temps de 15 min. Pour cela, on observe la dynamique des températures sur deux périodes de cinq jours, au printemps et en été 2022 (du 21 au 25 mars et du 15 au 19 juillet). La dynamique des températures horaires est étudiée séparément sur la zone du centre-ville, la zone péri-urbaine et la zone rurale.

1. Variations temporelles

Tout d'abord, nous pouvons remarquer une différence entre la courbe des températures atmosphérique et microlocale. En effet, la température atmosphérique est constante et varie principalement entre le jour et la nuit. La température microlocale possède une plus grande amplitude entre la nuit et le jour par rapport aux températures locales. Comme les capteurs de surface ne possèdent pas d'abris, les températures de la journée sont très variables par temps clair ou couvert comme durant les journées de juillet pour le site de Champs Libres (surface). Les données microlocales en journée sont proches de 50°C en juillet alors qu'elles sont inférieures de plus de 10°C pour les données atmosphériques sous abris. C'est pour cette raison que cette étude se concentre principalement sur les données microlocales nocturnes.

Les figures 40, 41 et 42 montrent que, en mars comme en juillet, les températures de surface sont moins élevées que les températures atmosphériques, allant en moyenne de 1 à 5 °C selon les sites. Seuls trois sites de surface mesurent des températures similaires à la station atmosphérique de leur zone : Zola en mars et Ferrer et Le Pré en juillet. La température des sites de surface se refroidit à des heures similaires en soirée par rapport aux stations atmosphériques. Seuls les sites de surface péri-urbaines (Ferrer et Landry) enregistrent des températures qui se refroidissent une heure après celle d'Avenue de Cork. Au contraire au lever du jour, pour les deux mois, les sites de surface mettent généralement une à deux heures pour se réchauffer par rapport aux stations atmosphériques. La zone rurale, par exemple, située sur le secteur de "Chantepie" connaît également un décalage d'évolution de température plus important le matin (Figure 42). Par exemple, le 24 mars, la température de "Le Hil" commence à augmenter vers 6h45, suivie de "Le Pré" à 7h15 et enfin "Chantepie" à 8h. Ce décalage est moins important en juillet où les températures de "Le Hil" et de "Chantepie" augmentent à partir de 5h15 suivi par "Le Pré" vers 5h45. En juillet les températures enregistrées par "Le Hil" et "Le Pré" sont similaires avec une variation jour-nuit de 15°C, alors que comme pour les autres zones, "Chantepie" se démarque par des variations plus importantes (environ 36°C). En revanche, en mars, aucune température des stations de surface ne se rapproche des températures atmosphériques.

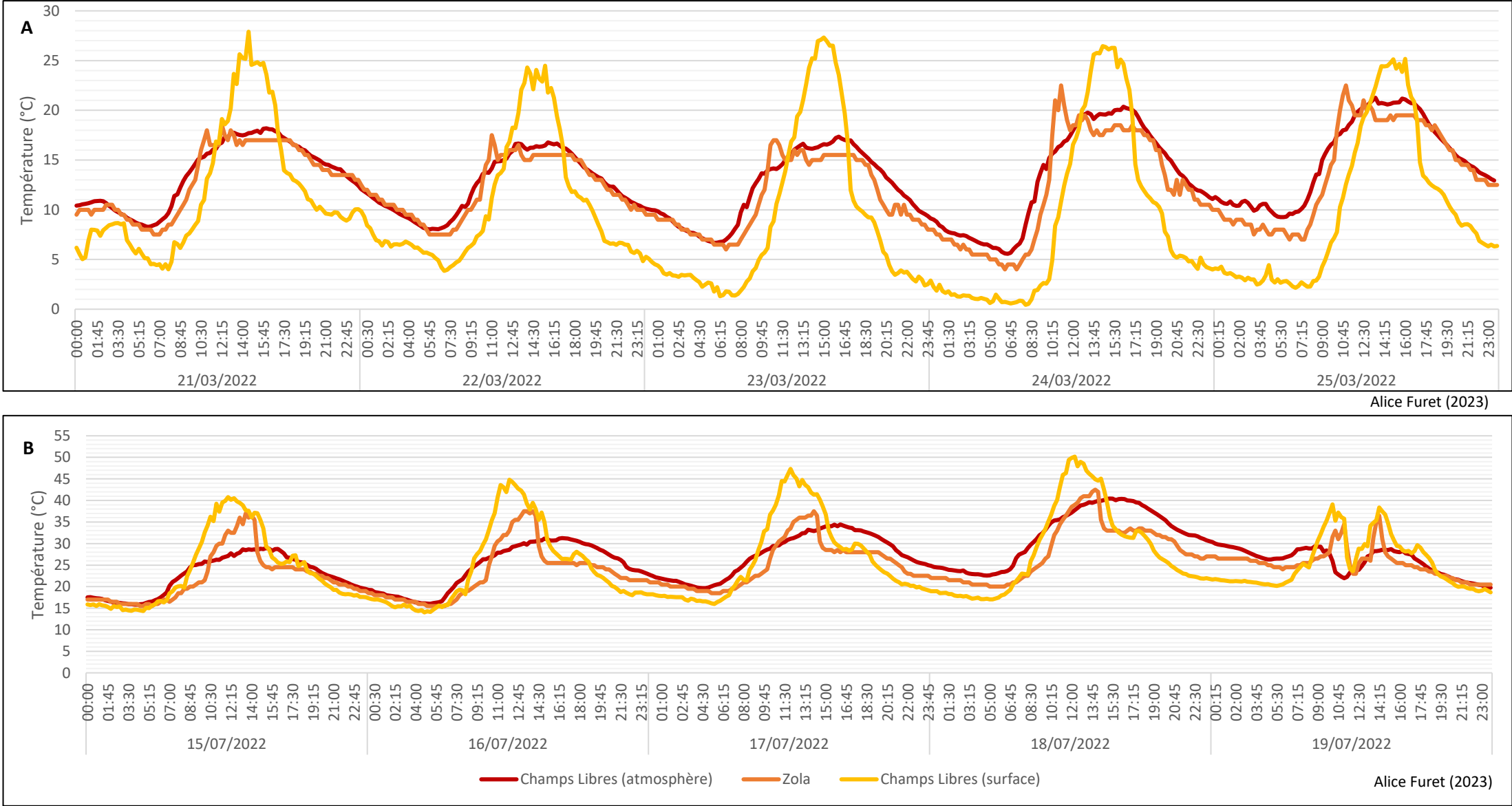
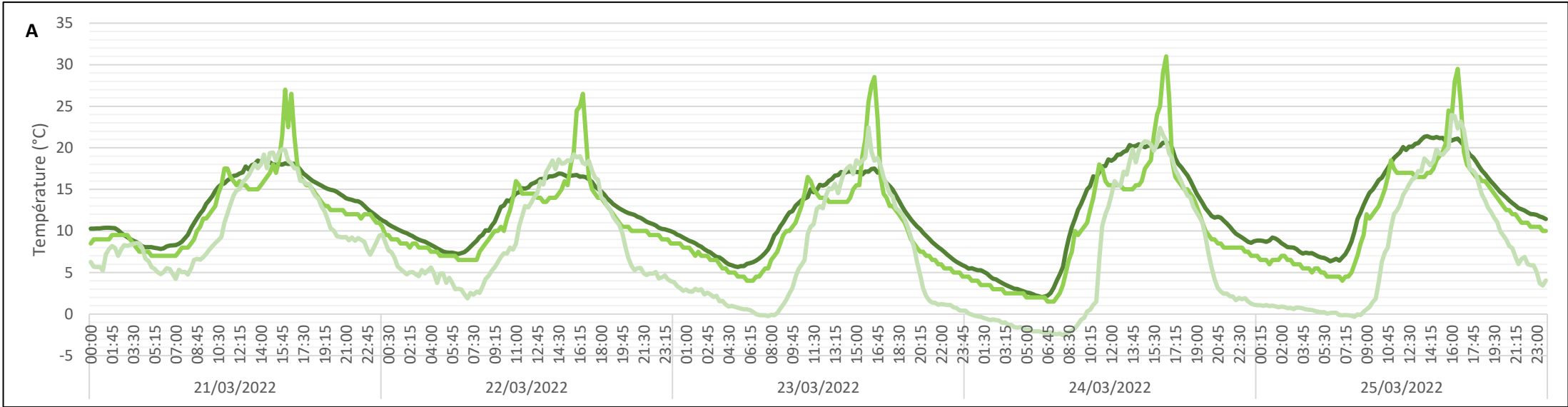
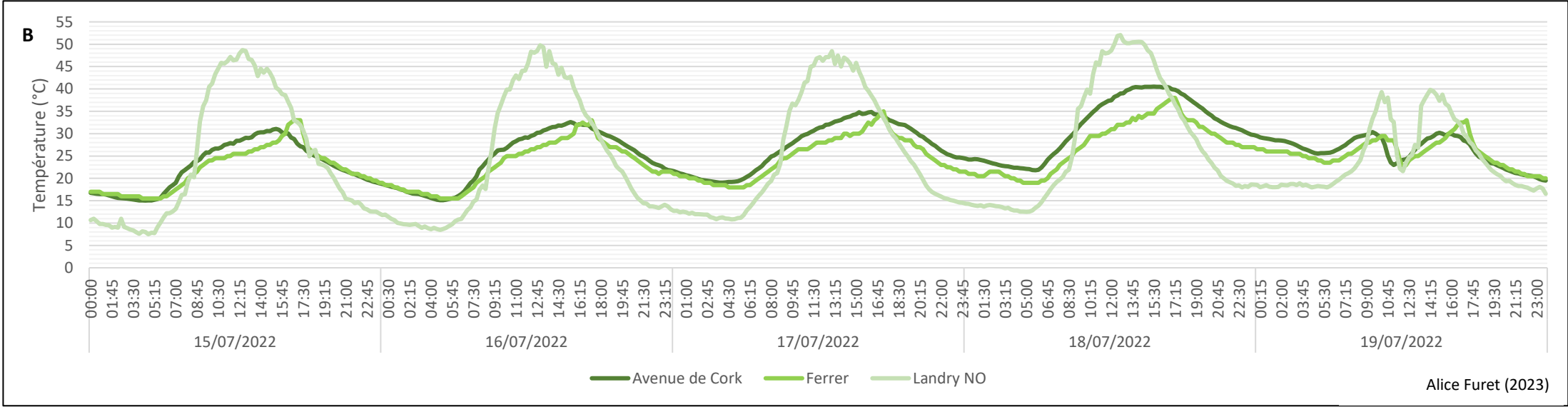


Figure 40 : Evolution de la température des stations du centre-ville (15 min) (A. du 21 au 25 mars, B., du 15 au 19 juillet)



Alice Furet (2023)



Alice Furet (2023)

Figure 41 : Evolution de la température des stations périurbaines (15 min) (A. du 21 au 25 mars, B., du 15 au 19 juillet)

