



HAL
open science

La ville de Caen est-elle soumise à un phénomène d'îlot de chaleur urbain ?

Mathys Cenier

► **To cite this version:**

Mathys Cenier. La ville de Caen est-elle soumise à un phénomène d'îlot de chaleur urbain ?. Géographie. 2022. dumas-03896146

HAL Id: dumas-03896146

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03896146>

Submitted on 13 Dec 2022

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

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

UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE
UFR SEGGAT
SCIENCES ÉCONOMIQUES, GESTION, GÉOGRAPHIE ET AMÉNAGEMENT DES TERRITOIRES
UMR-CNRS 6266 IDEES CAEN GÉOPHEN
DÉPARTEMENT DE GÉOGRAPHIE

LA VILLE DE CAEN EST-ELLE SOUMISE À UN PHÉNOMÈNE D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN ?



© Mathys Cenier

Mémoire présenté par
Mathys CENIER
en vue de l'obtention du diplôme de Master 1 GAED
(Géographie, Aménagement, Environnement, Développement)

Préparé sous la direction de M. Olivier CANTAT,
enseignant-chercheur habilité, géographe-climatologue

Juin 2022

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de mon mémoire de Master 1. Je souhaite également remercier toutes les personnes qui se sont impliquées pour l'installation des stations.

Je souhaite remercier mon professeur référent, M. Olivier Cantat, enseignant chercheur, géographe-climatologue à l'Université de Caen Normandie, pour m'avoir accordé sa confiance et partagé son savoir. Je tiens à le remercier particulièrement pour son implication et surtout pour m'avoir partagé ses précieux conseils.

Je remercie la Mairie de Caen pour nous avoir permis d'installer les stations météorologiques dans l'espace public. Je veux notamment remercier M. Arnaud Marie, Responsable du service Transition énergétique et Mme Vanida Allain, Directrice du développement durable, de la transition énergétique et de la prévention des risques. Un grand merci à Mme Nelly Hubert, responsable du Jardin Botanique, ainsi qu'à Mme Florence Thérèse, botaniste au Jardin des Plantes, pour nous avoir accordé du temps et permis d'installer notre station au sein du parc. Je tiens à remercier Mme Elisa Martel (locataire) et M. Franck Senevat (propriétaire) de nous avoir prêté une partie de leur jardin afin d'y installer notre station.

Je tiens à remercier le laboratoire IDEES-Caen Géophen de nous avoir permis le financement du projet. Je remercie aussi les membres du laboratoire pour le prêt de matériel ainsi que pour leur aide pour l'installation des stations. Ces remerciements s'adressent particulièrement à Matthieu David, doctorant, ainsi qu'à M. Robert Davidson, ingénieur d'études au laboratoire.

Je saisis cette occasion pour remercier mes camarades de promotion pour les moments partagés au sein de la cartothèque, pour leur aide, leur soutien sans faille ainsi que pour leur bonne humeur.

Enfin, je tiens à remercier Ninon pour son implication dans mon mémoire. Sa rigueur scientifique m'a permis de progresser tout au long du travail. Je souligne aussi son intérêt pour mon sujet, sujet qui a d'ailleurs animé plus d'une conversation au cours de l'année.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	7
Partie I : Description et origine de l'îlot de chaleur urbain	9
1.1 Comment définit-on la climatologie-urbaine ?	9
1.2 L'îlot de chaleur urbain	9
1.3 L'origine de l'élévation des températures	10
1.4 Mesures thermiques.....	15
Partie II : L'îlot de chaleur urbain dans un contexte de changement climatique. La ville de Caen est-elle à risque ?.....	19
2.1 Les enjeux sur la santé.....	19
2.2 Pourquoi la ville de Caen est-elle intéressante à étudier ?	20
2.3 Contexte d'augmentation des températures	244
Partie III : Analyse de l'occupation du sol et contexte topographique du territoire Caennais	299
3.1 L'occupation du sol	29
3.2 La topographie de la ville de Caen	344
Partie IV : Méthodes de mesures	37
4.1 Contextualisation	37
4.2 Démarches auprès de la Mairie de Caen pour l'installation des stations	39
4.3 Démarches dans le choix de l'emplacement des stations météorologiques	40
4.4 Les sites retenus	424
4.5 Représentation de la répartition géographique des stations	46
4.6 Proposition de sites supplémentaires	47
Partie V : Modélisation de l'îlot de chaleur urbain	53
5.1 Classification LCZ	53
5.2 Projet « MAPUCE ».....	60
Partie VI : Analyse et interprétation des résultats obtenus	65
6.1 Analyse générale	65
6.2 Discussion des résultats sous forme de données horaires	68
6.3 Zoom sur une période à fort ICU	71
6.4 Etude de l'îlot de chaleur caennais par type de temps	73
6.5 Les particularités repérées	78
6.6 Analyse de l'ICU lors de fortes chaleurs	81
6.7 Comparaison entre la modélisation et l'ICU relevé	83
CONCLUSION.....	85
Bibliographie.....	95

INTRODUCTION

A l'heure actuelle, le changement climatique est au cœur de nombreux débats. En effet, de plus en plus de personnes commencent à prendre conscience de la situation alarmante dans laquelle l'humanité se trouve. Les scientifiques sont unanimes : le climat est en train de changer. Le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) datant de 2021, indique que « la température de la planète devrait augmenter de 1,5°C dès 2030, soit dix ans plus tôt que la précédente version du GIEC » (<https://www.vie-publique.fr>).

Ce changement climatique est causé en très grande partie par les activités humaines. Il paraît évident que l'influence humaine entraîne des changements rapides et généralisés (Ministère de la transition écologique, 2021) sur les écosystèmes. D'après les experts du GIEC « les activités humaines affectent toutes les principales composantes du système climatique » (Masson *et al.*, 2021). Avec la population grandissante, les espaces urbanisés se multiplient. Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, nous assistons en effet à un processus d'urbanisation des espaces agricoles et naturels. Ce processus transforme les espaces ruraux en espaces urbains (Baud *et al.*, 2003). En France, selon l'INSEE en 2017, plus de 8 personnes sur 10 vivent dans une unité urbaine. C'est-à-dire, une commune ou un ensemble de communes présentant une zone de bâti continu qui compte au moins 2000 habitants.

Ce réchauffement aurait de nombreuses conséquences « irréversibles pour des siècles ou des millénaires » (<https://www.vie-publique.fr>). Le changement climatique auquel nous sommes en train d'assister est à l'origine de la modification de nombreux paramètres. Dans un premier temps, il modifie l'ensemble des écosystèmes et impacte la totalité des organismes présents sur terre. Selon l'Office Français de la Biodiversité (OFB), « la biodiversité est en chute libre » (<https://www.ofb.gouv.fr>). Nous pouvons parler d'une extinction de masse. De plus, la fréquence et l'intensité des événements climatiques extrêmes ne cessent d'augmenter. Les océans et les mers ne sont pas épargnés, leur niveau augmente et leur composition est modifiée. Les gaz à effet de serre sont, en effet, à l'origine de l'acidification des milieux marins.

Le changement climatique n'impacte pas seulement les milieux naturels et la biodiversité. Les populations humaines sont également largement impactées. En effet, ce changement a des effets directs sur les Hommes. L'augmentation des températures détériore les conditions de vie. En mai 2022, le mercure a dépassé les 50°C en Inde et au Pakistan. Encore plus récemment, en juin 2022, la France a connu une période caniculaire très précoce avec des températures supérieures à 35°C sur la majorité de la métropole. Nous pouvons également nous appuyer sur un événement particulièrement meurtrier : la canicule qui a eu lieu en 2003 en France. Le nombre de décès est estimé à près de 15 000 personnes (<https://www.santepubliquefrance.fr>). En effet, une importante partie de la population (personnes âgées, enfants, personnes malades...) est fragile et par conséquent particulièrement sensible à ce type d'événements caniculaires. Le problème auquel nous sommes confrontés est donc bien réel.

De plus, le GIEC prévoit une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes caniculaires. Il est devenu routinier d'observer les records de températures tomber les uns après les autres. Les 7 dernières années ont été les plus chaudes jamais enregistrées selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) (<https://meteofrance.com>). Les températures moyennes de ces dernières années sont généralement supérieures de plus d'un degré en comparaison à l'époque préindustrielle.

Face à ces enjeux de changement climatique et de disparition des espaces naturels, il paraît plus que nécessaire de trouver des solutions afin de limiter le changement climatique et ses effets néfastes. Une solution est souvent évoquée pour les espaces urbanisés, particulièrement sujets au phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Ce dernier est à l'origine d'une augmentation des températures dans les espaces urbanisés, il serait donc important de le limiter. Ce phénomène a été observé pour la première fois par Luke Howard, qui a découvert le phénomène à Londres en 1820. L'étude de l'ICU surtout développée « à partir de la fin des années 1960 [...] avec la mise en place de capteurs pour comprendre les échanges de chaleur entre les villes et l'atmosphère. » (<https://lejournel.cnrs.fr>). Nous détaillerons ce phénomène par la suite.

En effet, les projections climatiques prévoient d'ici la fin du siècle une augmentation de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur dans différentes régions du monde. Il est donc nécessaire de mieux comprendre le climat urbain pour pouvoir préparer les villes à ce changement (<https://www.umr-cnrm.fr>). La ville de Caen ne sera probablement pas épargnée par ce phénomène d'élévation des températures. Il est essentiel de trouver des solutions afin de limiter le réchauffement des villes et donc de limiter cet effet d'îlot de chaleur.

La présente étude va permettre de mieux appréhender cette question de changement climatique et de mieux connaître les risques encourus. Le but de l'étude est d'identifier les îlots de chaleur et les îlots de fraîcheur au sein même de la ville de Caen. Il est primordial de développer les connaissances sur ces sujets. En effet, à l'heure actuelle, nous ne disposons pas de données qui nous permettent d'évoquer ou non la présence de cet îlot de chaleur urbain sur la ville de Caen. L'objectif de ce mémoire est donc d'améliorer les connaissances thermiques de Caen, en mesurant les températures, dans plusieurs lieux stratégiques de la ville. L'amélioration des connaissances climatiques de la ville pourra, par la suite, permettre d'évaluer la présence ou non de d'ICU sur Caen. Cette étude thermique traitera aussi les îlots de fraîcheur urbain (IFU).

La problématique à laquelle nous essayerons de répondre est la suivante : « Caen, ville de taille moyenne au climat océanique, est-elle soumise au phénomène d'îlot de chaleur urbain ? ». Dans l'idéal, cette première étude ne constitue que les prémices d'une étude à plus large échelle. Par conséquent, afin de répondre à la problématique, nous nous fonderons dans un premier temps uniquement sur des données météorologiques relevées dans le centre-ville de Caen, avec comme référence « rurale » la station Météo-France de Caen-Carpiquet et une de nos stations expérimentales sur la Prairie de Caen.

Partie I : Description et origine de l'îlot de chaleur urbain

1.1 Comment définit-on la climatologie-urbaine ?

La climatologie peut être définie comme « une discipline scientifique relative au climat, dont l'objet principal est la caractérisation et la classification des divers types de climats, leur localisation géographique, leurs fluctuations à court et moyen terme ainsi que l'étude des causes de leur diversification spatiale et de leur évolution dans le temps » (Parcevaux *et al.*, 1990).

Notre étude porte sur un domaine en particulier de la climatologie, la climatologie urbaine. En effet, le climat présent dans les villes est singulier. Il est modifié par nos activités, provoquant des topoclimats d'échelle plus fine et des microclimats dans les espaces les plus confinés. Les activités humaines participent à l'augmentation des températures en ville mais d'autres paramètres sont à prendre en compte. En effet, à ce dégagement de chaleur anthropique, s'ajoute l'occupation du sol. Celle-ci peut se définir comme « la couverture (bio) physique de la surface des terres émergées » et donc le type d'utilisation (ou de non-usage) par l'Homme (<https://www.fao.org>). Notre mode de vie, de par les nombreuses constructions notamment, cause l'imperméabilisation des sols, ce qui exerce une pression non négligeable sur notre environnement. De plus en plus, l'Homme transforme ce qui l'entoure. Or, ces transformations impactent la biosphère. Les surfaces imperméabilisées sont de plus en plus importantes contrairement aux surfaces végétalisées, qui elles, régressent. Ces surfaces imperméabilisées sont notamment impliquées dans l'augmentation de la température car elles sont capables d'accumuler de l'énergie solaire au cours de la journée. La chaleur accumulée dans les matériaux urbains est à l'origine des écarts de températures mesurés entre les villes et leur périphérie. De fait, nous le ressentons tous, il fait plus « chaud » dans les villes que dans l'espace rural. Cela correspond au phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU).

Dans un contexte de changement climatique et de croissance spatiale et démographique des villes, l'étude du climat urbain apparaît comme plus qu'essentielle.

1.2 L'îlot de chaleur urbain

L'îlot de chaleur urbain est la principale caractéristique du climat dans les villes. C'est un phénomène d'élévation des températures d'origine anthropique. Cela correspond à une sorte de dôme d'air plus chaud couvrant la ville. Ce phénomène se fait en « fonction de l'absorption du rayonnement solaire par les matériaux durant la journée et de sa lente restitution sous forme de chaleur durant la nuit » (Cantat, 1999).

Le phénomène d'ICU se manifeste dans les agglomérations. L'Agence Parisienne du Climat définit cet îlot de chaleur de la façon suivante : « la température, en ville peut rester plus élevée que dans les zones rurales voisines ; il se crée ainsi une bulle de chaleur sur la ville, appelée îlot de chaleur urbain » (www.apc-paris.com). Ce phénomène est localisé. Par

conséquent, ceci fait de lui un élément difficile à prendre en compte en utilisant les outils météorologiques actuels. Il est néanmoins possible de l'étudier en usant de matériel adapté. Afin de comprendre au mieux ce phénomène, il est essentiel de réaliser des campagnes de mesures sur le terrain ainsi que des modélisations numériques.

Afin d'étudier au mieux le phénomène, il paraît essentiel de mieux comprendre le fonctionnement d'îlot de chaleur, ce que nous tenterons de faire à partir de l'exemple de la ville de Caen.

Le schéma ci-dessous (fig.1) résume brièvement par une courbe, les différences de températures observées sur une agglomération lorsque l'îlot de chaleur est présent. Nous remarquons ainsi une élévation des températures dans le centre-ville. L'espace rural enregistre des températures moins élevées. L'espace intermédiaire, c'est-à-dire, en périphérie, enregistre des températures comprises entre ces deux espaces.

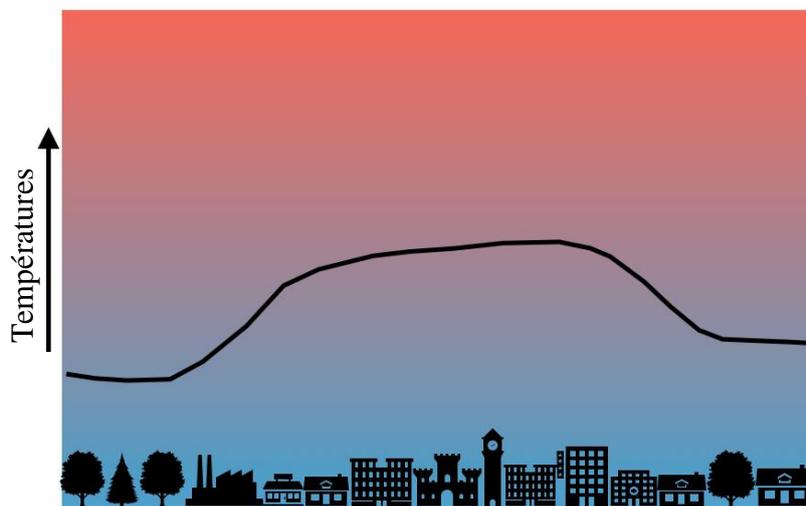


Figure 1: Représentation du phénomène d'îlot de chaleur urbain. Réalisation : Mathys Cenier.

1.3 L'origine de l'élévation des températures

Comme évoqué précédemment, ce phénomène d'élévation des températures en ville s'explique par plusieurs facteurs d'origine anthropique. Par conséquent, les écarts de températures peuvent être très marqués entre l'espace urbain et l'espace rural. Nous allons désormais nous intéresser plus en détail aux processus qui participent à cette élévation des températures.

Dans un premier temps, nous pouvons distinguer les émissions de chaleur provoquées par les activités humaines, responsables d'une élévation des températures de quelques dixièmes de degré. Il est cependant important de préciser que l'emmagasinement de la chaleur par les matériaux de constructions constitue la principale source d'émission de chaleur. Cette dernière présente d'importantes variations en fonction des conditions météorologiques. Nous allons désormais détailler l'ensemble des facteurs qui participent à la formation de ce dôme de chaleur.

1.3.1 L'occupation du sol

L'occupation du sol est un facteur clé à prendre en compte dans l'évaluation de l'îlot de chaleur urbain. En effet, les grands écarts de températures entre villes et campagnes s'expliquent par une occupation du sol très différente. Tous les matériaux et tous les revêtements de sol disposent de capacités propres à emmagasiner de la chaleur. De plus, ces matériaux présentent un albédo qui leur est également propre. L'albédo se définit comme le pouvoir d'une surface à réfléchir la radiation solaire. Plus un sol est clair, plus il réfléchit la radiation directe et diffuse ce qu'il reçoit. Inversement, plus il est sombre, plus il absorbe la chaleur (Escourrou, 1980).

L'albédo se calcule simplement par le rapport du rayonnement réfléchi par une surface (ou un milieu) en comparaison au rayonnement incident. Ce rapport est généralement exprimé en pourcentage (Parcevaux *et al.*, 1990). En conséquence de cet albédo, les rayons non renvoyés sont absorbés par les matériaux. Ceci explique logiquement la capacité du milieu urbain à emmagasiner de la chaleur. Effectivement, les matériaux de construction ne disposent pas tous de la même capacité de réflexion. A titre de comparaison, en moyenne un revêtement de couleur blanche renvoie plus de 70% du rayonnement solaire. A l'inverse, les espaces végétalisés, renvoient seulement 15 à 30% de ce rayonnement, les tuiles 15% et le goudron seulement 5%. Ces chiffres sont issus du Centre d'Etude et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) (<https://www.cerema.fr>).

Ainsi, les rayons du soleil qui ne sont pas renvoyés sont alors absorbés par les matériaux de construction et transformés en chaleur sensible. Ces mêmes matériaux disposent d'une inertie de chaleur qui leur est propre. Cette inertie correspond à la capacité des matériaux à retenir la chaleur. Cela dépend de trois éléments : la conductivité thermique, la capacité thermique massive ainsi que la densité (Institut d'aménagement et d'urbanisme, 2010).

Nous pouvons définir la conductivité thermique comme « l'aptitude d'un corps à transmettre la chaleur d'un point à l'autre de sa masse ». Elle s'exprime en watts par mètre-kelvin ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) (Parcevaux *et al.*, 1990). La capacité thermique massive, quant-à-elle, est déterminée par « la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse d'une substance ». Elle s'exprime en joule par kilogramme-kelvin ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) (<https://www.techno-science.net>). Cette unité de mesure correspond à l'équivalent de la chaleur massique d'un corps homogène d'une masse de 1 kilogramme dans lequel l'apport d'une quantité de chaleur de 1 joule produit une élévation de 1 kelvin (<https://www.larousse.fr>). Enfin, la densité peut se définir comme « le rapport de la masse d'un sol au volume occupé par la matière solide » (<https://www.larousse.fr>). Cette dernière n'a pas d'unité.

Par conséquent, un matériau ayant une inertie thermique importante devra recevoir une énergie importante pour s'échauffer. Ainsi, celui-ci diffusera de la chaleur sur une durée plus longue. Nous pouvons nous appuyer sur un exemple pour illustrer ce propos. Le goudron, ayant une inertie thermique plus importante que le bois, met plus de temps à s'échauffer que le bois.

Le goudron conserve donc la chaleur plus longtemps et la restitue sur le plus long terme. Les constituantes du sol sont différentes, ce qui modifie sensiblement l'impact du sol sur les températures. En moyenne, les villes françaises sont composées à 19% de surfaces végétalisées (<https://kermap.com>). Le reste, soit un peu plus de 80%, est constitué majoritairement de surfaces imperméables et de constructions.

En effet, l'espace rural est en grande partie composé de surfaces végétalisées, de cultures et de surfaces hydriques. Il est possible de qualifier ces surfaces de « climatiseur naturel ». Ces surfaces ont une capacité relativement faible à retenir l'énergie solaire. De plus, ces surfaces végétalisées ont la capacité de contenir de l'humidité et de la restituer. Cette restitution se fait notamment *via* le processus de transpiration des végétaux. Lors de la photosynthèse, de l'eau est évacuée par les stomates (partie microscopique de la plante qui permet d'assurer les échanges gazeux). Cette eau provient principalement des racines. De par la libération de cette eau, la température extérieure diminue. Pour qu'une goutte d'eau soit évaporée, de l'énergie est consommée pour la faire passer d'un état liquide à gazeux. C'est ce qui explique cet abaissement de température (réaction endothermique). Ainsi, la végétation participe à la régulation de la température extérieure et dispose d'une faible capacité d'accumulation de la chaleur. Ceci fait d'elle un atout important pour limiter la hausse des températures ainsi que l'accumulation de chaleur. De plus, les arbres, suivant leurs tailles et leurs caractéristiques, forment une surface ombragée. Cette surface privée de rayonnement solaire s'échauffe donc beaucoup moins, participant également à la régulation de la température (Parcevaux & Huber, 2007).

A l'inverse, l'espace urbain n'est évidemment pas doté d'autant de surfaces végétalisées que le milieu rural. Au contraire, les matériaux de construction et les surfaces imperméabilisées accumulent une grande quantité d'énergie solaire. Cette énergie est stockée durant la journée, puis elle est restituée dès que la chaleur extérieure devient inférieure à celle des matériaux échauffés. C'est à ce moment précis que les écarts de températures les plus importants apparaissent. Ce phénomène est amplifié par la masse du bâti qui limite le brassage de l'air. Ainsi, dans certaines grandes agglomérations, lors de conditions estivales favorables, les écarts de températures ville/campagne peuvent atteindre une dizaine de degrés.

1.3.2 Les activités humaines :

Dans une moindre mesure, les activités liées à l'Homme telles que l'utilisation des véhicules thermiques, la climatisation, le chauffage participent au phénomène d'îlot de chaleur urbain. Cette chaleur émise est relativement constante tout au long de l'année. Cette chaleur d'origine anthropique n'a rien de comparable avec l'accumulation de la chaleur par les matériaux. Ainsi, selon Valéry Masson, directeur de l'équipe de recherche sur le climat en ville au Centre national de recherches météorologiques (CNRM), « Le soleil de midi émet 800 watts par mètre carré, la moitié de cette énergie est stockée, puis libérée, par des surfaces telles que le béton. En comparaison, les émissions humaines correspondent à quelques dizaines de watts par mètre carré » (<https://lejournal.cnrs.fr>).

1.3.3 Les conditions météorologiques

L'accumulation de chaleur est possible dans le cas où les conditions météorologiques sont favorables. En effet, nous entendons souvent parler de l'îlot de chaleur urbain sans toutefois entendre parler des conditions favorisant son développement. C'est donc ce que nous allons aborder maintenant.

Tout d'abord, pour que l'îlot de chaleur urbain se forme il est nécessaire que de l'énergie soit reçue par les matériaux de construction. Nous savons que l'énergie la plus intense est reçue à nos latitudes durant la saison estivale. En effet, celle-ci dépend de l'inclinaison du soleil qui varie selon les saisons. A nos latitudes moyennes, le soleil varie à midi d'environ 20° de hauteur sur l'horizon à midi en plein hiver à plus de 65° en période estivale (sachant que l'intensité des rayons est beaucoup plus forte plus le soleil est haut sur l'horizon). D'autre part, la durée d'illumination est beaucoup plus longue en été. Par conséquent, l'énergie apportée en saison estivale est beaucoup plus intense en raison de la combinaison de ces facteurs astronomiques jouant sur la hauteur du soleil et la durée du jour.

De plus, l'absence de couverture nuageuse joue un rôle important dans l'abaissement des températures et ce d'autant plus au coucher du soleil, aussi appelé crépuscule. En effet, lorsque le ciel est dégagé, la chaleur accumulée au cours de la journée s'évacue plus facilement dans l'atmosphère pendant la nuit (moins d'effet de serre). A l'inverse, le froid de l'atmosphère descend. Ceci s'explique simplement par un phénomène physique. La densité de l'air chaud étant plus faible que celle de l'air froid, l'air chaud a tendance à monter en altitude alors que l'air froid va plutôt descendre.

C'est donc au moment du crépuscule que les écarts de températures apparaissent plus nettement entre les villes et les campagnes. La chaleur restituée par les matériaux va limiter le refroidissement en ville alors qu'en campagne ce n'est pas le cas. Ceci correspond donc au phénomène d'îlot de chaleur urbain. Si les nuages sont présents au crépuscule, la chaleur peine à s'évacuer au-dessus de toutes les surfaces. Les écarts sont alors beaucoup plus faibles. Notons par ailleurs que les précipitations homogénéisent aussi les températures en limitant l'échauffement du sol mais aussi en apportant de l'air plus frais en provenance des masses nuageuses.

En plus du temps clair qui favorise la présence des écarts thermiques ville/campagne, un autre élément est important pour que l'îlot de chaleur urbain se mette en place. En effet, il est important que le vent soit faible, voire nul pour que l'ICU se forme. Le vent brasse et donc homogénéise l'air. L'air chaud et l'air froid se mélangent. De cette façon, les écarts de températures entre les espaces urbanisés et les espaces ruraux sont moindres. Le vent est donc un élément essentiel à prendre en compte dans l'étude de l'ICU, puisqu'il permet de limiter la présence des microclimats et des topoclimats *via* ce brassage d'air.

De plus, il est à noter que la morphologie de la ville influe sur les dynamiques du vent. En fonction de la densité de bâti et de l'orientation de l'agglomération par rapport aux sens des vents, les dynamiques de ce dernier vont être modifiées et donc plus ou moins marquées.

1.3.4 Résumé de l'îlot de chaleur urbain

La figure 2 résume ce qui a été évoqué précédemment. Ce schéma représente une situation dans laquelle les conditions sont favorables à la formation de l'îlot de chaleur. C'est-à-dire, une agglomération composée de matériaux ayant une capacité thermo-physique importante mais aussi de conditions météorologiques propices (peu de vent, temps clair).

La partie supérieure du schéma, qui correspond au jour, est caractérisée par un phénomène d'emmagasinement de la chaleur dans les matériaux de construction et autres surfaces minérales. Les températures sont assez homogènes entre la ville et la campagne.

La partie inférieure, quant-à-elle, correspond à la nuit. Comme il a été dit précédemment, la chaleur est restituée pendant cette période. Ainsi, une bulle d'air plus doux se forme au-dessus de la ville (air chaud qui monte en altitude) induite par la restitution de la chaleur accumulée dans les matériaux au cours de la journée. Les températures ne sont pas homogènes entre la ville et la campagne.

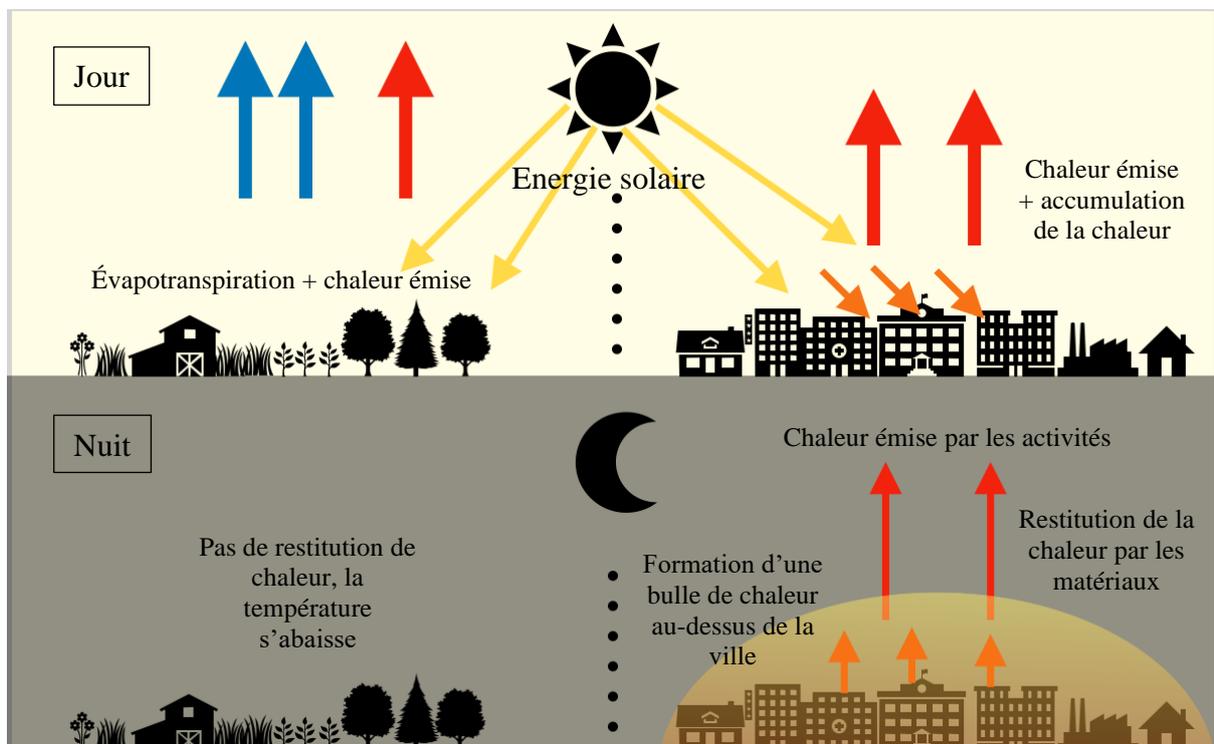


Figure 2 : Explication du phénomène d'îlot de chaleur urbain. Réalisation : Mathys Cenier. Inspiré de : <https://meteofrance.com>.

1.4 Mesures thermiques

Nous pouvons évaluer les températures des différentes surfaces qui composent le sol. Nous disposons pour cela d'un appareil numérique infrarouge C2 Flir. Cet appareil, permet à la fois de photographier les surfaces dans le visible (ce qui donne la finesse de l'image) et de lui associer une valeur de température d'émission par sa mesure dans l'infrarouge thermique. L'utilisation de cet appareil est relativement simple, il suffit de modifier les paramètres selon le résultat souhaité. Nous pouvons choisir différents paramètres d'utilisation comme le fait de bloquer l'échelle des températures. Cette option permet de faciliter la comparaison entre les différentes images obtenues. Les images sont stockées dans l'appareil grâce à la mémoire interne de l'appareil. Ensuite, l'envoi se fait *via* la connexion avec un ordinateur.

Pour cette étude, il a été décidé de représenter les images sous le format « mélange thermique ». Ce mode permet de visualiser à la fois l'image thermique et l'image numérique. Les photographies ont toutes été prises le 15 Juin 2022, journée particulièrement ensoleillée, au moment où la température est la plus élevée, soit entre 15 et 16 heures. Ces images permettent de comparer facilement les variations de températures entre les surfaces végétalisées et les surfaces imperméabilisées.

1.4.1 Le rôle de la végétation

Les figures 3A et 3B permettent de repérer des variations de températures importantes en fonction de l'occupation du sol.

La figure 3A permet, grâce à une vue en contre plongée sur l'église Saint-Pierre et la végétation présente devant le Château de Caen, de mettre en avant des variations très nettes. Les températures mesurées sur les surfaces végétalisées sont d'environ 25-30°C (ceci correspond au jaune au premier plan), ce qui est nettement inférieur à celles observées sur les surfaces goudronnées qui, elles, approchent des 45°C. Les surfaces bleutées, à l'arrière-plan, représentent les surfaces à l'ombre qui n'ont bénéficié que de très peu de rayonnement solaire.

La figure 3B montre très clairement le rôle de la végétation dans la régulation thermique. La comparaison entre le revêtement présent autour des rails et la végétation montre l'importance du revêtement dans l'accumulation de chaleur. En effet, la température de la surface minéralisée atteint les 45°C alors que les surfaces enherbées sont de nouveau comprises entre 25-30°C. Ces écarts montrent l'importance de l'occupation du sol et de la capacité de certaines surfaces à s'échauffer. Une surface minéralisée comme celle présente en rouge sur cette photographie, stocke la chaleur et la libère pendant la nuit ce qui participe évidemment à la formation d'un îlot de chaleur.

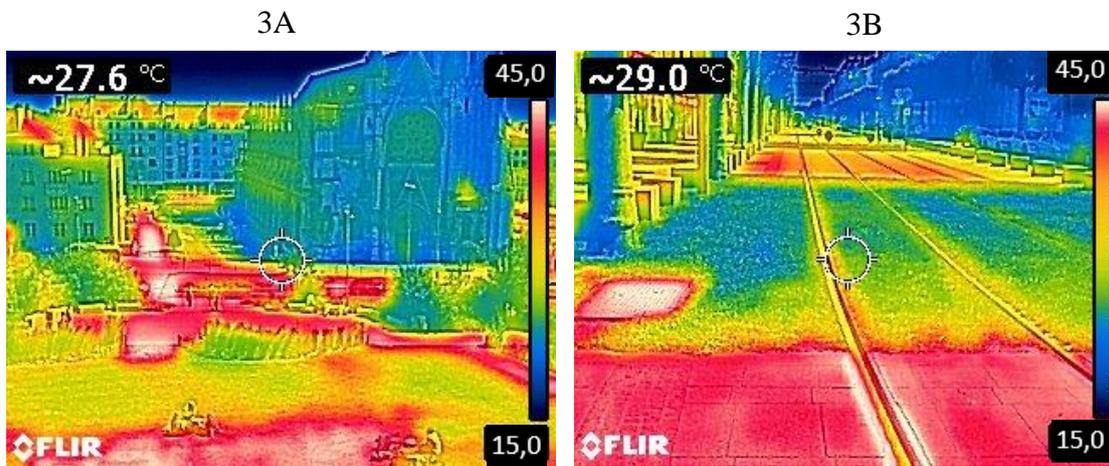


Figure 3 : Photographies infrarouges. 3A : Château de Caen. 3B : rails de tramway. Photographies : Mathys Cenier.

1.4.2 Les surfaces minérales et le bâti

Nous prenons à présent l'exemple de la Place Saint-Sauveur (fig. 4A) et de la Place de la République (fig. 4B). Il est intéressant d'étudier la Place Saint-Sauveur. En effet, cette dernière est totalement minéralisée (à l'exception de quelques jardinières et pots). Cette place est de ce fait particulièrement chaude. Les températures au sol sont élevées et celle des toitures encore davantage (environ 50°C pour les sols et 55°C pour les toits). Ces surfaces s'échauffent durant la journée. Il aurait été intéressant d'étudier les températures de l'air sur cette place. Seulement, aucun support permettant d'installer une station météorologique n'a été trouvé.

Nous pouvons nous demander si la pierre calcaire de Caen, présente en grande partie dans les constructions, s'échauffe facilement ou non. D'après la figure 4, celle-ci est à une température de 30°C environ. La couleur claire de la pierre calcaire laisse penser que celle-ci a un albédo assez important. En effet, les couleurs pâles absorbent 50 à 55% de la chaleur. (Escourrou, 1980). L'exposition au soleil d'un mur n'est pas la même qu'un sol. C'est la raison pour laquelle deux images ont été prises afin de mesurer la température des murs en comparaison à un sol goudronné. La façade visible sur ces photographies a été exposée au soleil tout l'après-midi. Nous pouvons constater que le mur a accumulé un peu de chaleur (environ 30°C). A l'inverse, même si le sol est clair, il est évident que, de par son exposition, ce dernier a accumulé plus de chaleur au cours de la journée. Sa température relevée est de 50°C. De plus, ce sol est de couleur grise et absorbe donc 75 à 85% de la chaleur (Escourrou, 1980).



Figure 4 : Photographies infrarouges. 4A : Place Saint Sauveur. 4B : Place de la République. Photographies : Mathys Cenier.

Conclusion de la partie I

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène climatique d'origine anthropique. Ce phénomène s'observe dans de nombreuses villes en France et dans le monde. L'urbanisation modifie le bilan radiatif en entraînant une accumulation de chaleur dans les matériaux de construction. Les surfaces végétalisées permettent de limiter cette accumulation de chaleur. En effet, nous avons vu que la présence de végétation offre une fraîcheur naturelle et limite donc l'effet d'ICU.

La présence de cet ICU est très dépendante de l'occupation du sol. Cette dernière peut donc expliquer la présence de microclimats au sein de la ville de Caen. Cependant, d'autres paramètres doivent être présents pour que l'îlot de chaleur urbain se forme. Les conditions météorologiques doivent être favorables. Pour que l'ICU se forme, le vent doit être faible et le temps clair.

Pour finir, nous avons également évoqué la cyclicité temporelle de l'ICU. En effet, il est important de prendre en compte ce rythme pour étudier au mieux l'îlot de chaleur. Ce phénomène est maximal en fin de journée, quelques heures après le coucher du soleil, lorsque la campagne se rafraîchit rapidement tandis que les matériaux de construction de la ville restituent l'énergie accumulée au cours de la journée.

Afin de mieux comprendre les dynamiques thermiques de la ville de Caen, il est essentiel d'effectuer une analyse du contexte climatique ainsi que de l'occupation du sol.

Partie II : L'îlot de chaleur urbain dans un contexte de changement climatique. La ville de Caen est-elle à risque ?

2.1 Les enjeux sur la santé :

L'îlot de chaleur urbain touche principalement les centres-villes, c'est-à-dire les milieux les plus fortement anthropisés. Les centres urbains regroupent une grande part de la population. En effet, en 2017, 79,2% de la population française vit au sein d'une unité urbaine (<https://www.insee.fr>). Parmi cette population, une partie est exposée et/ou est sensible aux fortes chaleurs. Nous pouvons logiquement évoquer les travailleurs extérieurs mais aussi les personnes à risque, telles que les très jeunes enfants ainsi que les personnes malades et âgées. Des études montrent que « lorsque la chaleur ambiante est très élevée, les échanges [...] au niveau de la peau et des poumons se font mal. La sudation, suscitée par ces conditions, peut être telle que l'on en arrive à la déshydratation, qui est un danger redoutable chez les enfants » (Lamarre & Pagney, 1999).

