



HAL
open science

Lutter contre la surchauffe urbaine : analyse du pouvoir rafraichissant des espaces verts dans l'agglomération caennaise

Céline Zangerl

► To cite this version:

Céline Zangerl. Lutter contre la surchauffe urbaine : analyse du pouvoir rafraichissant des espaces verts dans l'agglomération caennaise. Géographie. 2024. dumas-04818209

HAL Id: dumas-04818209

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04818209v1>

Submitted on 4 Dec 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Mémoire de recherche

Lutter contre la surchauffe urbaine

*Analyse du pouvoir rafraichissant des espaces verts dans
l'agglomération caennaise*

Céline Zangerl

*M1 GAED Parcours Environnement, Risques et Diagnostics
territoriaux - UFR SEGGAT*

Sous la direction de **Olivier Cantat**

*Enseignant-chercheur et géographe-climatologue
Laboratoire IDEES – UMR 6266*

Soutenu le 5 septembre 2024



Remerciements

Ce mémoire est le fruit d'un travail mené sur presque 9 mois qui n'aurait pas été possible sans un certain nombre de personnes que je tiens à remercier ici.

Premièrement, je remercie mon professeur-référent, M. Olivier Cantat, géographe-climatologue au laboratoire IDDES de l'Université de Caen Normandie, pour sa confiance en moi, son soutien et sa disponibilité. Grâce aux longs échanges que nous avons pu mener autour des questions de climatologie urbaine, de méthodologie mais également sur mes futurs projets professionnels, il a réussi à me donner confiance en moi et a ainsi largement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

De plus, je tiens à remercier toute l'équipe de recherche du laboratoire IDEES d'avoir répondu à mes questions en complément de mon encadrant et de m'avoir prêté le matériel nécessaire à la réalisation des campagnes de mesures.

Je remercie également toute l'équipe de la bibliothèque cartothèque de l'UFR SEGGAT pour leur aide précieuse dans la recherche bibliographique, leur patience et leur indulgence concernant les retards de retour de livre.

Les innombrables heures passées à la bibliothèque n'auraient pas été aussi agréables sans mes camarades de M1 qui ont toujours su m'aider et égayer mes journées. Plus précisément, j'aimerais mentionner Lucas, avec qui j'ai pu échanger sur les méthodes et les analyses des ICU, ainsi que Léa, qui a été une amie précieuse pendant toute cette période. Mais avant tout, je remercie Guillaume et Martin qui ont été très engagés dans les différentes campagnes de mesures. Sans leur disponibilité et leur soutien, ce mémoire aurait certainement été bien moins réussi.

Finalement, certaines personnes méritent une reconnaissance particulière. Je remercie donc mes parents qui, bien qu'ils soient très loin, ont toujours su être là pour me soutenir. Pour finir, j'aimerais remercier profondément mon conjoint. Pendant tous ces mois de travail, il a su se montrer patient, compréhensif et a fait tout son possible pour me permettre d'écrire ce mémoire dans les meilleures conditions. Sans lui, je ne serai probablement pas là où j'en suis aujourd'hui.

Sommaire

Introduction générale	2
Partie I – L'étude du climat des villes – un sujet récent et complexe	5
1) Qu'est-ce que la climatologie urbaine ?.....	5
2) La complexité de l'étude du climat urbain– un phénomène multi-facteurs et multi-échelles.....	9
3) La chaleur en ville – un réel problème de santé publique.....	29
4) Conclusion de la partie I	33
Partie II – Après la chaleur, la quête de la fraîcheur en ville.....	34
1) Quelles approches pour le rafraîchissement urbain ?	34
2) Les différentes formes de la végétation urbaine	38
3) Les parcs urbains – des îlots de fraîcheur à fort potentiel rafraichissant	42
4) Conclusion de la partie II	50
Partie III – L'agglomération caennaise – présentation de la zone d'étude.....	51
1) Caractéristiques démographiques et situation géographique.....	51
2) Topographie	52
3) Occupation du sol	54
4) Espaces verts de l'agglomération caennaise.....	57
5) Climat régional.....	77
6) Conclusion de la partie III	80
Partie IV – L'étude du climat caennais – îlots de chaleur et îlots de fraîcheur	81
1) Méthodologie	82
2) Résultats de l'étude des ICU	93
3) Résultats de l'étude des IFU.....	111
Partie V – La végétalisation des villes : un moyen efficace pour lutter contre la chaleur en ville	182
1) Les projets de végétalisation de l'espace urbain en France et à l'international	182
2) Les projets d'aménagement à Caen	197
3) Conclusion	203
Conclusion générale	205
Table des figures.....	209
Bibliographie.....	212