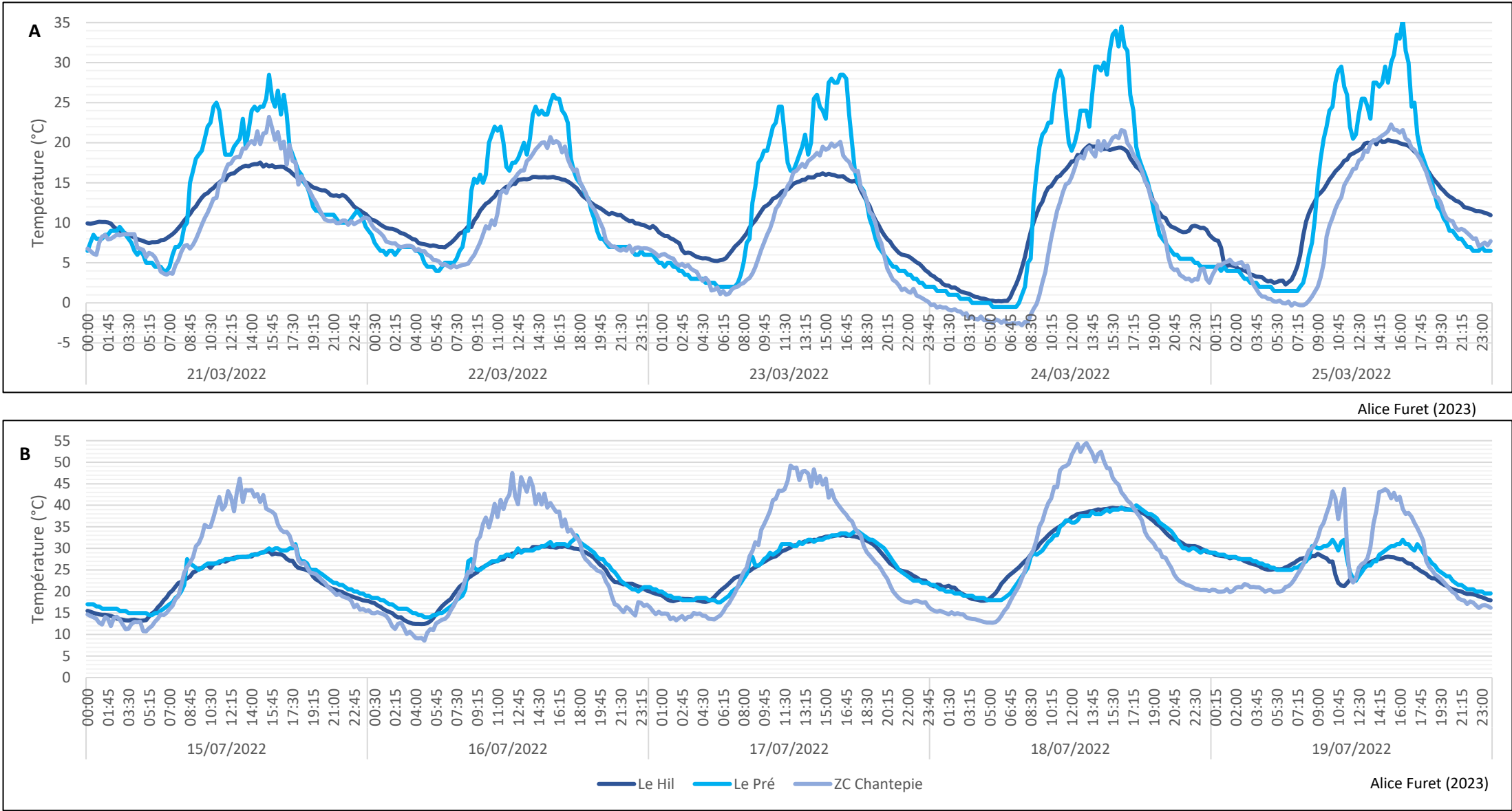
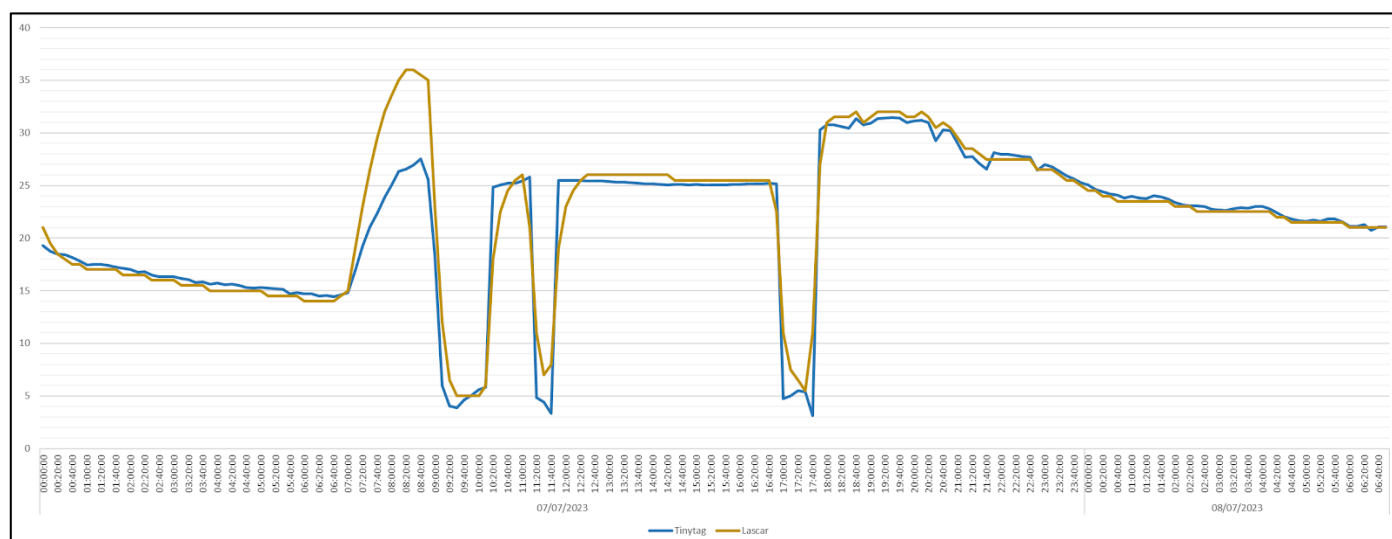


Figure 42 : Evolution de la température des stations rurales (15 min) (A. du 21 au 25 mars, B., du 15 au 19 juillet)

- Etude de la température mesurée par les deux capteurs de surface : le tinytag et le lascar.

D'après la figure 43, les deux capteurs mesurent des températures différentes face aux changements de température. En effet lorsqu'ils sont placés dans un milieu froid puis à température ambiante le tinytag semble être plus précis. Le lascar en revanche mesure des températures plus élevées lorsque les capteurs sont exposés au soleil (surement causé par le bouchon recouvrant en parti sa sonde). Néanmoins durant la nuit lorsqu'ils sont positionnés à l'extérieur les capteurs enregistrent les mêmes mesures. Dans tous les cas, cela reste un facteur à prendre en compte lors de l'analyse des résultats.



Alice Furet (2023)

Figure 43 : Résultats du test des deux capteurs de surface

2. Variations spatiales

L'analyse des courbes de températures atmosphériques nocturnes (Figure 44), met en évidence la différence de températures entre le centre-ville et la périphérie. Cette différence est d'habitude de quelques degrés (de 1 à 4°C) entre Champs Libres et Le Hil, mais elle peut être beaucoup plus grande. Cela est par exemple visible les nuits du 23 au 24 mars et du 24 au 25 mars où l'écart entre les deux stations est respectivement égal à 5,4°C et 7°C.

Cette « hiérarchie » des stations par rapport à leur localisation n'est pas similaire pour les stations de surface (Figure 45). En effet, d'après la figure 10, les capteurs n'enregistrent pas des températures suivant cette logique en mars comme en juillet. Pour donner un exemple le 24 mars à 6h15 (le moment où la température est la plus basse), Zola est le site qui enregistre la température la plus élevée avec 4°C. Il est suivi par Ferrer avec 2°C, puis par Champs Libres avec 0,7°C. Les trois derniers sites enregistrent une température négative avec Le Pré, Landry et Chantepie qui captent respectivement -0,5°C, -2,15°C et -2,2°C. Il ne s'agit pas d'un ordre respectif puisque la veille à la même heure Le Pré (2°C) occupe la troisième place derrière Zola (6,5°C) et Ferrer (4°C), suivi par Chantepie avec 1,5°C, Champs Libres avec 1,3°C et enfin Landry avec 0,48°C. En été, la différence est plus marquée entre Chantepie, Landry et les autres sites. Par exemple le 18 juillet à 5h15, Zola enregistre la température la plus élevée avec 20,5°C, suivi par Ferrer avec 19,5°C, Le Pré avec 18,5°C, Champs Libres avec 17,1°C et enfin Chantepie et Landry qui captent respectivement une température de 13,1°C et de 12,8°C.

Ainsi on remarque des températures captées qui ne sont pas représentatives de la localisation par rapport au centre-ville comme pour les températures atmosphériques. Zola est représentatif d'une station de centre-ville, tout comme Le Pré et Ferrer qui sont des sites périphériques et périurbains. Champs Libres qui est situé près de la station de référence urbaine du réseau atmosphérique du même nom capte la nuit des températures plus basses de quelques degrés. En juillet, Le Pré enregistre des températures plus élevées que Champs Libres, contrairement à mars. Enfin les sites de Landry (périurbain) et de Chantepie (rural) enregistrent une température bien plus basse que les autres sites en été. En mars, Chantepie capte certaines nuits des températures à la hauteur de celles de Le Pré et Champs Libres.

Il est clair que la localisation par rapport au centre-ville n'est pas l'unique paramètre qui explique la différence de température de surface. L'occupation du sol influence non seulement les températures minimales journalières, mais aussi les variations des températures à l'échelle journalière.