Nous savons que la population française est vieillissante, par conséquent, une part toujours plus importante de la population est considérée « à risque » face à ces périodes de chaleur. En 2022, près de 21% de la population est âgée de plus de 65 ans en France (<https://www.insee.fr>). Des événements marquants ont été particulièrement meurtriers pour les plus de 65 ans. Nous pouvons notamment citer la canicule de 1976, ou plus récemment, la canicule de 2003, qui elle a provoqué la mort de plus de 15000 décès en métropole (Hémon & Jougl, 2004).

Ces événements ont permis de mettre en avant plusieurs soucis. D'une part, il est apparu comme évident que la France n'était pas préparée à vivre des températures aussi élevées, notamment en ville. D'autre part, l'augmentation constante de l'artificialisation des sols *via* l'utilisation de matériaux de construction, ne fait qu'accroître le problème. Des écarts de températures conséquents ont été mesurés dans de nombreuses villes, c'est notamment le cas du centre de Paris. Ces écarts entre la ville et la périphérie atteignant parfois jusqu'à 10 degrés. Face à ces chiffres impressionnants, un aménagement urbain permettant de faire face au changement climatique apparaît comme primordial, afin de limiter la surchauffe en ville et ainsi assurer des conditions de vie adaptées à la santé de tous.

Ces informations nous amènent à nous questionner sur notre avenir. Nous pouvons légitimement nous demander si le bien-être de la population urbaine dépendra des aménagements effectués pour limiter les effets d'îlot de chaleur urbain ? Les dernières canicules ont montré qu'habiter en ville pouvait parfois s'avérer pénible. Ceci nous amène à penser qu'il est probable que dans le futur, les conditions thermiques d'une ville pourront influencer le choix de l'emplacement lors de l'acquisition d'un bien. Or, il est primordial de prendre en compte ces facteurs afin de garantir l'attractivité d'une ville. Dans le contexte actuel de changement climatique, il apparaît donc comme plus qu'urgent que les villes prennent en compte le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

2.2 Pourquoi la ville de Caen est-elle intéressante à étudier ?

2.2.1 Présentation de la zone d'étude :

Tout d'abord, l'étude est menée sur la ville de Caen. C'est une commune située au nord du Calvados, où se situe la préfecture du département (fig. 5). En 2018, la population de la ville est au nombre de 105 512 habitants (<https://www.insee.fr>). Au total, l'agglomération caennaise représente plus de 205 000 habitants. De plus, Caen fait partie de la communauté urbaine de Caen-la-mer depuis 2016. Cette dernière regroupe 48 communes. La carte ci-dessous montre la situation géographique de la ville de Caen.

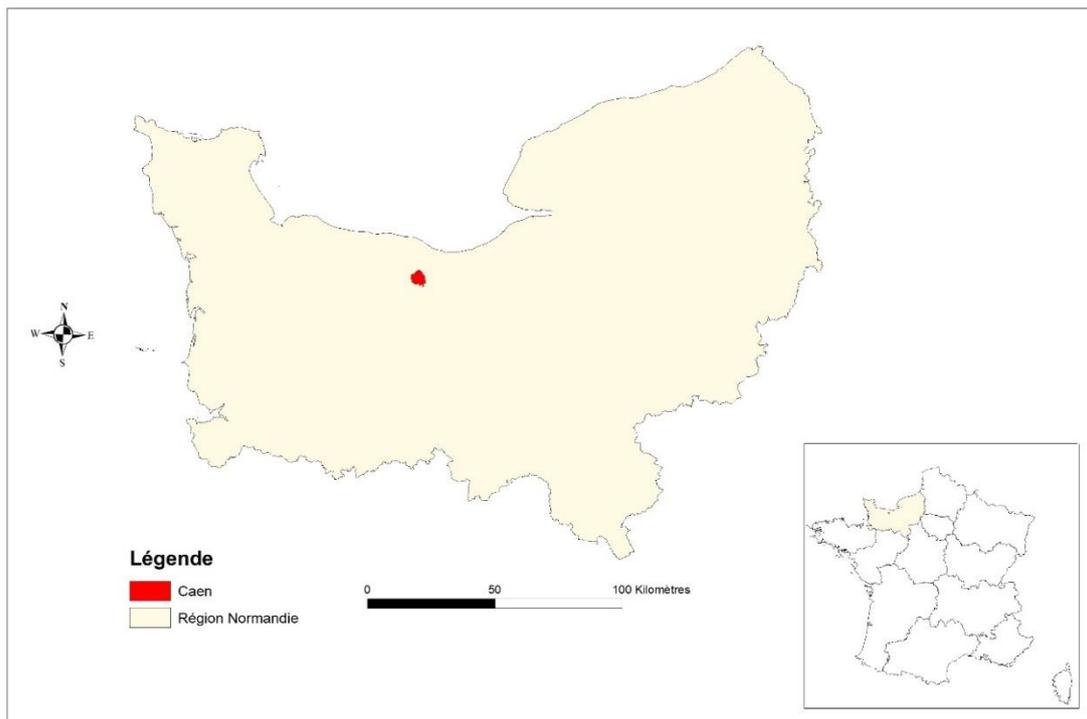


Figure 5 : Localisation de la zone d'étude. Source : BD ORTHO 2016. Réalisation : Mathys Cenier, 2022

2.2.2 Contexte climatique de la ville de Caen

La station météorologique de référence de la ville est la station Météo-France de Caen-Carpique. Elle est située à 7 km du centre-ville de Caen. La station est située à l'aéroport sur une surface plane, dégagée et couverte d'herbe (parc instrumental normalisé). Elle est en service depuis le 1^{er} janvier 1973. Les températures mesurées à cette station permettent d'avoir une idée générale des températures observées dans le centre-ville de Caen. Cependant, ces dernières ne permettent pas de mesurer précisément l'effet de l'îlot de chaleur urbain. Nous savons cependant que des écarts existent dans l'agglomération caennaise. En effet, une première étude l'a démontré à l'aide d'une station positionnée dans un jardin privé dans Caen durant l'hiver 2018/2019. Les relevés ont ainsi permis de mettre en évidence des différences thermiques moyennes de +0,4 degré, en comparaison avec la station de Carpiquet (Cantat & Follin, 2020). L'objectif de notre étude va donc être d'augmenter les relevés de températures dans la ville de Caen afin de mettre en avant d'éventuels écarts de températures.

Caen dispose d'un climat océanique induit par la proximité avec l'Atlantique. L'influence océanique apporte douceur et précipitations tout au long de l'année. Les amplitudes thermiques sont ainsi peu importantes (13 degrés d'amplitude annuelle en moyenne). Les précipitations sont, quant à elles, régulières même durant la saison estivale, il n'y a donc pas de saison sèche. La moyenne annuelle des précipitations est de 740 mm selon la normale de 1981-2010 (<https://www.infoclimat.fr>). Caen présente ainsi une pluviométrie ainsi que des contraintes thermiques modérées (Beauvais & Cantat, 2018).

Caen est située à environ 15 km à vol d'oiseau de la mer. Cette proximité lui offre certes un climat océanique mais pas seulement. En effet, les circulations d'air locales ont un impact conséquent sur les températures. Pour le cas de la ville de Caen, la circulation locale qui a le plus grand impact sur les températures est la brise de mer. Cette brise peut permettre d'éviter la surchauffe quand elle est présente, et donc d'éviter l'îlot de chaleur urbain. Il est important de prendre en compte cette brise pour l'étude de l'ICU et ce d'autant plus pour la ville de Caen. Gisèle Escourrou note que « la brise de mer peut pénétrer, en été, jusqu'à Caen, du fait du réchauffement rapide du sol calcaire de « la campagne » et de l'aire de basses pressions pelliculaires qui en résulte » (Escourrou, 1982). Cette brise s'explique par les capacités calorifiques différentes entre les terres et la mer. Nous observons un différentiel de températures en surface. Ainsi, une circulation locale s'établit au cours de la journée avec un mouvement ascendant, « résultat du réchauffement [de l'air] au-dessus des terres » (Roux, 1991).

2.2.3 Les types de temps dominants à Caen

A partir des études de temps réalisées de 1971 à 2010 sur la ville de Caen, nous pouvons relever les principaux types de temps présents sur la ville. L'expression « type de temps » correspond en réalité au moment où « des combinaisons sensiblement identiques apparaissent avec des fréquences notables » (Audurier & Izard, 1980). La connaissance des types de temps permet d'augmenter les connaissances climatiques et d'ainsi proposer des solutions afin de réduire la vulnérabilité des personnes fragiles (citées précédemment).

Sur notre zone d'étude, nous pouvons relever dans un premier temps une influence océanique forte. Cette caractéristique est spécifique au grand Ouest. Les types de temps dominants sont « temps variable, gris, gris arrosé, doux nuageux ainsi que doux et beau » (Cantat, 2011). Ces cinq types de temps représentent près de 40% des temps observés sur la ville de Caen. Ces derniers ne sont pas favorables à la formation d'un îlot de chaleur urbain.

La fréquence des types de temps « beau et chaud » survient principalement lors de la période estivale. Les remontées de la ceinture subtropicale entraînent avec elles des températures plus chaudes et un temps anticyclonique. Lors de ces remontées d'air chaud, le risque d'épisodes caniculaires augmente. Les canicules étant les périodes les plus favorables à la formation d'un îlot de chaleur. En prenant en compte cette information, il paraît important d'étudier plus précisément ces épisodes de forte chaleur sur l'agglomération de Caen.

La figure 6 confirme la présence, sur la ville de Caen, des types de temps évoqués précédemment. En effet, le climat de Caen se caractérise par des pluies peu intenses mais réparties tout au long de l'année. C'est pourquoi, le nombre de jours de précipitations est assez élevé mais beaucoup moins que sur les collines environnantes : 125 jours par an, il tombe entre 1 et 5 millimètres. Ceci s'explique simplement par la topographie de la zone. Comme le précise Pierre Pagney « L'effet d'abri fourni par les collines du bocage se manifeste par la médiocrité des précipitations : un peu plus de 700 mm/an à Caen » (Pagney, 1988). Ceci explique le type de temps brumeux régulièrement observé sur la ville de Caen.

Pour ce qui est du vent, les rafales observées sont supérieures à 16 m/s en moyenne 73 jours par an. Ces valeurs de vent correspondent à un vent supérieur à 57 km/h. Le reste du temps le vent est inférieur à ces valeurs. Cependant, il reste assez fort. Nous avons pu voir que le vent était un paramètre qui empêche la formation de l'ICU en homogénéisant l'air.

Enfin, l'insolation solaire est supérieure à 80% pendant 44 jours en moyenne par an. Le reste du temps, elle est inférieure à 80%. Ceci justifie encore une fois le temps variable et brumeux que connaît régulièrement la ville de Caen.

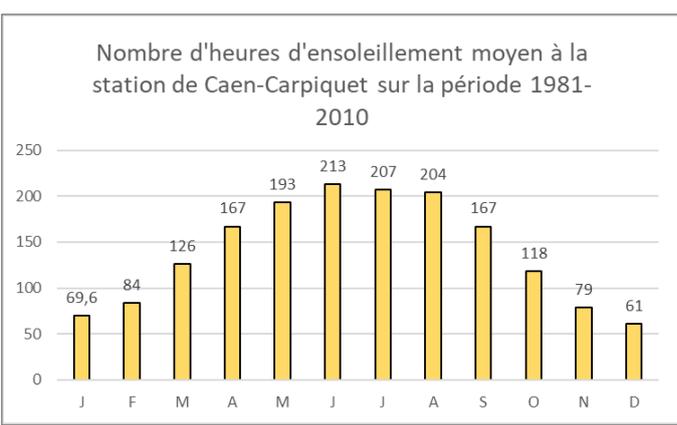
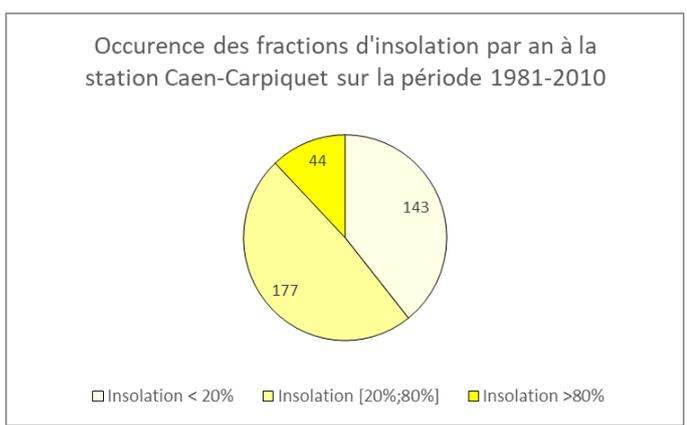
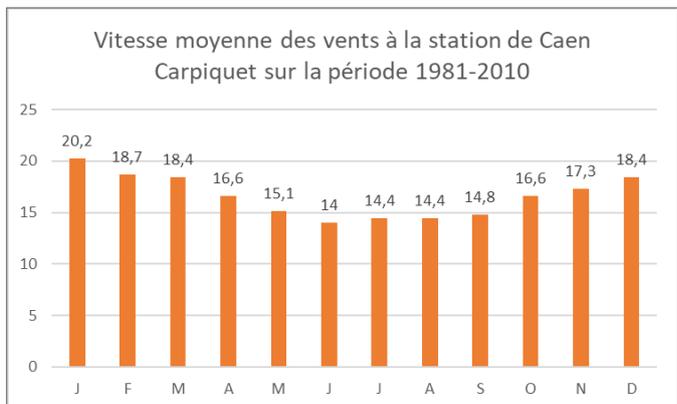
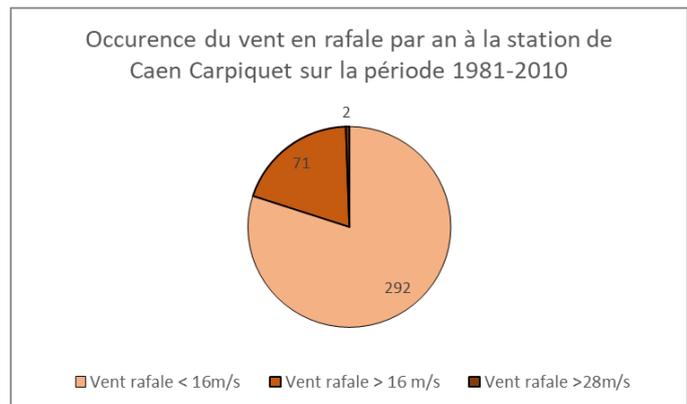
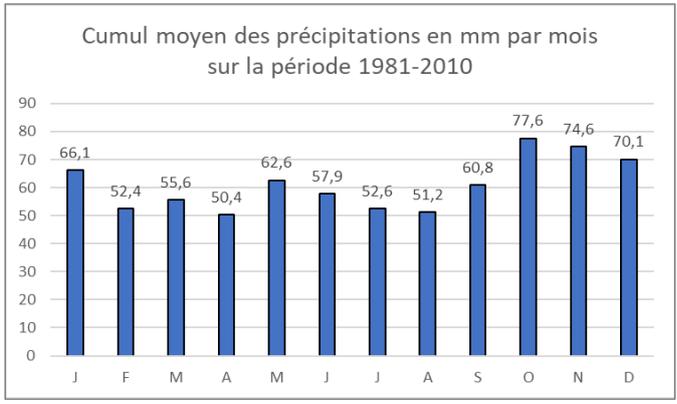
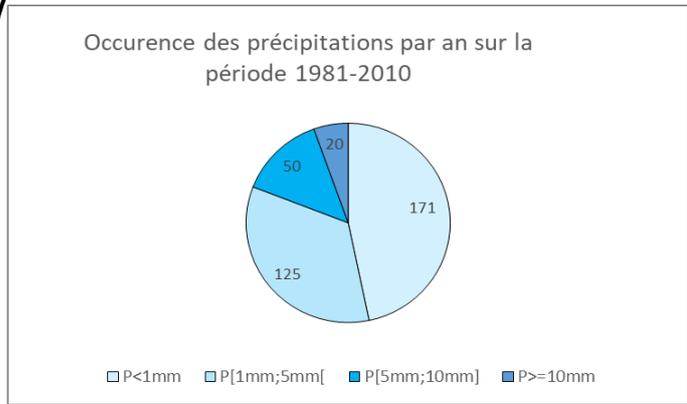


Figure 6 : Occurrence des différentes conditions météorologiques sur la station de Caen-Carpiquet sur la période 1981 – 2010. Réalisation : Mathys Center. Inspiration : Foissard, 2015.

2.3 Contexte d'augmentation des températures

2.3.1 Augmentation du nombre de jours de chaleur

Dans un contexte de changement climatique rapide et d'une inaction climatique, les scénarios du GIEC sont alarmistes. Le changement climatique provoque une multitude de changements dont une augmentation significative des températures. Les différents scénarios sont modélisés en se basant sur les pays les plus émetteurs de gaz à effet de serre, notamment la Chine et les Etats-Unis. Ces scénarios prennent en compte les mesures mises en place par ces pays dans l'objectif de limiter l'émission des gaz à effet de serre.

Le premier scénario, le plus optimiste, est le scénario RCP 2.6. Le second est appelé RCP 8.5. Selon ces modèles, la France semble se diriger vers une augmentation des températures à l'horizon 2100 de l'ordre de 3,5 à plus de 5°C. La figure 7 montre les premiers effets du changement climatique sur la station Météo France de Caen Carpiquet. Les données proviennent d'Infoclimat (<https://www.infoclimat.fr>). Le graphique met en avant l'augmentation du nombre de jours de chaleur par an (température maximale supérieure à 25°C à la station). Le nombre de jours de chaleur passe en effet de 19 jours sur la période 1980-1989, à plus de 26 jours entre 2010-2019. Cette augmentation de plus de 7 jours de chaleur en moyenne par an montre que la Normandie, et plus particulièrement la ville de Caen, ne sont pas épargnées par le changement climatique contemporain. Les jours de très fortes chaleurs (température maximale supérieure à 30°C) sont aussi en augmentation.

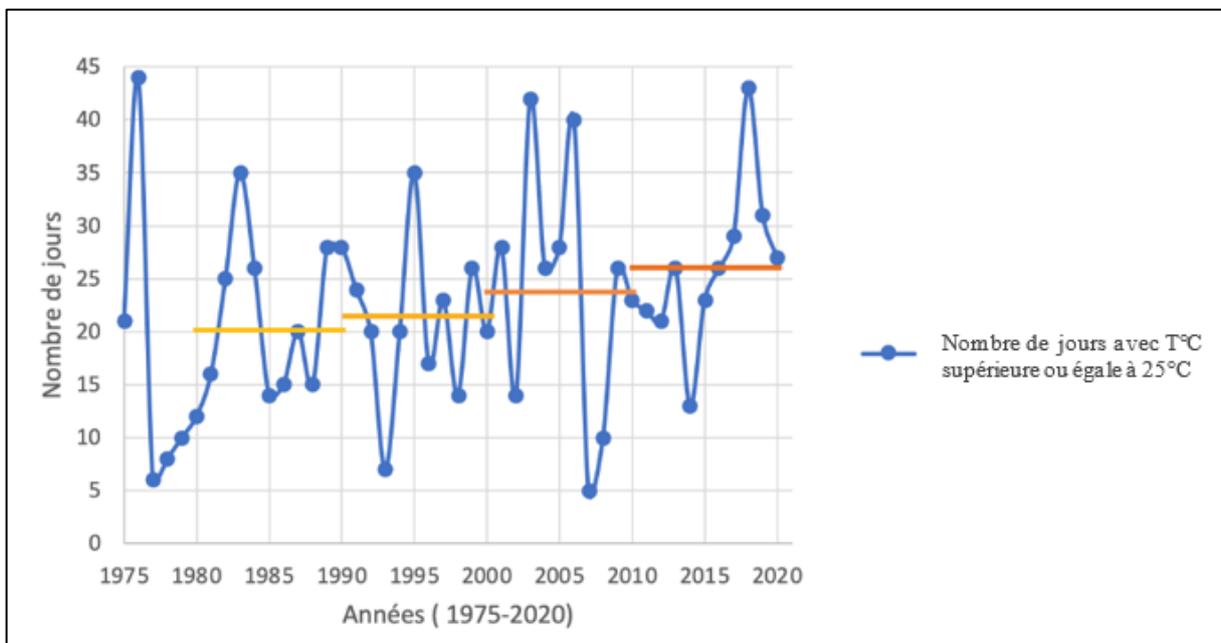


Figure 7 : Occurrence de la température supérieure à 25°C par an depuis 1975 à 2020. Source : <https://www.infoclimat.fr>. Réalisation : Mathys Cenier.

2.3.2. Les projections dans un contexte de changement climatique

Le nombre de jours au cours desquels la température est supérieure à 25°C devrait continuer à augmenter au fur et à mesure. Les cartes ci-dessous (fig. 8) montrent le nombre de jours de chaleur (T° maxi $> 25^{\circ}\text{C}$) par an selon les deux scénarios évoqués précédemment. L'augmentation du nombre de jours de chaleur pourrait largement dépasser les 30 jours si nous parvenons aux valeurs de GES du scénario RCP 2.6. Si aucune politique climatique n'est mise en place, le nombre de jours de chaleur passerait à plus de 50 par an pour la ville de Caen. Les enjeux d'aménagement portant sur l'îlot de chaleur deviendraient primordiaux pour le bien-être de la population.

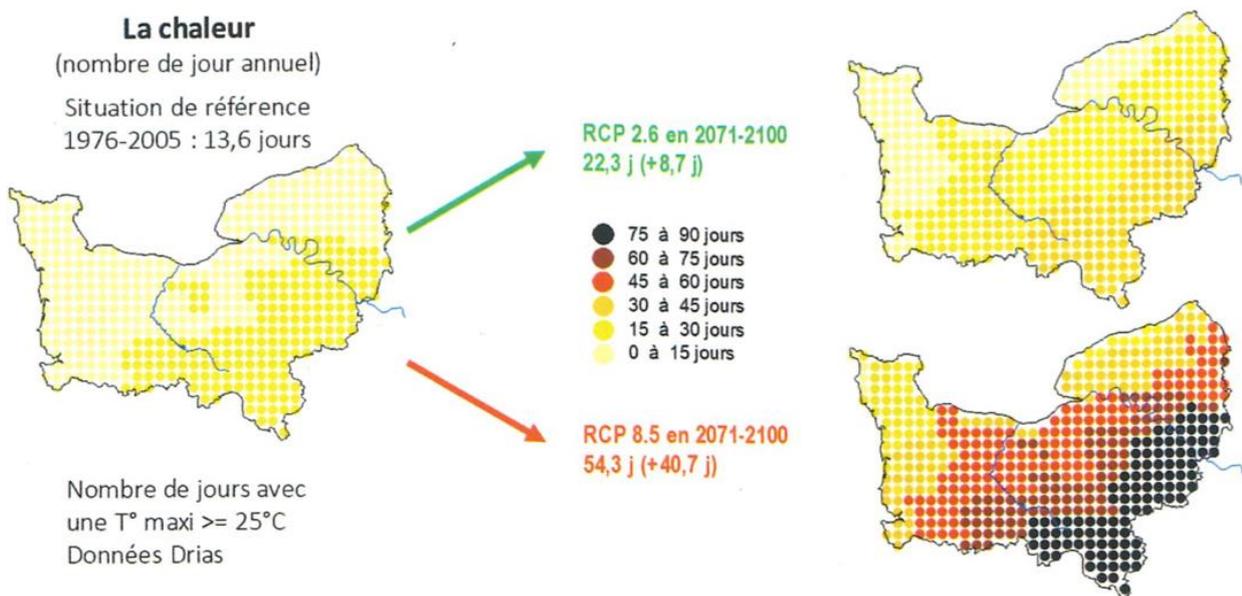


Figure 8 : Nombre de jours de chaleur (T° maxi $> 25^{\circ}\text{C}$) par an selon les scénarios 2.6 et 8.5.
Source : Beauvais & Cantat, 2018.

2.3.3 Les jours de canicule :

Le seuil de canicule est propre à chaque département en France. Il est fixé selon les données climatiques ainsi que sur la vulnérabilité des personnes. Les fortes températures augmentent la mortalité. Ainsi, lorsque la mortalité devient supérieure à la moyenne des dernières années, Météo-France estime que le seuil est atteint. La vigilance canicule a été créée en 2004 en fonction des données de la surmortalité observée pendant la canicule de 2003. Selon ces critères, le Calvados est considéré en période de canicule lorsque les températures maximales sont supérieures à 31°C et les températures minimales ne descendent pas en-dessous de 18°C. Pour que cette forte chaleur soit considérée comme canicule, les températures doivent être au-dessus de ces seuils pendant trois jours et trois nuits.

C'est lors de ces fortes chaleurs que les personnes les plus vulnérables sont véritablement en danger. Le mercure ne descend pas assez durant la nuit pour que le corps puisse récupérer totalement. C'est aussi lors des jours de canicule que les îlots de chaleur sont les plus intenses. Il paraît donc intéressant d'étudier le nombre de jours où la station de Caen Carpiquet a atteint ces seuils et d'observer s'il y a une augmentation du nombre de jours caniculaires depuis les années 1970.

Les données utilisées pour la figure 9 sont tirées également du site internet Infoclimat (<https://www.infoclimat.fr>) et d'un ouvrage intitulé Normales climatiques : Périodes 1961 – 1990 (Service central d'exploitation de la météorologie, 1996). Cette figure indique qu'au cours des 10 dernières années, le nombre de nuits (fig. 9A) et de jours (fig. 9B) caniculaires augmente assez rapidement. Dans les années 1970, nous pouvons noter qu'il est assez rare de dépasser ces seuils (seulement une fois tous les deux à trois ans environ). A l'inverse, au cours de la dernière décennie, la récurrence du dépassement de ce seuil a augmenté. Nous remarquons que depuis 2010, il n'y pas eu une seule année sans nuit caniculaire.

Il est à noter que ces données sont issues de la station Caen Carpiquet et ne sont donc pas totalement représentatives des températures mesurées en centre-ville de Caen. Nous pouvons donc penser que le nombre de jours et de nuits caniculaires sont plus importants au sein même de la ville de Caen. De plus, ces graphiques ne représentent pas les épisodes de canicule, mais simplement le nombre de jours/nuits où la température seuil a été atteinte. Cela ne témoigne pas de la présence d'un îlot de chaleur important. Nous pouvons néanmoins penser que les jours caniculaires sont plus propices pour la formation d'un ICU car ils sont associés à des temps clairs et calmes (par advection tropicale sèche). Cependant, d'autres paramètres météorologiques sont essentiels à prendre en compte pour la formation d'un îlot de chaleur (comme précisé précédemment).

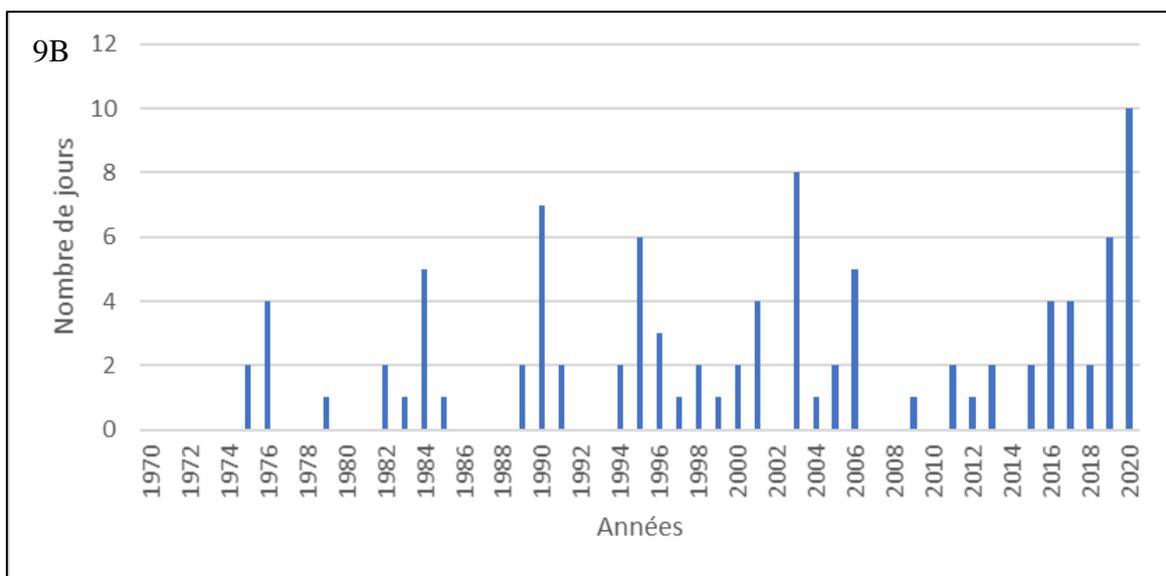
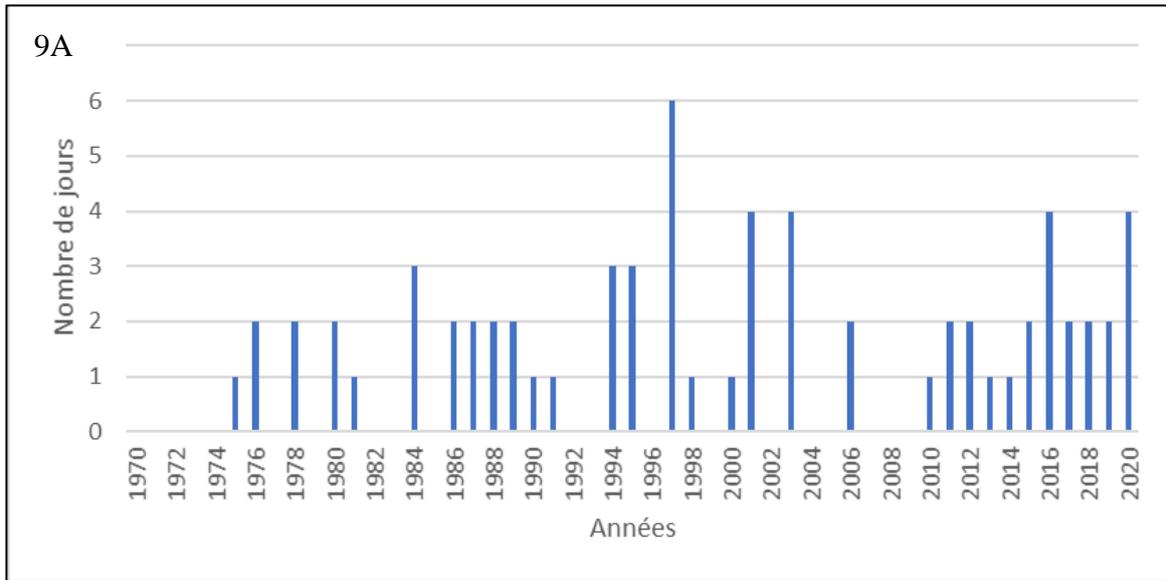


Figure 9 : Nombre de journées et de nuits caniculaires à Caen sur la période 1970-2020. 9A : nuits (canicule quand $T^{\circ}C > 18^{\circ}C$). 9B : journées (canicule quand $T^{\circ}C > 31^{\circ}C$). Réalisation : Mathys Cenier.

Conclusion de la partie II

Le contexte climatique de Caen semble limiter l'occurrence des conditions favorables au phénomène d'îlot de chaleur. En effet, sous influence océanique, Caen subit un temps régulièrement venteux et pluvieux, ce qui brasse et homogénéise l'air, limitant la formation d'un différentiel urbain/rural.

Cependant, le contexte actuel de changement climatique est à l'origine d'une augmentation des températures et des phénomènes caniculaires. En regardant le climat de ces trente dernières années, nous observons déjà une très nette augmentation des jours de chaleur. Face à ces changements, il est nécessaire de guider les pouvoirs publics afin de s'adapter au climat de demain en prenant en compte le phénomène d'ICU. Il est essentiel de penser à construire la ville de demain afin d'améliorer au maximum les conditions de vie de la population et donc continuer à être une ville attractive.

Afin de mieux connaître l'impact de l'occupation du sol sur les températures, nous allons étudier la répartition de l'occupation du sol sur la ville de Caen.

Partie III : Analyse de l'occupation du sol et contexte topographique du territoire Caennais

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain varie selon l'occupation du sol. Les surfaces imperméables absorbent et stockent la chaleur, ce qui accroît le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Les surfaces imperméables participent donc à l'augmentation des températures en ville et sont par conséquent à l'origine d'une dégradation des conditions de vie en ville. Enfin, plusieurs études ont montré un lien entre l'augmentation de la couverture de surfaces imperméabilisées et la diminution de la biodiversité (Schueler, 2000).

Dans cette partie, nous aborderons donc plusieurs caractéristiques de l'occupation du sol de la ville de Caen. Nous étudierons logiquement les surfaces occupées par l'Homme, c'est-à-dire les surfaces ayant des capacités thermo physiques importantes. Nous verrons également certains aspects du territoire Caennais, plus particulièrement les aspects topographiques qui peuvent influencer fortement sur la formation de microclimats urbains.

3.1 L'occupation du sol

3.1.1 Carte de l'occupation du sol

Nous allons désormais détailler le principal élément influant sur l'îlot de chaleur urbain dans notre zone d'étude : l'occupation du sol. Afin de mieux comprendre les dynamiques thermiques de la ville de Caen, nous avons réalisé une cartographie de l'occupation de sol dans sa globalité (fig. 10). La réalisation de cette cartographie a été effectuée à l'aide des couches présentes dans la BD TOPO. Nous avons choisi de représenter neuf couches qui témoignent de la diversité de l'occupation du sol. Ces couches correspondent aux bâtiments, aux surfaces hydrographiques, aux voies ferrées, aux routes, aux cimetières, et aux équipements de transport (gare, parking). Les espaces verts ont été digitalisés de façon précise afin d'obtenir la surface en espaces verts la plus proche de la réalité. Nous avons regroupé les différents types de végétation (végétation rase et végétation haute) par souci de temps et de praticité. Cette digitalisation a été effectuée grâce à la BD ORTHO de 2016. L'image satellite nous a permis de créer des polygones de façon précise sur l'ensemble de la végétation. La végétation située dans les jardins privés a elle aussi été digitalisée. Les espaces en transition ont été digitalisés selon les connaissances sur les travaux en cours dans la ville. Enfin les espaces ne pouvant être identifiés constituent les surfaces imperméables claires dites « surfaces minérales claires ».

Le tableau 1 regroupe les formats sélectionnés pour les différentes couches de la carte d'occupation du sol.

Tableau 1 : Formats des différentes couches de la carte d'occupation du sol. Réalisation : Mathys Cenier.

Occupation du sol	Format
Bâtiments	Polygones
Routes principales	Polylignes
Voies ferrées	Polylignes
Espaces verts	Polygones
Surfaces minérales claires	Polygones
Equipements de transports	Polygones
Espaces en transition	Polygones
Cimetières	Polygones
Surfaces hydrauliques	Polygones

3.1.2 Densité de bâti

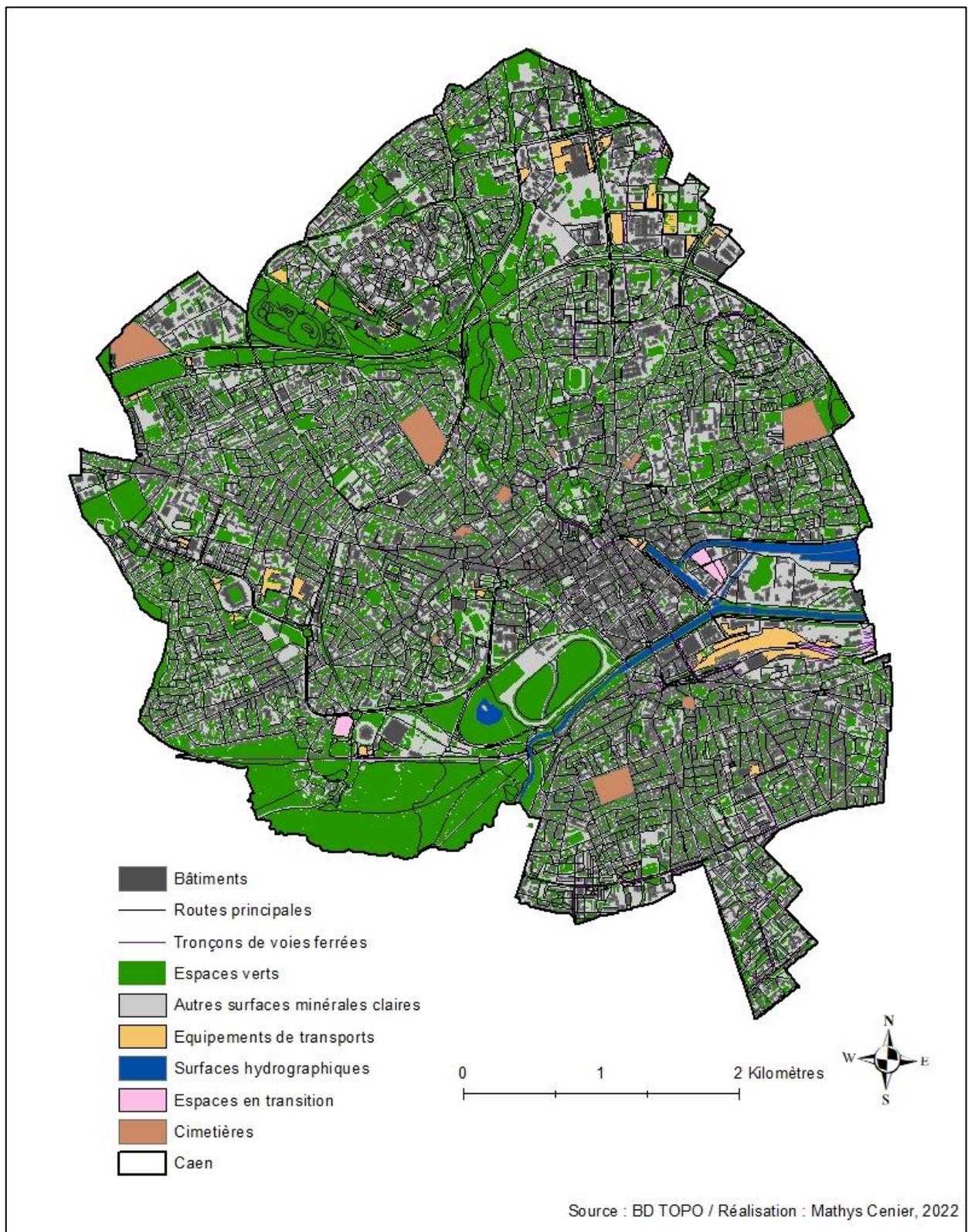


Figure 10 : Occupation du sol de la ville de Caen. Source : BD TOPO 2021 et BD ORTHO 2016. Réalisation : Mathys Cenier, 2022.