Introduction générale

Le changement climatique montre bien ses premières conséquences sur l'environnement. Les dernières années ont été marquées par un grand nombre d'événements extrêmes et d'années records en France et dans le monde entier. Sur le « podium » des années les plus chaudes enregistrées en France depuis le début du XXème siècle, on retrouve respectivement les années 2020, 2023 et 2022 (moyenne annuelle de 14,5°C) (Météo France, 2023). Ces moyennes déjà alarmantes cachent des écarts saisonniers à la normale d'autant plus impressionnants, comme lors de l'été 2022, où les mois de juin, juillet et août ont affiché une température de 2,3°C au-dessus de la moyenne et un nombre record en termes de jours de chaleur (Observatoire des forêt françaises, 2022). De plus, il semble que les températures élevées surviennent à la fois de plus en plus tôt et de plus en plus tard dans l'année. Le week-end du 12 au 14 avril 2024 témoigne d'une situation exceptionnelle, avec une température moyenne pour la France métropolitaine de 17,9°C et des températures au-delà des 30°C dans le sud du pays (Météo France, 2024). A cela s'ajoutent les épisodes de canicule, définis comme des périodes d'au moins 3 jours où l'on observe des températures élevées de jours comme de nuit (Météo France, 2023), qui devraient se multiplier, s'intensifier et s'étendre sur des périodes plus longues selon les prévisions des climatologues, notamment du GIEC normand (GIEC Normand, 2023). Pour résumer : la chaleur deviendra une préoccupation de plus en plus importante pour les populations.

Les villes n'ont pas cessé de grandir depuis la révolution industrielle et sont à la fois en partie responsables du changement climatique et les premières touchées par ses conséquences. Selon les données de l'INSEE pour l'année 2020 (INSEE, 2021), environ 50% de la population française vit dans une agglomération de plus de 100.000 habitants. En concentrant un grand nombre d'habitants, d'activités et d'infrastructures, les villes apparaissent alors comme des espaces particulièrement vulnérables, notamment à l'effet d'îlot de chaleur urbain, un phénomène qui décrit une situation de surchauffe urbaine, lorsque les températures observées en ville sont plus élevées que celles des campagnes environnantes. Cette situation peut s'avérer particulièrement dangereuse pour la population urbaine lors des épisodes de canicule, comme le montrent les chiffres de surmortalité lors de la canicule d'août 2003, où l'INSERM a observé une augmentation de la mortalité de 60% par rapport aux normales (Santé publique France, 2004). Les conséquences du changement climatique, qui se ressentent dès aujourd'hui, mettent les villes au défi de l'adaptation, notamment via l'aménagement du territoire. La végétation, par le mécanisme d'évapotranspiration et par l'ombrage qu'elle peut apporter, prend alors une place importante dans la lutte contre les îlots de chaleur, mais également dans la création d'îlots de fraîcheur (IFU) capables de représenter des points de fraîcheur pour les habitants de la ville lorsque la chaleur devient trop intense.

A Caen, un réseau de stations météorologiques mis en place en avril 2022 par le laboratoire IDEES de l'Université de Caen sous l'initiative du géographe-climatologue et enseignant-chercheur Olivier Cantat a comme objectif la caractérisation du climat urbain et l'étude du phénomène d'îlot de chaleur (ICU). Les données issues de ce réseau ont permis d'identifier l'existence d'un ICU pouvant parfois dépasser les 6°C entre le cœur de la ville et la campagne proche. Bien que le climat de la région soit réputé pour sa météo pluvieuse et venteuse, les données récoltées par ce réseau et les projections du climat futur de la Normandie à l'horizon 2050 montrent clairement que la surchauffe urbaine présente un réel risque pour la population caennaise.