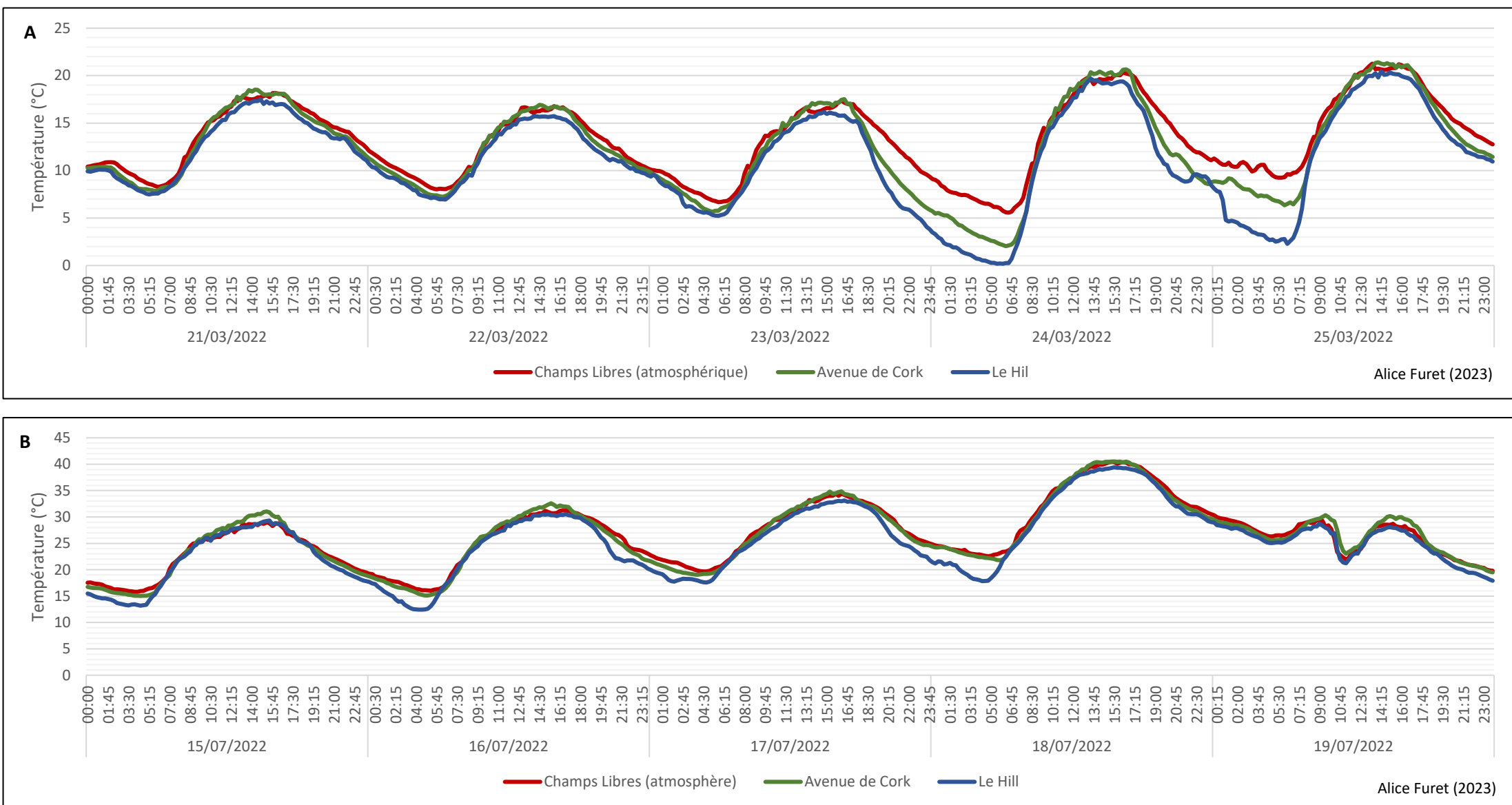


Figure 44 : Evolution des températures des stations atmosphériques (15 min) (A. du 21 au 25 mars, B. du 15 au 19 juillet)

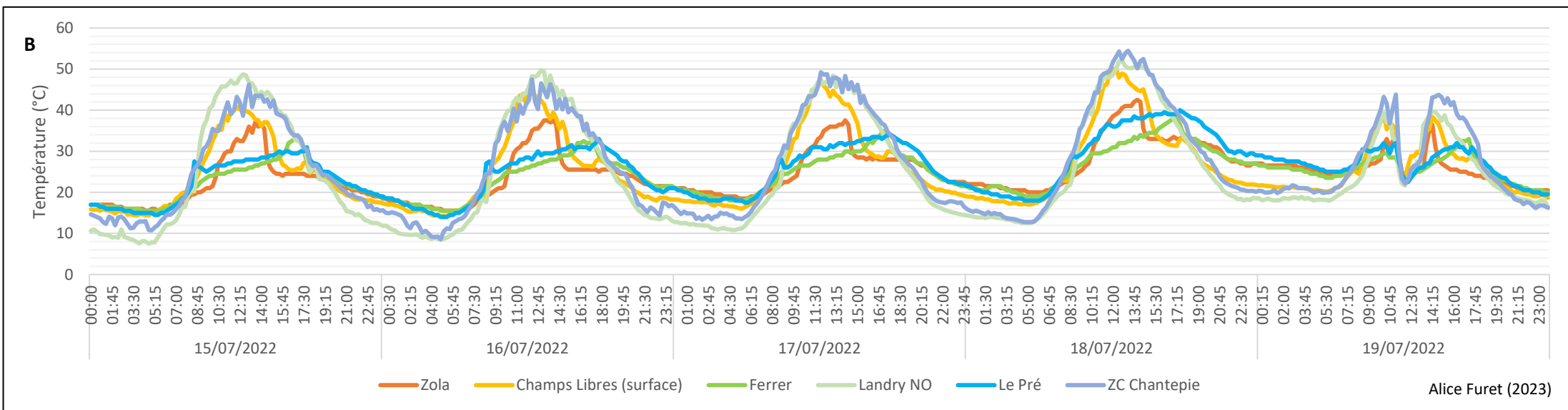
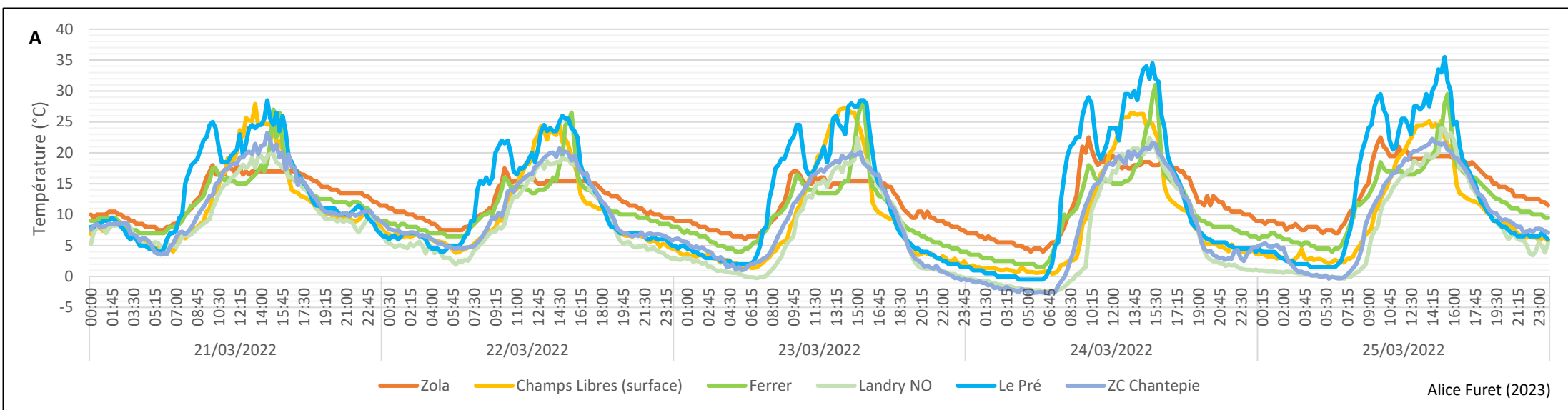


Figure 45 : Evolution des températures des stations de surface (15 min) (A. du 21 au 25 mars, B. du 15 au 19 juillet)

3. Relation avec les îlots de chaleurs urbains

3.1. Variations temporelles

Sur les 84 jours de mesures, 33 situations sont concernées par la formation d'un îlot de Chaleur Urbain (ICU) (Figure 46). Les nuits d'ICU sont inégalement réparties selon les mois avec 9 situations en mars et en juillet, 5 en août, 4 en avril. Juin, septembre et mai sont les mois avec le moins d'ICU, c'est-à-dire, respectivement 3, 2 et 1 épisode. Le nombre important d'ICU en mars et en juillet peut s'expliquer par le nombre plus important de situations atmosphériques avec ciel dégagé (24 mm en mars 2022 contre 52 mm en moyenne et moins de 1 mm en juillet 2022 contre 49 mm en moyenne), ainsi que l'augmentation des températures (10.3°C de moyenne en mars 2022 contre 8.6°C en moyenne et 21.3°C de moyenne en juillet 2022 contre 19.1°C en moyenne). Le mois de juin a connu un nombre de jours ICU plus faible, mais ses précipitations ont doublé par rapport à la moyenne (89 mm en 2022 contre 47 mm en moyenne). L'intensité des ICU est aussi inégalement répartie avec plus de jours ayant eu un ICU fort (4°C et plus) durant la période estivale, puisqu'ils représentent 10 jours d'ICU sur 17 entre juin et août.