Un carroyage de la densité du bâti caennais est réalisé. L'évolution du bâti a été rapide au lendemain de la seconde guerre mondiale. La population de la ville a plus que doublé entre 1945 et 1950. Cette croissance démographique s'est accompagnée d'un débordement en périphérie et dans les communes voisines (Chesnais *et al.*, 1994).

La taille des mailles a été choisie pour que la carte (fig. 11) soit visuellement parlante. Ces mailles font 200 mètres de côté. Cette taille de maille représente des carrées de quatre hectares de superficie. C'est une taille relativement petite mais qui permet de bien différencier les quartiers de la ville. Le nombre de mailles est donc de 641 sur la ville de Caen. De plus, le choix de la plage de données est serré pour les valeurs de densité faible. En effet, la densité intérieure à 50% est détaillée par tranche de 10%. Puis, les valeurs situées au-dessus de 50% sont regroupées ensemble. Nous avons ainsi six classes différentes. Cette plage de valeurs offre un meilleur rendu visuel. La densité de bâti est rarement supérieure à 50% de par les infrastructures de transports, les surfaces minérales claires, la végétation etc. Nous considérons ainsi que lorsque le bâti occupe plus de 50%, celui-ci est omniprésent dans la maille. C'est le cas dans le centre-ville de Caen qui est fortement dense en construction en comparaison avec le restant de la ville. Cet espace est donc intéressant à étudier pour l'îlot de chaleur urbain. La moyenne de la fraction de bâti présent sur ces mailles est de 16%. La superficie totale de l'espace bâti de la ville est de 430 hectares sur près de 2570 hectares que compte la ville de Caen.

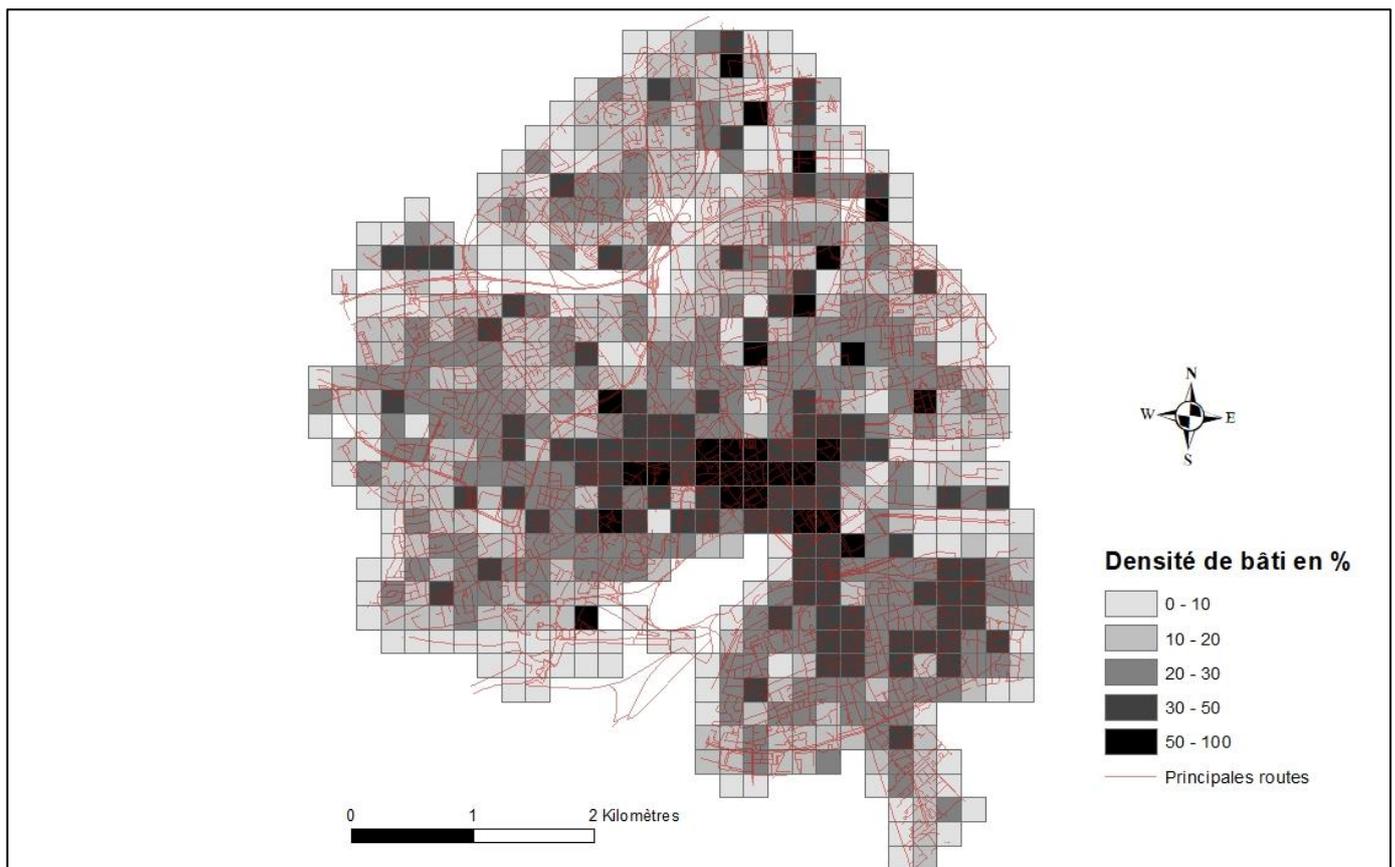
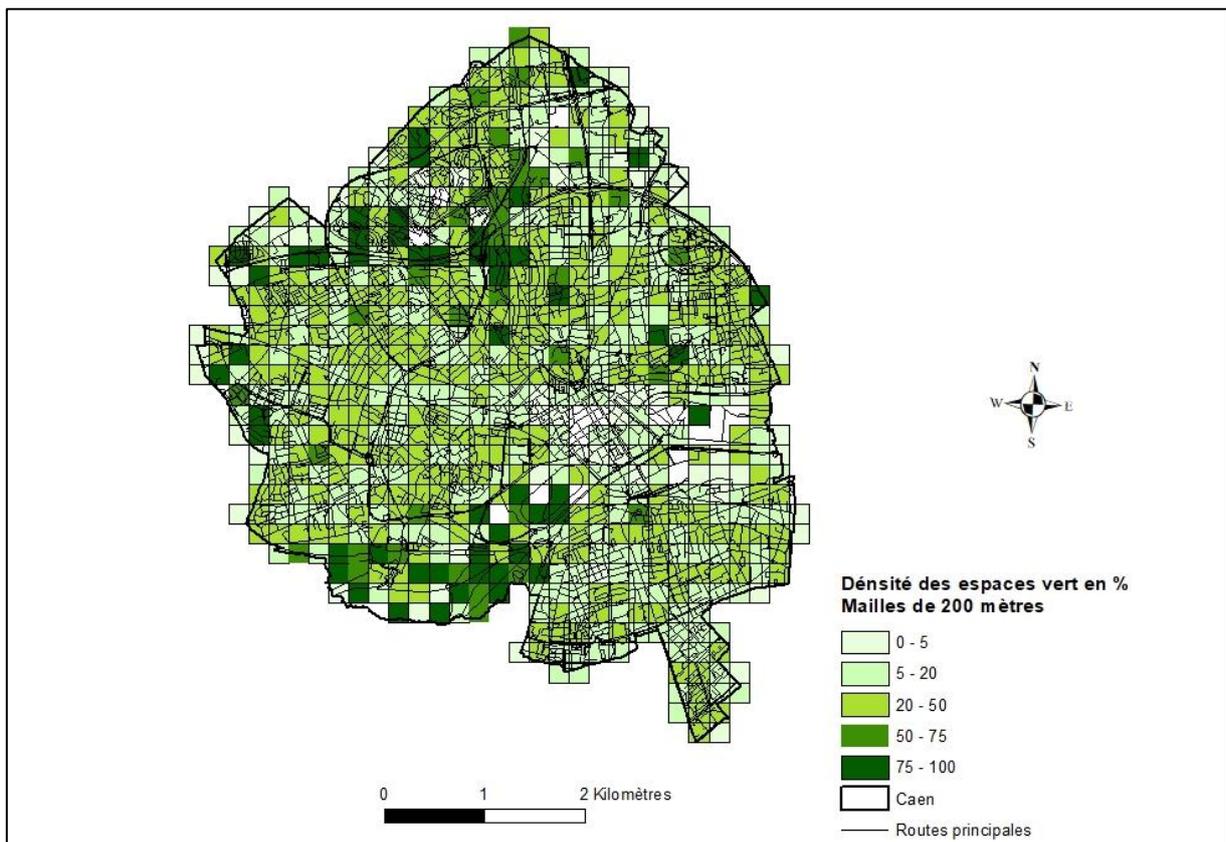


Figure 11 : Densité de bâti de la ville de Caen. Source : BD TOPO 2021. Réalisation : Mathys Cenier, 2022.

3.1.3 La densité des espaces verts

Un carroyage a été réalisé sur les espaces verts digitalisés. Nous avons gardé la même taille de maille que pour la densité de l'espace bâti. Cette carte (fig. 12) est ainsi découpée en mailles de 200 mètres. Nous retrouvons 665 mailles qui représentent la part de l'occupation des espaces verts en pourcentage. Ces mailles sont séparées en six classes, de la plus faiblement végétalisée à la plus végétalisée. La plage de valeurs permet de distinguer différentes catégories de quartier et d'espaces.

Les espaces fortement urbanisés et donc faiblement végétalisés sont retrouvés dans le centre-ville. Les espaces parsemés de végétation c'est-à-dire comprenant entre 5 à 20% de végétation sont présents dans les espaces proches du centre-ville ainsi que dans les quartiers résidentiels. Plus en périphérie, la végétation est plus importante. Dans les quartiers résidentiels plus excentrés, la végétation représente 20 à 50% en moyenne. Enfin, les mailles ayant un pourcentage de végétation supérieur à 50 % sont majoritairement des parcs urbains ou des prairies (dont la Prairie de Caen). La superficie totale des espaces verts est proche de 700 hectares. Ce chiffre est légèrement supérieur aux valeurs annoncées par la Mairie de Caen qui estime à 530 hectares de végétation (<https://actu.fr/>). Cette différence s'explique par la prise en compte des jardins privés. Ainsi, la végétation occupe plus de 20% de la ville de Caen, et ce, sans prendre en compte les forêts situées en extérieur de la ville (forêt de Grimbosq par exemple). La part des espaces verts devrait augmenter ces prochaines années grâce à la plantation d'une forêt à proximité du Mémorial, ainsi que de la revégétalisation de certaines surfaces minérales. Caen est située dans la moyenne haute des villes végétalisées.



3.2 La topographie de la ville de Caen

La ville de Caen est construite sur le bassin parisien. Ce dernier est composé de roches sédimentaires et plus particulièrement de calcaire.

Caen est situé dans la vallée de l'Orne. Cette vallée résulte de l'entaille de la roche calcaire causée par l'Orne. La vallée n'est pas très profonde puisque la partie la plus haute de la ville de Caen est située à 87 mètres, tandis que le fond de vallée est situé entre 3 et 6 mètres d'altitude. La différence d'altitude est donc très peu marquée et influe peu sur la modification du climat. Nous pouvons estimer que lorsque les conditions météorologiques respectent le gradient thermique adiabatique, les températures peuvent fluctuer de 0,4°C entre le point haut et le point bas.

La figure 13 présente la topographie de la ville de Caen. Le centre-ville est situé dans le fond de vallée. Plus en amont de la vallée de l'Orne, une vaste zone humide est présente. Ce grand espace de prairie joue un rôle de zone tampon. Cette zone est importante au moment des fortes pluies afin de limiter les inondations. La partie sud de la ville, quant à elle, est située sur un plateau de faible altitude d'environ 30 mètres. Enfin, la partie nord est composée d'un plateau compris entre 30 et 60 mètres d'altitude. Le point le plus haut se situe sur ce dernier, sur la Colline aux Oiseaux.

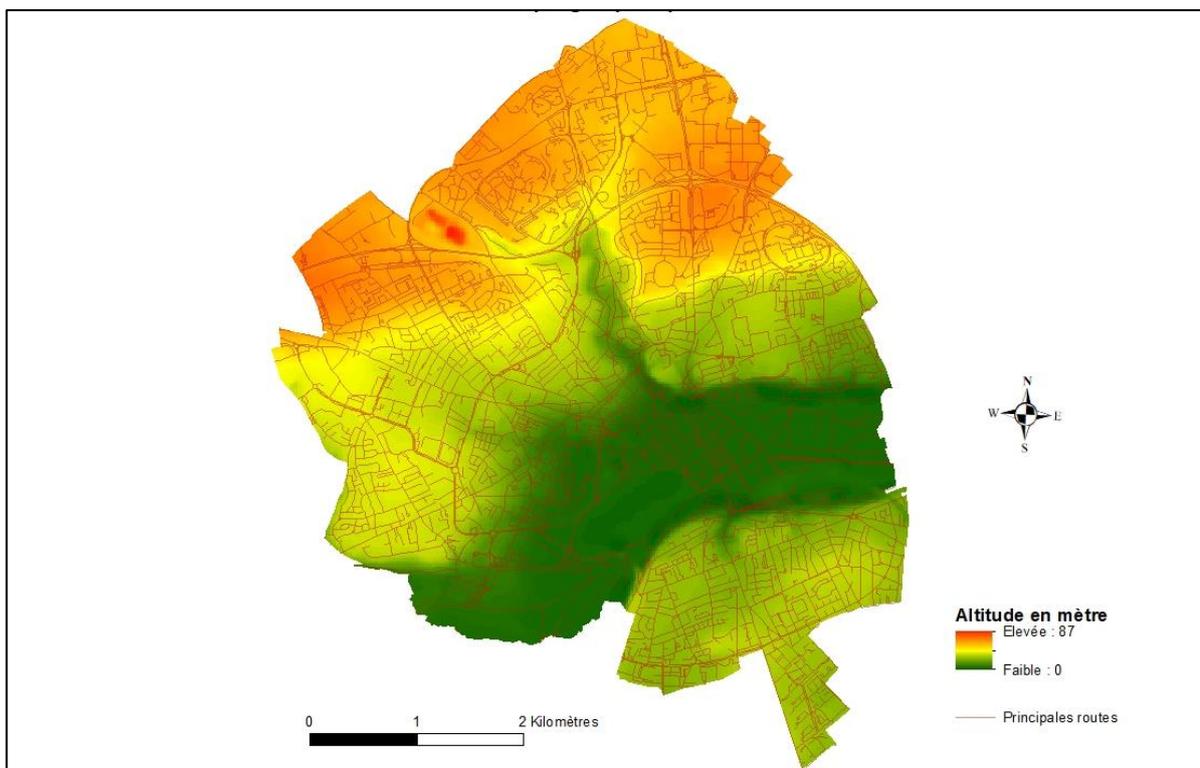


Figure 13 : Contexte topographique de la ville de Caen. Source : BD TOPO 2021. Réalisation : Mathys Cenier, 2022.

Conclusion de la partie III

Le climat urbain et la formation des îlots de chaleur sont très dépendants de l'occupation du sol. L'accumulation de chaleur dans les matériaux puis la libération de cette chaleur le soir venu, cause des écarts de températures entre le centre-ville et la périphérie.

La connaissance de l'occupation du sol a permis de mettre en avant les espaces probablement touchés par l'ICU. Les espaces où la végétation est peu présente et remplacée par des surfaces fortement minéralisées sont ceux les plus impactés par l'accumulation de chaleur dans les matériaux et par conséquent, par l'augmentation des températures de l'air.

Le centre-ville semble être l'espace le plus susceptible d'être touché par l'îlot de chaleur, notamment à cause de la densité de bâti qui y est très importante. A l'inverse, les zones plus périphériques, avec une densité de bâti plus faible et une végétation plus abondante, semblent être beaucoup moins impactées par l'ICU.

Il est à noter que la ville de Caen possède la particularité d'avoir un grand espace de prairie situé à proximité du centre-ville, ce qui participe grandement à la régulation des températures.

Suite à ces informations, nous pouvons désormais passer aux matériels de mesures ainsi qu'au choix des emplacements des stations.

Partie IV : Méthodes de mesures

4.1 Contextualisation

Afin de réaliser nos relevés, nous disposons de deux types de stations météorologiques, qui seront présentées plus tard. L'objectif est de collecter des données météorologiques à différents endroits de la ville sur une durée longue. Les stations sont positionnées pour une durée de plusieurs mois (la mise en place sera également détaillée par la suite). Le but de l'étude est d'étudier sur le long terme les dynamiques thermiques de la ville de Caen. Ces mesures sont essentielles pour étudier les lieux susceptibles d'accroître le phénomène d'îlot de chaleur. Ce type de mesures correspond ainsi à une étude sous différentes échelles spatiales. Nous verrons par la suite le choix de l'emplacement des stations qui justifiera la dimension innovante et inédite de l'étude de l'ICU de la ville de Caen.

4.1.1 Présentation et mise en place du matériel

Les stations météorologiques du réseau de mesure sont composées de deux références. La première station est de la marque DAVIS, le modèle est le Vantage Pro 2 (fig. 14). La station Vantage Pro 2 a été mise en place le 28 janvier 2022. C'est la première station à avoir été installée par M. Cantat et moi-même. Elle est située à proximité de l'Université, dans un jardin privé de la rue d'Edimbourg. Les huit autres stations météorologiques sont de la marque METEOHELIX IOT (fig. 14). L'une d'entre elles a été installée le 15 mars au Jardin des Plantes. Le 9 avril 2022, les six autres stations ont été installées dans le centre-ville à des endroits d'intérêt, sélectionnés au préalable. Nous détaillerons par la suite ces sites.

Ces stations sont dotées de plusieurs sondes mesurant différents paramètres (fig. 14). En effet, les stations mesurent évidemment la température, mais également l'humidité relative, le rayonnement solaire ainsi que la pression atmosphérique. La station de la marque Davis mesure deux paramètres supplémentaires, les précipitations et le vent (direction et vitesse). La station Davis est une station appartenant au laboratoire depuis quelques années. Les stations METEOHELIX ont, quant-à-elle été commandées pour cette étude. Elles ont été choisies pour les nombreux avantages qu'elles offrent. Tout d'abord, elles proviennent d'un fournisseur localisé sur Caen, Littoclimate. De plus, elles se sont avérées avoir un prix intéressant et une qualité comparable à des stations météorologiques semi-professionnelles, voire professionnelles. Le déploiement de ces stations est rapide et discret ce qui présente un avantage évidemment, en limitant l'impact visuel des stations dans l'agglomération... et les risques de vandalisme.

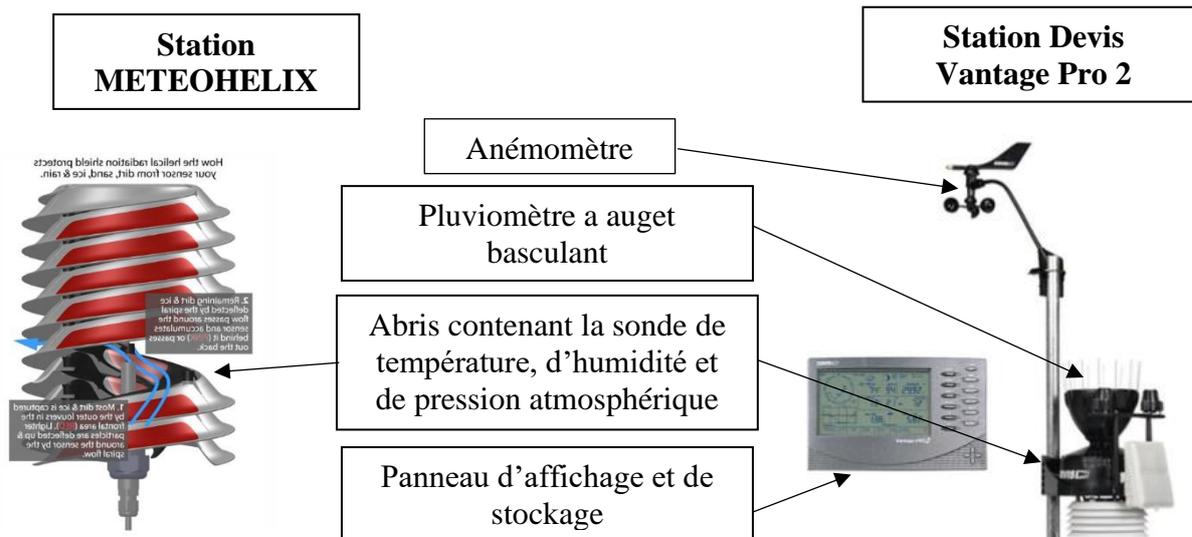


Figure 14 : Présentation des stations météorologiques utilisées pour l'étude. Réalisation : Mathys Cenier.

4.1.2 Détails sur le déstockage des données

Afin de récupérer les données relevées par les stations, il est essentiel de réaliser un déstockage de ces dernières. Les deux modèles de stations ont des moyens différents de déstocker les données mesurées. Le modèle Davis utilise un système de lecture direct via un panneau d'affichage. Le déstockage des données est possible grâce à une mémoire interne permettant de garantir la conservation des relevés. La capacité de stockage dépend de l'intervalle de mesure sélectionné. Ainsi, pour nos relevés horaires nous disposons de plus de 100 jours de stockage. Les données sont relevées régulièrement par nos soins à l'aide d'un ordinateur portable.

Les stations METEOHELIX sont, quant-à-elles, dotées d'un système qui permet l'envoi des données toutes les 10 minutes. Ce système est couvert par le réseau Sigfox. Un suivi en ligne est possible grâce à un site dédié. Les données peuvent être déstockées directement en ligne à partir de ce site. Cette technique permet d'obtenir les données plus rapidement sans se déplacer, ce qui représente un réel avantage. De plus, ces stations permettent de mesurer la température précisément, de par leur construction. Le rayonnement solaire est réfléchi par la station de couleur blanche. De plus, la forme hélicoïdale externe et interne (double hélice) permet d'éviter la surchauffe de la station sous l'effet du soleil par temps clair et calme de jour. Ainsi, l'air chaud est expulsé vers le haut et l'air frais circule dans un mouvement ascensionnel (www.baranidesign.com). Les rayons du soleil ainsi que les poussières n'atteignent pas le capteur. Le schéma (fig. 15) résume le processus de la station conçu par l'entreprise BARANI DESIGN.

BARANIDESIGN

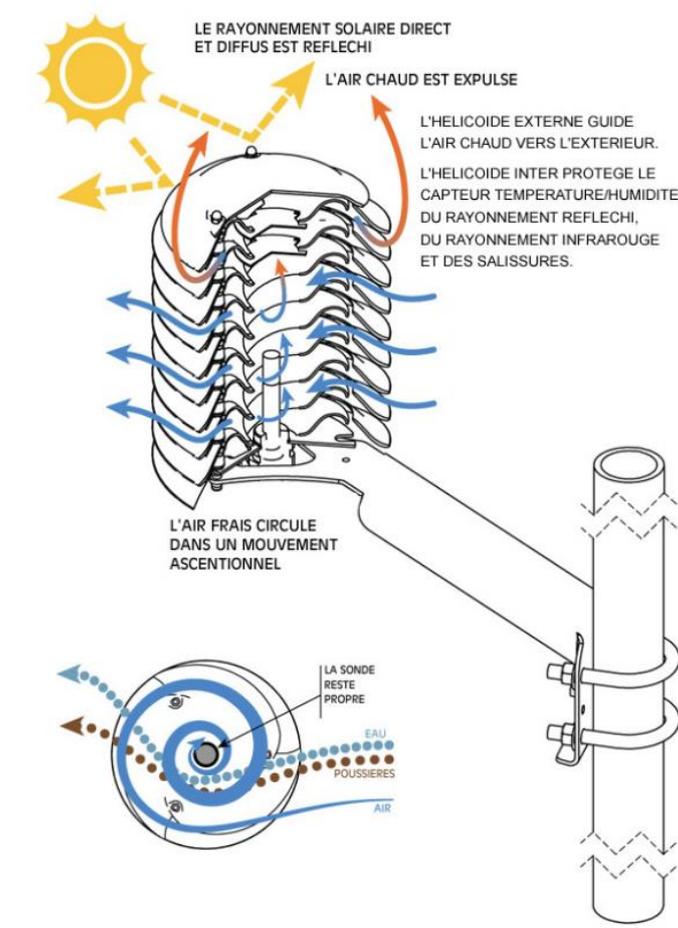


Figure 15 : Détail du fonctionnement de la station conçue par l'entreprise BARANIDESIGN.
Source : <https://www.littoclimate.net>.

4.2 Démarches auprès de la Mairie de Caen pour l'installation des stations

Tout d'abord, dès le mois de novembre M. Cantat a effectué une demande auprès de l'Université et de la Région (RIN) pour l'achat de huit stations météorologiques. Un appel d'offres a été effectué dans l'objectif de trouver un fournisseur proposant des stations adaptées à notre projet. Les critères de sélection étant la qualité des stations, le prix et si possible, trouver un fournisseur local. Nous avons obtenu une offre correspondant à cette proposition. Une entreprise locale, la société Littoclimate, située à Caen, a donc été choisie pour la commande de huit stations autonomes.

Au mois de janvier, nous avons pris contact avec la Mairie de Caen afin d'expliquer notre projet d'étude de l'îlot de chaleur de la ville. Nous avons donc contacté Mme Vanida Allain, directrice du Développement Durable, transition énergétique et prévention des risques à la communauté urbaine de Caen la Mer. Ce premier contact par mail, nous a conduit, M. Cantat et moi-même, à un entretien en visioconférence avec Mme Allain et M. Arnaud Marie, responsable du service Transition Énergétique. Nous avons donc exposé l'ensemble du projet et démontré les enjeux de celui-ci. Nous avons également demandé une autorisation de la Mairie

afin de pouvoir installer nous-mêmes les stations dans la ville de Caen et d'accélérer ainsi la mise en service du matériel. A la suite de cet entretien, la Mairie a validé le projet. L'autorisation pour l'installation des stations a donc été signée par différents services et personnels de Mairie (Annexe 1). Parmi eux, le directeur général adjoint, le directeur général des services, le cabinet de mairie et M. Escash, maire-adjoint à la Mairie de Caen.

Parallèlement, nous avons contacté Nelly Hubert, responsable du Jardin des Plante depuis 2008 et Florence Thérèse, botaniste, chargée de protection de la faune et de la flore, afin de pouvoir installer une station dans le parc. Après acceptation du projet, Mme Thérèse nous a accueilli au Jardin des Plantes pour que nous choissions un endroit où positionner la station.

4.3 Démarches dans le choix de l'emplacement des stations météorologiques

4.3.1 Premières démarches

Les emplacements des stations météorologiques ont été choisis dans l'objectif d'obtenir des relevés de température dans des milieux différents. Nous voulions une diversité dans l'occupation du sol et dans le cadre général environnant. Ce réseau de mesures va permettre d'augmenter les connaissances climatiques de la ville par l'observation sur le long terme des températures. Le but étant de relever des différences de température au sein de la ville de Caen et d'observer des modifications du climat sous l'effet de l'urbanisation.

L'étude préliminaire sur l'occupation du sol, nous a permis de mieux connaître l'occupation du sol. En effet, en connaissant la densité de bâti et la densité d'espaces verts, nous en apprenons davantage sur l'occupation du sol réelle. A cet aspect cartographique, s'ajoute notre connaissance personnelle de la ville. Grâce à l'ensemble de ces informations nous avons pu choisir les emplacements de façon pertinente.

Tout d'abord, rappelons que nous disposons d'une station météorologique Davis Vantage Pro 2 et de huit stations météorologiques de type METEOHELIX. Une station METEOHELIX est gardée en réserve afin d'assurer le remplacement d'une station en cas de dysfonctionnement. Nous avons huit stations à positionner dans la ville afin de réaliser cette première phase d'étude climatique de la ville de Caen.

Pour cette première phase d'étude de l'îlot de chaleur de Caen, nous avons choisi de concentrer les stations dans le centre-ville. Ce travail est exploratoire, d'où la nécessité de commencer par le centre-ville. En effet, nous disposons de peu d'informations sur les dynamiques thermiques de la ville et le nombre de stations ne nous permet pas d'élargir notre étude en périphérie, sachant qu'une référence « rurale » sera fourni par une station sur la Prairie.

L'étude thermique du centre-ville est en cohérence avec l'étude de l'occupation du sol que nous avons étudiée précédemment. Le bâti occupe plus de 70% de la surface du sol dans le centre-ville, sans compter les surfaces goudronnées et minérales. Le centre de Caen est donc fortement anthropisé et très dense.

4.3.2 Les critères pris en compte dans le choix des emplacements

Nous allons maintenant justifier le choix de l'emplacement des stations météorologiques situées dans le centre-ville et proposer des emplacements supplémentaires dans le cadre d'une étude ultérieure plus large de l'ICU de Caen.

Les stations ont été réparties selon plusieurs critères. Tout d'abord, nous avons fait le choix de privilégier des sites représentatifs de milieux variés, milieu urbain, milieu mixte, et espaces verts.

De plus, pour l'implantation des stations, il est nécessaire de disposer de support d'attache pouvant les accueillir. Nous avons donc dans un premier temps, repéré les endroits intéressants pour notre étude puis nous avons repéré si ces lieux accueillait des lampadaires et/ou des mâts servant de support pour les caméras de surveillance de la ville. Pour des raisons de sécurité et afin d'éviter toute destruction, les stations ont été placées à 3 mètres de haut à l'aide d'un escabeau. Cette hauteur est pertinente car elle permet d'associer sécurité et fiabilité des relevés (et est la hauteur retenue usuellement dans les études de climatologie urbaine).

Pour finir, les stations ont été fixées sur les supports à l'aide d'un collier de serrage (fig. 16) garantissant la stabilité de la station. Afin de ne pas biaiser nos résultats, nous avons veillé à ce que le positionnement des stations respecte certains critères. Tout d'abord, le positionnement de la station s'effectue toujours dans l'objectif d'une exposition optimale tout au long de la journée. Le panneau solaire, permet non seulement de recharger la station mais aussi d'enregistrer l'intensité du rayonnement solaire. Chaque station est orientée en direction du soleil. Ce critère paraît essentiel afin d'assurer la recharge des stations et d'homogénéiser les conditions de mesure (même hauteur et même direction).



Figure 16 : Installation d'une station météorologique METEOHELIX (située au château de Caen). Photographie : Matthieu David.

4.4 Les sites retenus

4.4.1 Milieu urbain dense

Les deux stations situées en milieu urbain sont placées sur un mât utilisé pour la vidéo surveillance sur la Place Pierre-Bouchard (fig. 17A) et sur le Boulevard des Alliés (nommée Tour Leroy pour l'exploitation des données) (fig. 17B). Ces sites sont représentatifs d'un milieu fortement urbanisé. Ce sont également des lieux très fréquentés par les habitants de Caen du fait de la présence de nombreux services et commerces. La carte de la densité de bâti présentée précédemment indique que sur ces espaces, la part de bâti correspond à 50 et 70% de l'occupation du sol. Dans les deux cas, le bâti présent est majoritairement composé d'immeubles de plusieurs étages. Ces derniers accumulent de la chaleur sur une très grande surface, ils sont représentatifs du bâti du centre de Caen. La proportion d'espaces végétalisés est très faible, voire nulle aux alentours de ces deux stations. Cependant, un élément diffère entre les deux. Cet élément est le milieu environnant. En effet, la station située Tour Leroy est localisée dans un espace relativement ouvert. A l'inverse, la Place Pierre Bouchard est plus confinée. Ainsi ces deux stations permettent d'étudier un cadre minéral et fortement urbanisé mais avec un environnement différent. Enfin, les stations sont situées sur la partie basse de la ville, dans le fond de vallée. Les stations sont à 5-6 mètres d'altitude.

De par leur localisation, nous pouvons penser que ces stations pourront mesurer des écarts de températures relativement importants.

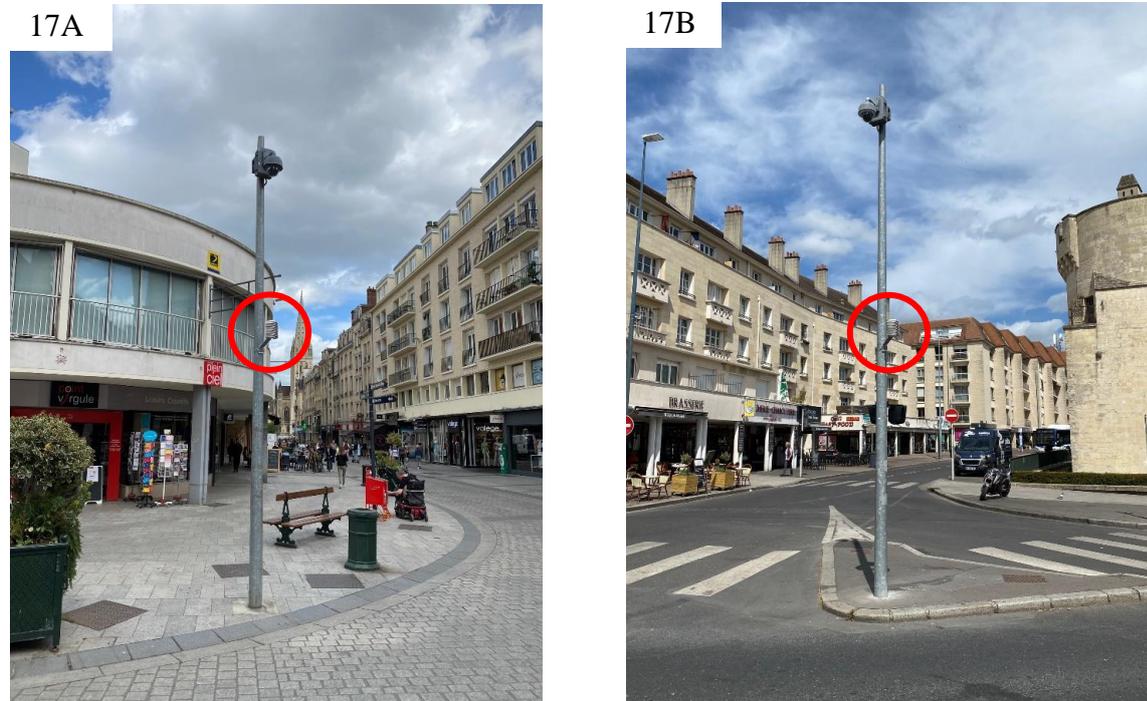


Figure 17 : Localisation des stations météorologiques METEOHELIX situées en milieu urbain. 17A : Place Pierre Bouchard. 17B : Boulevard des Alliés. Photographies : Mathys Cenier.

4.4.2 Les sites dit « mixtes »

Trois stations sont situées dans des milieux mixtes, c'est-à-dire dans un milieu urbain mais avec des particularités propres à chaque station. La première est située à proximité de l'Université, Rue d'Edimbourg, sur la partie haute de la ville de Caen. Elle est positionnée sur un mât dans un jardin privé dans un environnement composé de végétation et de constructions. Cet espace peut être décrit par « la présence de maison individuelle, accompagnée de jardin à l'arrière » (Allain, 2004). Les données relevées par cette station sont ainsi représentatives d'un jardin d'une maison individuelle. Ce site est composé d'environ 20 à 40% de surfaces végétalisées et d'une surface de bâti d'environ 20%. Le reste correspond à des surfaces généralement minéralisées et goudronnées. La station positionnée est la station Vantage Pro 2 (annexe 9).

La seconde station est située au château de Caen (fig. 18A). L'environnement est composé d'une végétation relativement importante et d'un revêtement mixte (surfaces minérales, végétalisées, goudron, ...) avec la proximité de l'Esplanade de la Paix, des habitations et du Château en lui-même. La part de surface bâtie est de 20% et les surfaces végétalisées représentent 30% environ. Cette station est également située sur la partie haute de la ville. La station est positionnée sur un lampadaire à l'entrée de l'enceinte du château de Caen.

Enfin, la troisième est au milieu de la Place de la Résistance (fig. 18B). Le cadre correspond à un espace densément urbanisé et entouré de surfaces minérales. La station est néanmoins située au-dessus d'un espace vert et dans un espace ouvert. Elle se situe dans des conditions similaires à la station de la Tour Leroy. Il est intéressant de comparer deux stations aux conditions similaires mais avec un revêtement différent. Nous pourrions ainsi évaluer l'impact d'un sol enherbé sur les températures dans la partie basse de la ville de Caen.



Figure 18 : Localisation des stations météorologiques METEOHELIX situées en milieu mixte. 18A : Château de Caen. 18B : Place de la Résistance. Photographies : Mathys Cenier.

4.4.3 Milieu végétalisé

Les deux stations situées en milieu végétalisé sont situées au Jardin des Plantes (sur un mât) (fig. 19A) et à la Prairie de Caen (Boulevard du Petit Vallerent) sur un lampadaire (fig. 19B). Ces sites ont la particularité d'être entièrement entourés de végétation. L'objectif est de mesurer l'effet de la nature en ville. De par leur localisation, nous pouvons émettre l'hypothèse que ces stations ne seront pas ou peu soumises aux variations artificielles de températures.

Tout d'abord, le Jardin des Plantes est un espace vert intra-urbain. C'est un parc d'une superficie de 3,5 hectares. Il est composé de plus de 8000 espèces différentes de végétaux (<https://www.calvados-tourisme.com>). Cette végétation apporte un espace de vie agréable pour la population mais aussi un lieu intéressant pour notre étude thermique de la ville. Nous avons vu précédemment que la végétation jouait un rôle dans la régulation des températures. De plus, le Jardin des Plantes est situé dans un creux topographique. Cet espace est composé d'une végétation dense située à basse altitude, entraînant un léger confinement de la station.

Ensuite, la station de la Prairie a été choisie comme station de référence. En effet, le site de la Prairie est idéal. Nous y trouvons un site plan et dégagé. La Prairie est une grande surface enherbée située à proximité du centre-ville de Caen. La zone de 90 hectares s'étend jusqu'à Louvigny. Cet espace peut être considéré comme le poumon vert de la ville de Caen (<https://www.caenlamer-tourisme.fr>). Il est rare de trouver un espace végétalisé aussi grand dans le centre d'une ville, d'où l'intérêt de positionner une station à cet endroit. Elle est située dans le fond de vallée à une altitude de 5 mètres. Les conditions environnantes de cette station font d'elle une référence qui pourrait être utilisée dans le réseau de Météo-France.