Ce mémoire se consacre alors aux îlots de fraîcheurs et plus largement à la lutte contre la surchauffe urbaine par le biais de la végétation, avec une attention particulière portée aux parcs urbains de l'agglomération caennaise. Il existe un grand nombre d'espaces verts de type, de taille, de forme et de configuration différente qui, selon l'hypothèse où l'évapotranspiration et l'ombrage ont un effet régulateur sur la température de l'air, devraient présenter des dynamiques thermiques différentes de celles observées dans des espaces minéraux de cœur de ville.

Dans un premier temps, ce mémoire présentera les fondements théoriques de la climatologie urbaine. Après une brève présentation de l'histoire de la discipline, la première partie définira la notion de l'îlot de chaleur urbain (ICU) ainsi que les processus physiques à l'origine de ce phénomène. Puis, l'attention sera portée sur le sujet principal de ce mémoire, qui est l'étude des dynamiques thermiques des espaces verts ainsi que leur capacité à constituer des espaces de fraîcheur intra-urbains. Cet état de l'art présentera les hypothèses et les résultats obtenus par des chercheurs français et internationaux concernant l'étude des îlots de fraîcheur urbains (IFU) et proposera une définition de ces derniers applicable dans ce mémoire.

Dans un deuxième temps, il sera question d'exposer les résultats de l'analyse des ICU et des IFU dans l'agglomération caennaise. La troisième partie de ce mémoire présentera donc la zone d'étude en se concentrant sur la topographie, l'occupation du sol, les espaces verts et le climat régional. La partie IV constitue le cœur de ce mémoire. Après avoir décrit la méthodologie appliquée pour la récolte et l'analyse des données, l'attention sera portée sur les résultats en détail de l'étude des ICU et des IFU dans l'agglomération caennaise.

Finalement, une dernière partie fera l'objet d'un tour d'horizon de quelques exemples de projets d'aménagements et de mesures prises en France et en Europe dans le cadre de la lutte contre la chaleur en ville par le biais de la végétation urbaine. Pour finir, il sera question des projets d'aménagement en cours à Caen intégrant la végétalisation de l'espace urbain et leur potentiel impact sur les températures de l'air.

Partie I – L'étude du climat des villes – un sujet récent et complexe

L'îlot de chaleur urbain (ICU) est un phénomène aujourd'hui bien étudié et qui constitue l'origine du développement de la discipline de la climatologie urbaine. Il s'agit, comme mentionné en introduction, d'un phénomène de surchauffe urbaine caractérisé par des températures plus élevées en ville que dans les campagnes environnantes (Terrin, 2015). Les recherches menées depuis plusieurs décennies sur les ICU ont révélé la complexité de ce phénomène, représentant bien plus qu'une simple opposition ville/campagne (Stewart & Oke, 2012). Les ICU sont des phénomènes variables à plusieurs échelles spatiales et temporelles et leur intensité dépend d'un grand nombre de facteurs dynamiques (ensoleillement, force et direction du vent, ...) et statiques (situation géographique, topographie, morphologie urbaine, matériaux de construction, ...).

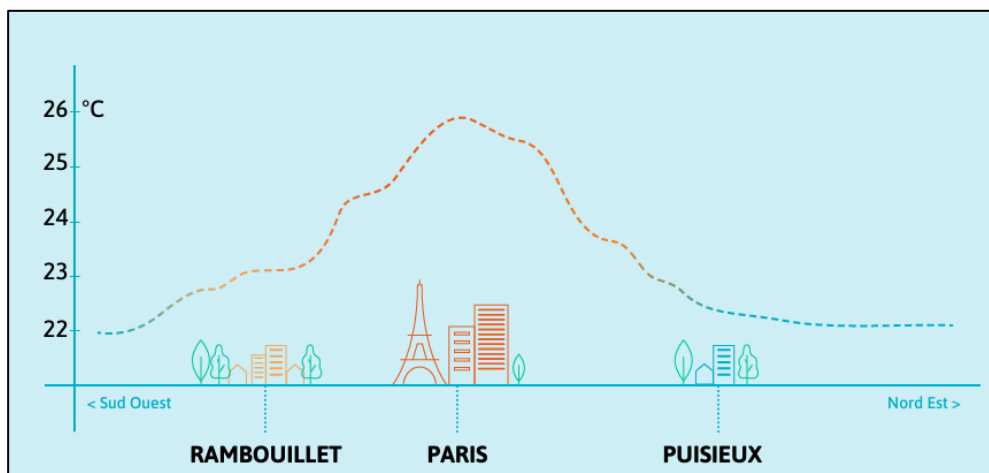


Figure 1: Exemple d'un îlot de chaleur urbain dans l'agglomération parisienne - (Agence Parisienne du Climat, 2024)