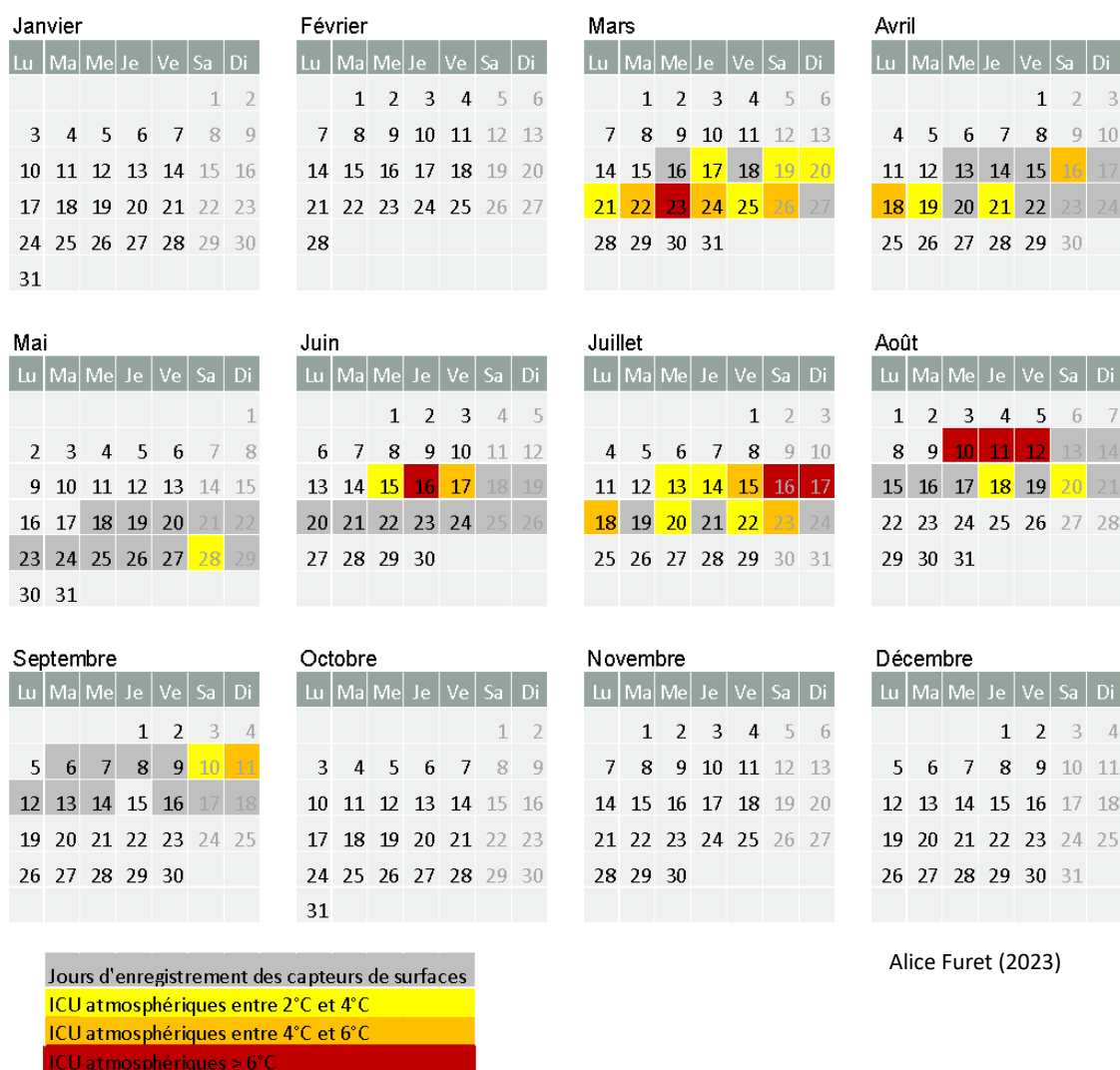
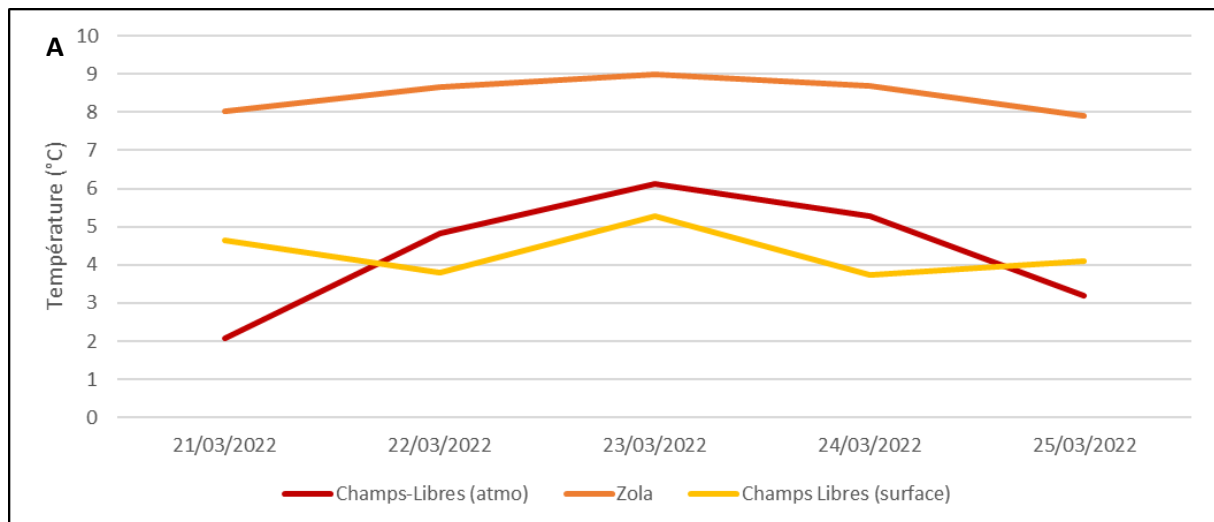
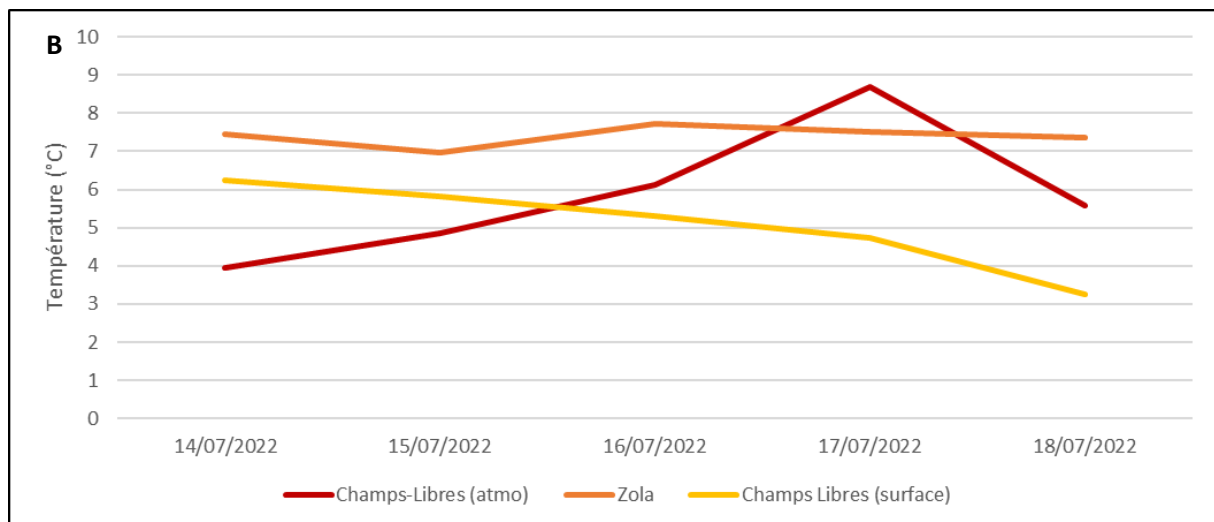


Figure 46 : Calendrier de l'intensité des ICU selon la période d'étude

Certains capteurs calculent un ICU plus élevé que les ICU atmosphériques en mars. En effet d'après la figure 47, Champs Libres (atmosphérique) atteint un ICU de 6°C durant la nuit du 23 au 24 mars alors que "Zola" enregistre un ICU de 9°C ce même jour. Au contraire, en juillet l'inverse se produit avec un ICU atmosphérique de près de 9°C dans le centre-ville durant la nuit du 17 au 18 contre 7,5°C à Zola. Ces cas sont similaires dans toutes les zones avec les stations atmosphériques et microlocales les plus chaudes (Zola, Ferrer et Le Pré). Par exemple, du 21 au 25 mars, Ferrer mesure un ICU qui stagne entre 6 et 7°C alors que la station atmosphérique périurbaine, Avenue de Cork, enregistre un ICU variable entre 1 et 4°C avec un pic atteint le 22 mars (Figure 48). Le même cas est observable entre Le Pré et Le Hil (Figure 49).

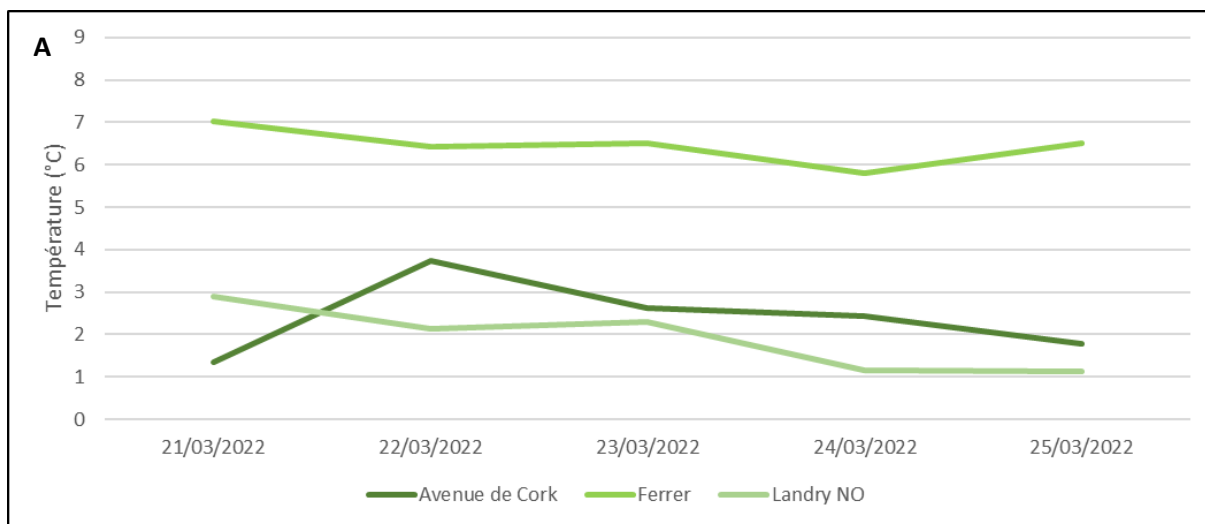


Alice Furet (2023)

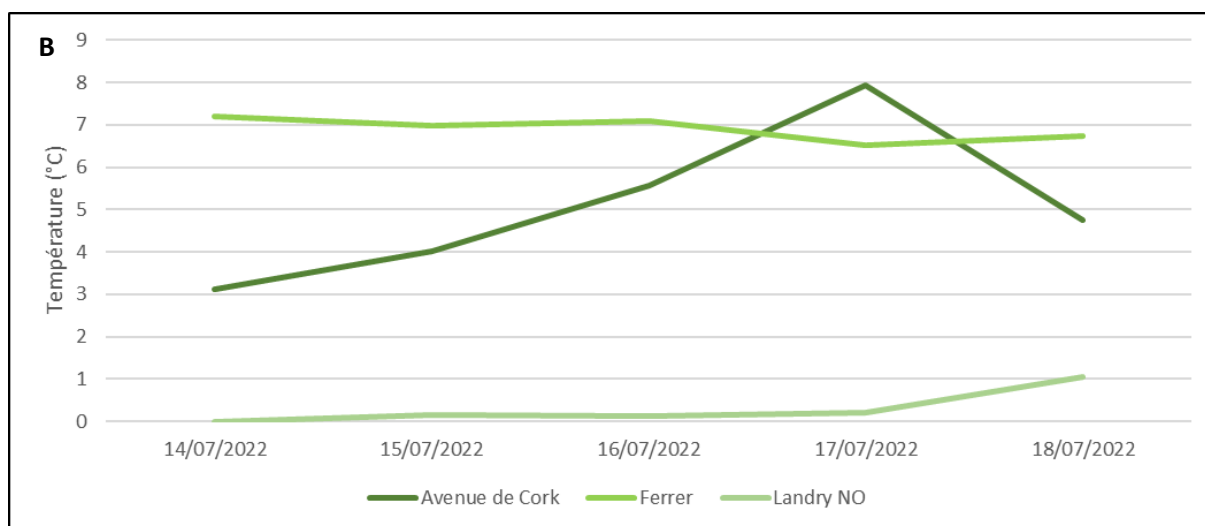


Alice Furet (2023)

Figure 47 : ICU entre les stations atmosphériques et de surface du centre-ville (A. du 21 au 25 mars, B. du 14 au 18 juillet)

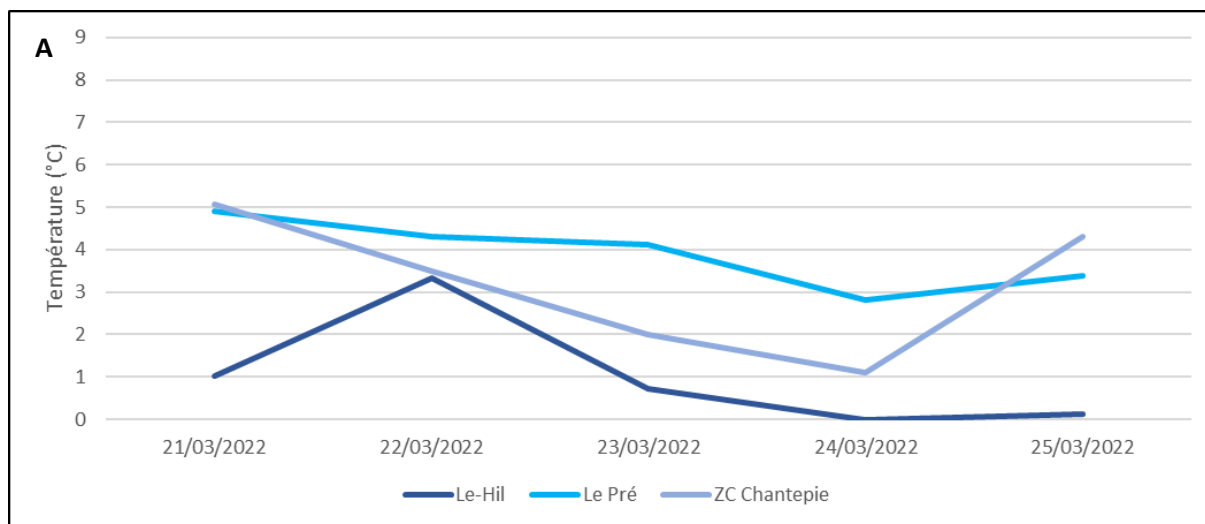


Alice Furet (2023)