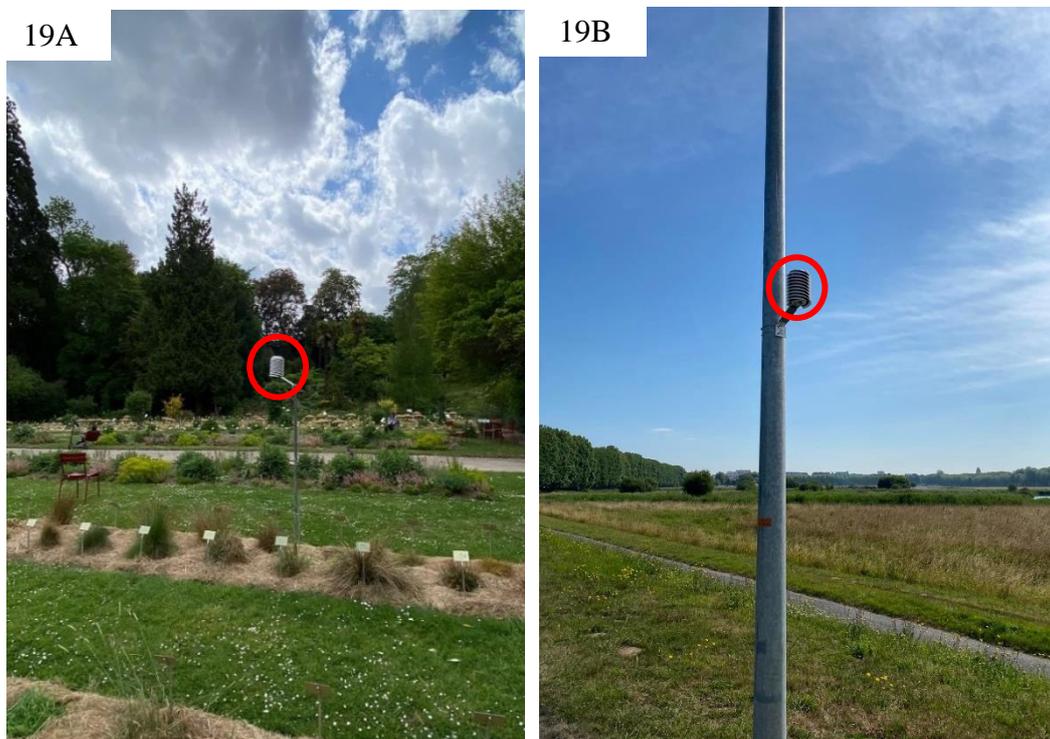


Figure 19 : Localisation des stations météorologiques METEOHELIX situées en milieu végétalisé. 19A : Jardin des Plantes. 19B Prairie de Caen. Photographies : Mathys Cenier.

4.4.4 Surface hydraulique

La dernière station est située sur un lampadaire à proximité du Pont Winston Churchill (fig. 20). Il est intéressant d'étudier les températures à proximité d'une surface hydraulique, faisant partie de la trame bleue, dans le centre-ville de Caen. L'objectif étant d'évaluer les potentiels écarts de températures induits par la Trame Bleue. La Trame Verte et Bleue (TVB) a pour objectif de maintenir et reconstituer un réseau d'échanges pour que les espèces animales et végétales puissent assurer leur cycle de vie (<https://www.ecologie.gouv.fr>). Ceci permet d'enrayer la perte de biodiversité, en conservant des surfaces favorables à la faune, réparties sur l'ensemble du territoire et connectées les unes aux autres (Michelot *et al.*, 2015).

Le fleuve de l'Orne traverse Caen d'ouest en est, nous avons donc souhaité évaluer son rôle dans la régulation thermique. Cette station est située dans le fond de vallée dans des conditions similaires à celle positionnée Place de la résistance et Tour Leroy.



Figure 20 : Localisation de la station météorologique METEOHELIX située près d'une surface hydraulique (Pont Winston Churchill) Photographie : Mathys Cenier.

4.5 Représentation de la répartition géographique des stations

La figure 21 permet d'indiquer le positionnement de toutes les stations météorologiques utilisées pour étudier le phénomène d'ICU au sein de la ville de Caen.

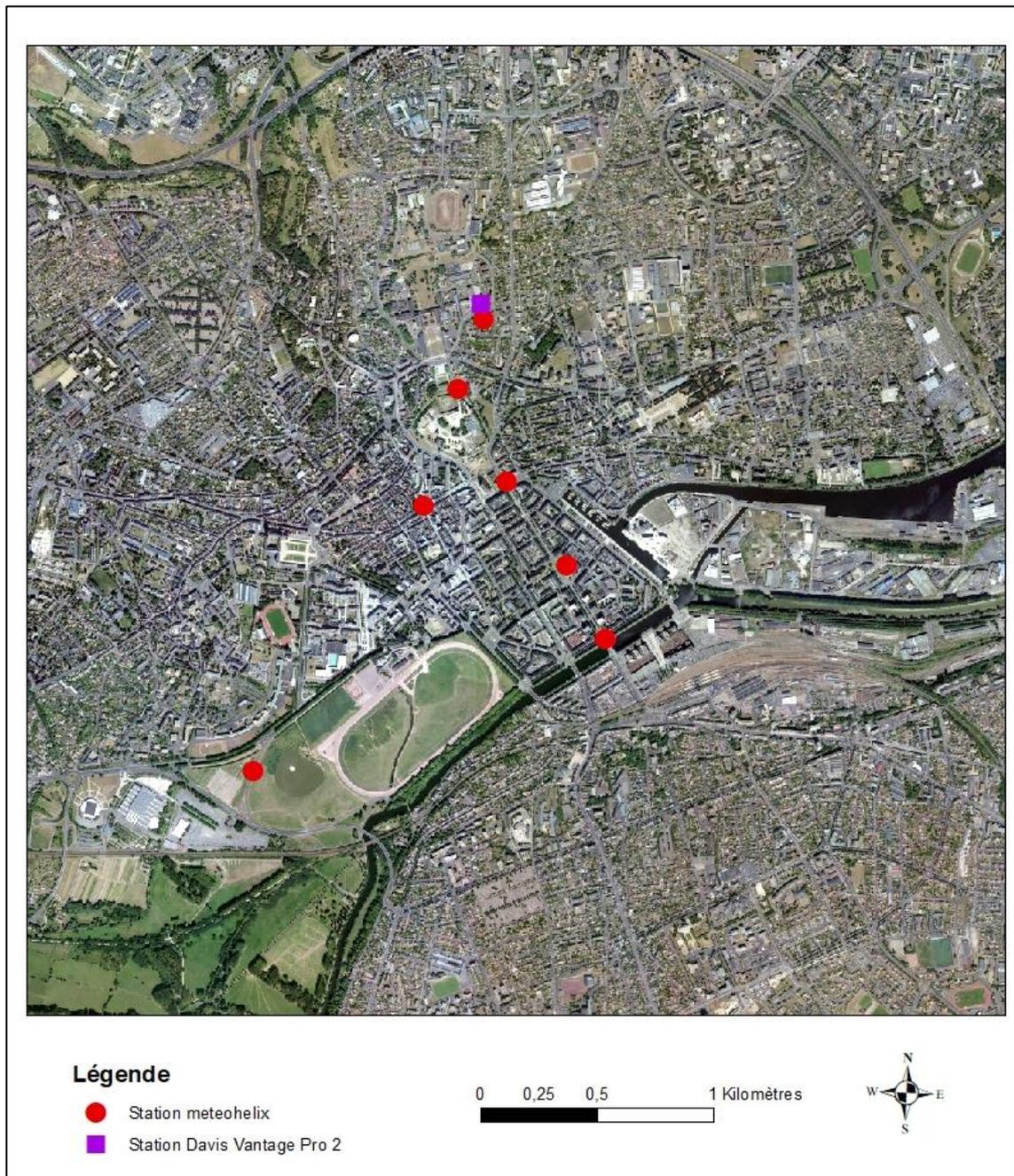


Figure 21 : Localisation des stations météorologiques au sein de la ville de Caen. Source : BD ORTHO 2016. Réalisation : Mathys Cenier, 2022.

4.6 Proposition de sites supplémentaires

4.6.1 Démarches suivies pour le choix des sites supplémentaires

Cette étude est un travail exploratoire. L'objectif est de l'élargir à l'ensemble de l'agglomération caennaise afin de comprendre au mieux les dynamiques thermiques de la ville et d'évaluer les espaces plus touchés par l'îlot de chaleur. En effet, cette première phase d'étude nous permet de connaître les dynamiques thermiques dans le centre-ville de Caen. Nous pourrions ainsi proposer des solutions adaptées dans les espaces les plus touchés par ce phénomène d'élévation de la température.

Une liste de sites supplémentaires est réalisée. Ces sites permettraient d'accroître les connaissances sur l'îlot de chaleur de la ville de Caen. Une estimation du nombre de stations nécessaires est réalisée. Il faudrait environ trente stations pour couvrir la ville de Caen et son agglomération. Ceci correspond donc à l'installation de 22 stations en plus des huit sites déjà mises en place pour cette étude. Les emplacements des sites sont choisis de la même manière que pour les stations installées pour ce mémoire. Cependant, nous avons proposé d'autres conditions et des sites différents dans l'objectif de déceler d'autres particularités du climat de Caen.

Ainsi, les stations seraient situées sur des sites très hétérogènes du point de vue de l'occupation du sol. Toutes les stations sont positionnées de façon à être exposées de manière optimale au soleil. La hauteur des stations reste la même, c'est-à-dire trois mètres afin d'éviter toutes dégradations et d'assurer la sécurité des habitants. Les stations sont positionnées sur des lampadaires, situés à plusieurs mètres de tout obstacle qui pourrait influencer trop directement les données relevées. Ce dernier critère ne s'applique volontairement pas pour certaines stations. Ces dernières ont pour objectif d'étudier des particularités des sites sélectionnés.

Les stations sont réparties de manière à couvrir entièrement la ville de Caen et son agglomération. Lors de notre demande d'installation des stations auprès de la Mairie, plusieurs emplacements nous avaient été proposés. Pour cette première phase exploratoire, nous n'avons pas pu répondre à ces demandes. Nous avons donc pris en compte ces sites dans le cadre d'une étude plus large. Ces lieux ont pour projet d'être déminéralisés dans les prochaines années, d'où l'importance de savoir si ces derniers participent ou non à la formation d'un ICU. Couvrir l'agglomération caennaise dans son intégralité permettrait de spatialiser l'ICU sous forme de cartographie. Une carte comprenant un dégradé de couleurs permettrait la compréhension auprès du grand public.

4.6.2 Localisation des sites complémentaires

La figure 22 permet de visualiser la répartition des trente sites que nous avons repéré. Les points rouges et le carré vert représentant les stations déjà installées et les ronds violets correspondant aux sites proposés.

Tout d'abord, nous avons deux sites qui ont été proposés par la Mairie. Comme dit précédemment, ce sont des sites qui ont pour projet d'être déminéralisés dans les prochaines années. Nous avons parmi eux la **Place Würzburg** à la Folie Couvre-chef et la **Place Foch**.

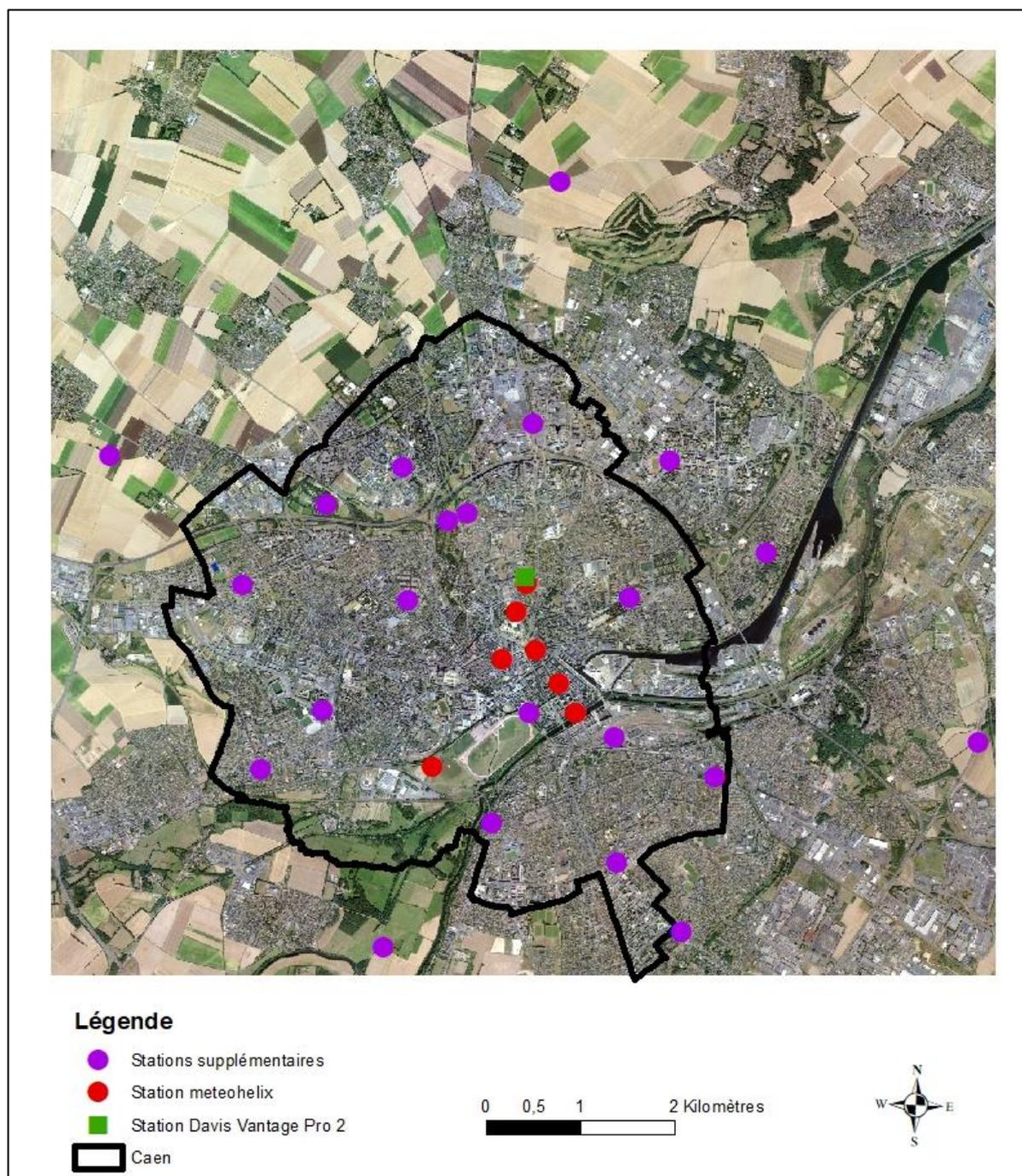


Figure 22 : Localisation des stations météorologiques supplémentaires au sein de la ville de Caen.
Source : BD ORTHO 2016. Réalisation : Mathys Cenier.

Ces espaces sont très minéralisés et constitués de peu de végétation. Un suivi des températures pourrait être intéressant afin d'étudier la différence entre avant et après les travaux de végétalisation. Sur les deux sites nous avons repéré un lampadaire qui pourrait servir de support et qui garantirait une bonne exposition au soleil.

En outre, nous avons retenu plusieurs sites réunissant des conditions similaires. Ils sont situés en zone urbanisée et respectent les conditions évoquées précédemment. Les stations sont entourées d'environnements très hétérogènes pour ce qui est de l'occupation du sol. En effet, selon l'emplacement, la densité de bâti et de surfaces végétalisées est différente. Ces paramètres sont intéressants car comme dit précédemment, l'occupation du sol influe sur la formation d'un ICU et donc sur les données mesurées par les stations.

De plus, la Mairie nous a fait part de sa volonté de végétaliser les cours des écoles. Celles-ci étant pour la plupart goudronnées, elles représentent des surfaces ayant une forte capacité à retenir la chaleur. La Mairie a donc pour projet de revégétaliser ces espaces. Nous avons trouvé intéressant d'étudier ces espaces qui participent au bien-être des plus jeunes. La mise en place des stations pourrait faire l'objet d'une action de sensibilisation *via* la présentation de l'étude et des enjeux aux enfants.

Les sites supplémentaires sélectionnés sont répartis de manière à permettre une couverture optimale de la ville. De plus, ces derniers permettent d'étudier des zones situées sur la partie haute et également la partie basse de la ville, ce qui a pour avantage de mettre en avant l'influence de la topographie sur la formation de l'ICU.

Voici l'ensemble des sites retenus par secteur :

Nord-Ouest :

- Rondpoint des victimes civiles caennaises de la Bataille de Normandie,
- Boulevard André Detolle, à proximité du stade Malherbe,
- Rue de Beaulieu (à proximité de l'école La Maladrerie)

Sud-Ouest :

- Route de Bretagne, Caen,
- Rue de Branville, Caen

Sud-Est :

- Gare de Caen,
- Boulevard Raymond Poincaré, à proximité de l'école Sainte-Thérèse,
- Boulevard de Rethel,
- Rue des écoles, Cormelles-le-Royal, à proximité de l'école primaire Alber Camus

Nord-Est :

- Avenue George Clemenceau, Caen,
- Boulevard de la Paix, Hérouville-Saint-Clair,
- Avenue Professeur André Morice, à proximité du CHU de Caen,
- Rond-point des droits de l'enfant, Avenue de la Valeuse, Hérouville-Saint-Clair.

Ensuite, nous avons choisi de positionner trois stations supplémentaires dans des espaces végétalisés. Les deux premières stations pourraient être positionnées dans la Vallée des Jardins, plus précisément sur le Coteau des Sablons. Pour ce faire, une comparaison entre le fond de vallée et le haut du coteau pourrait être intéressante. Ceci permettrait de déceler des écarts de températures importants et de mesurer également des températures plus froides en fond de vallée. Une étude thermique d'une ville a aussi pour objectif de trouver les îlots de fraîcheur urbain (IFU). Une station positionnée sur la Colline aux Oiseaux apporterait des données intéressantes. Ce parc urbain est situé sur la partie haute de la ville. Nous pourrions ainsi comparer les valeurs obtenues aux autres stations positionnées dans le fond de vallée (Jardin Des Plantes et Vallée des Jardins). Ces sites pourraient relever des IFU.

- En haut du Coteau des Sablons,
- En bas du Coteau des Sablons,
- Colline aux Oiseaux

Enfin, nous avons choisi de positionner quatre stations dans l'espace rural environnant. Ces stations seraient positionnées aux quatre points cardinaux afin de mesurer les dynamiques et le déplacement de l'îlot de chaleur. Les emplacements ne sont que des propositions. En effet, l'installation de ces stations en périphérie nécessite l'accord des propriétaires des parcelles agricoles.

- A l'ouest (à proximité de la station Météo-France de Caen Carpiquet),
- A l'est,
- Au sud,
- Au nord.

Conclusion de la partie IV

Pour ce travail préliminaire sur l'îlot de chaleur urbain de la ville de Caen, les stations météorologiques ont simplement été installées dans le centre-ville. Au total, sept stations, mises à disposition par le laboratoire GEOPHEN, ont été mises en place. Ces stations ont notamment été choisies pour leur praticité (facilement déployables) mais aussi pour leur discrétion, leur permettant de se fondre dans le paysage urbain. Elles ont aussi la qualité d'obtenir des données quantitatives facilement exploitables grâce à un système d'envoi en direct sur les téléphones portables et/ou ordinateurs.

Le choix des sites accueillant les stations a été effectué en respectant des critères précis afin d'obtenir des données comparables. De plus, les sites sont hétérogènes afin de tenter de déceler des particularités du climat de Caen.

Pour finir, les emplacements des stations supplémentaires à mettre en place dans le cadre d'une étude plus large sont réparties de façon à permettre une étude complète du climat de la ville de Caen ainsi que de son agglomération.

Avant de passer à l'exploitation des données relevées par les stations, nous allons étudier les différents travaux de modélisation climatique qui ont été réalisés sur la ville de Caen. Ceci nous permettra d'avoir une estimation de l'ICU présent sur la ville à l'heure actuelle et son évolution dans le futur.

Partie V : Modélisation de l'îlot de chaleur urbain

5.1 Classification LCZ

5.1.1 Présentation de la classification LCZ

Stewart et Oke ont proposé un moyen d'appréhender les îlots de chaleur par la modélisation. Ces scientifiques ont inventé le concept de « Local Climate Zone », aussi appelé LCZ. C'est une méthode de classification des zones de la ville selon plusieurs critères. Tout d'abord, ces zones sont classées selon la présence de végétation, de l'occupation du sol mais aussi en prenant en compte la morphologie des rues et du bâti. Ainsi, 17 classes ont été créées afin de définir au mieux un espace et son exposition à l'îlot de chaleur (<https://www.frontiersin.org>). Parmi ces classes, il y a 10 classes consacrées à l'espace urbain. Cette classification par les LCZ à l'avantage d'être reconnue dans le monde entier. Cette méthode s'applique à l'aide d'images satellites.

Les différentes catégories sont présentées dans la figure 23 et traduites en français ici :

- 1) Bâti compact et haut « type gratte-ciels »
 - 2) Bâti compact moyennement haut
 - 3) Bâti compact et de petite taille
 - 4) Bâti de grande taille, parsemé de végétation
 - 5) Bâti moyennement haut, parsemé de végétation
 - 6) Bâti de petite taille, parsemé de végétation
 - 7) Bâti de petite taille à un étage, très dense (type favelas)
 - 8) Bâti de grande dimension et de hauteur faible (zone commerciale)
 - 9) Bâti de petite taille, végétation autour très présente
 - 10) Bâti de grande dimension, avec cheminée, surface fortement minéralisée (type industrielle)
- A) Végétation haute et dense
 - B) Végétation haute et peu dense
 - C) Végétation basse de type buisson
 - D) Végétation très basse de type prairie ou culture
 - E) Surface rocheuse ou pavée (naturelle ou artificielle)
 - F) Sol nu (non recouvert de végétation) ou sol sableux
 - G) Surface en eau

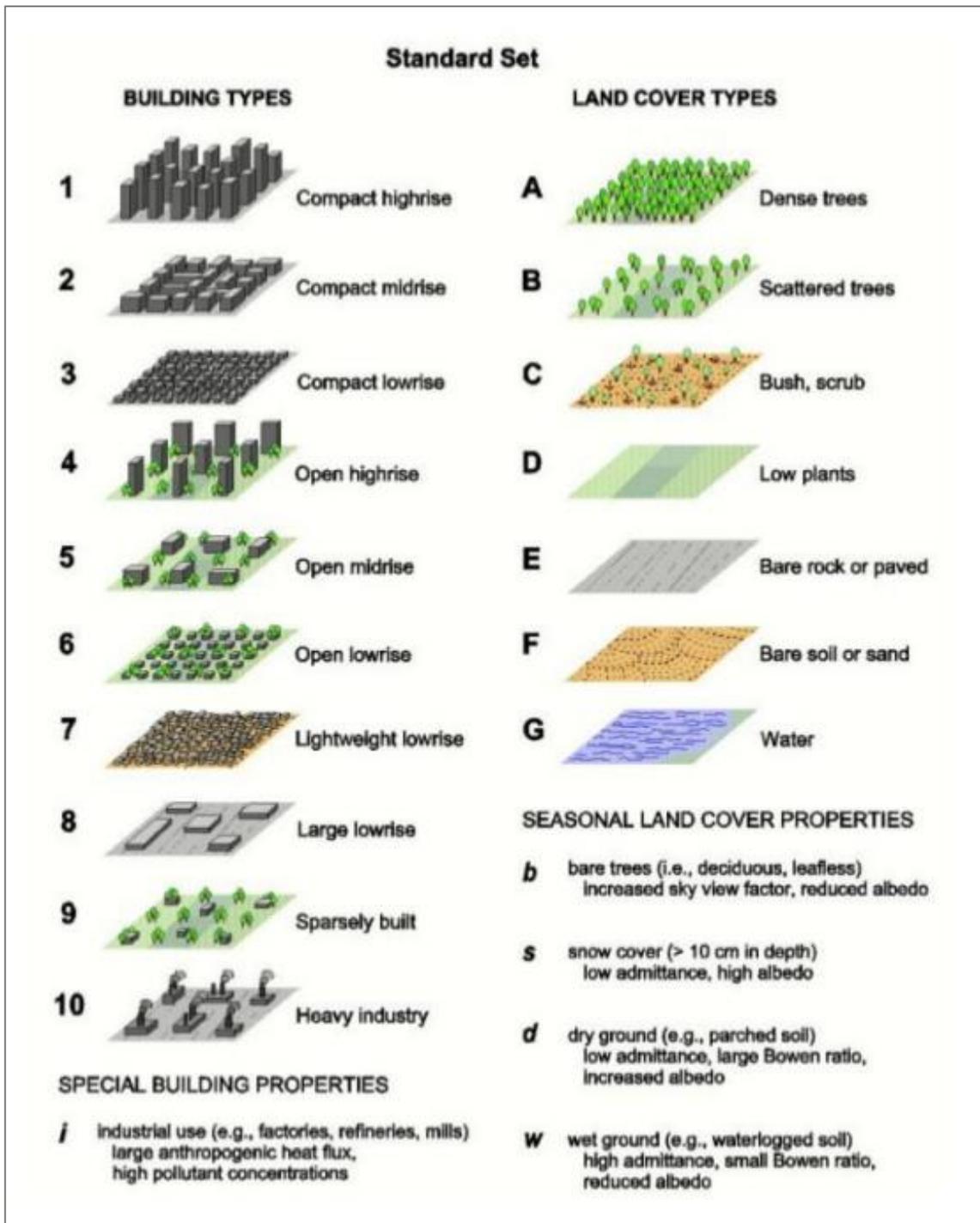


Figure 23 : Classification des LCZ. Source : Stewart & Oke, 2012.

5.1.2 Application de la classification LCZ à notre zone d'étude

Nous allons nous servir de cette classification pour déterminer à quelles LCZ correspondent les sites d'implantation de toutes les stations. Grâce à un générateur de LCZ, nous avons pu cartographier la ville de Caen et ses environs selon ces classes. L'application se nomme « web LCZ Generator » (<https://lcz-generator.rub.de>). La classification est réalisée à l'aide de *Google earth pro* qui réalise une analyse géospatiale avec des données issues de Landsat et de Sentinel (Générateur LCZ). L'application permet de générer une classification en digitalisant les différents espaces de la ville selon leur LCZ correspondant. Nous obtenons ces résultats à l'aide de la connaissance de la ville et de son occupation du sol. Cette connaissance est utile notamment pour la détermination du nombre d'étages des immeubles ou encore la présence de végétation afin de choisir la classification la mieux adaptée. La figure 24 illustre la réalisation des LCZ à l'aide de l'outil de cartographie en trois dimensions de Google Earth Pro.

Ces données sont contrôlées lors de la soumission des données au simulateur. En effet, chaque polygone créé est vérifié par le générateur qui détecte les zones suspectes (zones potentiellement mal digitalisées). Cet outil permet de retenir les critères de sélection utilisés lors de la digitalisation. Cette mémoire est utilisée par le modélisateur qui sera capable de repérer des zones identiques qui n'auraient pas été modélisées. Celles-ci pourront donc être modélisées à leur tour.

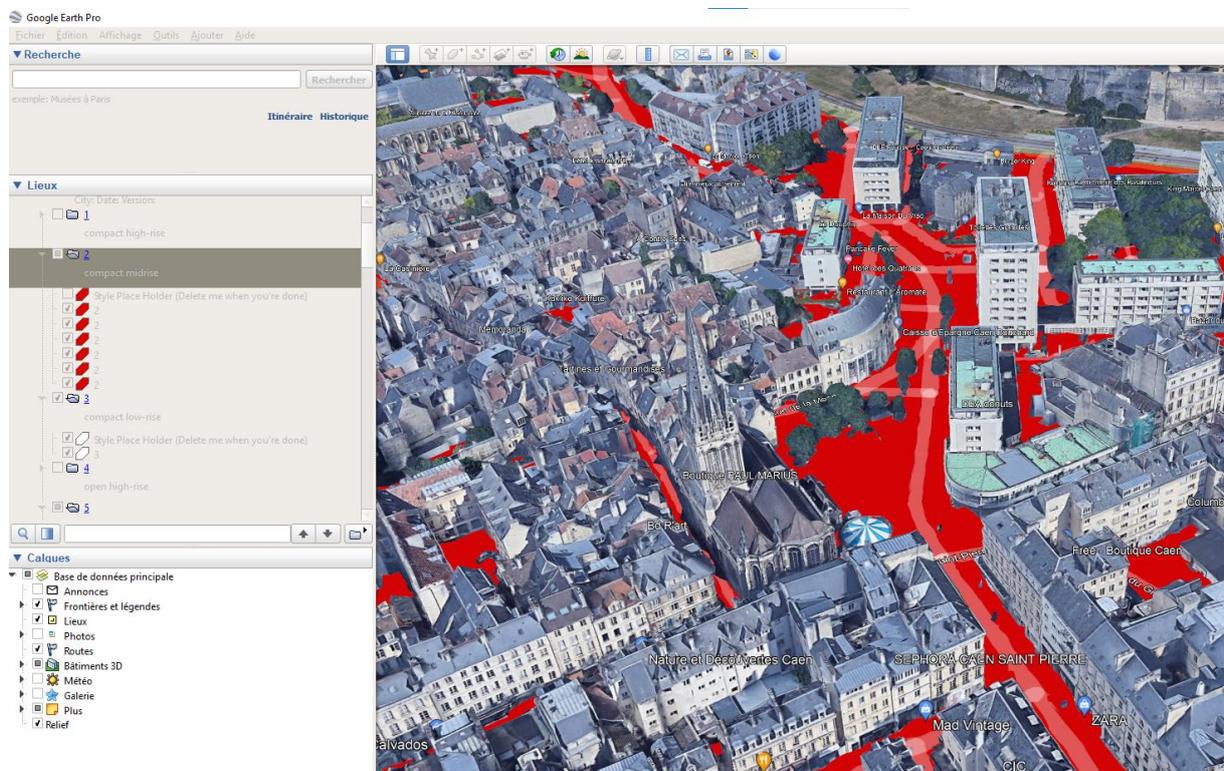


Figure 24 : Réalisation des LCZ à l'aide de l'outil de cartographie en trois dimensions de Google Earth Pro. Réalisation : Mathys Cenier.

5.1.3 Classification LCZ obtenue

Voici la carte (fig. 25) obtenue après modélisation de la ville de Caen. Cette carte est en libre accès sur le site LCZ-generator. Ce site regroupe la réalisation des cartographies LCZ. Plus de 200 villes dans le monde ont ainsi été cartographiées grâce à ce site.

Nous constatons que la ville de Caen est composée en son hypercentre d'une classification LCZ majoritairement de type 2. En s'éloignant du cœur de la ville, nous retrouvons une végétation un peu plus présente et des bâtiments avec quelques étages en moins, ce qui correspond à une classification comprise entre le LCZ 5 et le LCZ 6. Ensuite, plus en périphérie, la classe 8 et la classe 10 font leur apparition. Ceci témoigne de la présence de bâti de plus grande taille mais d'une hauteur plus faible. A ces deux classes, s'ajoute la classe 9 retrouvée plus en périphérie. Les classes dites « sans construction » apparaissent en s'éloignant. Cela correspond aux classes A et B, indiquant une végétation arborée. La ville de Caen est située dans la plaine, la classe D correspondant aux surfaces de culture, représente donc une grande surface en dehors de l'espace urbanisé.

La figure 25 permet de classer les sites des emplacements des stations météorologiques installées dans le cadre de notre étude.

Voici-ci la classification LCZ des sites d'installation :

- **Place Pierre Bouchard : LCZ 2** (Urbain dense avec un bâti de taille moyenne compris entre 2-5 étages)
- **Boulevard des Alliés : LCZ 2** (Urbain dense avec un bâti de taille moyenne compris entre 2-5 étages)
- **Pont Winston Churchill : LCZ 5 G** (Bâti moyennement haut, parsemé de végétation, avec la présence de la trame bleue)
- **Place de la Résistance : LCZ 5** (Bâti moyennement haut, parsemé de végétation)
- **Rue d'Edimbourg : LCZ 6** (Bâti de petite taille, parsemé de végétation)
- **Château de Caen : LCZ 6** (Bâti de petite taille, parsemé de végétation)
- **Jardin des Plantes : LCZ A** (Végétation haute et dense)
- **Boulevard du Petit Vallerent LCZ D** (Végétation très basse de type prairie ou culture)

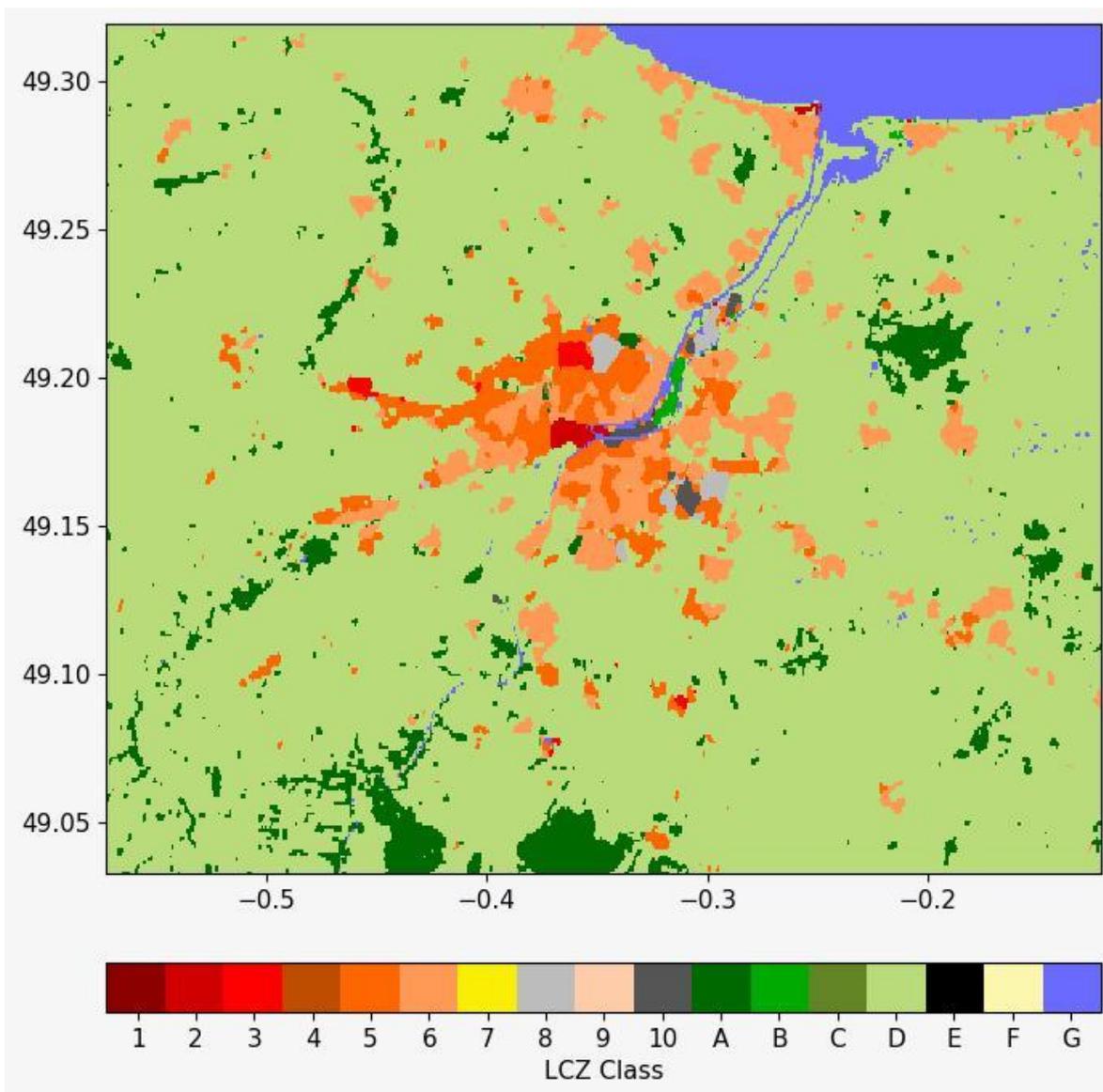


Figure 25 : Cartographie en LCZ de la ville de Caen et ses alentours. Réalisation : Mathys Cenier.

La figure 26 permet une visualisation plus rapprochée de l'occupation du sol de quelques stations. Ceci permet de mieux visualiser la répartition de l'occupation du sol. Les strates herbacées et arborées sont différenciées, ainsi que les surfaces goudronnées et les surfaces minérales claires. Nous pouvons voir le site du Pont Winston Churchill (fig. 26A), le site de la Place de la Résistance (fig. 26B) et enfin, celui de la place Bouchard (fig. 26C).