Cette partie se consacrera à une brève description de l'histoire de la climatologie urbaine en tant que discipline, ses évolutions ainsi que l'identification de chercheurs qui ont marqué son histoire. Les différents facteurs ainsi que les processus physiques à l'origine de l'intensité et la variabilité spatiale et temporelle des ICU seront ensuite exposés.

1) Qu'est-ce que la climatologie urbaine ?

La climatologie urbaine est une branche récente de la climatologie (Mills, 2014). Cette discipline est basée sur le constat que les villes modifient localement les propriétés de l'atmosphère proche du sol, que ce soit en termes de température, d'humidité de l'air, de circulation des flux d'air ou de charge en particules. Depuis toujours, l'homme a modifié son environnement afin de l'adapter à ses besoins. Nombreux sont les exemples de villes anciennes qui ont su, par l'aménagement du territoire, se construire en composant avec l'environnement et s'adapter aux milieux marqués par la chaleur, que

ce soit par l'implantation sur les versants, l'aménagement de patio ombragés ou par le choix de couleur des bâtiments comme le montre le fameux exemple de l'archipel grec de Santorini (Cravero, 2023). Bien que la chaleur en ville soit un phénomène avec lequel on a composé pendant des siècles, l'étude du climat urbain par les scientifiques a débuté au 19^{ème} siècle, notamment en lien avec les révolutions industrielles et l'arrivée massive de populations dans les villes qui en a découlé.

Ayant comme objet d'étude les échanges entre l'atmosphère et la surface terrestre urbanisée, la climatologie urbaine intègre des notions et des méthodes de plusieurs disciplines dont la météorologie, la climatologie mais également l'hydrologie, l'architecture, l'urbanisme et bien entendu la géographie. L'urbanisation accélérée ainsi que le développement des technologies et les préoccupations environnementales grandissantes ont contribué à multiplier les recherches en climatologie urbaine durant les dernières décennies pour en faire une science aujourd'hui bien établie. Le retour historique sur le développement de la discipline qui suit se réfère à l'article publiée en 2014 par G. Mills à ce sujet (Mills, 2014).

En 1833, Luke Howard est le premier chercheur à mesurer des différences de température entre le centre-ville de Londres et sa campagne proche grâce aux données issues de deux stations météorologiques maintenues pendant 26 ans. Dans son ouvrage *The Climate of London*, il conclut alors que la ville, par la présence de la population et de ses activités, contribue à réchauffer la couche de l'atmosphère la plus proche du sol (Howard, 1833). Ce travail est aujourd'hui considéré comme étant à l'origine de la discipline de la climatologie urbaine et comme étant le premier à avoir documenté un effet d'îlot de chaleur urbain (ICU).

A partir des années 1900, on observe une multiplication des études sur le climat urbain, portées notamment par des chercheurs allemands comme Geiger (1927) ou encore Kratzel (1937). Cette période est marquée par une approche descriptive du climat urbain, ce qui implique des travaux importants sur la méthodologie de la mesure des propriétés atmosphériques comme la mise en place de réseaux de stations météorologiques ou le développement des méthodes de transect. Les méthodologies mises en place étant différentes selon les études, la généralisation et la transposition des résultats d'une ville à une autre est donc encore difficile. Néanmoins, on peut ici mentionner les travaux de Timothy R. Oke (1973, 1981), professeur émérite de l'Université de Colombie-Britannique (Canada) et expert en climatologie urbaine, qui tentent de démontrer un lien entre la taille d'une ville, d'abord caractérisée par sa population puis par sa géométrie, et son influence sur le climat urbain en Amérique du Nord.