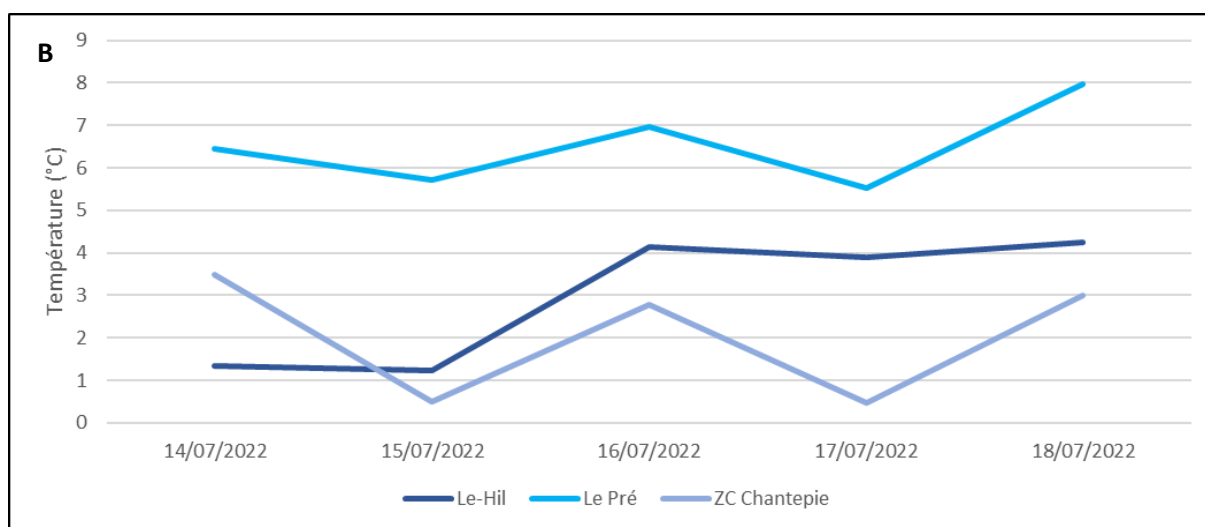


Alice Furet (2023)

Figure 48 : ICU entre les stations atmosphériques et de surface périurbaines (A. du 21 au 25 mars, B. du 14 au 18 juillet)



Alice Furet (2023)



Alice Furet (2023)

Figure 49 : ICU entre les stations atmosphériques et de surface rurales (A. du 21 au 25 mars, B. du 14 au 18 juillet)

3.2. Variations spatiales

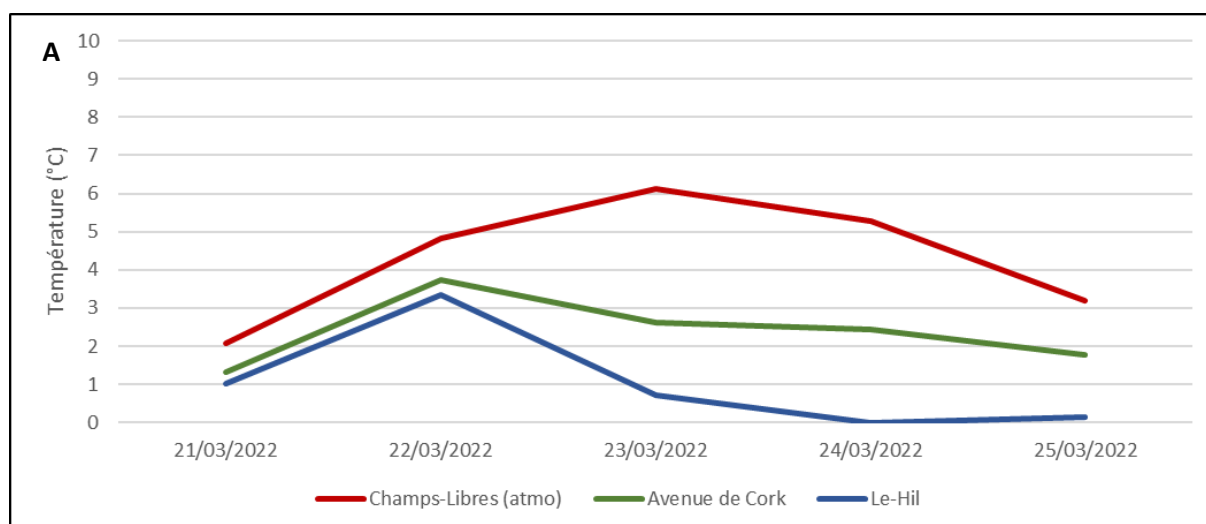
Bien qu'au niveau des températures les stations atmosphériques se rapprochent des sites microlocaux les plus chauds, au niveau des ICU (essentiellement en mars) les stations atmosphériques se rapprochent plus des stations microlocales froides (Champs Libres, Landry et Chantepie)(Figure 50).

Certains sites microlocaux affichent un ICU plus élevé en mars qu'en juillet (Zola, Landry et Chantepie) (Figure 51). Les autres sites au contraire dévoilent un ICU plus important durant le mois estival plutôt qu'en mars (Champs Libres, Ferrer et Le Pré. Par exemple, d'après la figure 14, ce dernier enregistre durant la nuit du 18 au 19 juillet un ICU plus fort que Zola à la hauteur de 8°C.

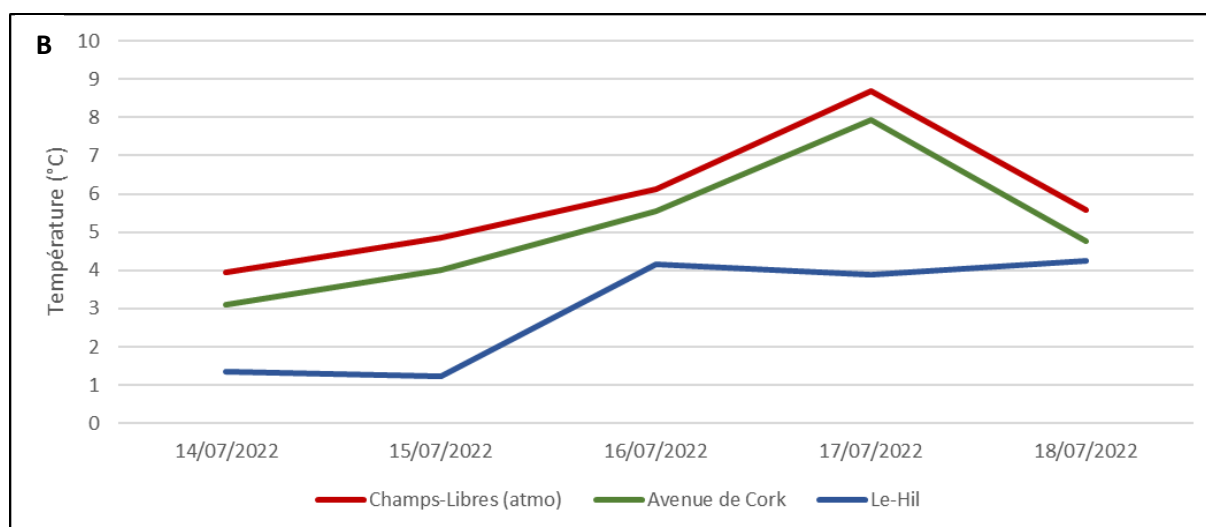
On remarque sans surprise parmi les sites microlocaux Landry et Chantepie qui affichent en juillet un ICU faible. En juillet la température de Chantepie est quasi égale à celle enregistrée par Monniais. Les

variations plus importantes des minimales nocturnes de Landry sont causées par une température plus élevée certaines nuits.

Les capteurs atmosphériques varient de 4°C(centre-ville) à 9 °C entre le 14 et le 17 juillet alors que les microlocaux sont constants durant cette période. Zola et ferrer varient de 1°C.



Alice Furet (2023)



Alice Furet (2023)

Figure 50 : ICU entre les stations atmosphériques (A. du 21 au 25 mars, B. du 14 au 18 juillet)

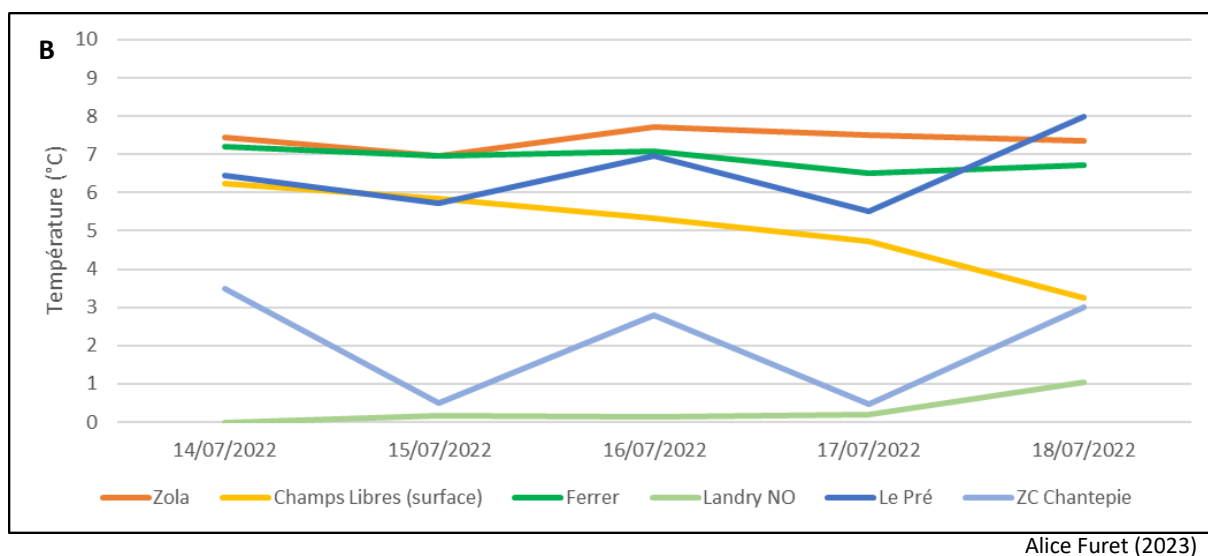
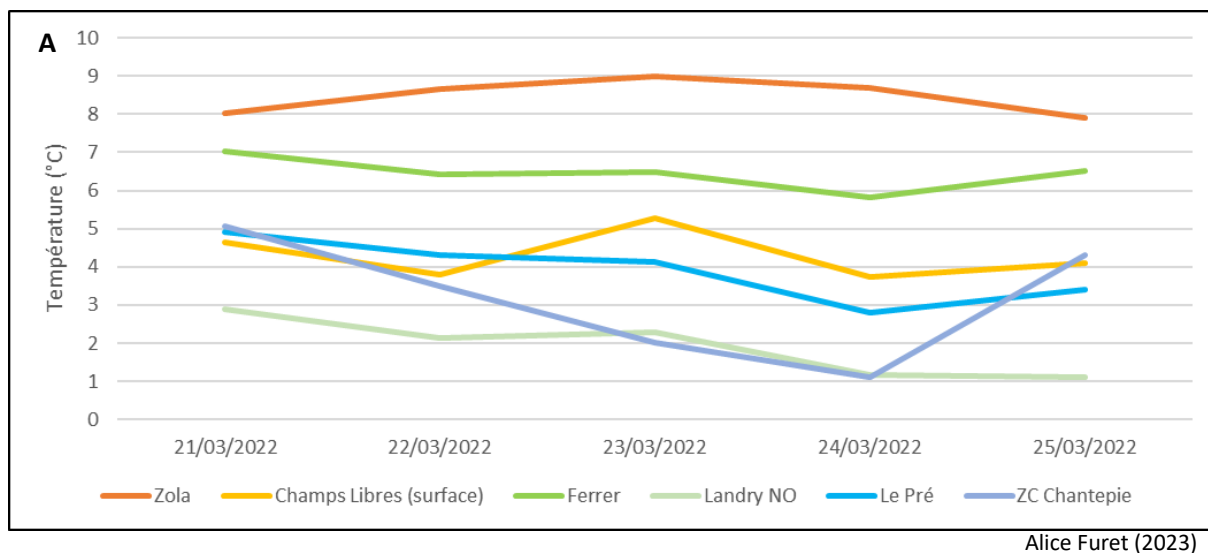