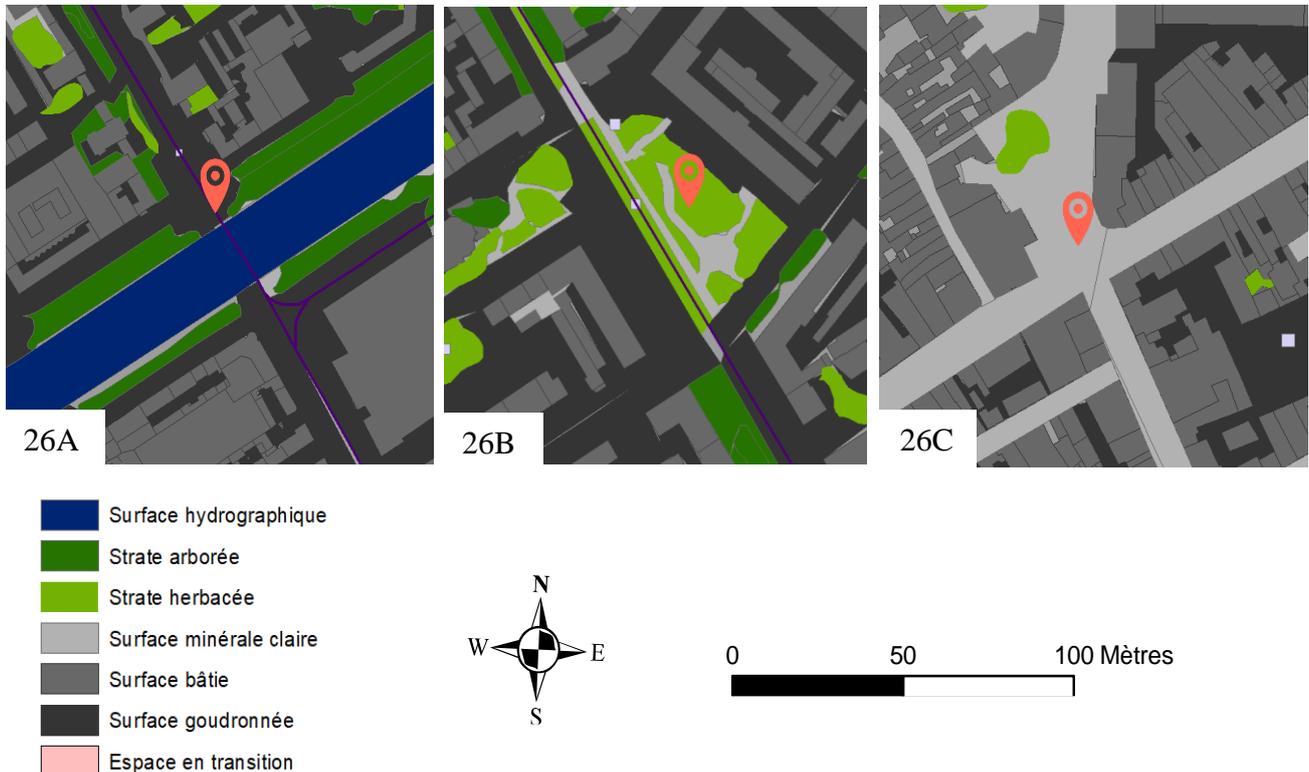


Figure 26 : Zoom sur l'occupation du sol de 3 sites accueillant une station METEOHELIX. 26A : Pont Winston Churchill. 26B : Place de la Résistance. 26C : Place Bouchard. Réalisation : Mathys Cenier.

5.1.4 Répartition de l'occupation du sol des sites d'implantation des stations

A l'aide du carroyage réalisé sur la densité des espaces végétalisés et des surfaces bâties nous avons pu obtenir la répartition de l'occupation du sol (fig. 27). Ainsi, pour l'ensemble des stations, nous pouvons connaître en pourcentage la part de surfaces bâties, végétalisées, et les surfaces minéralisées. Pour simplifier les choses, nous avons regroupé des éléments. En effet, la fraction représentant la surface de végétation comporte la strate herbacée et la strate arborée. Dans le cas des surfaces minéralisées, nous avons regroupé les surfaces imperméabilisées (goudron, pierre, ...).

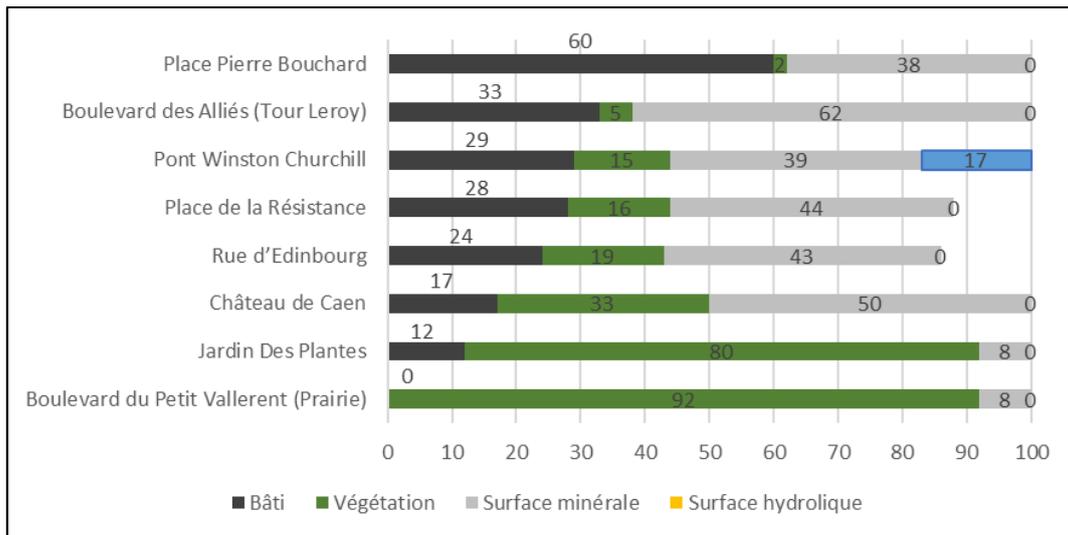


Figure 27 : Répartition de l'occupation des sites d'implantation des stations. Réalisation : Mathys Cenier.

5.1.5 Répartition de l'occupation du sol des sites supplémentaires proposés

Les sites retenus ont tous un profil similaire (fig. 28). En effet, cela permet une homogénéisation des milieux et donc des relevés. Les sites présentent donc des proportions de bâti (en moyenne 20%), surfaces minéralisées (en moyenne 60%) et végétalisées (en moyenne 20%) relativement identiques. Certains sites sont néanmoins beaucoup plus végétalisés. C'est notamment le cas de la Colline aux Oiseaux et du Coteau des Sablons, qui sont des sites présentant une occupation du sol quasiment entièrement végétale. Ces particularités vont potentiellement permettre de déceler des particularités thermiques de la ville.

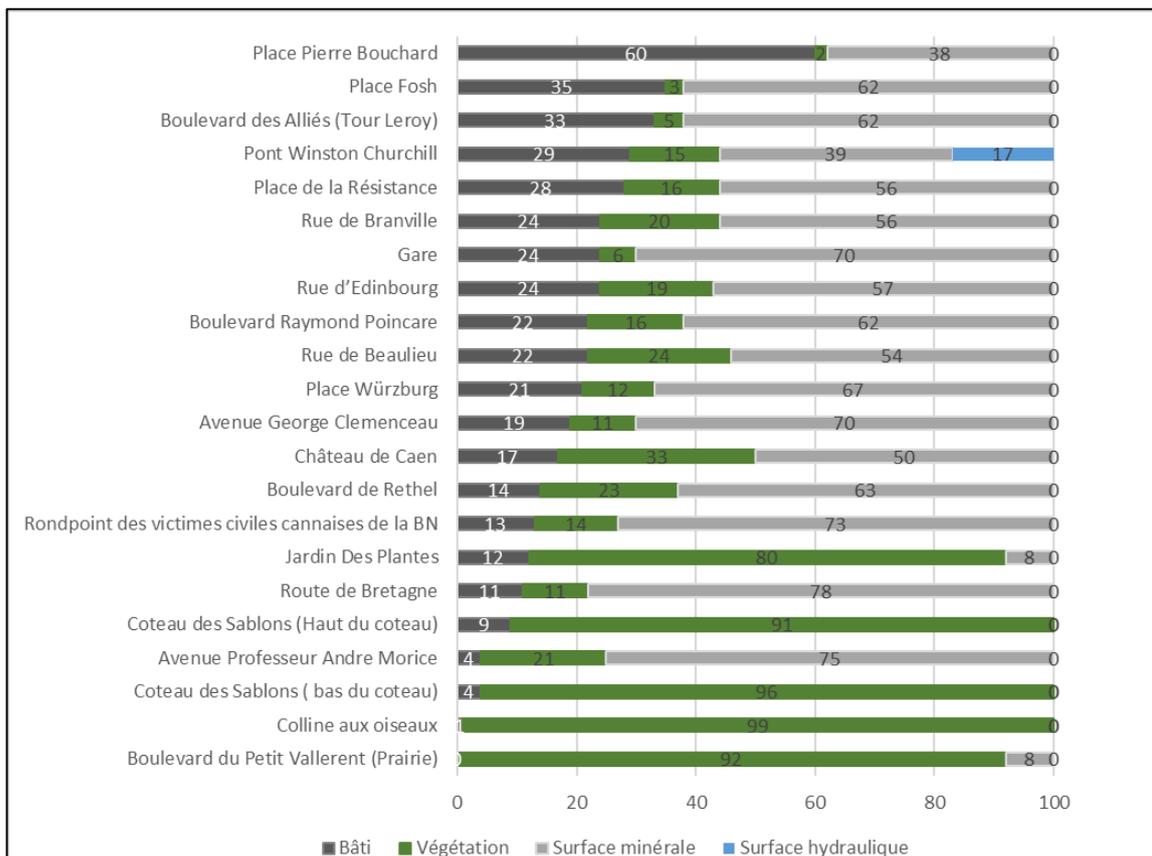


Figure 28 : Répartition de l'occupation des sites d'implantation des stations positionnées et des stations supplémentaires. Réalisation : Mathys Cenier.

5.2 Projet « MAPUCE »

Une modélisation de l'îlot de chaleur urbain de la ville de Caen a été effectuée grâce au projet « Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme » aussi appelé « MAPUCE ». Ce projet a été coordonné par le Centre National de Recherche en Météorologie (CNRM) à partir de 2014 et s'est terminé en 2018 (<https://www.umr-cnrm.fr>). Ce projet est une modélisation de l'ICU en vue d'orienter les pouvoirs publics dans l'aménagement des villes. L'objectif est d'augmenter la prise en compte du climat dans les décisions politiques. Le climat urbain n'étant, à l'heure actuelle, que trop peu pris en compte dans les documents juridiques. En effet, dans un contexte de changement climatique et d'augmentation des températures, il paraît nécessaire de faire des choix d'aménagements en s'adaptant à ces changements.

Cette étude a été réalisée en coordination avec 51 agences d'urbanismes françaises. Ce travail a été effectué à l'aide d'une multitude de professionnels provenant de plusieurs disciplines. Parmi eux, sont retrouvés des météorologues, des climatologues, des urbanistes, des géographes, des géomaticiens et des sociologues (<https://www.umr-cnrm.fr>).

Les résultats obtenus sont intéressants puisqu'ils permettent d'avoir en libre accès « des données quantitatives à partir de simulations numériques » (<https://www.umr-cnrm.fr>). Ce travail a été effectué sur quarante villes françaises dont l'agglomération de Caen. Ces simulations ont été réalisées à l'aide de données issues de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) et d'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) et également en se basant sur des données météorologiques. De plus, l'architecture et les matériaux de construction ont été pris en compte dans la modélisation. La morphologie des bâtiments a également été prise en compte dans le modèle, en s'appuyant sur la classification LCZ (Local Climate Zones). D'autres paramètres sont pris en compte dans la modélisation, nous ne les citerons pas tous. Ces données ont permis d'aboutir à une classification par mailles d'une ville.

Cette classification nous donne la localisation précise des espaces pouvant être touchés par une élévation des températures. En effet, il en ressort une typologie de la ville. Les quartiers sont classés selon leur vulnérabilité face à l'îlot de chaleur par type de temps. C'est donc un outil important permettant de mieux appréhender ce phénomène et de localiser les microclimats urbains.

Les cartes des figures 29 et 30 sont issues des modélisations de ce projet. Nous avons pu récupérer ces données en libre accès sur le site pour ensuite en proposer une cartographie de la ville de Caen. Deux modèles atmosphériques ont été utilisés pour cette étude, le premier se nomme MesoNH et le second TEB. Les mailles ont une résolution de 250 mètres soit 6,25 hectares de superficie. Les deux cartes représentent deux types de temps estivaux retrouvés durant les étés de 2004 (été 1) et de 2005 (été 2). Les données sont issues du projet MAPUCE. Nous avons présenté sous forme de carte l'intensité de l'îlot de chaleur caennais. Les écarts de températures présents sur la carte sont le résultat de la différence entre une simulation des

températures avec la présence de bâti et sans. Ainsi, les figures ci-dessous représentent les écarts de températures observés, causés par la présence de l'ICU au sein de la ville de Caen.

La première carte (fig. 29) est une modélisation de l'intensité de l'îlot de chaleur lors d'une situation favorable en 2004 (soirée favorable au phénomène d'îlot de chaleur). Ce jour-là, les vents sont orientés en direction du sud-est. L'îlot de chaleur est relativement intense avec des écarts de températures modélisés atteignant deux à trois degrés sur une grande partie de sud de Caen, le centre-ville et la partie haute de la ville. L'îlot de chaleur est maximal dans le centre-ville. En effet, les dix mailles ayant les plus grands écarts de températures sont situées dans l'hyper centre de Caen. La maille ayant l'écart maximal est située entre la Place Pierre-Bouchard et la Rue aux Fromages. Celle-ci présente une différence de températures proche de trois degrés.

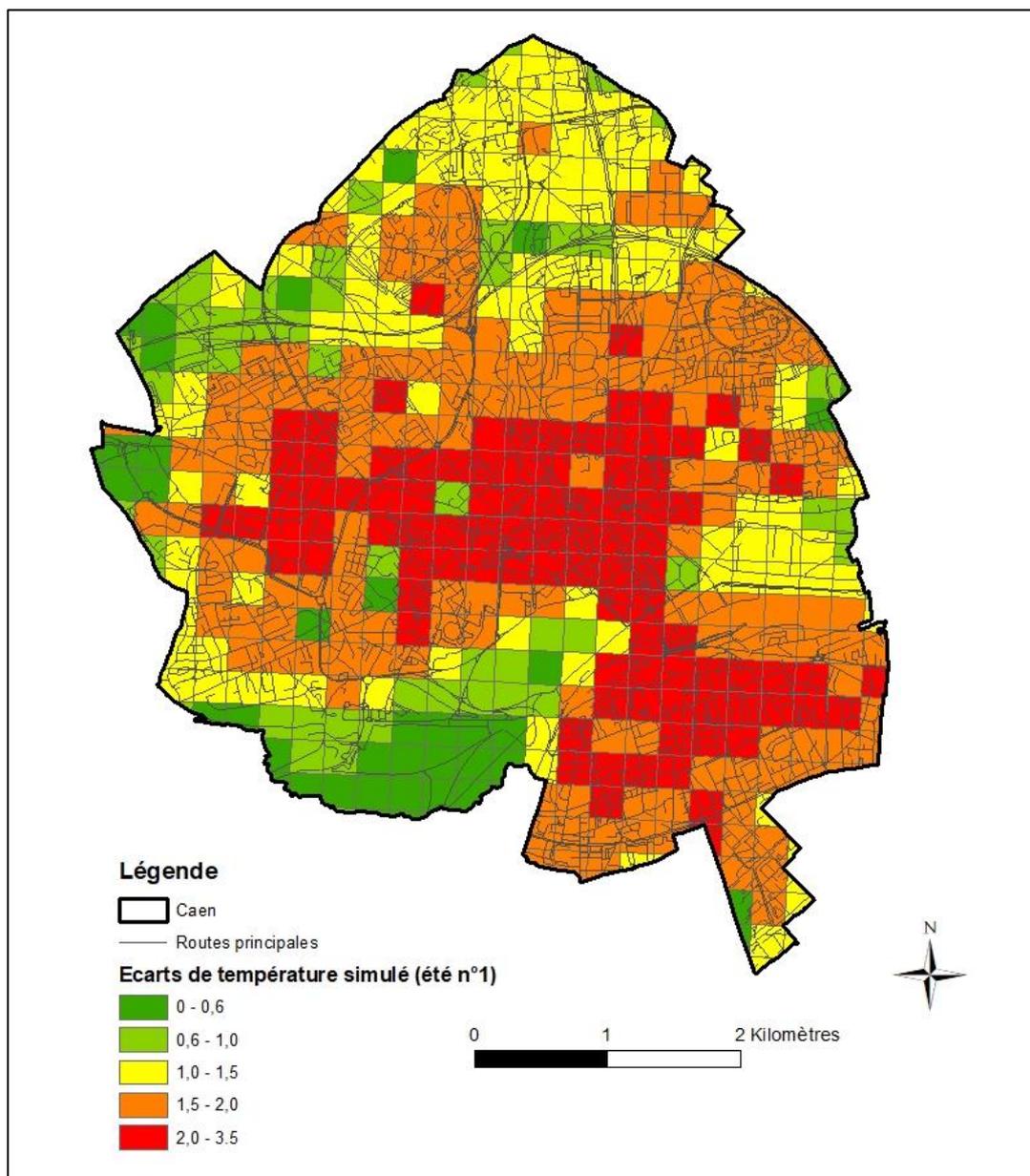


Figure 29 : Effet de l'urbanisation sur la température nocturne pendant une situation estivale (été 1) propice à un fort ICU sur la ville de Caen. Source : Données-DICU-Mapuce. Réalisation : Mathys Cenier, 2022.

La seconde carte (fig. 30) modélise l'intensité de l'îlot de chaleur sur la ville de Caen lors de l'été 2005. Lors de cette situation favorable les vents sont faibles dans le secteur ouest. Cette orientation modifie la répartition de l'îlot de chaleur plus à l'est. En effet, le vent d'ouest a légèrement gommé l'îlot de chaleur à l'ouest. L'ICU maximal est toujours situé dans l'hyper centre. Seule une maille se distingue des autres, elle est située sur la partie sud de la ville. La maille détenant le plus grand écart de températures reste la même (entre Place Pierre-Bouchard et la Rue aux Fromages). Cet écart maximal est de 2.8°C.

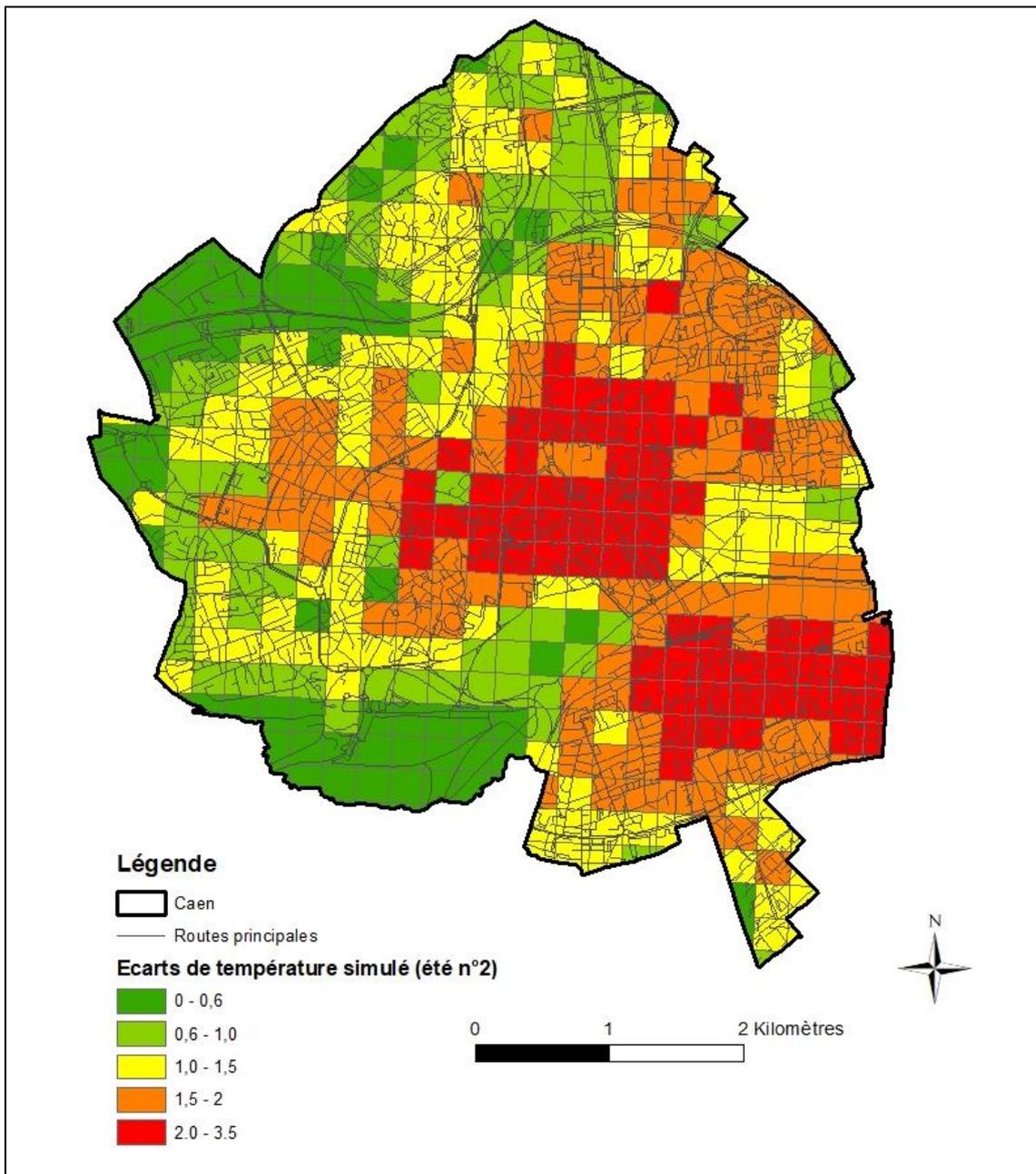


Figure 30 : Effet de l'urbanisation sur la température nocturne pendant une situation estivale (été 2) propice à un fort ICU sur la ville de Caen. Source : Données-DICU-Mapuce. Réalisation : Mathys Cenier, 2022.

La figure 31 permet de zoomer sur les 10 mailles avec les écarts de températures les plus importants. Nous voyons que la modélisation montre très clairement la présence d'un îlot de chaleur nocturne dans la ville de Caen. L'intensité de l'îlot de chaleur atteint les 3°C au maximum. Nous pouvons remarquer que même des vents de faible intensité ont la capacité de modifier l'ICU et de le déplacer. Cet ICU semble cependant se concentrer dans le centre-ville de Caen et dans la partie sud de la ville. Ainsi, une corrélation est alors facilement réalisable entre la densité de bâti et les résultats de la modélisation.



Figure 31 : Zoom sur les 10 mailles avec les écarts de températures les plus importants. Réalisation : Mathys Cenier.

La modélisation de l'ICU présente néanmoins certaines limites. En effet, les modélisations sont complexes et doivent prendre en compte de nombreux paramètres. Certains d'entre eux sont difficiles à prendre en compte dans la modélisation notamment les ombres des bâtiments ou la présence de végétaux. Les images satellites ne représentent pas avec exactitude les conditions réelles du terrain. Cette approche de l'îlot de chaleur, doit, selon moi, constituer simplement une aide à la compréhension de l'îlot de chaleur.

Nous allons par la suite pouvoir vérifier si les écarts de températures estimés par les modèles sont similaires à ceux enregistrés par nos stations météorologiques.

Conclusion de la partie V

La modélisation permet de développer les connaissances des dynamiques de l'ICU sur la ville de Caen. La classification LCZ de la ville est une méthode d'analyse qui permet de mettre en avant les espaces qui pourraient potentiellement être sujets à l'îlot de chaleur.

Le projet MAPUCE, qui a été réalisé sur différentes villes dont Caen, offre une spatialisation des espaces les plus touchés. Cette modélisation s'appuie sur des variables que nous avons étudiées précédemment comme l'occupation du sol, l'altitude ou encore la présence de surfaces en eaux.

Les résultats obtenus grâce à cette modélisation sont cartographiés par maille de 500 mètres de résolution. Les valeurs obtenues permettent de mettre en avant la présence évidente d'un îlot de chaleur se concentrant dans le centre-ville de Caen ainsi que dans la partie sud de la ville.

Nous allons désormais analyser les résultats des relevés météorologiques. Par la suite, les données théoriques de la modélisation seront comparées aux données réellement mesurées. Ceci permettra d'évaluer si la modélisation réalisée est fiable.

Partie VI : Analyse et interprétation des résultats obtenus

6.1 Analyse générale

Dans un premier temps, nous allons analyser les résultats obtenus par la station Vantage Pro 2 positionnée à proximité de l'Université. Cette station comporte des caractéristiques qui lui sont propres. En effet, cette station est placée dans un jardin privé, nous n'avons donc pas eu besoin de sécuriser la station. Par conséquent, les relevés de températures ne s'effectuent non pas à trois mètres de haut comme les stations METEOHELIX mais à deux mètres. De légères variations de températures et d'humidité peuvent donc être présentes entre les deux. C'est la raison pour laquelle nous n'allons pas comparer ces données aux stations autonomes. Cette station a été installée le 28 janvier 2022. Nous avons donc recueilli les données sur un peu plus de six mois, du 29 janvier au 2 juin 2022.

Les données issues de cette station seront comparées à celles issues de la station Météo-France de Caen-Carpique. Nous avons fait ce choix car les données récoltées par ses stations sont similaires. Nous pourrions ainsi comparer différents paramètres concernant les conditions météorologiques de la ville de Caen et celle de Carpiquet.

Tout d'abord, nous allons réaliser l'analyse de l'élément qui caractérise l'îlot de chaleur urbain : la température. Nous disposons de données horaires pour les deux stations météorologiques. Nous comparons les températures de ces deux stations en calculant la différence de températures aux mêmes heures, soit sur 2990 relevés. Une fois, les écarts obtenus, une moyenne horaire de ces écarts est calculée. Les écarts sont représentés sur la figure 32.

Ce graphique met en avant deux éléments importants. Premièrement, les températures mesurées sont plus élevées dans le jardin situé dans le centre-ville par rapport à la station de Caen-Carpique. Rappelons, que la station Météo-France de Caen-Carpique est située dans un environnement végétalisé et complètement dégagé. La seconde chose importante à relever est le cycle de l'îlot de chaleur. En effet, cet îlot de chaleur varie selon l'heure de la journée. La cyclicité prouve que cette chaleur n'est pas provoquée par des paramètres autres que l'occupation du sol et les activités de l'Homme. Si d'autres paramètres influaient sur la formation de l'îlot de chaleur, nous n'observerions certainement pas de cyclicité.

En nous appuyant sur les données mesurées par cette première station, nous pouvons mettre en évidence une élévation des températures d'origine anthropique sur la commune de Caen. Les écarts de températures sont assez constants durant la journée avec une température à Caen-ville supérieure en moyenne de 0,5°C. C'est en fin de journée que ces écarts se creusent. Ainsi, l'écart de température est maximale aux environs de 21h sur la période étudiée. Elle est en moyenne de 1,5°C à cette heure-là. Cet écart se réduit dans la nuit au fur et à mesure que les matériaux libèrent la chaleur accumulée.

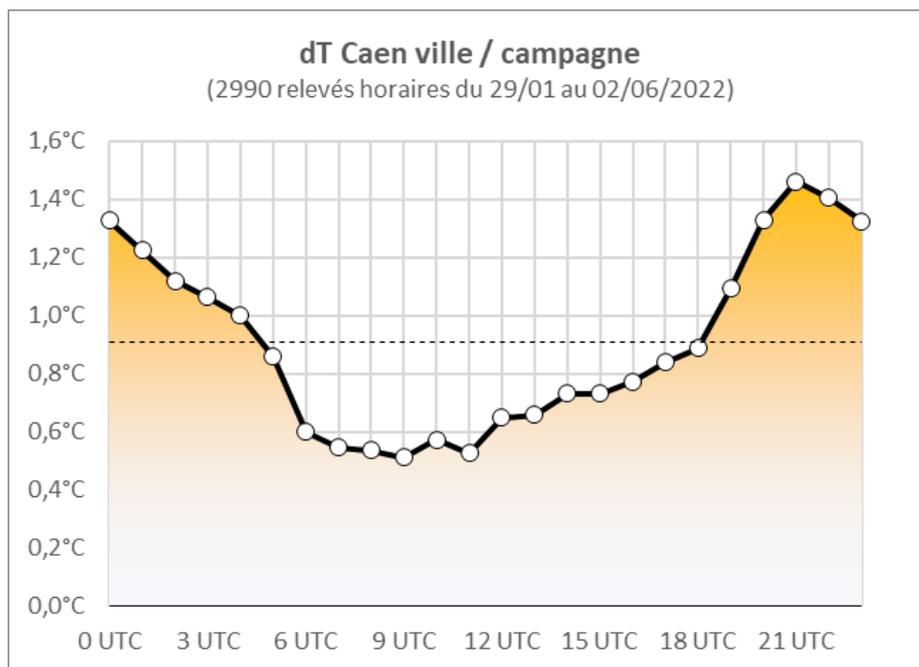


Figure 32 : Écarts de températures observés entre la station de Caen-Carpiquet et la station Vantage Pro 2. En abscisse, nous retrouvons les heures UTC (Temps Universel Coordonné). En ordonnée, les écarts de températures en °C. Réalisation : Mathys Cenier.

6.1.1 Décalage saisonnier de l'heure d'intensité maximale de l'îlot de chaleur

Nous allons maintenant comparer l'évolution de ces écarts de températures mois par mois. En effet, en étudiant les écarts de températures mois par mois, nous nous rendons mieux compte de l'évolution du décalage du pic de l'ICU (fig. 33). Ce pic correspond à l'écart de températures maximal observé entre les deux stations.

Tout d'abord, l'intensité de l'ICU augmente à l'approche du solstice d'été. L'énergie solaire reçue étant de plus en plus forte, l'intensité de l'îlot de chaleur augmente par la même occasion. Les valeurs de L'ICU sont faibles durant le mois de février, avec en moyenne un ICU maximal de 1,0°C par rapport à la station de Caen-Carpiquet. Cet ICU maximal s'intensifie au fur et à mesure des mois. Ainsi, celui-ci passe de 1,5°C au mois de mars à 1,6°C au mois d'avril, et dépasse même les 2,0°C pour le mois de mai. Nous pouvons mettre en évidence l'augmentation de l'intensité des écarts sans même prendre en compte les types de temps observés.

L'ICU évolue lors de l'augmentation de la durée des jours. En effet, l'ICU maximal se produit de plus en plus tardivement. C'est un élément important qui prouve que la restitution de la chaleur s'effectue après le crépuscule. Par conséquent, l'intensité maximale est atteinte à 18 heures au mois de février contre 22 à 23 heures au mois de mai.

Nous remarquons un élément intéressant durant le mois de février. Durant les heures les plus froides (matin), les écarts de températures sont quasiment nuls avant le lever du soleil. En effet, les températures observées ont parfois été très proches, voire inférieures à Caen-ville

durant les matinées où le ciel était dégagé. Ces données confirment les données obtenues durant l'hiver 2018/2019 (Cantat & Follin, 2020).

Exceptée cette particularité, le régime en lui-même reste relativement semblable durant les mois de mesures. Il est à noter que ces données sont une moyenne pour chaque mois sans prendre en compte les types de temps. Ces résultats constituent donc une première approche permettant d'indiquer le régime de l'ICU.

Nous allons, par la suite, étudier de façon plus précise cet îlot grâce aux stations MeteoHelix.

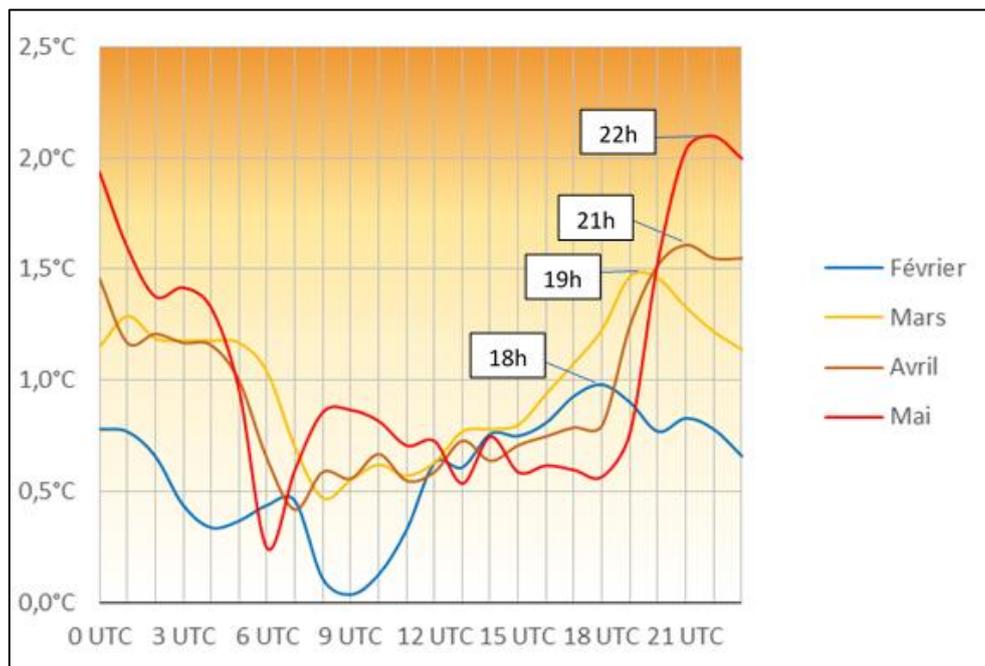


Figure 33 : Evolution de l'ICU au fil des mois entre la station de Caen-Carpiquet et la station Vantage Pro 2. En abscisse, nous retrouvons les heures UTC (Temps Universel Coordonné). En ordonnée, les écarts de températures en °C. Réalisation : Mathys Cenier.

6.1.2 Etat des lieux

Rappelons que nous disposons de sept stations MeteoHelix positionnées à différents endroits de la ville de Caen. Les sept sites sont les suivants : Le Jardin des Plantes, le Château de Caen, le Boulevard des Alliés (appelé « Tour Leroy »), la Place de la Résistance, le Pont Winston Churchill, la Place Pierre-Boucharde, et enfin le Boulevard du Petit Vallerent (appelé la « Prairie »). Ces sites offrent une diversité de conditions qui va nous permettre de compléter les premières données issues de la station Vantage Pro 2. Ces stations ont été installées le 9 avril 2022. Nous traiterons donc les données sur la période s'étalant du 10 avril jusqu'au 30 mai 2022.

Le traitement des données est réalisé en comparant uniquement les données des stations MeteoHelix entre elles. En effet, dans un souci de rigueur, il est pertinent de ne pas comparer ces données à la station de Caen-Carpiquet et à celle située dans le jardin à proximité de

l'Université. Ces stations n'étant pas placées à trois mètres de hauteur. La station de référence ne sera donc pas la station de Carpiquet.

Nous avons donc pris la décision d'utiliser la station située à la Prairie comme station de référence. Cette station comporte tous les éléments nécessaires pour faire d'elle une référence hors urbanisation du secteur de Caen. En effet, elle est située proche du centre-ville (contrairement à Carpiquet) mais dans un environnement dégagé, plan et couvert d'une végétation basse (herbe). Néanmoins, les données issues de la station Vantage Pro 2 sont utilisées afin de nous renseigner sur le vent et les précipitations. Ces valeurs sont considérées comme fiables, compte tenu de la taille de la zone d'étude.

Les données horaires obtenues sur la période du 10 avril au 30 mai permettent d'obtenir une première approche des particularités thermiques du centre-ville de Caen (fig. 34). Tout d'abord, nous pouvons remarquer des différences au niveau de la température moyenne observée entre les stations. La température moyenne sur cette période se situe entre 13,3°C à la Prairie et plus de 14,2°C pour le site de la Place Pierre-Bouchard. Les espaces verts semblent présenter les températures les plus basses avec un gradient thermique fluctuant selon la proportion de surface minéralisée. Le même constat est fait pour les températures maximales et minimales enregistrées. En effet, par exemple, il a gelé uniquement sur deux stations, celle du Jardin des Plantes et celle de la Prairie. Les autres stations n'ont pas connu de températures négatives durant cette période. A l'inverse, les températures maximales relevées ont quant-à-elles été enregistrées dans le centre-ville, soit à la station de la Tour Leroy et celle de la Place-Pierre Bouchard.

Station	JDP	P.P.Bouchard	Château	Tour Leroy	P.Résistance	Pont.W.Churchil	Prairie (Ref)
Moyenne	13,5	14,21	13,63	14,13	13,86	13,87	13,33
T°C Min	-0,95	1,3	0,43	1,35	0,92	0,5	-1,33
T°C Max	28,75	29,4	28,7	29,68	28,85	28,95	28,43

Figure 34 : Températures mesurées pour les stations METEOHELIX. Le dégradé de couleurs représente les températures les plus froides (en bleu) et celles les plus chaudes (en rouge). Réalisation : Mathys Cenier.

Ces premières informations permettent de visualiser quelles stations ont enregistré des valeurs plus importantes mais elles ne donnent aucune information sur la cyclicité et l'intensité de l'élévation des températures. C'est la raison pour laquelle nous devons étudier les températures heure par heure.

6.2 Discussion des résultats sous forme de données horaires

Les données horaires facilitent le traitement des données lorsque l'on étudie des périodes relativement longues. Pour ce faire, la température moyenne pour chaque heure est calculée. Les stations MeteoHelix enregistrent des données toutes les dix minutes, soit six relevés par heure. Nous avons donc réalisé sur Excel une moyenne de ces données afin d'obtenir des données horaires pour chacune des stations. Ces données sont essentielles afin d'étudier en détail les particularités de l'îlot de chaleur urbain caennais.

La figure 35 représente, pour chacune des stations, les moyennes de températures obtenues pour chaque heure. Cette représentation permet d'avoir une autre approche des écarts de températures. En effet, le graphique met en exergue le fait que les écarts de températures sont plus importants en début de soirée jusqu'en fin de nuit.

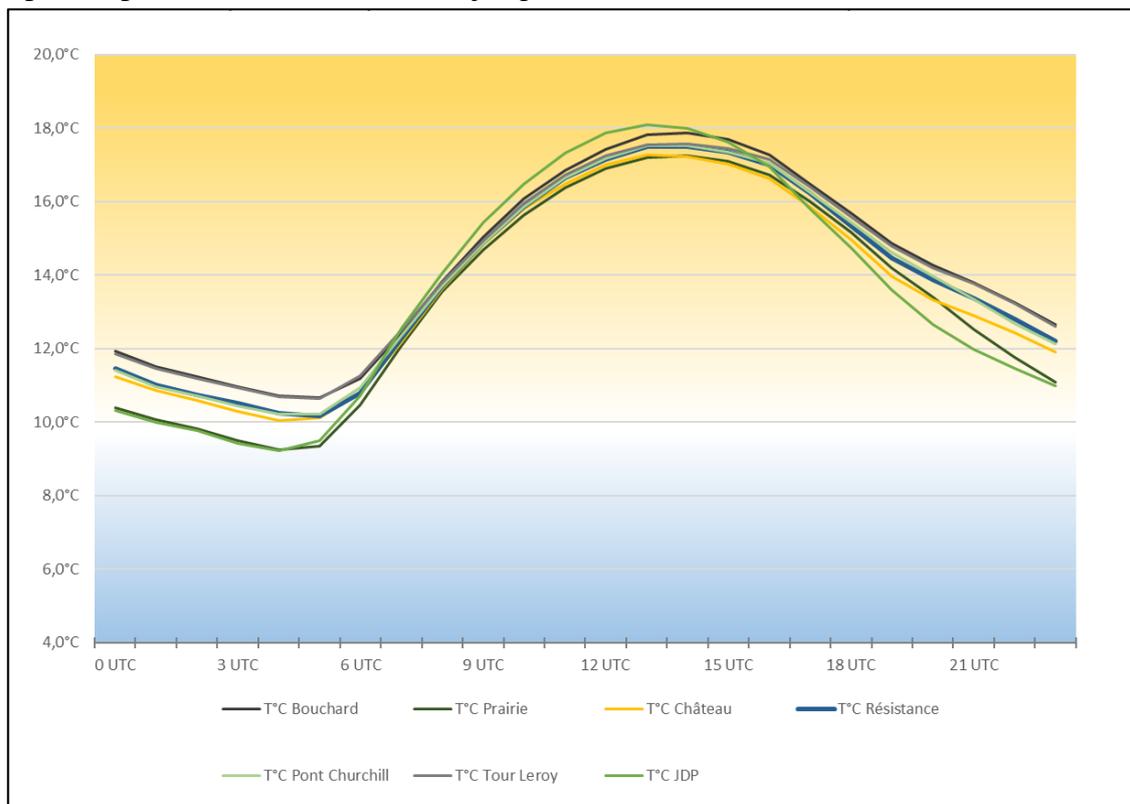


Figure 35 : Température moyenne des différentes stations METEOHELIX. En abscisse, nous retrouvons les heures UTC (Temps Universel Coordonné). En ordonnée, la température en °C. Réalisation : Mathys Cenier.