Durant la fin du XXème siècle, on observe un changement d'approche dans la discipline passant de la simple description du phénomène à une approche systémique telle qu'elle est pratiquée en géographie physique. L'attention est alors portée sur l'étude des échanges thermiques entre l'atmosphère et la ville afin de comprendre les processus physiques à l'origine du climat urbain. Ces échanges ne pouvant pas être mesurés directement par des instruments, les avancées technologiques ont permis aux chercheurs de développer les premières méthodes de calculs de ces échanges à partir des données empiriques et plus tard de développer des modèles de simulations largement utilisés aujourd'hui.

Le développement des approches systémiques révèle alors la complexité de l'étude du climat urbain liée à l'imbrication des phénomènes physiques influençant l'atmosphère à différentes échelles. Oke, dans son ouvrage intitulé *Boundary Layer Climates* (Oke T. R., 1978), apporte des précisions sur les couches atmosphériques et les phénomènes physiques agissant à chacune des échelles verticales. Il définit le concept de la canopée urbaine comme la couche atmosphérique la plus proche du sol, située entre la surface du sol et la hauteur moyenne des bâtiments, qui est sous l'influence de processus régissant à une échelle micro comme les échanges radiatifs entre l'air et les bâtiments. En 1977, Oke et Nunez définissent également un cadre pour étudier ces échanges à l'intérieur de la canopée urbaine. Il s'agit du canyon urbain qui est décrit par le ratio entre la hauteur des bâtiments et la distance qui les sépare. De plus, l'utilisation d'indicateurs tels que le « sky view factor » (SVF), qui décrit la proportion des radiations reçues par un point donné par rapport aux radiations totales émises par la demi-sphère du ciel, devient de plus en plus courante afin de faciliter la comparaison des résultats d'une ville à une autre. On peut également mentionner en ce sens des travaux plus récents comme celui de Stewart et Oke sur les *Local Climate Zones* (Stewart & Oke, 2012). Ces zones permettent de classer à une échelle de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres des zones homogènes en termes d'occupation du sol, de types de matériaux et d'activité humaine caractéristiques d'un certain régime thermique. Cette classification étant simplificatrice et ne représentant donc pas la réalité du terrain, elle ne peut suffire à l'analyse du climat urbain ou à la détection d'îlot de chaleur. Néanmoins, elle constitue un outil important dans l'étude du climat urbain et est largement utilisée dans les travaux actuels.

Aujourd'hui, un grand nombre de villes à travers le monde entier ont fait l'objet de recherches sur le climat urbain. Toutes ces recherches ont permis de démontrer la complexité de l'étude des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains. La compréhension de l'imbrication des différentes échelles spatio-temporelles et donc l'analyse systémique des phénomènes constitue la clé de compréhension de l'étude du climat urbain. Cette lecture de l'espace sous forme de géosystème montre que ce sujet est profondément géographique et prouve donc le rôle indispensable du géographe dans ce genre

d'analyse spatiale. Timothy Oke, qui est considéré aujourd'hui comme une référence mondiale en climatologie urbaine, est lui-même professeur émérite en géographie, tout comme son collègue Iain Stewart avec lequel il a réalisé de nombreux travaux en climatologie urbaine. En France, on peut mentionner des travaux menés dans différentes agglomérations, comme les travaux à Rennes menés par Hervé Quenol, directeur de recherches au CNRS et chercheur au sein du laboratoire Littoral – Environnement – Télédétection – Géomatique de l'Université de Rennes, qui ont notamment porté sur l'étude des ICU à Rennes sur 16 années d'observations entre 2004 et 2019 (Dubreuil, Foissard, Nabucet, Thomas, & Quenol, 2020). De l'autre côté de la France métropolitaine, des travaux sur les îlots de chaleur à Strasbourg ont été menés par l'équipe de recherche de la faculté de géographie et aménagement autour de Pierre Kastendeutsch (Kastendeutsch, Najjar, Lacarrere, & Colin, 2010). Bien qu'il s'agisse d'une science dont le sujet est très propice à la transdisciplinarité, le géographe apparaît comme le plus à même d'apporter cette vision systémique de l'écosystème que forme la ville.