Figure 51 : ICU entre les stations de surface (A. du 21 au 25 mars, B. du 14 au 18 juillet)

Tout comme pour la température, L'ICU de surface est influencé par l'ICU local ainsi que par l'occupation du sol à l'échelle microlocale. Les résultats ici présents montrent un ICU de surface plus ou moins intense selon les sites que l'ICU atmosphérique. Cela amène une nouvelle fois à penser que l'occupation du sol possède une influence plus grande que l'ICU atmosphérique.

Partie 4 : Discussion des résultats

I. Les différences entre les stations atmosphériques et de surface sur la période des relevés

1. Variations temporelles et spatiales

Sur l'ensemble de la période d'étude, les températures minimales journalières à la surface suivent la dynamique des températures atmosphériques. Cependant, si les variations suivent les mêmes tendances aux deux échelles, les températures à la surface sont globalement plus basses que les températures atmosphériques. Trois sites montrent cet exemple : Champs Libres, Landry et Chantepie dont les températures minimales journalières atteignent jusqu'à 4°C de moins que les températures enregistrées par les stations atmosphériques de leur zone respective.

Néanmoins, tous les capteurs de surface ne suivent pas cette tendance. En effet les trois autres sites (Zola, Ferrer et Le Pré) présentent des températures de surface très similaires aux températures atmosphériques. Le cas de Le Pré est atypique, puisque les températures minimales journalières apparaissent légèrement supérieures à celles de la station atmosphérique correspondante (Le Hil). La température minimale journalière étant atteinte durant la nuit, cela signifie que contrairement aux autres sites de surface, Le Pré mesure une température nocturne parfois supérieure à celles de la station atmosphérique de sa zone.

Ces différents résultats obtenus sur les six sites de surface amènent à penser que les caractéristiques liées à l'occupation du sol, qui sont un des principaux facteurs impactant la température microlocale (Lehmann *et al.*, 2018) (Pincebourde *et al.*, 2016), peuvent expliquer l'hétérogénéité des variations des températures minimales journalières mesurées.

Même si les sites de surface froids de chaque zone mesurent des températures minimales journalières inférieures aux températures atmosphériques, ces différences sont plus ou moins importantes selon la zone. En effet, dans le centre-ville, les températures à la surface sont plus élevées et la différence avec la température atmosphérique et Champs Libres est plus faible (jusqu'à 3°C). Au contraire, les zones périurbaine et rurale mesurent des différences allant jusqu'à 4°C et 5°C entre la station à la surface la plus basse et la station atmosphérique de leur zone. De plus, cette différence de température est essentiellement observable durant la saison estivale (Figure 36). La diminution de l'écart entre les températures aux deux échelles peut s'expliquer par la présence d'une occupation du sol imperméable et dense au centre-ville contre des espaces verts en périphérie de Rennes. Par exemple Zola est recouvert à plus de 85 % de surface artificialisée dans un rayon de 50 m contre un peu plus de 30 % pour Chantepie (Figure 39). Cette différence est plus présente en période estivale, car l'occupation du sol, notamment les espaces végétalisés, doit davantage impacter la température lors des vagues de chaleurs.

2. Relations avec l'occupation du sol

Tout comme l'étude de Renard et Alonso (2020), les résultats présentés dans cette étude montrent une température de surface régie par la morphologie urbaine et la végétation. Le site de Zola, situé dans le centre-ville, se trouve dans un canyon urbain à moins de 5 m d'une façade en pierre. La proportion de surface artificialisée élevée et la surface végétalisée faible dès 20 m autour du capteur (Figure 38) peuvent expliquer la température élevée mesurée par le capteur qui est souvent similaire à la température atmosphérique. Le cas du site Champs Libres (capteur de surface) est différent. Bien que le site soit situé en centre-ville et entouré de bâtiments, les capteurs sont situés sur un espace végétalisé relativement grand (1 643 m²). L'effet refroidissant de l'évapotranspiration doit donc être plus important que sur le site de Zola. La station Ferrer qui enregistre des températures similaires à Zola, se situe dans un jardin sous une haie. On pourrait tout d'abord penser que cette station devrait enregistrer des températures plus basses que la station de surface du centre-ville notamment grâce à l'évapotranspiration issue de la végétation. Néanmoins, au vu des résultats, il semblerait que la proximité avec le mur de la maison ainsi qu'une végétation rase qui ne protège pas les capteurs des rayonnements solaires (Zola et Ferrer) explique la température mesurée plus élevée. Une hypothèse apparaît également concernant la taille réduite de la surface enherbée sur ces deux sites (88 m² pour Zola et 148 m² pour Ferrer) qui expliquerait un refroidissement moins important de la température durant la nuit contrairement aux sites où la surface de végétation est plus grande (Chantepie, Landry et Champs Libres). La température mesurée par Le Pré est surprenante, car la station est située en périphérie dans un espace constitué d'arbres clairsemés. Contrairement aux résultats issus de la même occupation du sol de l'étude de Renard et Alfonso (2020), « Le Pré » affiche des températures nocturnes égales voire plus élevées que celles de « Zola », le site le plus urbanisé. Les deux derniers sites, « Landry » et « Chantepie » affichent des températures représentatives de l'îlot de fraîcheur causé par la grande proportion de végétation.

La résolution des données d'occupation du sol ne permettant pas de quantifier la présence d'éléments de petite taille à échelle fine (par exemple inférieurs à 10m), les proportions de certains éléments jouant un rôle dans les variations de températures de surface ont pu être sous-évaluées (la surface enherbée où se situe Zola). Ainsi, une cartographie fine de terrain pourrait permettre d'améliorer la caractérisation des occupations du sol autour des sites.

Les résultats indiquent que l'effet de la structure de la végétation joue un rôle sur la température. En effet l'étude de Renard et Alfonso (2020) a démontré que la température était plus élevée sur un sol nu que sous des arbres clairsemés. Cet exemple nous aide à comprendre le cas de « Le Pré », qui présente des températures élevées, bien qu'il soit entouré de végétation. La nature du sol (quasiment nu et piétiné) doit, en raison d'une évapotranspiration faible, supplanter l'impact des arbres environnants. Le fait que les stations « Champs Libres », « Landry » et « Chantepie » présentent des températures plus faibles que les autres stations de surface indique que la hauteur de végétation joue un rôle important. Bien que généralement la température mesurée dans une végétation herbacée soit plus élevée qu'avec les autres strates de la végétation (Renard et Alonso, 2020), une végétation herbacée suffisamment haute pour recouvrir la sonde protège les capteurs d'une partie du rayonnement tout en apportant une évapotranspiration importante. La proportion de végétation ainsi que sa hauteur ont ainsi un effet important sur la température de surface.

Estimer la texture du sol au niveau des sites de la surface est intéressant, car un sol possédant une grande capacité de rétention d'eau permet notamment de refroidir la température de l'air à la surface

via l'évaporation (Lehmann, 2018). Il s'agit d'un facteur important à prendre en compte lorsqu'on s'intéresse à la température microlocale. Bien que la méthode utilisée ne permette pas d'obtenir qu'une catégorisation grossière des sols selon leur texture, une tendance indique une proportion plus importante d'argile dans le sol sur les sites plus froids au niveau du sol (« Champs Libres », « Landry » et « Chantepie »). Au contraire, les sites de « Ferrer » et de « Le Pré » pourraient enregistrer des températures plus élevées en parti à cause de la structure de leur sol, composé principalement de limons et de sables. Ces deux textures, comme l'explique Lehmann (2018) ont une capacité de rétention de l'eau plus faible que l'argile, qui pourraient donc apporter moins d'évaporation à la surface.

Une étude plus poussée des relations entre microclimat et structure du sol nécessiterait des données quantitatives de composition des sols, uniquement disponibles par une analyse en laboratoire.

II. Les différences entre les températures atmosphériques et de surface sur de courtes périodes

1.. Variations temporelles et spatiales

A l'échelle journalière et au sein d'une même zone (urbaine, périurbaine, rurale), une première tendance apparaît concernant les températures (brute) nocturnes mesurées sur les stations de surfaces : celles-ci sont plus basses que l'air atmosphérique (de 1 à 5°C). Même si quelques sites enregistrent des températures nocturnes similaires entre les deux échelles, « Zola » au printemps et « Ferrer » et « Chantepie » en été, les températures nocturnes ont tendance à être plus basses à la surface, qu'à deux mètres, ce qui est conforme aux résultats décrits par Oke *et al.*, 2017. A l'inverse, en conditions diurnes les températures microlocales sont plus élevées (Oke *et al.*, 2017). Nos résultats montrent que les températures aux deux échelles ont tendance à se refroidir dans la soirée, à des heures similaires. La baisse des températures de surface est d'ailleurs plus importante que celle de l'air, car la chaleur accumulée par le sol en journée se perd rapidement la nuit tombée. Au contraire, le matin, les températures de surface se réchauffent généralement plus tard que la température de l'air (1 à 2h). Ceci peut s'expliquer par un sol qui se réchauffe plus lentement que l'atmosphère et qui donc impacte la température de l'air à sa surface. De plus, l'effet d'ombre additionné à une potentielle rosée qui apporte de l'humidité pour les zones végétalisées peuvent également jouer un rôle dans ce retard (Zhang et Xiao, 2013). Tout comme l'explique Renard et Alonso (2020), les variations de la température de l'air à la surface sont beaucoup plus importantes entre le jour et la nuit que les variations de la température de l'air ambiante.

Afin d'étendre les comparaisons entre échelles aux conditions diurnes sur la base de données non biaisées par le rayonnement solaire, de futures études pourraient inclure des températures mesurées en surface, sous abris. Réaliser ce type de mesure reste cependant compliqué en milieu urbain en raison des possibles vols ou dégradations de matériel.