Les écarts de températures restent relativement difficiles à lire sur ce type de graphique (fig. 34). C'est pourquoi, est calculée la différence de températures de chaque relevé avec la station de la Prairie, qui est rappelons-le, la station de référence pour cette étude. Nous allons donc comparer la moyenne des données horaires des différentes stations à la station de référence (Prairie).

La figure 36 montre les écarts de températures des différentes stations positionnées. Nous remarquons de nombreux éléments intéressants.

En premier lieu, nous remarquons des écarts importants sur les stations situées dans le cœur de la ville. Parmi ces stations, celle située sur la Place Pierre-Bouchard et la station de la Tour Leroy se démarquent des autres de par l'intensité de l'ICU relevé sur ces stations. En effet, les écarts de températures sont importants après le coucher du soleil avec des valeurs dépassant les 1,5°C sur cette période. De plus, ces mêmes stations gardent des températures élevées pendant plus longtemps durant la nuit. Durant la journée, seule la station située sur la Place Bouchard enregistre des différences significatives. Ces écarts sont supérieurs à 0,6°C durant l'après-midi, ceci met donc en avant un échauffement localisé sur ce site. Le site de la Tour

Leroy, quant à lui, enregistre de faibles écarts durant la journée avec seulement 0,3°C de différence mesuré au cours de l'après-midi.

Deux stations détiennent des écarts similaires : la station du Pont Winston Churchill et celle de la Place de la Résistance. Les écarts maximaux sont un peu moins importants que les deux stations évoquées précédemment. Ils sont situés aux alentours d'un degré environ. La journée, les écarts moyens de ces deux stations s'amoindrissent et se stabilisent autour de 0,2°C.

Ensuite, la station positionnée au Château est aussi sujette à une élévation des températures mais dans une moindre mesure. L'îlot de chaleur atteint au maximum une valeur proche de 0,8°C. Durant la journée, les écarts de températures sont négatifs. En effet, la station du Château présente des températures plus faibles que celle de la Prairie (jusqu'à 0,5°C de moins au Château qu'à la Prairie). C'est la seule station qui enregistre des écarts négatifs en pleine journée.

Ensuite, la station située au Jardin des Plantes dispose d'un régime particulier. Les températures sont inférieures à la station de référence lors du coucher du soleil. En effet, l'îlot de fraîcheur urbain atteint plus de 0,8°C en fin de journée. Ces écarts s'amoindrissent au lever du jour, jusqu'à ce que les températures du Jardin soient supérieures à la Prairie en journée. Les écarts enregistrés au zénith sont en moyenne d'un degré lorsque le soleil est le plus puissant.

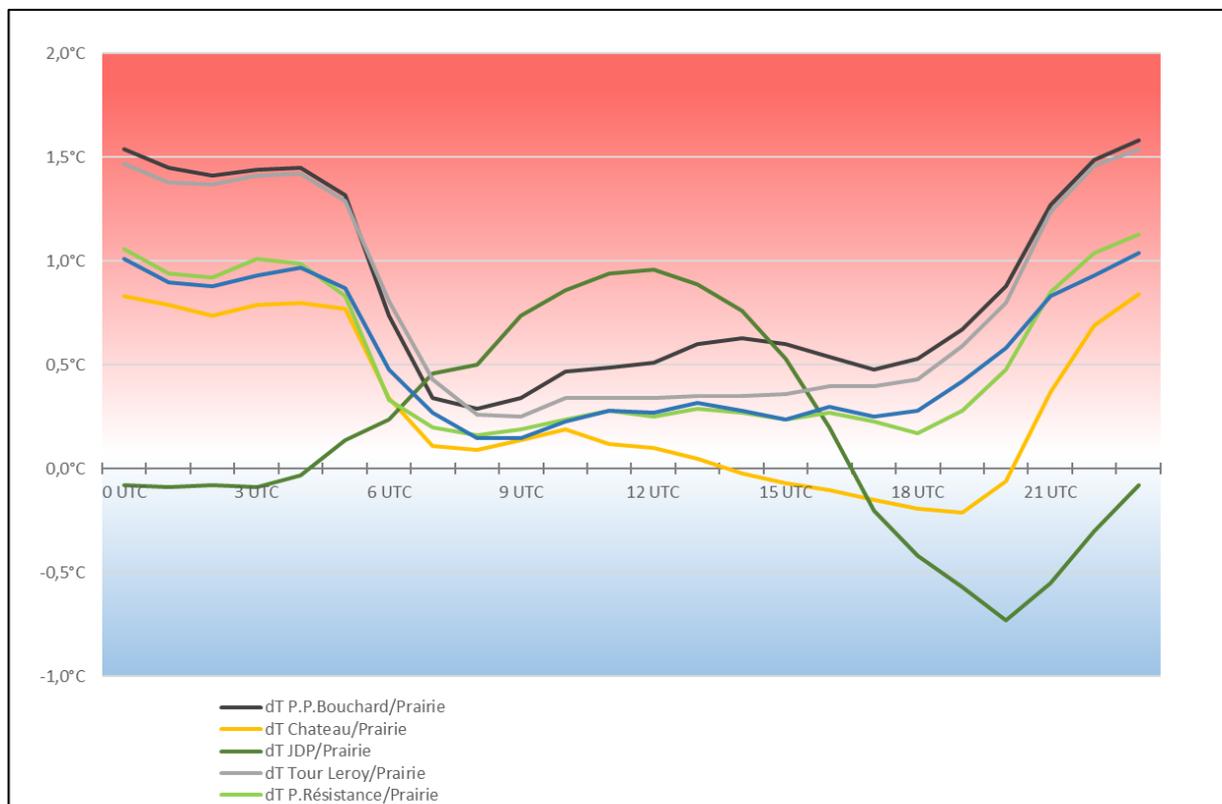


Figure 36 : Différence de températures entre les stations METEOHELIX et la station de référence située à la Prairie. En abscisse, nous retrouvons les heures UTC (Temps Universel Coordonné). En ordonnée, les écarts de températures en °C. Réalisation : Mathys Cenier.

6.2.1 Fréquence des écarts de températures sur nos relevés

Le graphique (fig. 37), sous forme de barres empilées permet de se rendre compte de la fréquence des écarts de températures. Grâce à celui-ci, nous pouvons voir la répartition en pourcentage des ICU et des IFU pour chacune des stations. Ainsi, nous remarquons que pour les stations situées au cœur de la ville, (Place Pierre Bouchard, Tour Leroy, Place de la Résistance) les écarts de températures sur cette période sont compris entre 0°C et 1°C la majeure partie du temps. Par ailleurs, dans le cas des stations de la Place Bouchard et de la Tour Leroy, nous avons relevé un ICU supérieur à 2°C dans plus de 10% des cas. Sur ces mêmes stations, les températures n'ont que très rarement été inférieures à celles relevées à la Prairie. A l'inverse, les stations du Château et du Jardin des Plantes ont enregistré une répartition quasi égale entre les températures supérieures et inférieures à celles de la station de référence. Il est à noter que le Jardin des Plantes est le seul site à avoir enregistré un IFU d'une intensité supérieure à -1°C.

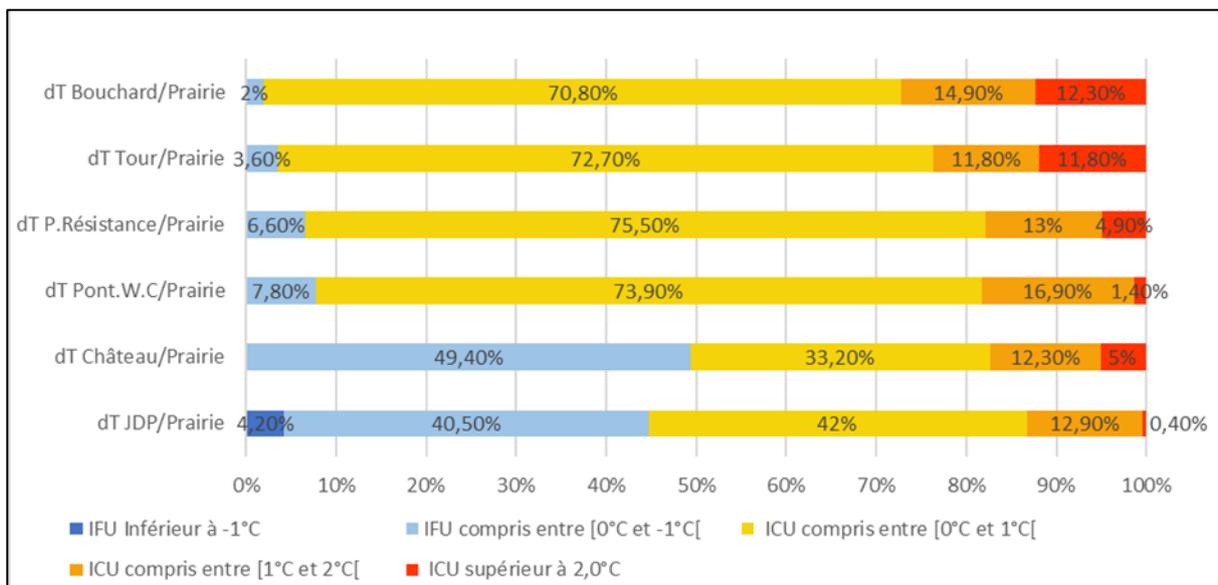


Figure 37 : Fréquence des écarts observés par les stations METEOHELIX en comparaison à la station de référence située à la Prairie. Réalisation : Mathys Cenier.

6.3 Zoom sur une période à fort ICU

6.3.1 Ecart obtenus

Après avoir analysé les écarts de températures ainsi que leurs fréquences, nous allons nous appuyer sur l'exemple de quelques jours où l'intensité de l'ICU a été importante. La figure 38 présente les relevés sur une durée de quatre jours consécutifs.

Nous constatons que les écarts les plus importants sont observés lorsque le soleil se couche jusqu'au lever du soleil. Nous retrouvons tous les soirs des différences similaires entre les stations. Nous pouvons classer les stations en fonction de l'ICU. En effet, sur chaque station,

l'intensité de l'ICU est relativement constante. Dans l'ordre du plus fort au plus faible ICU en prenant la station de la Prairie comme référence, nous retrouvons la Place Pierre-Bouchard et la Tour Leroy, suivie par le Château et la Place de la Résistance, enfin le Pont Winston Churchill. Le Jardin des Plantes est particulier puisque les données qui y sont relevées sont relativement proches de celles de la Prairie. Nous étudierons plus en détail les écarts observés sur cette station plus tard.

L'intensité de l'îlot de chaleur retrouvé graduellement sur les stations est principalement liée à l'occupation du sol. La proportion de surfaces imperméables et la densité du bâti se retrouvent sur les températures observées. Le centre-ville est particulièrement dense, d'où un ICU important, dépassant les 3°C. Les autres stations dites mixtes sont moins touchées avec des écarts situés autour de 2°C. La station située à proximité de l'Orne comporte un écart de températures situé aux alentours de 1,5°C.

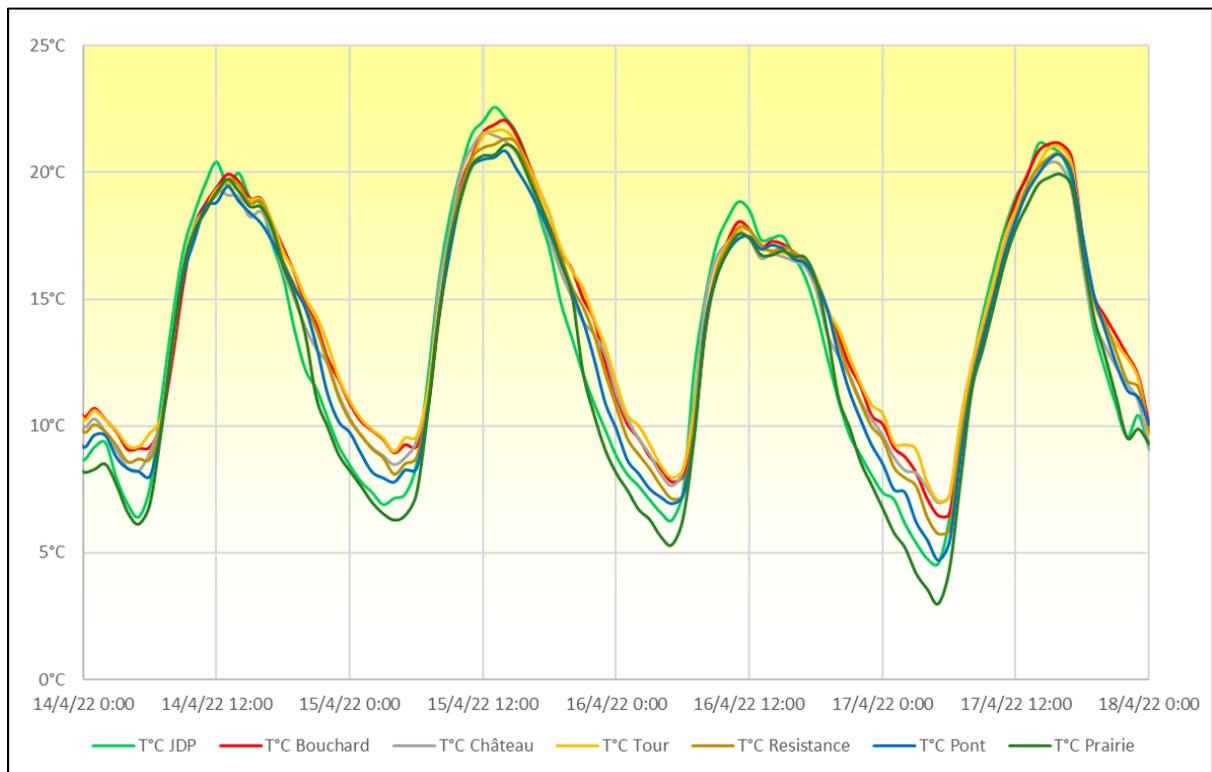


Figure 38 : Evolution des températures sur les stations METEOHELIX. En abscisse, nous retrouvons les jours. En ordonnée, la température en °C. Réalisation : Mathys Cenier.

La figure 39 représente les températures relevées au lever du soleil, la journée du 17/04/2022. Les températures les plus élevées se situent dans les espaces les plus anthropisés. Ces résultats sont donc en cohérence avec ce qui a été dit précédemment.

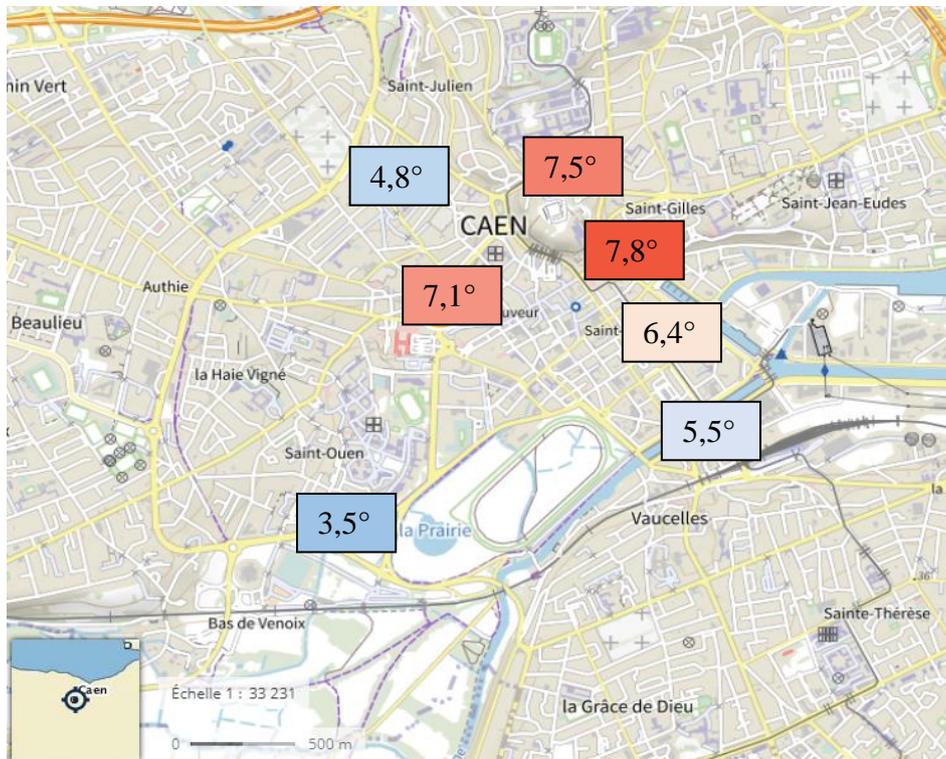


Figure 39 : Températures relevées (en °C) au lever du soleil, la journée du 17/04/2022.
Réalisation : Mathys Cenier.

6.4 Etude de l'îlot de chaleur caennais par type de temps

Nous avons vu que l'occupation du sol n'était pas le seul élément déterminant dans la formation d'un îlot de chaleur. Effectivement, il faut des conditions météorologiques favorables pour que celui-ci se forme. De plus, les conditions participent également à son intensité. C'est ce que nous allons tenter de démontrer en étudiant différentes configurations météorologiques. Dans un premier temps, nous verrons les conséquences du vent, puis l'impact de la couverture nuageuse. Enfin, nous finirons par étudier les températures sous un temps perturbé.

Pour ce faire, nous nous appuyons sur les températures relevées par la station MeteoHelix située sur la Place Pierre-Bouchard. Nous avons vu précédemment que cette station a enregistré les écarts de températures les plus élevés. Par conséquent, nous étudierons les écarts relevés entre la Place Pierre-Bouchard et la station de référence de la Prairie. Nous verrons quelle est l'importance des types de temps dans l'intensité de l'îlot de chaleur. Afin de justifier les types de temps, nous nous fondons sur les données enregistrées par la station Vintage Pro 2 ainsi que les archives de la station de Caen-Carpique.

6.4.1 Le vent

Selon Vigneau, « L'impact des grandes agglomérations se lit sur le bilan thermique, la stratification des basses couches et la circulation aux échelles fines » (Vigneau, 2005). Ce phénomène météorologique est donc à considérer comme un élément important dans l'étude de l'ICU. Le vent est moins important en ville, de par la présence du bâti qui fait diminuer son intensité. Néanmoins, les villes n'échappent pas au vent et donc à ce « ventilateur naturel ». En effet, le vent brasse l'air et empêche la formation d'écarts de températures. Caen étant une ville régulièrement soumise au vent et ouverte il paraît important d'étudier son impact sur l'ICU.

Nous allons comparer deux configurations météorologiques similaires avec pour seul élément de différence le vent. Nous étudions deux journées du mois d'avril. La première journée est considérée comme la période témoin, elle se déroule du 14 au 15 avril. La seconde période date du 29 au 30 avril. Durant ces deux périodes, les conditions sont anticycloniques, c'est-à-dire avec une pression atmosphérique élevée comprise entre 1025 et 1029 hPa. Ces hautes pressions sont de manière générale synonymes d'un temps clair. C'est d'ailleurs, un temps complètement dégagé qui est retrouvé sur ces deux dates. Le graphique (fig. 40) prouve que l'intensité solaire est similaire sur les deux périodes. De plus, les deux journées étudiées étant proches, l'intensité solaire n'a que très peu évoluée. Enfin, nous avons veillé à étudier deux journées présentant une absence de nuage bas formé durant la nuit.

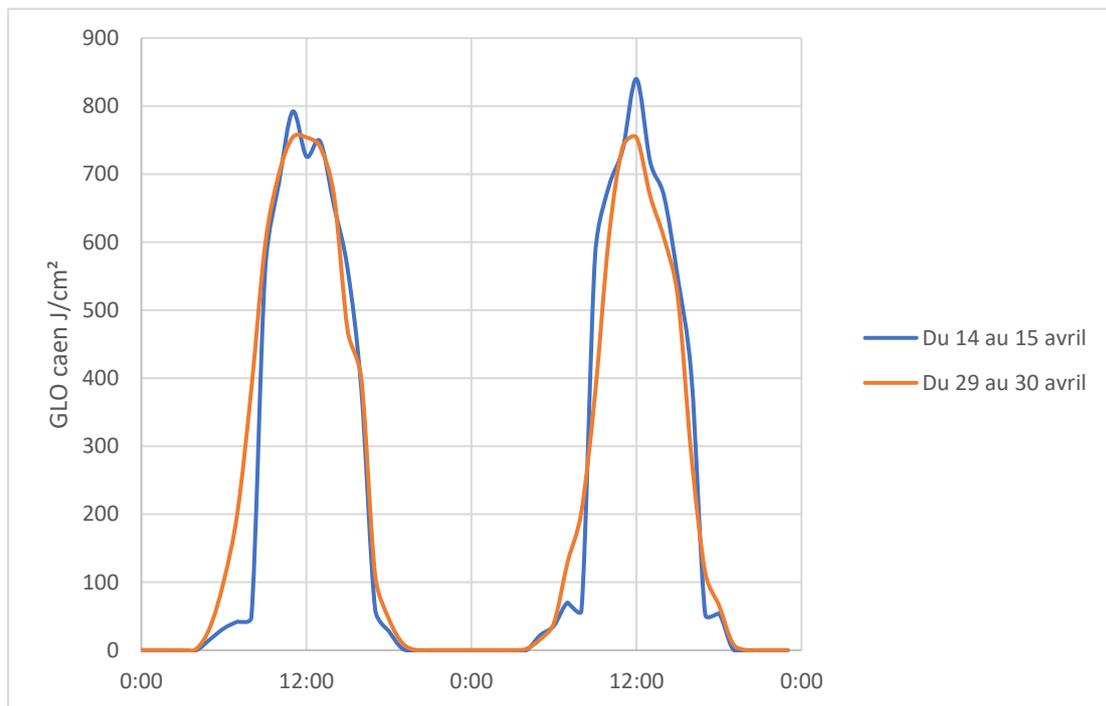
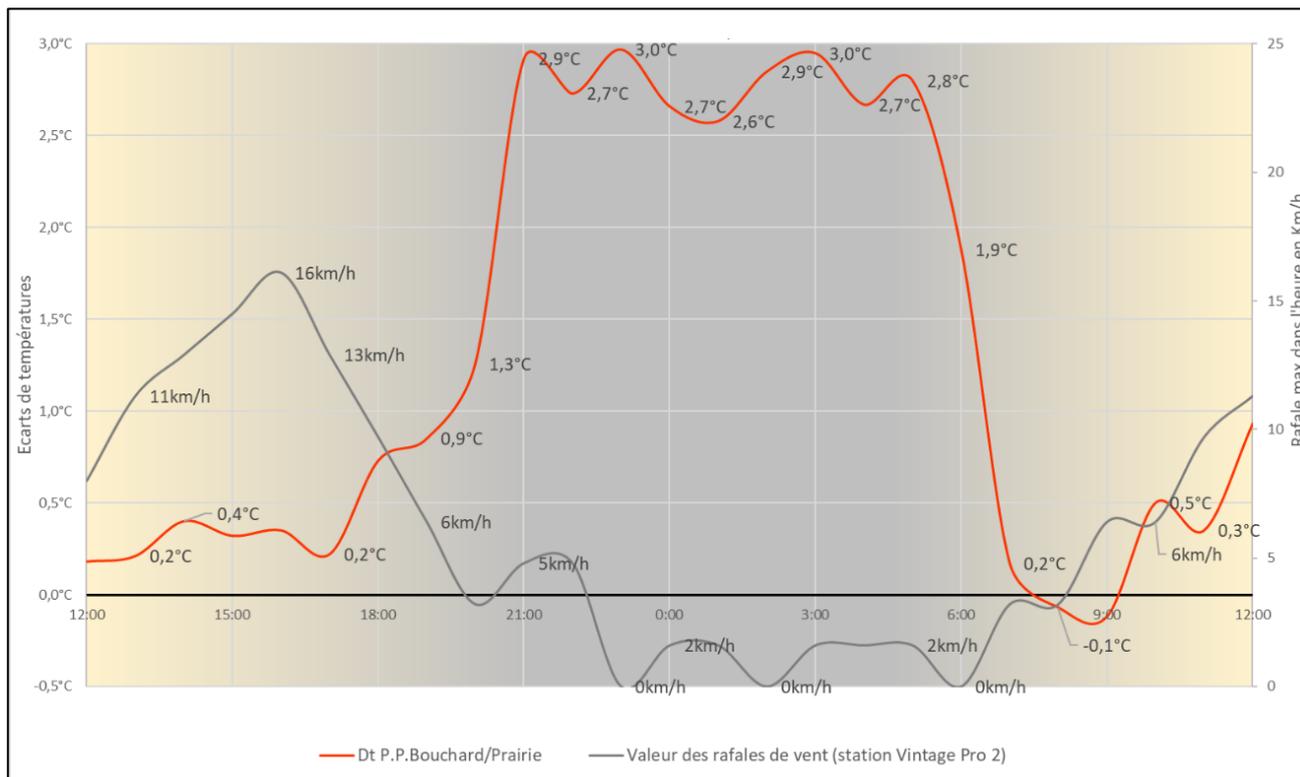


Figure 40 : Intensité solaire mesurée sur la station Vantage Pro 2 du 14 ou 15 avril 2022. En abscisse, nous retrouvons les heures (en h). En ordonnée, l'intensité lumineuse en J/cm². Réalisation : Mathys Cenier.

Intéressons-nous maintenant au vent. Nous remarquons à l'aide des graphiques (fig. 41) que le vent n'est pas de la même intensité. La période du 14 au 15 avril (fig. 41A) est composée d'un vent faible à modéré dans l'après-midi du 14 avril, puis le vent baisse jusqu'à devenir nul en soirée et dans la nuit. A l'inverse, la nuit du 29 au 30 avril (fig. 41B) n'enregistre qu'une baisse très légère de la force du vent. La vitesse du vent est mesurée à 15 km/h durant la nuit sur la station Vantage pro 2 positionnée à proximité de l'Université Caen Normandie. Ceci est relativement faible mais ces valeurs sont sous-estimées, à cause notamment, de la présence d'arbres dans les environs. En effet, la station de Caen-Carpiqueqet enregistre des rafales proches des 40 km/h dans la nuit (<https://www.meteociel.fr>). Le vent est orienté dans la direction nord-nord-est, ce qui correspond à un vent de mer.

Nous retrouvons des écarts de températures atteignant plus de 3 degrés dans la situation sans vent, contre 0,3°C dans le cours de la nuit avec du vent. Les résultats obtenus sont particulièrement intéressants puisqu'ils mettent très clairement en avant l'impact du vent sur l'intensité de l'ICU. Il existe bien évidemment une marge d'erreur dans ces résultats. L'objectif n'étant pas de calculer précisément les écarts mais de prouver l'importance de la présence du vent sur l'ICU.

41A



41B

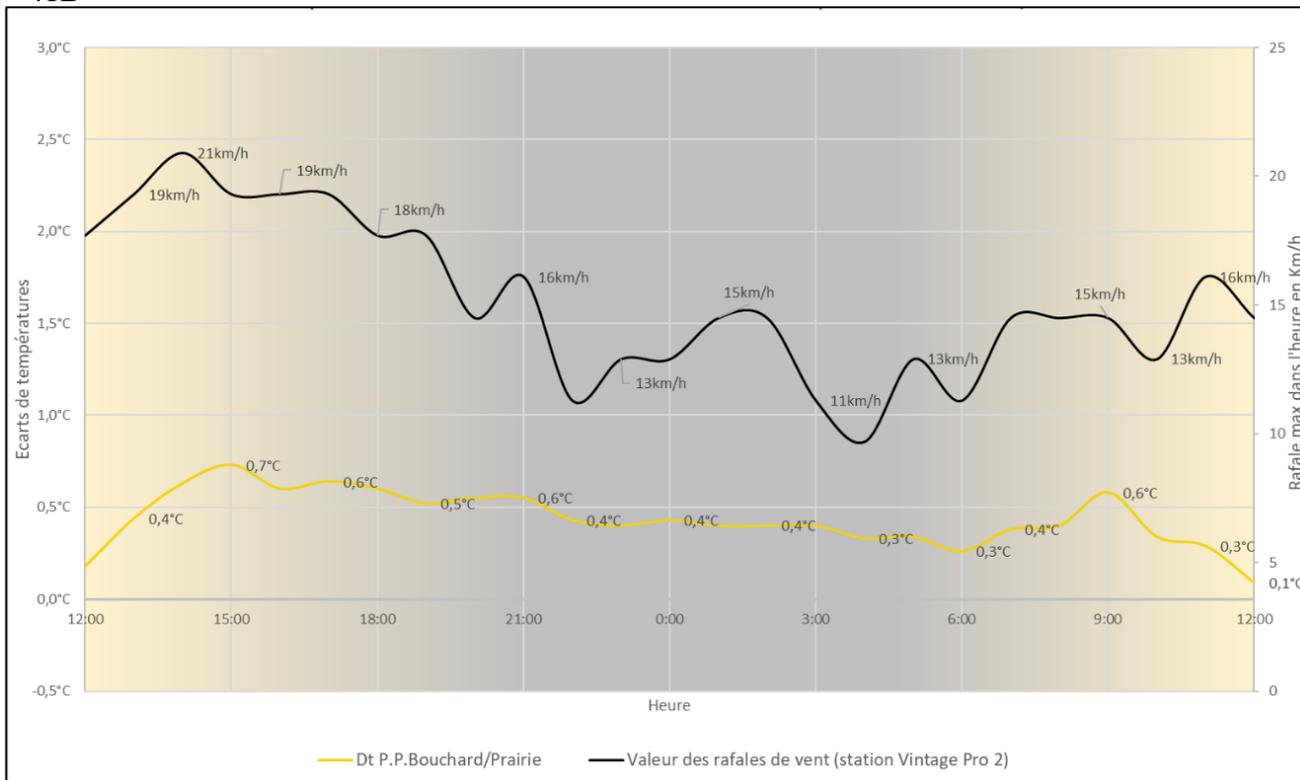


Figure 41 : Écarts de températures observés 41A : lors d'une situation de temps clair et calme (du 14 ou 15 avril 2022). 41B : lors d'une situation temps clair et venteux (du 29 ou 30 avril 2022). En abscisse, nous retrouvons les heures (en h). En ordonnée, les écarts de températures (en °C). Réalisation : Mathys Cenier.

6.4.2 L'impact des précipitations

Nous allons à présent étudier l'impact d'un passage pluvieux sur l'évolution d'un ICU. Nous allons prendre pour exemple deux passages orageux qui ont eu lieu en fin de journée durant le 3 mai ainsi que dans la nuit qui a suivi. Ces averses sont survenues aux alentours de 15 h (fig. 42) puis durant une averse orageuse à 3 h du matin. Ainsi, le cumul de pluies atteint plus de 13 mm d'eau sur cette période. Le vent est resté faible durant ces deux jours, sauf durant les averses ou des rafales dépassant les 40 km/h se sont produites. Il paraît donc intéressant d'étudier les écarts de températures observés durant la nuit qui a suivi cette averse.

Les écarts de températures durant la nuit se caractérisent par deux pics importants. Le premier pic arrive juste après le coucher du soleil. Le ciel est dégagé, ce qui crée une différence de température entre la Prairie et la Place Pierre-Bouchard d'environ 1,5°C. Cet écart n'est pas très important puisque le rayonnement solaire durant la journée n'a pas été très fort. De plus, les précipitations tombées en fin d'après-midi ont permis de refroidir les surfaces imperméabilisées. Nous avons pu voir précédemment que l'évaporation de l'eau permettait un abaissement des températures, en consommant de l'énergie.

Par la suite, les écarts de températures ont brusquement chuté au passage de l'averse apportant une dizaine de millimètres d'eau. La réduction de ces écarts est due à l'apport de fraîcheur *via* les précipitations ainsi qu'au refroidissement des surfaces. Ainsi, les températures sont devenues quasiment identiques sur l'ensemble des stations. A la suite de cette averse, l'animation satellite nous informe que la nébulosité disparaît à nouveau. Nous remarquons alors une légère hausse des écarts mais ne dépassant pas le degré.

En conclusion, cet exemple met en évidence l'impact des précipitations dans la régulation des températures *via* la perte d'énergie par évaporation. La mise en place de la couverture nuageuse empêche également la formation d'écarts de températures. La chaleur ayant du mal à s'évacuer, les températures diminuent très peu. Par conséquent, les écarts de températures ne sont que très faibles, voire nuls.

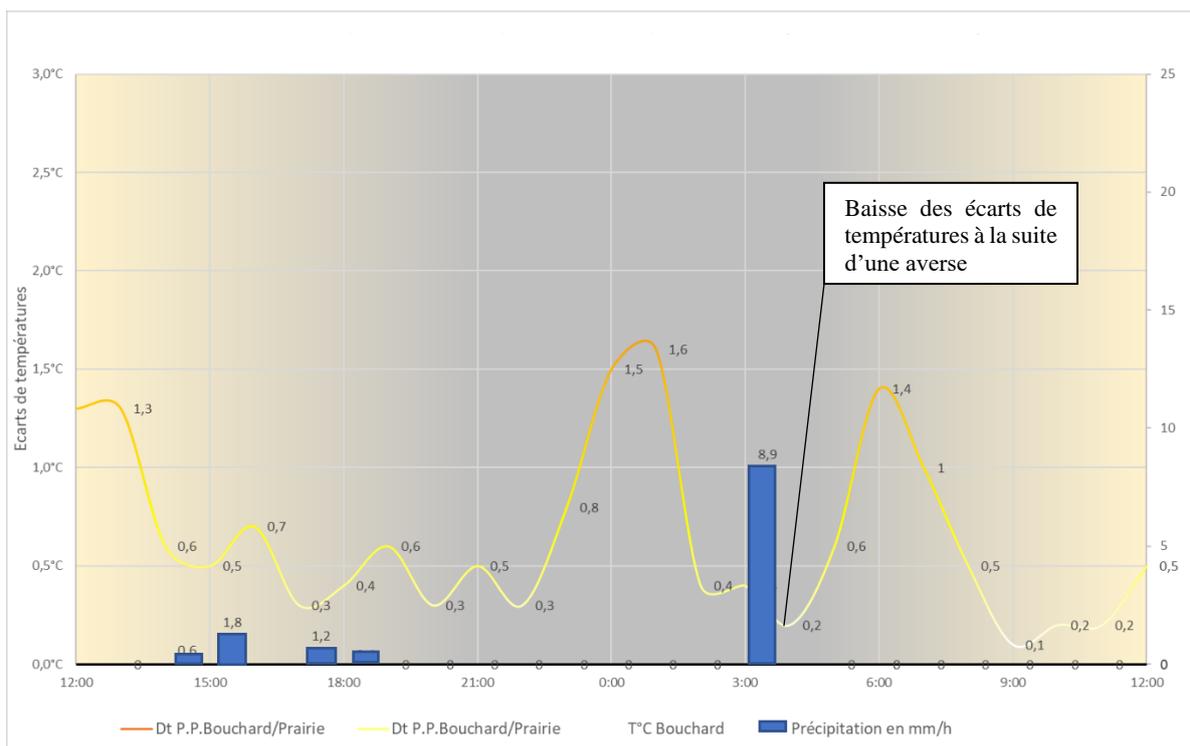


Figure 42 : Écarts de températures observées lors d'une série d'averses (du 3 au 4 mai 2022). En abscisse, nous retrouvons les heures (en h). En ordonnée, les écarts de températures (en °C). Réalisation : Mathys Cenier.

6.5 Les particularités repérées

Les stations météorologiques nous ont permis de relever des caractéristiques thermiques intéressantes et parfois inattendues.

6.5.1 Jardin des Plantes : un « trou à froid »

Le Jardin des Plantes enregistre une amplitude thermique quotidienne la plus importante (différence entre les températures minimales et maximales). Cette station a la particularité de relever des températures minimales très froides (IFU) et des températures maximales supérieures à l'ensemble des stations. Le positionnement de la station est à l'origine de ce phénomène. Le Jardin des Plantes est situé dans un creux entouré de végétation. La station est au-dessus d'une pelouse, cependant une végétation plus importante se trouve à une dizaine de mètres, ce qui peut provoquer une légère surchauffe par effet de confinement. Le positionnement de cette station, non optimal, résulte d'un compromis avec le gestionnaire du jardin de façon à la rendre discrète.

Les courbes de températures présentées sous forme de graphique représentent les dynamiques thermiques observées sur une journée type. Nous remarquons des écarts de températures importants dans l'après-midi, de l'ordre de 1,5°C. Le cadre légèrement confiné de cette station justifie ces températures. Lorsque le soleil se couche, le Jardin est déjà passé dans l'ombre depuis un long moment, ce qui explique que les températures chutent rapidement et deviennent alors inférieures à celles de la station de référence. Ainsi, durant plusieurs heures

après le coucher du soleil, les températures sont inférieures à la station de la Prairie. De manière générale, les écarts sont maximaux une heure après le coucher du soleil.

Pour continuer, nous relevons $-0,5^{\circ}\text{C}$ de différence lorsque le temps est clair et calme. Ceci s'explique non seulement par la topographie en forme de cuvette du Jardin des Plantes mais aussi par l'environnement très végétalisé qui retient que très peu de chaleur. Cet emplacement peut être considéré comme un « trou à froid ». Ce phénomène peut se définir comme une inversion de température. En effet, la température ne décroît pas avec l'altitude. Ainsi durant la nuit, la chaleur accumulée monte dans l'atmosphère tandis que l'air froid, plus dense, lui, descend. Le froid s'accumule en fond de vallée, tandis qu'un air plus doux est retrouvé en altitude.

La figure 43 montre que les écarts de températures entre la station de référence et celle du Jardin des Plantes sont moindres durant la nuit. Le graphique ne permet d'étudier que la période du mois d'avril à fin mai. Cependant, il démontre cette dynamique thermique.

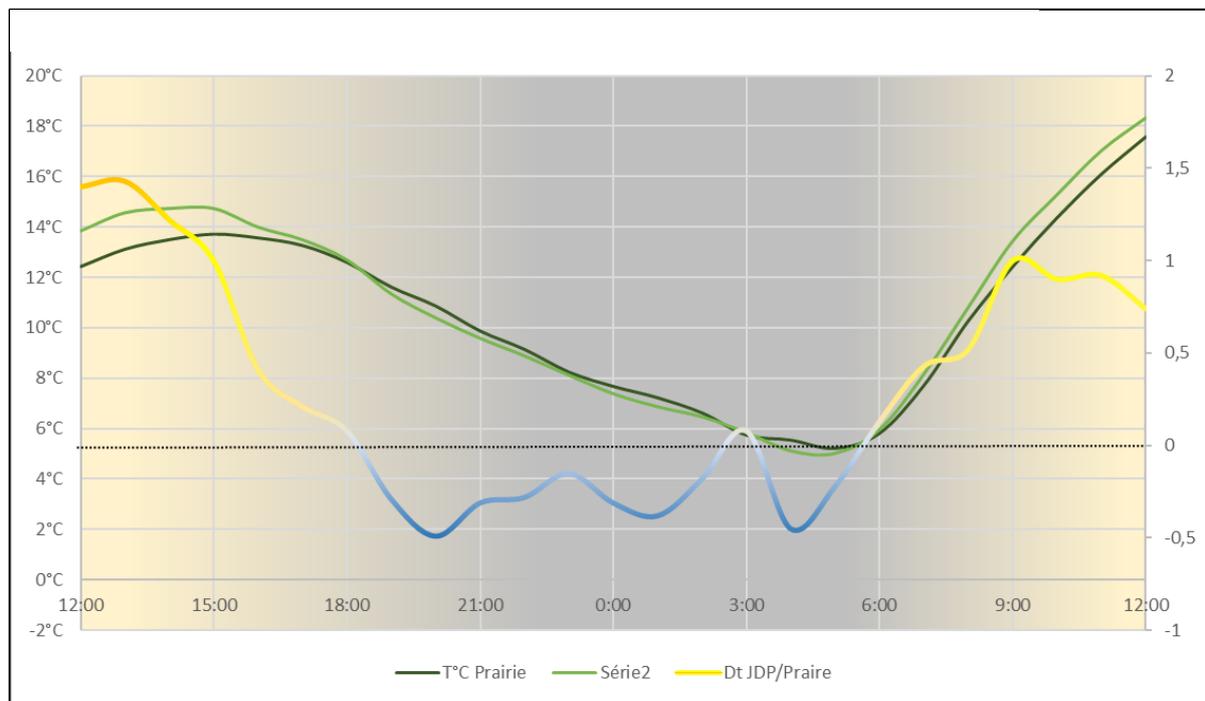


Figure 43 : Températures observées à la Prairie et au Jardin des Plantes (du 10 au 11 avril 2022). En abscisse, nous retrouvons les heures (en h). En ordonnée, les températures (en °C). Réalisation : Mathys Cenier.

Afin de mieux comprendre les différences de températures entre les deux stations, il serait pertinent de s'intéresser à l'orientation des vents au niveau de la Prairie. En effet, nous pouvons émettre l'hypothèse que lorsque le vent provient de la ville, celui-ci est échauffé. C'est la raison pour laquelle nous avons pour projet d'installer un anémomètre sur le site de la Prairie (opérationnel à partir du 23 juin 2022). Cet instrument permettrait de connaître l'orientation du vent. Nous pourrions ainsi, valider ou non l'hypothèse évoquée précédemment.

6.5.2 Le rôle de la nature en ville

Nous remarquons que deux places ayant les mêmes caractéristiques en termes de morphologie urbaine peuvent néanmoins présenter des écarts de températures. C'est le cas du site de la Tour Leroy et de la Place de la Résistance. Nous sommes ici dans des environnements avec une densité de bâti importante et dans des espaces relativement ouverts en fond de vallée. La seule différence notable est la présence d'une trame verte pour la station de la Place de la Résistance. Nous pouvons ainsi montrer le rôle de la végétation. Bien que cette trame verte soit majoritairement composée de pelouses rases, elle apporte une légère fraîcheur. Nous pouvons démontrer cette affirmation en comparant les écarts de températures entre les deux stations (fig. 44). Les écarts de températures sont présents en fin de journée lorsque les surfaces rejettent la chaleur accumulée. Nous pouvons voir sur le graphique que ces écarts sont en moyenne, compris entre 0,4 et 0,5°C pendant la nuit. Les deux stations sont situées à moins de 400 mètres de distance et pourtant des écarts de températures sont présents. Ces écarts prouvent donc l'importance de la présence de végétation dans la régulation des températures.

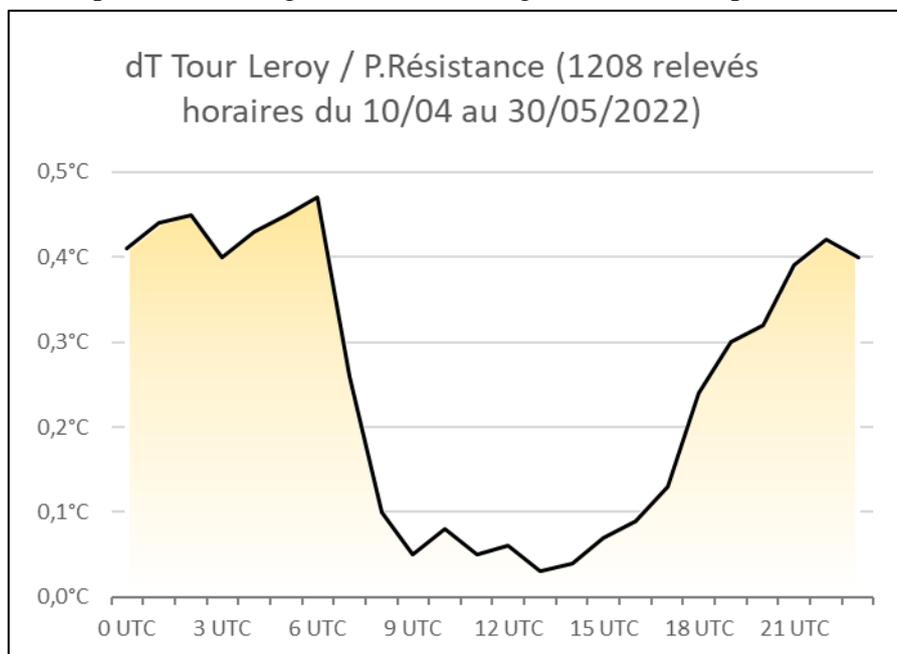


Figure 44 : Ecarts de températures entre la station située à Tour Leroy et celle sur la Place de la Résistance. En abscisse, nous retrouvons les heures UTC (Temps Universel Coordonné). En ordonnée, les écarts de températures en °C. Réalisation : Mathys Cenier.

6.5.3 Le rôle d'une surface hydraulique

Nous avons obtenu des écarts de températures similaires sur le site du Pont Winston Churchill. La présence de la trame bleue semble jouer son rôle en limitant l'échauffement. L'Orne apporte de la fraîcheur grâce à la surface en eau relativement importante. Cette surface ne s'échauffe évidemment que très peu et ne rejette donc pas de chaleur. Cette zone constitue également un couloir de circulation de l'air en provenance de la vallée. Les températures sont donc plus basses le long de l'Orne malgré un environnement dense en bâti et minéralisé des deux côtés des rives. Ces paramètres font de cette station, la station la plus froide après celle du Jardin des Plantes (toujours en comparaison avec la station de référence).

Dans le cadre, d'une étude de plus longue durée, il serait intéressant d'étudier le rôle de l'Orne dans le régime de températures. Précédemment, il a été précisé que le vent de mer apportait une brise influant sur les températures. En effet, la brise a tendance à remonter le long de l'Orne, ce qui pourrait potentiellement impacter les températures aux alentours des rives et donc celle mesurées par la station. Malheureusement, en deux mois de relevés, nous ne disposons pas de données assez importantes pour valider cette hypothèse. L'ensemble des conditions climatiques propices pour étudier ce phénomène n'a pas été rencontré sur la période d'étude. C'est pour cette raison, qu'il paraît pertinent d'approfondir cette étude afin d'obtenir plus de données et d'améliorer les connaissances thermiques au sein de la ville de Caen.

6.6 Analyse de l'ICU lors de fortes chaleurs

Pour finir l'analyse des résultats, nous allons regarder de plus près la réaction de l'îlot de chaleur caennais lors de fortes chaleurs (fig. 45). Ces fortes chaleurs résultent de la remontée d'une « plume de chaleur » ou « *heat plume* » en anglais (un panache de chaleur) d'origine saharienne/maghrébine. Cette arrivée d'air chaud est arrivée en Espagne puis sur la France. Celle-ci est provoquée par une dépression positionnée au large de la péninsule ibérique qui permet cette remontée d'air chaud. Nous avons donc retrouvé un air particulièrement chaud avec une température observée à 850 hPa (soit 1550 mètres d'altitude environ) de 23°C sur la ville de Caen. Soit une anomalie de température proche de 15 degrés par rapport à la moyenne de la période de référence 1981-2010. C'est dans ce contexte que des températures particulièrement élevées, proches des records ont été mesurée dans le passé. Nous avons observé une température de 34,3°C le vendredi 17 juin à la station de Caen Carpiquet. Le record de juin étant de 35,2 °C le 29 juin 2019. Pour ce qui est des températures relevées pas nos stations, nous avons dépassé les 35°C sur l'ensemble des stations, sauf sur notre station de référence (Prairie).

Ces résultats sont obtenus lors de conditions de fortes chaleurs, il est donc intéressant d'analyser les écarts obtenus entre le centre-ville et la prairie. Les conditions météorologiques à la tombée de la nuit ont été relativement propices à la formation de l'ICU avec un temps clair et calme durant ces trois jours, malgré un voile de nuages présent durant la seconde nuit (du 17 au 18 juin). Celui-ci a peut-être limité la formation d'écarts plus importants encore.

Les écarts relevés sont importants puisque l'îlot de chaleur urbain dépasse les 3°C durant la nuit du 17 au 18 juin. Le pic de l'îlot de chaleur est atteint à 3 h du matin avec 3,6°C (moyenne horaire). Cet îlot de chaleur résulte de l'accumulation de chaleur des matériaux de construction qui durant plusieurs jours été exposés à un rayonnement important. Les matériaux n'ont pas le temps de diffuser toute la chaleur accumulée durant la nuit. L'accumulation de chaleur amplifie donc le phénomène d'îlot de chaleur lors de la période estivale.

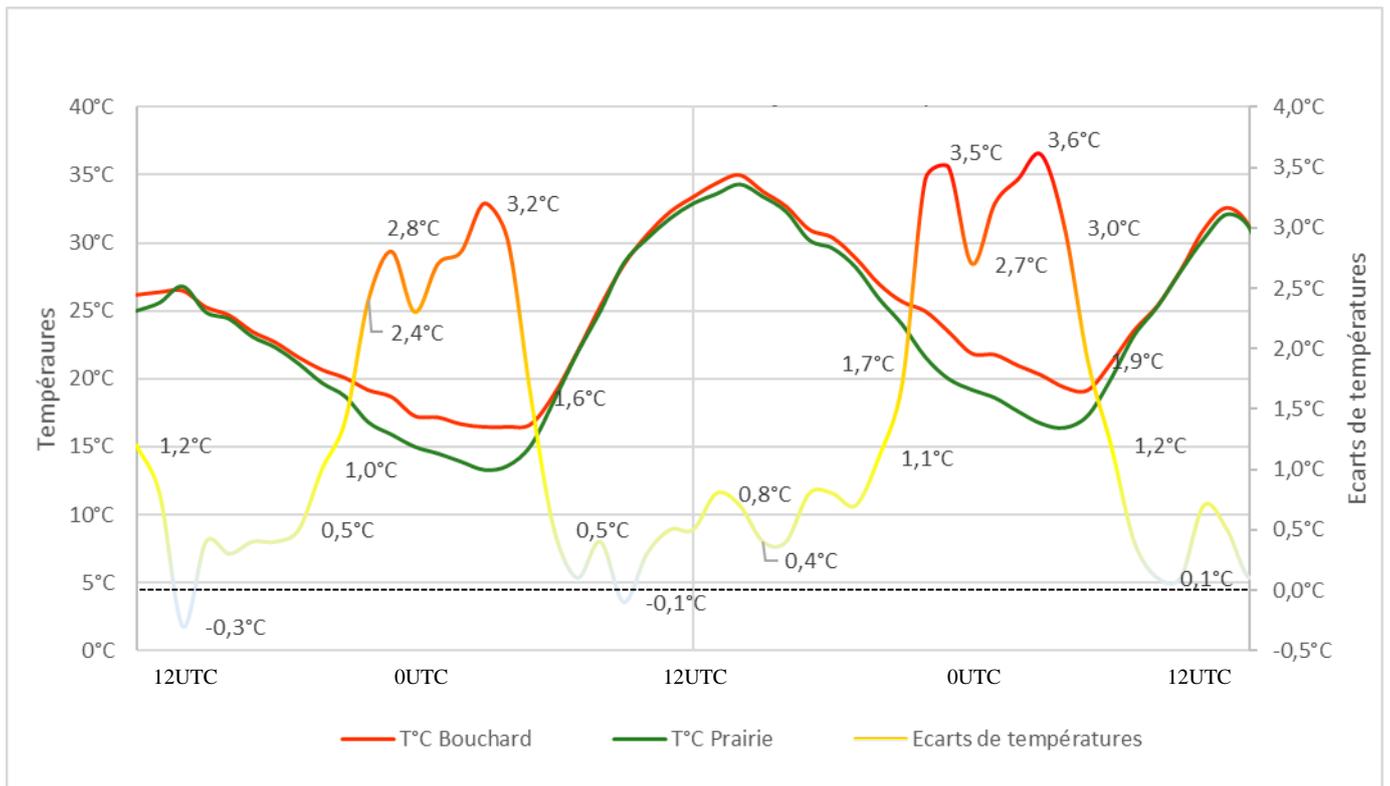


Figure 45 : Réaction de l'îlot de chaleur urbain lors de fortes chaleurs. En abscisse, nous retrouvons les heures UTC (Temps Universel Coordonné). En ordonnée, les températures en °C. Réalisation : Mathys Cenier.

6.7 Comparaison entre la modélisation et l'ICU relevé

Les données issues de la modélisation de l'ICU sont comparées aux relevés des stations lors de la nuit du 17 au 18 juin 2022, afin de voir si la modélisation est représentative de la réalité (Tableau 2). Les données issues des cartographies nous permettent de connaître les valeurs maximales modélisées de l'ICU en fonction des espaces. Une moyenne des valeurs modélisées durant les deux étés est calculée. Ces valeurs sont affichées dans le tableau 2.

Il est à noter que pour cette partie, nous prenons en compte les relevés d'une station supplémentaire. En effet, le site de la gare a été retenu afin d'y installer une station le 2 Juin 2022. Pour des raisons de temps, les relevés de cette station n'ont pas été exploités pour ce mémoire. Cependant, les premières observations de ce site sont intéressantes puisque la station enregistre un ICU assez important comparable à celui observé dans le centre-ville. Ceci s'explique par une surface minéralisée importante et par l'absence de végétation.

La station à la Prairie est modélisée pour avoir un écart de température de 0,4°C supplémentaire. Il suffit de soustraire 0,4°C à chaque station pour supprimer cet écart. Le tableau 2 présente les écarts obtenus et ceux modélisés. Les écarts modélisés sont sous-estimés par rapport à ceux mesurés, avec environ de 0,5 à 1°C de moins que ce qui est observé. Les stations au Château et sur le Pont Winston Churchill enregistrent des écarts plus proches de la modélisation.

Tableau 2 : Comparaison entre les données modélisées et celles observées. Réalisation : Mathys Cenier.

Stations	ICU max relevé	ICU modélisé
Place Pierre Bouchard	3,6-0,4 = 3,2°C	2,3°C
Tour Leroy	3,5-0,4 = 3,1°C	2,3°C
Place de la Résistance	3,1-0,4 = 2,8°C	2,1°C
Gare de Caen	3,5-0,4 = 3,1°C	2,3°C
Château	2,8-0,4 = 2,4°C	2,0°C
Pont Winston-Churchill	2,1-0,4 = 1,8°C	1,7°C

Le Jardin des Plantes n'est pas pris en compte dans la comparaison puisque les mailles sont trop grandes pour prendre en compte cet espace. Ainsi la comparaison entre les valeurs modélisées et les températures observées ne serait pas pertinente.

Cette comparaison est évidemment critiquable puisque les conditions météorologiques n'étaient pas similaires. Cependant, nous pouvons affirmer plusieurs éléments. Tout d'abord, les écarts de températures sont dans l'ensemble sous-estimé, surtout pour les stations situées dans le centre-ville. L'ICU peut être plus intense si les conditions climatiques sont favorables. Néanmoins, même si ces écarts de températures sont sous-estimés, la modélisation permet de mettre en avant les espaces susceptibles d'être les plus touchés par le phénomène.

Conclusion de la partie VI

Les relevés des stations météorologiques mettent en avant la présence d'un îlot de chaleur urbain sur la ville de Caen. Les données relevées montrent des écarts de températures très nets, en particulier entre les stations situées dans l'hypercentre et la station de référence. Certains espaces sont beaucoup plus sujets à l'ICU. C'est notamment le cas des sites de la Place Pierre-Bouchard et de la Tour Leroy. Ces deux stations ont enregistré les écarts les plus importants.

De plus, les relevés ont permis de mettre en exergue la cyclicité du phénomène d'ICU, et ce malgré la courte durée d'exploitation des données. En effet, les stations ont relevé des écarts de températures plus marqués en début et en fin de journée.

Certaines particularités thermiques de la ville ont également pu être repérées. C'est le cas du site de Jardin des Plantes, qui représente un réel « trou à froid » en plein centre-ville de Caen. Nous avons aussi pu mettre en évidence l'importance de la nature en ville. Cette dernière permet de limiter l'accumulation de chaleur et donc de limiter l'intensité de l'îlot de chaleur (effet « trame verte »). Ainsi malgré la présence d'un climat océanique peu propice à la formation de l'ICU, l'imperméabilisation des sols impacte les températures. C'est pourquoi la ville de Caen doit prendre en compte l'intégration de la végétation pour les futurs aménagements.

CONCLUSION

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une analyse thermique de la ville de Caen et de son agglomération. Les travaux réalisés dans ce mémoire sont une introduction à une étude plus large. Nous entendons par « plus large », une analyse spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain caennais sur une plus longue durée et élargie à des stations périphériques. L'ICU est aujourd'hui beaucoup plus facilement mesurable grâce aux nouvelles stations disponibles. Les stations de type MeteoHelix sont de véritables outils permettant de fournir des données de haute précision. Les données issues de cette étude préliminaire offrent des informations plus qu'intéressantes. En effet, ces dernières prouvent l'influence de l'occupation du sol sur la régulation des températures.

Tout d'abord, la zone d'étude est présentée comme un espace a priori peu soumis à l'effet de chaleur urbain. De par la proximité avec la côte, le contexte climatique est peu favorable à la formation de l'ICU. Le climat littoral océanique, ordinairement nuageux et venteux, modère les écarts de températures et apporte une humidité non négligeable. De plus, la topographie de la zone n'influe que très peu sur l'îlot de chaleur urbain. La vallée de l'Orne au niveau de Caen est très peu encaissée avec une altitude faible. Ainsi, la situation géographique de Caen laisse penser que l'îlot de chaleur urbain n'est que peu présent, voire absent sur la ville.

Cependant, dans un contexte de changement climatique des questions se posent. En effet, l'augmentation des températures est déjà amorcée sur la ville de Caen. Les données climatiques de la station de Caen Carpiquet sont archivées depuis 1947. Nous disposons donc d'assez de recul pour évoquer une augmentation des températures ainsi que des jours de chaleur. Le nombre de jours de chaleur augmente de façon constante depuis le début des relevés. Cette augmentation des jours de chaleur et des jours caniculaires est en phase d'accélération depuis les dix dernières années. L'étude a permis de mettre en avant une corrélation entre les journées chaudes et l'intensité de l'îlot de chaleur, plus les températures mesurées dans la journée sont importantes, plus l'ICU est marqué. C'est dans ces conditions particulières, lors de fortes chaleurs, que ce phénomène est évoqué par les médias puisqu'il occasionne des problèmes de santé chez les plus fragiles.

Caen fait partie des villes de taille moyenne en France. Les surfaces occupées par le bâti et les surfaces minéralisées ont la capacité de modifier localement le climat. Le centre-ville de Caen est la partie de la ville la plus minéralisée et la moins végétalisée. Le bâti y est plus haut que sur le restant de la ville et surtout plus dense. Cependant, la ville de Caen dispose d'un avantage intéressant qui est la couleur du bâti. La couleur blanche de la pierre calcaire de Caen permet de limiter l'accumulation de chaleur. La modélisation de l'îlot de chaleur urbain de Caen initié par le projet MAPUCE en 2013 montre que l'hypercentre peut être soumis à plusieurs degrés de plus que des espaces plus périphériques. Cette étude préliminaire de l'occupation du

sol ainsi que la modélisation de l'îlot de chaleur ont permis d'orienter nos choix pour le positionnement des stations.

Les sites retenus ont été concentrés dans le centre-ville pour plusieurs raisons. La première est évidemment le nombre limité de stations. Cette étude étant vouée à être élargie à toute l'agglomération caennaise, il paraissait logique de nous concentrer dans un premier temps sur le centre. La seconde raison est le manque de données. En effet, avant de commencer cette étude, nous ne connaissions pas la présence de l'îlot de chaleur sur la ville de Caen. Afin de maximiser les chances de trouver des résultats intéressants, l'étude s'est donc concentrée sur les espaces fortement minéralisés. Enfin, le centre-ville offre des sites avec des caractéristiques diverses, ce qui nous a permis d'étudier et de comparer des sites intéressants.

Ainsi, les sites ont été soigneusement choisis. La diversité des sites correspond à une occupation différente du sol. Nous avons des espaces fortement minéralisés, des espaces verts et un autre à proximité d'une surface en eau. Les sites ont été choisis de manière à varier les emplacements confinés et les espaces plus ouverts afin de pouvoir étudier des espaces avec une circulation de l'air différente.

Les relevés sont très intéressants puisque l'îlot de chaleur est très nettement mis en évidence. En conditions optimales, des écarts parfois supérieurs à 4°C ont été repérés entre la station de référence de la Prairie et les autres stations. Ces données mesurées sont plus importantes que les chiffres avancés par la modélisation. Cependant, il est à noter que l'îlot de chaleur est présent principalement dans le centre-ville de Caen. Nous remarquons la cyclicité journalière de ce phénomène avec l'apparition de celui-ci en fin de journée, jusqu'au petit matin. D'autres particularités intéressantes ont pu être remarquées, notamment la présence d'un « trou à froid » non négligeable au Jardin des Plantes (IFU). Le manque de temps ne nous a pas permis d'analyser les données sous tous les types de temps. Cependant, nous avons pu étudier l'ICU en présence des principales conditions météorologiques nécessaires à sa formation en fin de journée, soit un vent faible et une couverture nuageuse absente.

Néanmoins, le climat urbain reste complexe à étudier. D'autres paramètres sont à prendre en compte dans la formation de l'ICU, même si ces derniers agissent dans une moindre mesure par rapport au vent notamment. Parmi ces éléments, nous pouvons par exemple citer l'apport d'énergie complémentaire, c'est-à-dire l'émission de chaleur par les véhicules, le chauffage ou encore la climatisation en été (Escourrou, 1980).

La multiplication des vagues de chaleur amène à réfléchir sur l'aménagement du territoire. Les modélisations réalisées sur la Normandie montrent que les journées de chaleur, c'est-à-dire avec une température supérieure à 25°C sont vouées à augmenter dans les prochaines années. Si aucune politique n'est mise en place afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre, le nombre de journées de chaleur pourrait tripler à l'horizon 2100. Le risque de connaître un épisode caniculaire serait lui aussi beaucoup plus récurrent. C'est pourquoi il est nécessaire de diminuer drastiquement les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi d'adapter l'aménagement des villes afin de réduire au maximum le phénomène d'îlot de chaleur.

Une gestion durable doit avoir lieu en prenant compte les évolutions climatiques. Les pouvoirs politiques et les élus doivent prendre en compte le phénomène d'îlot de chaleur dans leurs projets d'aménagements. Comme nous l'avons démontré, cela passe par l'intégration de la nature en ville. En effet, la végétation a de nombreux atouts pour limiter les écarts de températures entre l'espace rural et urbain. La végétation joue un rôle de climatiseur naturel et limite l'emmagasinement de la chaleur. Le choix des essences d'arbres à privilégier dans un contexte de changement climatique devra faire l'objet d'une étude plus approfondie.

Demain, la qualité de vie de la population dépendra des aménagements réalisés aujourd'hui afin de répondre à ces questions d'ICU. Au-delà de la qualité de vie, la santé de nombreuses personnes sera impactée par ces fortes chaleurs. De plus, à l'avenir, la présence et l'intensité de l'ICU sera potentiellement un critère de sélection pour acheter ou construire une maison. Afin de rester attractives, les villes doivent donc dès maintenant mettre en place des aménagements adaptés.

Enfin, il est important de prendre en compte l'avis de la population. Pour cela, il serait pertinent de réaliser un questionnaire auprès des habitants. Ceci permettrait par exemple, de mieux connaître les seuils de températures considérés comme acceptables. La question de la chaleur dans les logements lors de fortes chaleurs pourrait également être abordée. En effet, de trop fortes chaleurs durant la nuit empêchent la bonne récupération du corps et créent une fatigue sur le long terme. Une température trop élevée dans les logements détériore grandement les conditions de vie des habitants.

Il est également nécessaire d'augmenter le réseau de mesures afin de connaître au mieux les dynamiques thermiques de la ville. Récemment, un anémomètre a été posé à la Prairie, ceci permettra de connaître plus en détail les flux présents sur la zone, potentiellement responsables des fluctuations de températures.

Ensuite, il est important de mieux connaître la végétation de la ville et de la favoriser. La nature en ville est très importante pour limiter l'îlot de chaleur urbain. Dans un contexte de changement climatique, de meilleures connaissances botaniques sont essentielles afin de pouvoir proposer des essences adaptées au climat de demain.

Pour finir, ce mémoire offre des pistes de réflexion et propose des aménagements à effectuer sur la ville de Caen. Dans un premier temps, il est essentiel de développer une modélisation de l'ICU plus détaillée. Les modèles sont en effet, des outils de travail importants, servant à prévenir sur les éventuels risques futurs. Ces modélisations sont des outils permettant d'appuyer des propos et ainsi guider le pouvoir politique.

Table des illustrations

Figure 1 : Représentation de l'îlot de chaleur urbain.....	10
Figure 2 : Explication de l'îlot de chaleur urbain.....	14
Figure 3 : Photographies infrarouges.	16
Figure 4 : Photographies infrarouges.	16
Figure 5 : Localisation de la zone d'étude.	20
Figure 6 : Occurrence des différentes conditions météorologiques sur Caen-Carpiquet	23
Figure 7 : Occurrence de températures supérieures à 25°C par an depuis 1975 à 2020.	24
Figure 8 : Nombre de jours de chaleur (T° maxi > 25°C) par an selon 2.6 et 8.5.	25
Figure 9 : Nombre de journées et de nuits caniculaires à Caen sur la période 1970-2020	27
Figure 10 : Occupation du sol de la ville de Caen.	31
Figure 11 : Densité de bâti de la ville de Caen.....	32
Figure 12 : Densité des espaces verts de la ville de Caen.	33
Figure 13 : Contexte topographique de la ville de Caen.	34
Figure 14 : Présentation des stations météorologiques utilisées pour l'étude.....	38
Figure 15 : Détail du fonctionnement de la station conçue par BARANIDESIGN.....	39
Figure 16 : Installation d'une station météorologique METEOHELIX (château de Caen).	41
Figure 17 : Localisation des stations météorologiques METEOHELIX (milieu urbain).....	42
Figure 18 : Localisation des stations météorologiques METEOHELIX (milieu mixte).....	43
Figure 19 : Localisation des stations météorologiques METEOHELIX (milieu végétalisé)...	44
Figure 20 : Localisation de la station météorologique METEOHELIX (surface hydraulique)45	
Figure 21 : Localisation des stations météorologiques au sein de la ville de Caen.	46
Figure 22 : Localisation des stations météorologiques supplémentaires	48
Figure 23 : Classification des LCZ.	54
Figure 24 : Réalisation des LCZ à l'aide de Google Earth Pro.....	55
Figure 25 : Cartographie en LCZ de la ville de Caen et ses alentours.	57
Figure 26 : Zoom sur l'occupation du sol de 3 sites accueillant une station METEOHELIX..	58
Figure 27 : Répartition de l'occupation des sites d'implantation des stations..	59
Figure 28 : Répartition des stations positionnées et supplémentaires.	59
Figure 29 : Effet de l'urbanisation sur la T°C nocturne pendant une situation estivale	61
Figure 30 : Effet de l'urbanisation sur la T°C nocturne pendant une situation estivale	62
Figure 31 : Zoom sur les 10 mailles avec les écarts de températures les plus importants.	63
Figure 32 : Ecart de températures entre Caen-Carpiquet et la station Vantage Pro 2	66
Figure 33 : Evolution de l'ICU entre Caen-Carpiquet et la station Vantage Pro 2	67
Figure 34 : Températures mesurées pour les stations METEOHELIX.....	68
Figure 35 : Température moyenne des différentes stations METEOHELIX.	69
Figure 36 : Différence de T°C entre les stations METEOHELIX et la référence.....	70
Figure 37 : Fréquence des écarts des METEOHELIX en comparaison à la référence	71
Figure 38 : Evolution des températures sur les stations METEOHELIX.	72
Figure 39 : Températures relevées (en °C) au lever du soleil, la journée du 17/04/2022.....	73
Figure 40 : Intensité solaire mesurée sur la station Vantage Pro 2 du 14 ou 15 avril 2022	74
Figure 41 : Ecart de températures observées	76
Figure 42 : Ecart de températures observées lors d'une série d'averses	78
Figure 43 : Températures observées à la Prairie et au Jardin des Plantes	79
Figure 44 : Ecart de températures entre Tour Leroy et Place de la Résistance	80
Figure 45 : Réaction de l'îlot de chaleur urbain lors de fortes chaleurs.....	82
Tableau 1 : Formats des différentes couches de la carte d'occupation du sol.....	30
Tableau 2 : Comparaison entre les données modélisées et celles observées.....	83

Table des matières

REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	5
INTRODUCTION	7
Partie I : Description et origine de l’îlot de chaleur urbain	9
1.1 Comment définit-on la climatologie-urbaine ? :	9
1.2 L’îlot de chaleur urbain :	9
1.3 L’origine de l’élévation des températures :	10
1.3.1 L’occupation du sol :	11
1.3.2 Les activités humaines :	12
1.3.3 Les conditions météorologiques :	13
1.3.4 Résumé de l’îlot de chaleur urbain :	14
1.4 Mesures thermiques :	15
1.4.1 Le rôle de la végétation :	15
1.4.2 Les surfaces minérales et le bâti :	16
Conclusion de la partie I :	17
Partie II : L’îlot de chaleur urbain dans un contexte de changement climatique. La ville de Caen est-elle à risque ?	19
2.1 Les enjeux sur la santé :	19
2.2 Pourquoi la ville de Caen est-elle intéressante à étudier ? :	20
2.2.1 Présentation de la zone d’étude :	20
2.2.2 Contexte climatique de la ville de Caen :	20
2.2.3 Les types de temps dominants à Caen :	21
2.3 Contexte d’augmentation des températures :	24
2.3.1 Augmentation du nombre de jours de chaleur :	24
2.3.2 Les prédictions dans un contexte de changement climatique :	25
2.3.3 Les jours de canicule :	26
Conclusion de la partie II :	28
Partie III : Analyse de l’occupation du sol et contexte topographique du territoire Caennais	29
3.1 L’occupation du sol :	29
3.1.1 Carte de l’occupation du sol :	29
3.1.2 Densité de bâti :	31
3.1.3 La densité des espaces verts :	33
3.2 La topographie de la ville de Caen :	34
Conclusion de la partie III :	35

Partie IV : Méthodes de mesures :	37
4.1 Contextualisation :.....	37
4.1.1 Présentation et mise en place du matériel :	37
4.2 Démarches auprès de la Mairie de Caen pour l’installation des stations :.....	39
4.3 Démarches dans le choix de l’emplacement des stations météorologiques :.....	40
4.3.1 Premières démarches :.....	40
4.3.2 Les critères pris en compte dans le choix des emplacements :	41
4.4 Les sites retenus :	42
4.4.1 Milieu urbain dense :.....	42
4.4.2 Les sites dit « mixtes » :.....	43
4.4.3 Milieu végétalisé	44
4.4.4 Surface hydraulique :	45
4.5 Représentation de la répartition géographique des stations :	46
4.6 Proposition de sites supplémentaires :	47
4.6.1 Démarches suivies pour le choix des sites supplémentaires :	47
4.6.2 Localisation des sites complémentaires :	47
Conclusion de la partie IV :	51
Partie V : Modélisation de l’îlot de chaleur urbain :	53
5.1 Classification LCZ :	53
5.1.1 Présentation de la classification LCZ :.....	53
5.1.2 Application de la classification LCZ à notre zone d’étude :	55
5.1.3 Classification LCZ obtenue :.....	56
5.1.4 Répartition de l’occupation du sol des sites d’implantation des stations :.....	58
5.1.5 Répartition de l’occupation du sol des sites supplémentaires proposés :.....	59
5.2 Projet « MAPUCE ».....	60
Conclusion de la partie V :	64
Partie VI : Analyse et interprétation des résultats obtenus	65
6.1 Analyse générale :	65
6.1.1 Décalage de l’îlot de chaleur :.....	66
6.2 Discussion des résultats sous forme de données horaires :	68
6.2.1 Fréquence des écarts de températures sur nos relevés :	71
6.3 Zoom sur une période à fort ICU :	71
6.3.1 Ecart obtenus :	71
6.4 Etude de l’îlot de chaleur caennais par type de temps :	73
6.4.1 Le vent :.....	74
6.4.2 L’impact des précipitations :.....	77
6.5 Les particularités repérées	78

6.5.1 Jardin des Plantes : un « trou à froid »	78
6.5.2 Le rôle de la nature en ville :	80
6.6 Analyse de l'ICU lors de fortes chaleurs :	81
6.7 Comparaison entre la modélisation et l'ICU relevé :	82
Conclusion de la partie VI	84
CONCLUSION	85
Table des illustrations	89
Table des matières	91
Bibliographie	95
Annexes	99
Annexe 1 : Autorisation de la Mairie de Caen pour l'implantation des stations	99
Annexe 2 : Fiche station du Jardin des Plantes	100
Annexe 3 : Fiche station du Château de Caen	102
Annexe 4 : Fiche station de la Tour Leroy	104
Annexe 5 : Fiche station de la Place de la Résistance	106
Annexe 6 : Fiche station du Pont Winston Churchill	108
Annexe 7 : Fiche station de la Place Pierre-Boucard	110
Annexe 8 : Fiche station de la Prairie (Boulevard du Petit Vallerent)	112
Annexe 9 : Fiche station de la station situé a côté de l'université (Avenue d'Edimbourg)	114
Résumé	116

Bibliographie

- Allain R (2004). Morphologie urbaine. Géographie, aménagement et architecture de la ville. Armand Col. Université des Sciences et Technologies de Lille. 254 pp.
- Audurier-Cros A, Izard JL (1980). Types de temps en climat méditerranéen français et conception architecturale bioclimatique. *Méditerranée Aix-en-Provence* **4** : 67-79.
- Baud P, Bourgeat S, Bras C (2003). Dictionnaire de géographie. Hatier, Paris. 543 pp.
- Beauvais F, Cantat O (2018). Le climat en Normandie. *Préfet de la région Normandie*. 94 pp.
- Cantat O (2004). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois* **191**: 75-102.
- Cantat O, Follin A (2020). Thermal singularities of a peri-urban area in a medium-sized conurbation: the case of Caen in the winter of 2018/2019. *Climatologie* **17** : 15 pp.
- Escourrou G (1980). Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat. Masson, Paris. 182 pp.
- Escourrou G (1982). Le climat de la France. Presses universitaires de France, Paris. 128 pp.
- Foissard X (2015). L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennais. Géographie. Université Rennes 2. 248 pp.
- Hémon D, Jouglu E (2004). Surmortalité liée à la vague de chaleur d'août 2003 : suivi de la mortalité post-canicule, causes médicales de décès au cours de la vague de chaleur. Institut National de la santé et de la Recherche Médicale. 76 pp.
- Institut d'aménagement et d'urbanisme, Ile de France (2010). Les îlots de chaleur urbains, l'adaptation de la ville aux chaleurs urbaines. 81pp.
- Lamarre D, Pagney P (1999). Climats et société. Armand Colin, Paris. 268 pp.
- Ministère de la transition écologique (2021). Changement climatique : les éléments scientifiques du GIEC. 4 pp.
- Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. In: *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.). IPCC – Summary for Policymakers*. Cambridge University Press. 31 pp.