A l'échelle journalière les stations atmosphériques suivent la tendance d'une température qui baisse en fonction de l'éloignement par rapport au centre-ville. Si dans notre cas, cette tendance se confirme au printemps, c'est moins le cas en été avec des températures similaires entre les stations « Zola », « Ferrer » et « Le Pré ». En revanche, les autres stations de surface montrent bien un refroidissement des températures dans les zones fortement végétalisées avec « Landry » et « Chantepie », parfois suivi de « Champs Libres » au printemps. Le changement de météo du 19 juillet montre une grande sensibilité des capteurs de surface à l'humidité, qui atteignent tous la même température contrairement aux températures atmosphériques, qui restent hétérogènes.

2.. Discussion des résultats sur l'ICU

Bien que les températures de surface nocturnes soient plus basses que les températures atmosphériques, l'inverse peut s'observer sur les ICU, qui peuvent atteindre au printemps 3°C et plus en surface (Zola). Seuls les sites de Champs Libres et de Landry mesurent un ICU similaire à l'ICU atmosphérique de leur zone respective (Champs Libres et Avenue de Cork). Sur la période enregistrée, les ICU forts sont plus présents durant la période estivale. Pour avancer ce propos, ces nuits d'ICU forts

reflètent les trois vagues de chaleur qui ont touché l’Ille-et-Vilaine en juin, juillet et août (BSP, 2022). Bien que les vagues de chaleurs se répercutent dans les ICU atmosphériques, elles ne reflètent pas les ICU de surface qui sont souvent plus faibles lorsque l’ICU atmosphérique est fort. Ces résultats suggèrent un impact rafraîchissant de la surface et de la végétation plus important sur les températures de la surface. Les sites situés dans une zone fortement végétalisée (Landry et Chantepie) ont par exemple montré un ICU bien plus faible que l’ICU atmosphérique de leur zone respective. Nous n’avons observé aucune covariation entre l’ICU atmosphérique et l’ICU de surface, ce qui suggère un impact fort de l’occupation du sol à l’échelle fine (quelques dizaines de mètres) sur l’ICU de surface.

L’analyse de l’ICU de surface est complexe, car le calcul de l’écart de la température microlocale se fait avec une station de référence de surface (« Monniais »). La température microlocale étant très variable (Pincebourde et Salle, 2020), l’ICU se calcule avec des températures de points précis à une date précise. De plus, la station de surface de référence : Monniais utilise des capteurs Tinytag dont la température sera soustraite à celles des autres capteurs Tinytag et Lascar. La comparaison entre les ICU locaux et de surface est également pénible car les stations de références des deux échelles enregistrent des températures différentes (bien que ces températures soient souvent similaires) (figure méthodo). De plus, les jours d’enregistrement des capteurs de surface sont limités. Certains jours d’ICU hors de la période estivale n’ont par exemple pas été pris en compte.

Les ICU atmosphériques tendent, tout comme pour les températures, vers un ICU plus fort en centre-ville qu’en périphérie (Dubreuil *et al.*, 2020). Tout comme pour les températures, on ne retrouve pas cette tendance au niveau de la surface. Par exemple les stations Zola, Ferrer et Le Pré montrent un ICU fort (tous situés à 1°C près). En revanche, cette tendance se retrouve dans les écarts par rapport à l’ICU atmosphérique d’une même zone, avec par exemple Zola qui montre un écart de 3°C et plus par rapport à l’ICU atmosphérique mesuré sur Le Pré qui mesure une différence de 1°C et plus avec Le Hill. Encore une fois, les zones végétalisées reflètent les ICU de surface les plus froids. Mise à part pour les deux stations de surface périphériques, la corrélation entre les différents sites est légère, voire nulle.

Conclusion

Pour conclure, cette étude a montré que la température à l'échelle de la surface est très variable. Elle est directement influencée par le climat local et l'occupation du sol à l'échelle fine, à savoir les surfaces artificialisées (comme le bâti) et la végétation. En effet, les zones végétalisées, grâce à l'évapotranspiration, forment des îlots de fraîcheur. Au contraire, les zones urbanisées provoquent un effet réchauffant sur la température ambiante et de surface du fait de l'absorption et la restitution des rayonnements solaires. Les variables de la nature de la surface ainsi que de la texture du sol influencent également la température de la surface. Ce sont ces facteurs qui engendrent les différences de températures entre les échelles locales et microlocales, notamment au niveau des variations des températures de la fin de la journée jusqu'au matin suivant. Les stations de surface mesurent des températures qui ne sont pas représentatives de la zone urbaine dans laquelle elles se situent, par exemple le site de surface Champs Libres.

L'ICU, la différence entre la température du centre-ville et de la campagne marque donc une variabilité en fonction de l'éloignement du centre-ville. L'ICU de surface est influencé quant à lui, par les effets microlocaux de l'occupation du sol qui génèrent une forte variabilité de température sur les petits espaces, comme c'était le cas avec « Le Pré ».

Ainsi, au-delà des impacts climatiques, les effets microlocaux liés à l'occupation du sol ont des répercussions non négligeables sur les températures microlocales, ce qui a une incidence sur les arthropodes, notamment les araignées.

Bibliographie

- Anderson, Rodolfo O., Craig R. White, David G. Chapple, et Michael R. Kearney. 2021. « A Hierarchical Approach to Understanding Physiological Associations with Climate ». *Global Ecology and Biogeography* 31 (2): 332-46. <https://doi.org/10.1111/geb.13431>.
- Battista, Gabriele, Emanuele de Lieto Vollaro, Paweł Octoń, et Andrea Vallati. 2021. « Effect of Mutual Radiative Exchange between the Surfaces of a Street Canyon on the Building Thermal Energy Demand ». *Energy* 226: 7. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120346>.
- Beltrando, Gérard. 2016. « Les géographes - climatologues français et le changement climatique aux échelles régionales ». *EchoGéo*. <https://doi.org/10.4000/echogeo.11816>.
- Bright, Vivien Bianca, William James Bloss, et Xiaoming Cai. 2013. « Urban Street Canyons: Coupling Dynamics, Chemistry and within-Canyon Chemical Processing of Emissions ». *Atmospheric Environment* 68 (avril): 127-42. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.056>.
- Bruand, Ary, Odile Duval, H Gaillard, R Darthout, et Marcel Jamagne. 1996. « Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols: importance de la densité apparente. » *Étude et Gestion des Sols*.
- Caton, F., R.E. Britter, et S. Dalziel. 2003. « Dispersion Mechanisms in a Street Canyon ». *Atmospheric Environment* 37 (5): 693-702. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00830-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00830-0).
- Dubreuil, V., X. Foissard, J. Nabucet, A. Thomas, et H. Quénot. 2020. « Fréquence et intensité des îlots de chaleur à Rennes : bilan de 16 années d'observations (2004-2019) ». *Climatologie* 17: 6. <https://doi.org/10.1051/climat/202017006>.
- Dubreuil, Vincent, Charlotte Brabant, Gabriel Delaunay, Jean Nabucet, Hervé Quénot, Frédéric Clain, et François Leprince. 2022. « Rennes, une ville climato-intelligente ? L'IOT au service du suivi des îlots de chaleur », 24.
- Dubreuil, Vincent, Hervé Quénot, Xavier Foissard, et Olivier Planchon. 2011. « Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain à Rennes ». *Ville et Biodiversité*, 24.
- Fallot, J-M, Martine Rebetez, Yves Bonard, J-P Dind, Sandra Guinand, et Marianne Thomann. 2008. « Villes et climat ». *Vues sur la ville*, n° 21: 8.
- Foissard, X., V. Dubreuil, et H. Quénot. 2019. « Defining Scales of the Land Use Effect to Map the Urban Heat Island in a Mid-Size European City: Rennes (France) ». *Urban Climate* 29: 100490. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100490>.

- Foissard, Xavier. 2015. « L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique: application à l'agglomération rennaise ».
- Foissard, Xavier, Hervé Quénol, et Vincent Dubreuil. 2013. « Analyse et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'agglomération rennaise ». In *Actes du 26e colloque de l'AIC, Cotonou, Bénin*, 242-47.
- Hesselbarth, Maximilian, Marco Sciaini, Kimberly With, Kerstin Wiegand, et Jakub Nowosad. 2019. « landscapemetrics : an open-source R tool to calculate landscape metrics ». *Ecography* 42: 1648-57. <https://doi.org/10.1111/ecog.04617>.
- Hu, Youpei, Marcus White, et Wowo Ding. 2016. « An Urban Form Experiment on Urban Heat Island Effect in High Density Area ». *Procedia Engineering* 169: 166-74. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.020>.
- Lauffenburger, Mireille. 2010. « Îlot de chaleur urbain, plan climat et prévention des canicules urbaines Urban heat island, climate plan and urban heat waves prevention ». *POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE*.
- Lehmann, P., O. Merlin, P. Gentine, et D. Or. 2018. « Soil Texture Effects on Surface Resistance to Bare-Soil Evaporation ». *Geophysical Research Letters* 45 (19): 10,398-10,405. <https://doi.org/10.1029/2018GL078803>.
- Lembrechts, Jonas J., Ivan Nijs, et Jonathan Lenoir. 2019. « Incorporating Microclimate into Species Distribution Models ». *Ecography* 42 (7): 1267-79. <https://doi.org/10.1111/ecog.03947>.
- Levy, Albert. 2016. « Changement climatique, îlot de chaleur urbain et impacts sanitaires : Paris et son urbanisme ». *Environ Risque Sante* 15: 6.
- Oke, T. R. 1987. *Boundary Layer Climates*. 2^e éd. London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203407219>.
- Oke, T. R., G. Mills, A. Christen, et J. A. Voogt. 2017. *Urban Climates*. 1^{re} éd. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>.
- Pincebourde, Sylvain, Courtney C. Murdock, Mathew Vickers, et Michael W. Sears. 2016. « Fine-Scale Microclimatic Variation Can Shape the Responses of Organisms to Global Change in Both Natural and Urban Environments ». *Integrative and Comparative Biology* 56 (1): 45-61. <https://doi.org/10.1093/icb/icw016>.
- Pincebourde, Sylvain, et Aurélien Salle. 2020. « On the importance of getting fine-scale temperature records near any surface ». *Global Change Biology* 26 (11): 6025-27.

- Pincebourde, Sylvain, et H Arthur Woods. 2020. « There Is Plenty of Room at the Bottom: Microclimates Drive Insect Vulnerability to Climate Change ». *Current Opinion in Insect Science* 41 (octobre): 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2020.07.001>.
- Potter, Kristen A., H. Arthur Woods, et Sylvain Pincebourde. 2013. « Microclimatic Challenges in Global Change Biology ». *Global Change Biology* 19 (10): 2932-39. <https://doi.org/10.1111/gcb.12257>.
- Quénol, Hervé. 2002. « Modifications Climatiques aux Echelles Fines Générées par un Ouvrage Linéaire en Remblai ». *USTL, Lille, France*.
- Quénol, H. 2012. « Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique », 104.
- Renard, Florent, et Lucille Alonso. 2020. « Températures de surface et mesures mobiles confrontées aux zones climatiques locales : exemples des agglomérations de Tokyo et de Lyon ». *Climatologie* 17: 11. <https://doi.org/10.1051/climat/202017011>.
- Sears, M. W., E. Raskin, et M. J. Angilletta. 2011. « The World Is Not Flat: Defining Relevant Thermal Landscapes in the Context of Climate Change ». *Integrative and Comparative Biology* 51 (5): 666-75. <https://doi.org/10.1093/icb/icr111>.
- Stewart, I. D., et T. R. Oke. 2012. « Local Climate Zones for Urban Temperature Studies ». *Bulletin of the American Meteorological Society* 93 (12): 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.
- Wong, Nyuk Hien, Yueer He, Ngoc Son Nguyen, Srivatsan V. Raghavan, Miguel Martin, Daniel Jun Chung Hii, Zhongqi Yu, et Jiyu Deng. 2020. « An Integrated Multiscale Urban Microclimate Model for the Urban Thermal Environment ». *Urban Climate* 35: 17. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100730>.
- Yang, Li, Feng Qian, De-Xuan Song, et Ke-Jia Zheng. 2016. « Research on Urban Heat-Island Effect ». *Procedia Engineering* 169: 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.002>.