- Michelot JL, Salen P, Simon L, Loiseau J (2015). La fonctionnalité de l'espace. « *Couloirs de vie* » *Projet de restauration et de préservation des corridors biologiques du Grésivaudan*. pp.7-20.
- Pagney P (1988). *Climats et cours d'eau de France*. Masson, Paris. 243 pp.
- Parcevaux S, Huber L (2007). *Bioclimatologie : concepts et applications*. Editions Quae, Versailles. 324 pp.
- Parcevaux S, Payen D, Brochet P, Samie C, Hallaire M, Mériaux S (1990). *Dictionnaire encyclopédique d'agrométéorologie*. INRA Editions, Paris. 323 pp.
- Roux F (1991). *Les Orages : météorologie des grains, de la grêle et des éclairs*. Editions Payot, Paris. 353 pp.
- Service central d'exploitation de la météorologie (1996). *Normales climatiques : Périodes 1961 – 1990. Tome 1 – Stations de métropole*. Météo-France, Trappes.
- Schueler T (2000). The Importance of Imperviousness: The Practice of Watershed Protection. *Watershed Protection Techniques 1* : 100-111.
- Stewart ID, Oke TR (2012). Local Climate Zones for Urban Temperatures Studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **93**. 1879-1900.
- Vigneau JP (2005). *Climatologie*. Armand Colin, Paris. 199 p

Sites internet :

- Caen : ville plus verte ou ville moins verte ? Le duel des classements – Liberté, le Bonhomme Libre, consulté en juin 2022.
(https://actu.fr/normandie/caen_14118/caen-ville-plus-verte-ou-ville-moins-verte-le-duel-des-classements_49548605.html)
- Canicules : effets sur la mortalité en France métropolitaine de 1970 à 2013, et focus sur les étés 2006 et 2015. Santé publique France, consulté en mai 2022.
(<https://www.santepubliquefrance.fr/les-actualites/2019/canicules-effets-sur-la-mortalite-en-france-metropolitaine-de-1970-a-2013-et-focus-sur-les-etes-2006-et-2015>)
- Capacité thermique massive – Techno-Science, consulté en mars 2022.
(<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Capacite-thermique-massive.html>)
- Climatologie globale à Caen – Carpiquet – Infoclimat, consulté en mai 2022.
(<https://www.infoclimat.fr/climatologie/globale/caen-carpiquet/07027.html>)
- Comprendre les îlots de chaleur urbains – CNRS Le journal, consulté en mai 2022.

(<https://lejournal.cnrs.fr/articles/comprendre-les-ilots-de-chaaleur-urbains>)

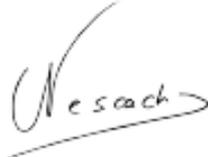
- Densité – Larousse, consulté en mars 2022.
(<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/densité/23620#:~:text=1.%20Qualité%20de%20ce%20qui%20est%20dense%20.,à%201%2C4%29.%203.%20Valeur%20de%20gris%20d%27un%20phototype>).
- Dossier complet, commune de Caen - Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques, consulté en mai 2022.
(<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=COM-14118>)
- Espaces verts par habitant, en mètres carrés – Alternatives économiques, consulté en juin 2022.
(<https://www.alternatives-economiques.fr/espaces-verts-habitant-metres-carres-0104201778143.html>)
- Fast and easy Local Climate Zone mapping – LCZ Generator, consulté en juin 2022.
(<https://lcz-generator.rub.de>)
- Ilot de chaleur urbain – Centre National de Recherches Météorologiques, consulté en mai 2022.
(<https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article197>)
- Jardin des Plantes et Jardin Botanique – Calvados Tourisme, consulté en mars 2022.
(<https://www.calvados-tourisme.com/offre/jardin-des-plantes-et-jardin-botanique/#labels-classement>)
- La biodiversité en danger – Office Français de la Biodiversité, consulté en avril 2022.
(<https://www.ofb.gouv.fr/pourquoi-parler-de-biodiversite/la-biodiversite-en-danger>)
- La Prairie et l’Hippodrome – Caen la mer, consulté en mars 2022.
(<https://www.caenlamer-tourisme.fr/patrimoine-naturel/la-prairie-et-lhippodrome/>)
- LCZ Generator : A Web Application to Create Local Climate Zone Maps – Frontiers in Environmental Science, consulté en juin 2022.
(<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2021.637455/full>)
- Les 7 dernières années sont le plus chaudes à l’échelle du globe – Météo France, consulté en mai 2022.
(<https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/planete/2021-5e-annee-la-plus-chaude-lechelle-du-globe-selon-copernicus>)
- Pic de chaleur : pourquoi fait-il plus chaud en ville ? – Météo France, consulté en mai 2022.
(<https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/pic-de-chaaleur-pourquoi-fait-il-plus-chaud-en-ville>)
- Population par sexe et groupe d’âges – Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques, consulté en juin 2022.

https://www.insee.fr/statistiques/2381474#figure1_radio2)

- Portail d'information sur les sols – Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, consulté en avril 2022.
(<https://www.fao.org/soils-portal/fr/>)
- Quelle place pour l'arbre dans votre ville ? – Kormap, consulté en avril 2022.
(<https://kormap.com/plateformes/nos-villes-vertes/>)
- Rapport du Giec sur le climat : un constat alarmant - Vie publique, consulté en mai 2022.
(<https://www.vie-publique.fr/en-bref/281114-rapport-du-giec-sur-le-climat-un-constat-alarmant>)
- Solutions d'adaptation au changement climatique fondées sur la Nature en milieu urbain : quels retours d'expérience ? – CEREMA, consulté en mars 2022.
(<https://www.cerema.fr/fr/actualites/solutions-adaptation-au-changement-climatique-fondees-nature>)
- Station météo METEOHELIX IoT Sigfox – Littoclime, consulté en avril 2022.
(<https://www.littoclime.net/station-meteo-autonome-meteohelix-iot-version-sigfox-c2x31946668>)
- Tableau d'observations pour Caen (14) (78 m) – Météociel, consulté en mai 2022.
(https://www.meteociel.fr/temps-reel/obs_villes.php?code2=7027&jour2=29&mois2=3&annee2=2022)
- Toujours plus d'habitants dans les unités urbaines – INSEE, consulté en mai 2022.
(<https://www.insee.fr/fr/statistiques/4806684#graphique-figure2>).
- Trame verte et bleue – Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, consulté en avril 2022.
(<https://www.ecologie.gouv.fr/trame-verte-et-bleue>)

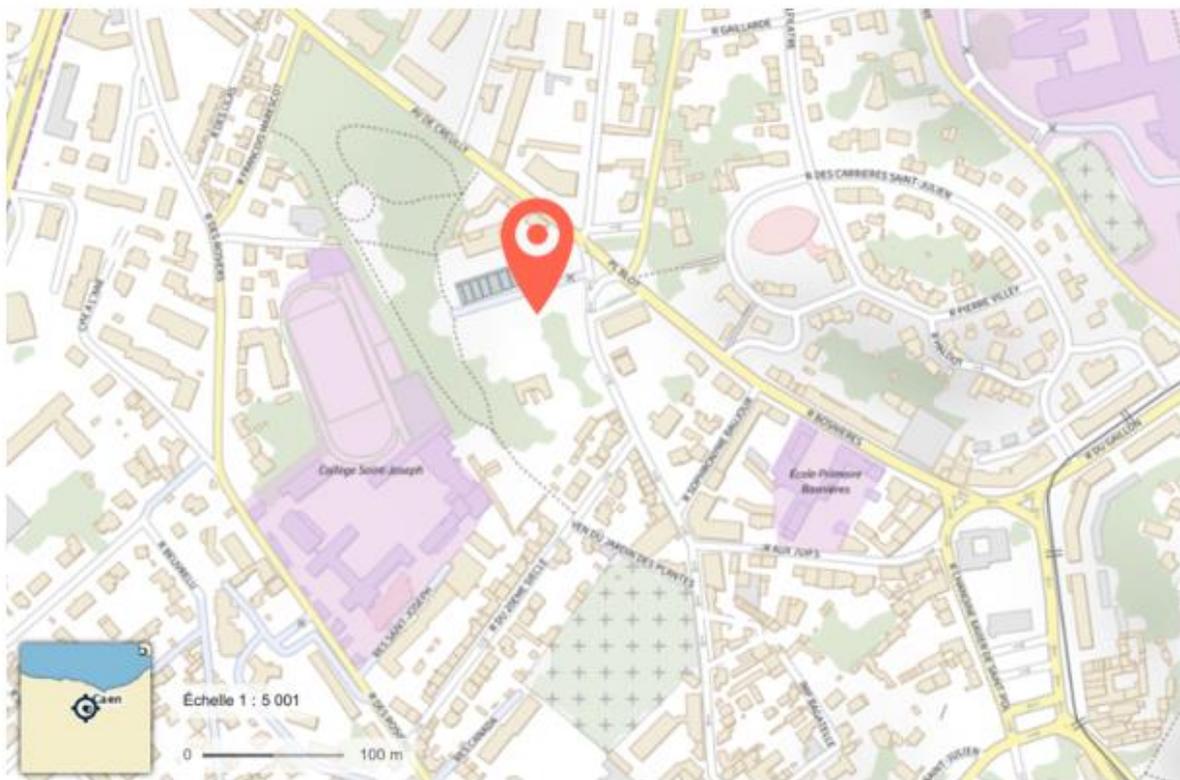
Annexes

Annexe 1 : Autorisation de la Mairie de Caen pour l'implantation des stations

<p>RÉPUBLIQUE FRANÇAISE</p> <p>—</p> <p>Ville de</p>  <p>CAENA NORMANDIE</p>	
	<p>Caen, le 8 avril 2022</p>
<p>Le Maire</p>	<p>Monsieur Olivier CANTAT Enseignant-chercheur HDR - Département de géographie UNIVERSITE DE CAEN NORMANDIE ESPLANADE LA PAIX PLACE MICHEL DE BOUARD 14000 CAEN</p>
<p>Monsieur,</p> <p>L'Université a sollicité la Ville de Caen afin de lui permettre d'installer 6 stations météo sur son espace public en vue de caractériser les îlots de chaleur sur le territoire. Cette demande s'inscrit dans le cadre d'une étude que vous souhaitez réaliser à l'échelle du territoire de Caen et qui répond aux enjeux portés par la Ville en matière de climat et de transition écologique.</p> <p>A ce titre, j'ai le plaisir de valider votre demande et autorise l'implantation de ces stations autonomes selon vos préconisations, à savoir sur des mâts d'éclairage public à une hauteur de 3 mètres. Les sites retenus sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none">• Station n°1 : positionnée entre le Château et l'Université• Station n°2 : positionnée à proximité de la Tour Leroy• Station n°3 : positionnée Place de la Résistance• Station n°4 : positionnée Quai de Juillet• Station n°5 : positionnée 2 Place Bouchard• Station n°6 : positionnée à la Prairie <p>Dans le cadre de cet accord, je vous précise que la pose des stations et le respect des règles de sécurité sont de la responsabilité de l'Université.</p> <p>Je vous prie d'agréer, Monsieur, l'expression de mes salutations distinguées.</p>	
	<p>Pour le Maire et par délégation, Le Maire-adjoint</p>  <p>Nicolas ESCACH</p>
<p>Ville de Caen – Esplanade Jean-Marie LOUVEL – 14027 CAEN Cedex 9 DDDIEPR-SERV TRANS. ENERG. Référence à rappeler : S22-012931 – Affaire suivie par : Arnaud MARIE Téléphone : 0231304175 – Courriel : arnaud.marie2@caenlamer.fr – www.caen.fr</p>	

Annexe 2 : Fiche station du Jardin des Plantes

FICHE STATION Nom de la station : Station METEOHELIX n°1 Jardin des Plantes Caen 	LOCALISATION Département : CALVADOS (14) Commune : CAEN (14000) Lieu-dit : PLACE DE BLOT Latitude : 49,18899°N Longitude : 0,37140°O Altitude : 18 m Date d'installation : 15/03/2022
---	---



Station météo de type METEOHELIX IOT Sigfox

Température $\pm 0,2$ T°C

Humidité $\pm 1,8$ %

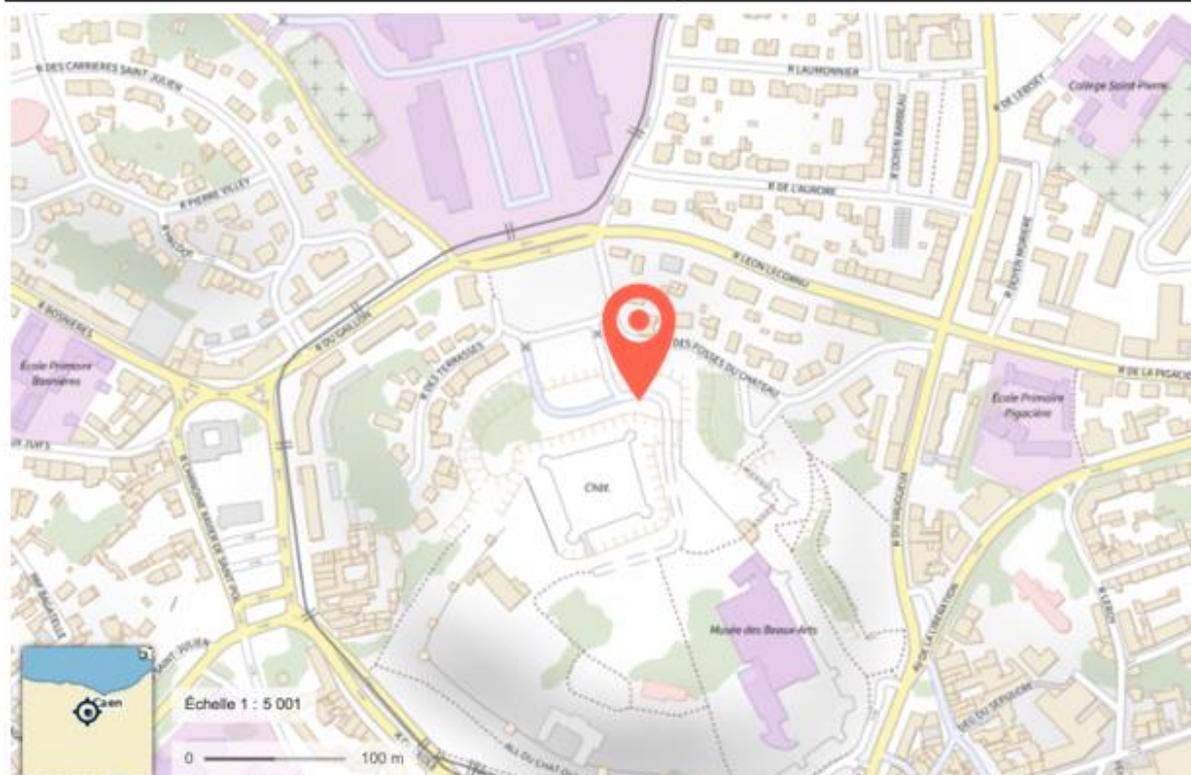
Pression atmosphérique $\pm 0,2$ hPa

Rayonnement global $\pm 6\%$ du quotidien



Annexe 3 : Fiche station du Château de Caen

<p>FICHE STATION</p> <p>Nom de la station :</p> <p>Station METEOHELIX n°2</p> <p>Château de Caen</p> <p>Caen</p>  <p>UMR6266 CNRS Normandie Université</p>	<p>LOCALISATION</p> <p>Département : CALVADOS (14)</p> <p>Commune : CAEN (14000)</p> <p>Lieu-dit : Le château</p> <p>Latitude : 49,18768°N</p> <p>Longitude : 0,36246°O</p> <p>Altitude : 30 m</p> <p>Date d'installation : 09/04/2022</p>
--	--



Station météo de type METEOHELIX IOT Sigfox

Température $\pm 0,2$ T°C

Humidité $\pm 1,8$ %

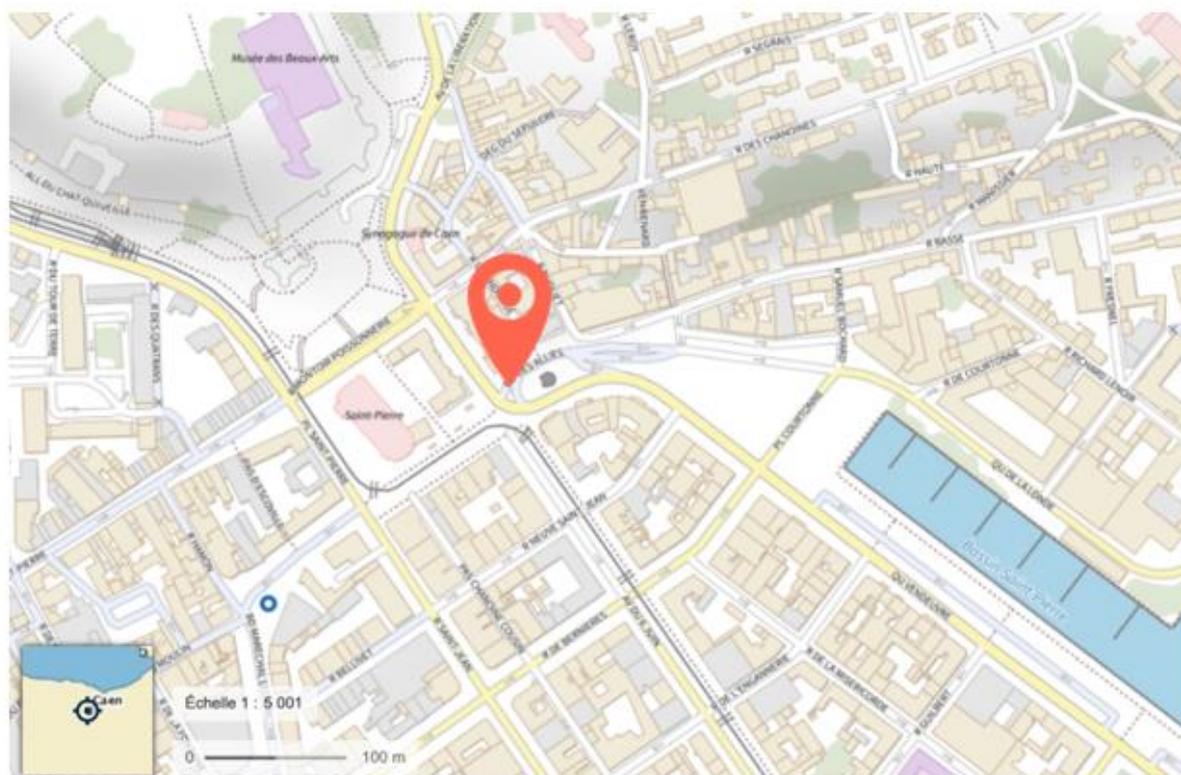
Pression atmosphérique $\pm 0,2$ hPa

Rayonnement global $\pm 6\%$ du quotidien



Annexe 4 : Fiche station de la Tour Leroy

<p>FICHE STATION</p> <p>Nom de la station :</p> <p>Station METEOHELIX n°3</p> <p>Tour Leroy (Boulevard des Alliés)</p> <p>Caen</p>  <p>UMR6266 CNRS Normandie Université</p>	<p>LOCALISATION</p> <p>Département : CALVADOS (14)</p> <p>Commune : CAEN (14000)</p> <p>Lieu-dit : Boulevard des alliés</p> <p>Latitude : 49,18419°N</p> <p>Longitude : 0,35930°O</p> <p>Altitude : 5 m</p> <p>Date d'installation : 09/04/2022</p>
--	---



Station météo de type METEOHELIX IOT Sigfox

Température $\pm 0,2$ °C

Humidité $\pm 1,8$ %

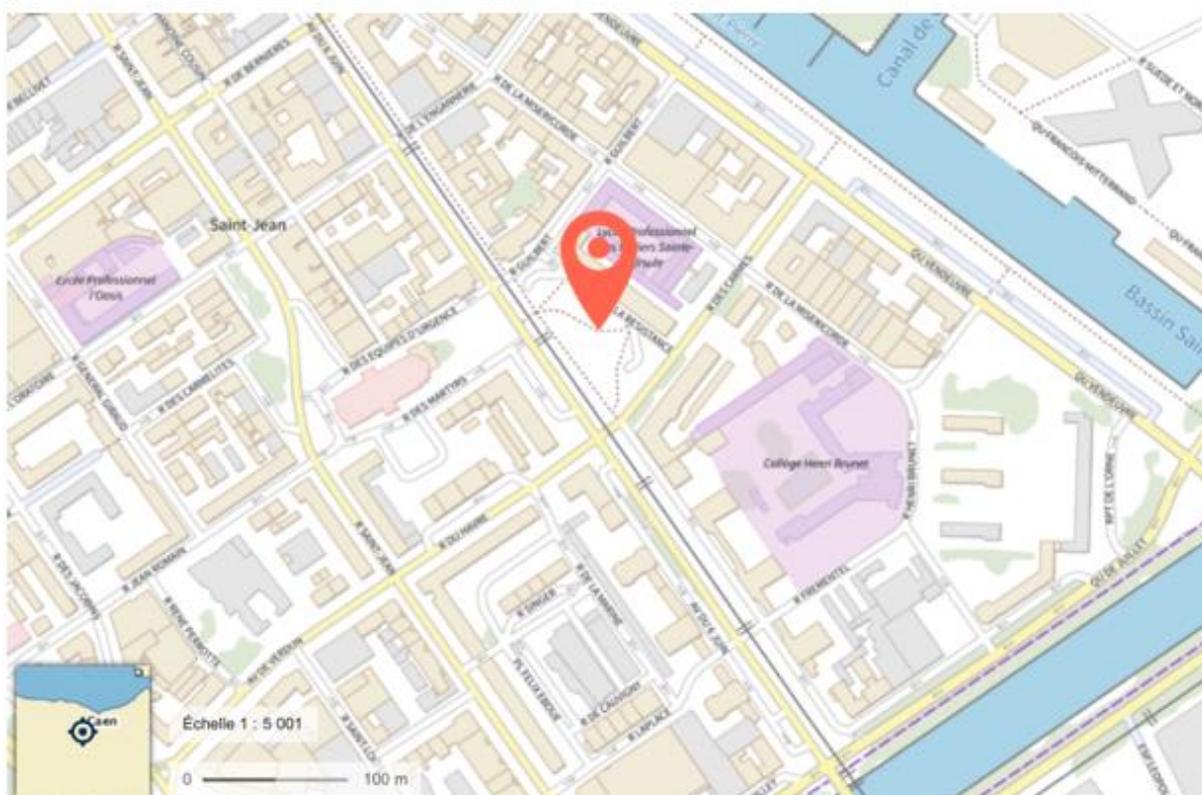
Pression atmosphérique $\pm 0,2$ hPa

Rayonnement global $\pm 6\%$ du quotidien



Annexe 5 : Fiche station de la Place de la Résistance

<p>FICHE STATION</p> <p>Nom de la station :</p> <p>Station METEOHELIX n°4</p> <p>Place de la Résistance</p> <p>Caen</p>  <p>UMR6266 CNRS Normandie Université</p>	<p>LOCALISATION</p> <p>Département : CALVADOS (14)</p> <p>Commune : CAEN (14000)</p> <p>Lieu-dit : Place de la Résistance</p> <p>Latitude : 49,18097°N</p> <p>Longitude : 0,35571°O</p> <p>Altitude : 5 m</p> <p>Date d'installation : 09/04/2022</p>
---	---



Station météo de type METEOHELIX IOT Sigfox

Température $\pm 0,2$ T°C

Humidité $\pm 1,8$ %

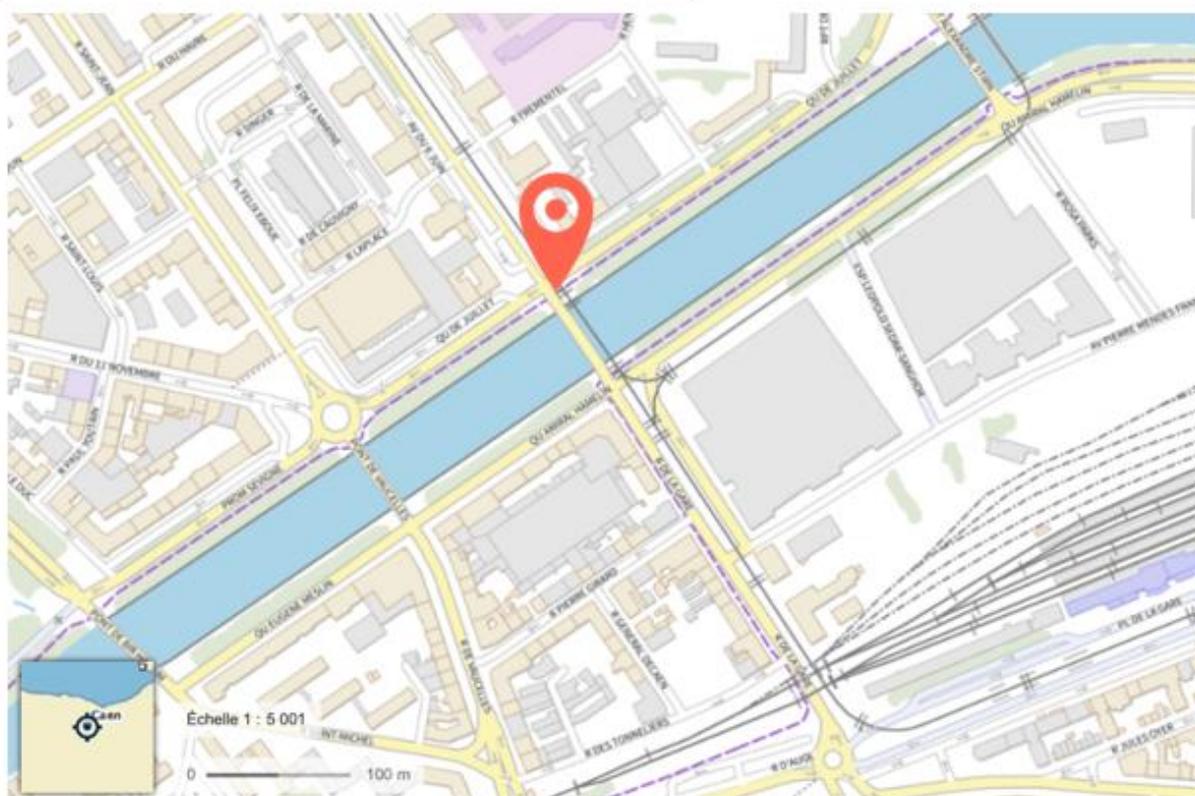
Pression atmosphérique $\pm 0,2$ hPa

Rayonnement global $\pm 6\%$ du quotidien



Annexe 6 : Fiche station du Pont Winston Churchill

<p>FICHE STATION</p> <p>Nom de la station : </p> <p>Station METEOHELIX n°5</p> <p>Pont Winston Churchill, Caen</p>  <p>UMR6266 CNRS Normandie Université</p>	<p>LOCALISATION</p> <p>Département : CALVADOS (14)</p> <p>Commune : CAEN (14000)</p> <p>Lieu-dit : Pont Winston Churchill</p> <p>Latitude : 49,17823°N</p> <p>Longitude : 0,35314°O</p> <p>Altitude : 6 m</p> <p>Date d'installation : 09/04/2022</p>
--	---



Station météo de type METEOHELIX IOT Sigfox

Température $\pm 0,2$ T°C

Humidité $\pm 1,8$ %

Pression atmosphérique $\pm 0,2$ hPa

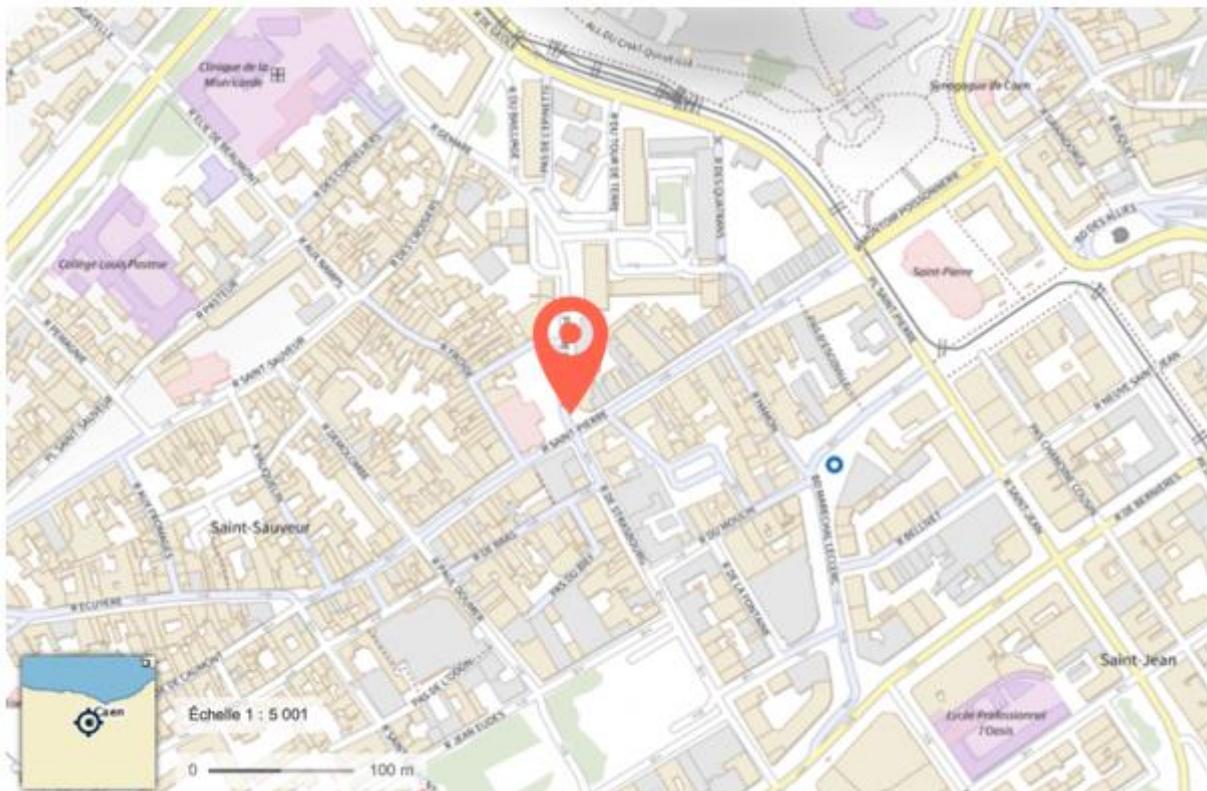
Rayonnement global $\pm 6\%$ du quotidien



Annexe 7 : Fiche station de la Place Pierre-Bouchard

FICHE STATION	LOCALISATION
Nom de la station :	Département : CALVADOS (14)
Station METEOHELIX n°6	Commune : CAEN (14000)
Place Pierre Bouchard	Lieu-dit : Place Pierre Bouchard
Caen	Latitude : 49,18315°N
	Longitude : 0,36419°O
	Altitude : 6 m
	Date d'installation : 09/04/2022


UMR6266 CNRS Normandie Université



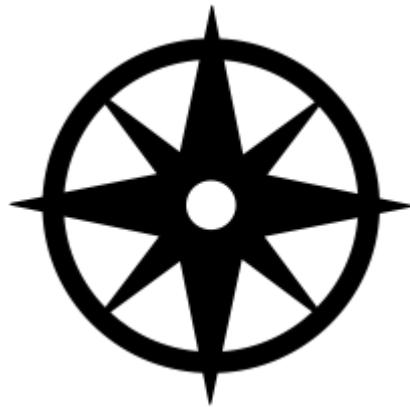
Station météo de type METEOHELIX IOT Sigfox

Température $\pm 0,2$ T°C

Humidité $\pm 1,8$ %

Pression atmosphérique $\pm 0,2$ hPa

Rayonnement global $\pm 6\%$ du quotidien



Annexe 8 : Fiche station de la Prairie (Boulevard du Petit Vallerent)

FICHE STATION

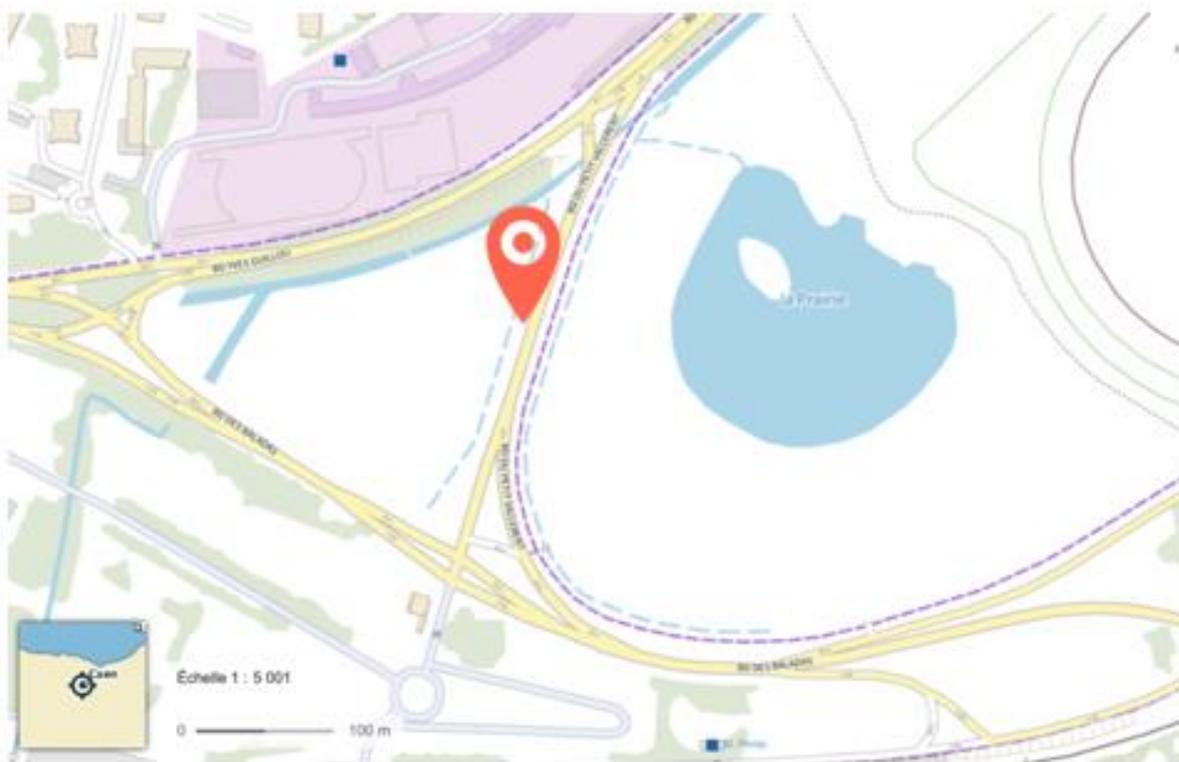
Nom de la station :

Station METEOHELIX n°7

Boulevard du Petit Vallerent (Prairie)

Caen

ides



Station météo de type METEOHELIX IOT Sigfox

Précision :

Température $\pm 0,2$ T°C

Humidité $\pm 1,8$ %

Pression atmosphérique $\pm 0,2$ hPa

Rayonnement global $\pm 6\%$ du quotidien



Annexe 9 : Fiche station de la station située à côté de l'Université de Caen (Avenue d'Edimbourg)

<p>FICHE STATION</p> <p>Nom de la station :</p> <p>Station METEOHELIX n°8</p> <p>Avenue d'Edimbourg</p> <p>Caen</p>  <p>UMR6266 CNRS Normandie Université</p>	<p>LOCALISATION</p> <p>Département : CALVADOS (14)</p> <p>Commune : CAEN (14000)</p> <p>Lieu-dit : Avenue d'Edimbourg</p> <p>Latitude : 49,19048°N</p> <p>Longitude : 0,36113°O</p> <p>Altitude : 31 m</p> <p>Date d'installation : 09/04/2022</p>
---	--



<p>Station météo de type METEOHELIX IOT Sigfox</p> <p>Précision :</p> <p>Température $\pm 0,2$ T°C</p> <p>Humidité $\pm 1,8$ %</p> <p>Pression atmosphérique $\pm 0,2$ hPa</p> <p>Rayonnement global $\pm 6\%$ du quotidien</p>



Résumé

L'îlot de chaleur urbain est une modification locale du climat. C'est l'une des principales composantes du climat urbain. Ce phénomène correspond à une augmentation des températures en ville en comparaison à l'espace rural environnant. Le développement des surfaces imperméables en est la cause principale. La chaleur est emmagasinée dans les matériaux de construction pendant la journée, puis restituée pendant la nuit, provoquant ces écarts de températures. Ce phénomène est plus important le soir après de fortes chaleurs. Ceci impacte les conditions de vie de la population et multiplie les désagréments chez les personnes les plus à risque en période de fortes chaleurs.

Cette étude n'est que le début d'une étude plus large sur le sujet de l'îlot de chaleur urbain caennais. Afin de mesurer ce phénomène, nous avons déployé un réseau de huit stations expérimentales qui nous a permis d'évaluer l'intensité de l'îlot de chaleur. Les emplacements ont été sélectionnés grâce à une étude au préalable sur l'occupation du sol et l'étude du climat. L'étude de la modélisation de l'ICU nous a conforté dans le choix de l'implantation des sites. Ainsi, malgré son contexte climatique défavorable à la création d'écarts de températures, nous avons pu remarquer que le phénomène d'ICU est présent dans le centre-ville. Des écarts parfois supérieurs à 4°C ont été mesurés. Dans un contexte d'élévation des températures, l'ICU de Caen risque d'être plus important que dans le passé. La multiplication des fortes chaleurs nous expose à un risque à prendre en considération dans l'aménagement des villes de demain.

Mots clés : Ilot de chaleur urbain, nature en ville, changement climatique, station météorologique expérimentale, Caen la mer, climat urbain

The urban heat island is a local modification of the climate. It is one of the main components of the urban climate. This phenomenon is an increase in temperatures in urban landscapes compared to the surrounding rural area. The development of impermeable surfaces is the cause. Heat is stored in building materials during the day and restored during the night, causing these temperature differences. This phenomenon is more important in the evening after strong heat. This leads to a multiplication of inconveniences for those most at risk.

This study is the beginning of a larger study on the subject of the Caen urban heat island. In order to measure this phenomenon, we deployed a network of 8 experimental stations which allowed us to assess the intensity of the heat island. The locations were selected thanks to a preliminary study on the occupation of the ground and the study of the climate. The study of the modeling of the urban heat island confirmed our choice of the location of the sites. Despite its topo climatic context that is not very favorable to the creation of the urban heat island, we have noticed that this phenomenon is very present in the city center. Deviations sometimes greater than 4°C have been measured. In a context of rising temperatures, Caen heat island seems to be more important than in the past. The proliferation of high temperatures exposes us to risk to be taken into consideration in the development of cities of tomorrow.

Key words: urban heat island, nature in the city, climate change, experimental weather station, Caen la Mer, urban climate.