Table des figures

Figure 1 : Les différentes échelles du climat.....	8
Figure 2 : Formes générales typiques des couches limites urbaines à mésoéchelle . Erreur ! Signet non défini.	
Figure 3 : Etalement typique de l’atmosphère au-dessus de la ville. a. en journée et b. la nuit.....	10
Figure 4 : Ecart de la température de l’air à la surface à travers un microhabitat	11
Figure 5 : Exemple de la différence de température entre l’atmosphère et l’air au niveau du sol selon le changement d’occupation du sol.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 6 : Classification des Local Climat Zones.....	15
Figure 7 : Exemple typique d’un ICU entre le centre-ville et la campagne proche	16
Figure 8 : Schéma présentant les facteurs de la variabilité temporelle de l’ICU.....	17
Figure 9 : Réseau de mesures météorologiques dans l’agglomération rennaise en 2019	18
Figure 10 : Localisation des capteurs connectés dans l’agglomération rennaise en fonction de la classification des LCZ	19
Figure 11 : Variabilité horaire et saisonnière de l’ICU à Rennes de 2004 à 2019 entre la station de référence rurale (Melesse) et celle du centre-ville (Griffon).....	20
Figure 12 : Fréquences mensuelles des classes d’intensité d’ICU nocturne quotidien à Rennes de 2004 à 2019 entre les stations de Melesse et de Griffon.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 13 : Localisation de la zone d’étude.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 14 : Occupation du sol de Rennes et de Chantepie.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 15 : Diagramme ombrothermique des données moyennes à la station Rennes-Saint Jacques.	24
Figure 16 : Rose des vents de Rennes	Erreur ! Signet non défini.
Figure 17 : Anomalies mensuelles des températures et des précipitations de 1979 à 2022	26
Figure 18 : Diagramme ombrothermique des données de la station Rennes-Saint Jacques en 2022	Erreur ! Signet non défini.
Figure 19 : Calendrier des jours enregistrés par les stations de surface	29
Figure 20 : Les deux capteurs de surface	Erreur ! Signet non défini.
Figure 21 : Les deux réseaux de capteurs	Erreur ! Signet non défini.
Figure 22 : Localisation des stations atmosphériques et de surface sélectionnées... Erreur ! Signet non défini.	
Figure 23 : Localisation des stations atmosphérique et de surface du centre-ville ... Erreur ! Signet non défini.	
Figure 24 : Emplacement de la station de surface Zola	Erreur ! Signet non défini.
Figure 25 : Station atmosphérique de Champs Libres (centre-ville)	Erreur ! Signet non défini.
Figure 26 : Emplacement de la station de surface Champs Libres	Erreur ! Signet non défini.
Figure 27 : Localisation des stations atmosphérique et de surface péri-urbaine Erreur ! Signet non défini.	
Figure 28 : Station atmosphérique péri-urbaine de Avenue de Cork.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 29 : Emplacement de la station de surface Ferrer	Erreur ! Signet non défini.
Figure 30 : Emplacement de Landry	Erreur ! Signet non défini.
Figure 31 : Localisation des stations atmosphérique et de surface rurales Erreur ! Signet non défini.	
Figure 32 : Station atmosphérique rurale Le Hil.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 33 : Emplacement de la station de surface Le Pré.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 34 : Emplacement de la station de surface Chantepie	Erreur ! Signet non défini.
Figure 35 : Exemple de deux boudins	Erreur ! Signet non défini.

Table des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des stations atmosphériques sélectionnées	32
Tableau 2 : Récapitulatif des stations de surface sélectionnées	32
Tableau 3 : Distance et hauteur du bâtiment le plus proche de chaque station de surface	47
Tableau 4 : Taille et caractéristiques moyennes de la pelouse de chaque station de surface	47
Tableau 5 : Proportion de la végétation autour des stations de surface par mois (1m)	50
Tableau 6 : Fréquence d'entretien des pelouses par mois	50
Tableau 7 : Proportion du sol nu autour des stations de surface par mois (1m)	50
Tableau 8 : Etat de la strate herbacée par stations de surface par mois (1m)	51
Tableau 9 : Hauteur de la strate herbacée autour des stations de surface par mois (1m)	51

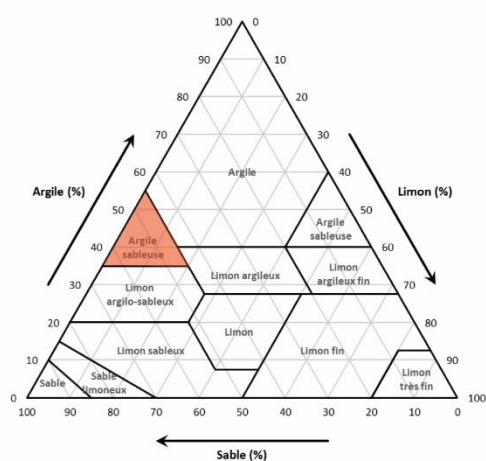
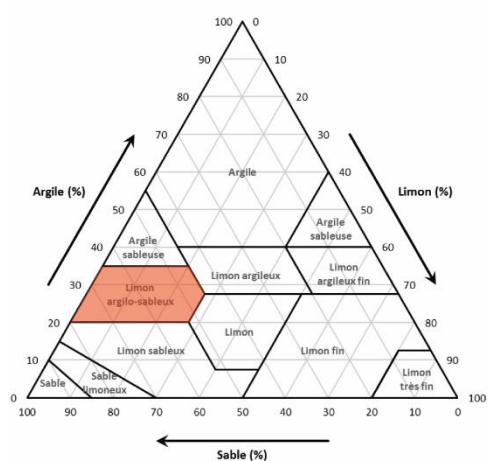
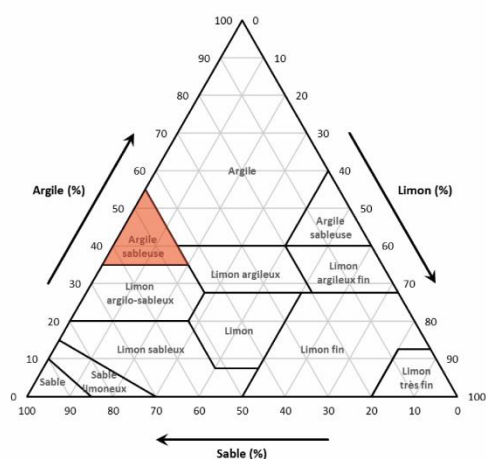
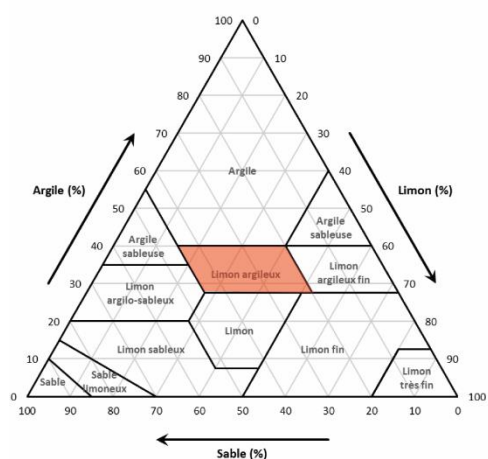
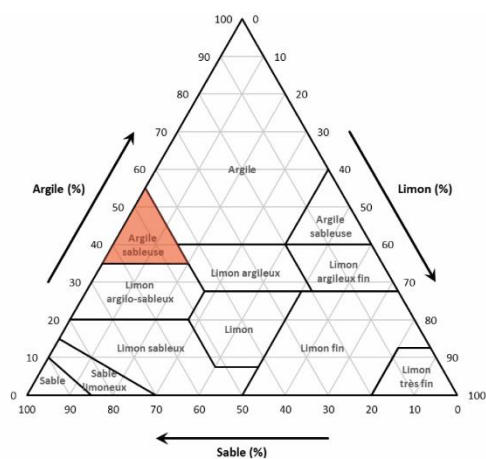
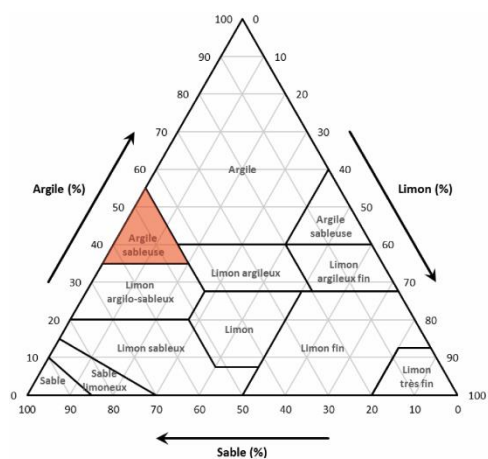
Résumé

Dans un contexte de changement climatique, l'augmentation du nombre et de l'intensité des vagues de chaleur aggrave les îlots de chaleur urbains (ICU) ce qui pose de nombreux problèmes sanitaires. Ce contexte a amené la réalisation de nombreuses études portant sur les impacts sur les hommes et les animaux, mais peu au titre des effets microlocaux sur les arthropodes, d'où l'intérêt d'étudier ce phénomène. La température de l'air à l'échelle microlocale est hétérogène du fait de l'environnement urbain et du climat local. Elle est encore peu étudiée. En appui sur deux réseaux de stations mesurant des températures à l'échelle atmosphérique et microlocale, ce mémoire a pour objectifs : premièrement de comparer les variabilités temporelles et spatiales des températures mesurées par les deux réseaux. Ensuite d'appliquer le même mode d'analyse sur les données d'ICU. Et finalement, de déterminer les effets des facteurs microlocaux d'occupation du sol sur les températures et ICU microlocaux.

Abstract

Against a backdrop of climate change, the increase in the number and intensity of heat waves is exacerbating urban heat islands (UHI), posing numerous health problems. This context has led to numerous studies on the impact on humans and animals, but few on the micro-local effects on arthropods, hence the interest in studying this phenomenon. Air temperature at the micro-local level is heterogeneous due to the urban environment and local climate. It is still little studied. Based on two networks of stations measuring temperatures at atmospheric and microscales, the objectives of this dissertation are: firstly, to compare the temporal and spatial variability of temperatures measured by the two networks. Secondly, to apply the same analysis method to UHI data. And finally, to determine the effects of microlocal land use factors on microlocal temperatures and UHI.

Annexe



Annexe 1 : Résultats de la texture du sol par stations de surface