L'arrivée des préoccupations autour de l'atténuation du changement climatique et l'adaptation de nos sociétés et de nos villes à ce dernier renforcent d'autant plus l'importance accordée à l'étude du climat urbain et fait émerger de nombreux projets, notamment dans les villes françaises. Les équipes de recherches, de plus en plus multidisciplinaires, tentent de saisir les spécificités du fonctionnement climatique de chaque ville par le développement de modèles de simulations ou encore l'étude des trames vertes et bleues pour leur potentiel de rafraîchissement de l'air. C'est dans cette nouvelle tendance que s'inscrit l'étude des îlots de fraîcheur et l'importance accordée à la nature en ville. A ce titre, on peut mentionner le projet VegDUD mené entre 2007 et 2014 qui vise à rassembler les savoirs et les compétences autour de la recherche sur les impacts de la végétation sur tout l'écosystème urbain (Plante & Cité, 2014). Chaque ville présente des caractéristiques différentes qui ont le pouvoir de modifier localement les conditions climatiques. Il existe donc autant de climats urbains qu'il existe de villes, d'où l'importance d'étudier précisément le phénomène pour un endroit donné. Le but de ce mémoire est donc de contribuer à la recherche sur la végétation urbaine dans le cadre de l'atténuation des îlots de chaleur et de l'adaptation des villes aux conséquences du changement climatique en intégrant des solutions fondées sur la nature.

2) La complexité de l'étude du climat urbain – un phénomène multi-facteurs et multi-échelles

Comme mentionné en entrée, l'étude du climat des villes est un sujet particulièrement complexe. La ville est composée d'un grand nombre de surfaces qui interagissent avec les différentes couches de l'atmosphère. Chaque surface possède des caractéristiques radiatives, thermiques, d'humidité et d'aérodynamisme différentes qui influencent le bilan thermique de la ville à plusieurs échelles allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de kilomètres (bâtiment, rue, quartier jusqu'à la ville entière) (Oke, Mills, Christen, & Voogt, 2017). En général, les villes présentent des conditions de surfaces plus rugueuses, plus chaudes et plus sèches que celles que l'on retrouve dans des espaces extérieurs à la ville. Ces conditions de surface sont à l'origine du phénomène d'ICU.

En plus de la morphologie urbaine sous forme des différents types d'occupations du sol, la situation géographique d'une ville constitue également un paramètre fixe qui influence le climat urbain. Ces paramètres fixes sont couplés à des paramètres dynamiques dont l'importance est fondamentale dans la formation des îlots de chaleur et de fraîcheurs urbains. On parle alors des types de temps calmes et claires, autrement dit des conditions météorologiques marquées par un vent faible et un ciel dégagé de jour comme de nuit. La combinaison des paramètres fixes et des paramètres dynamiques favorables conditionne alors la variabilité spatiale et temporelle des phénomènes d'ICU et d'IFU (Sturman & Quenol, 2024).

2.1) Le système terre-atmosphère – une interaction constante

Avant d'évoquer plus en détail les paramètres fixes et dynamiques à l'origine du climat urbain, il semble nécessaire de rappeler le fonctionnement de l'atmosphère et ses différentes couches influencées par la présence de la ville. La compréhension du fonctionnement de l'atmosphère proche du sol est nécessaire pour saisir les différentes échelles spatiales auxquelles sont étudiés les phénomènes d'ICU et d'IFU. Ces dernières sont explicitées dans l'ouvrage *Urban Climates* de Oke, Mills, Christen et Voogt (2017) qui constitue la base des explications ci-dessous (Oke, Mills, Christen, & Voogt, 2017).

La couche atmosphérique qui intéresse avant tout la climatologie urbaine est celle qui se situe au contact du sol et qui est donc sensible aux conditions de surface (rugosité, échanges thermiques, etc.). Cette dernière est appelée la **couche limite atmosphérique (CLA)**. Son épaisseur est comprise entre 100 m et 3.000 m selon les moments de la journée. Les caractéristiques de la couche limite atmosphérique telles que la température, l'humidité de l'air ou encore la direction et la vitesse du vent sont alors différentes de celles observées en altitude, dans **l'atmosphère libre**, où les effets de surface

sont considérés comme négligeables. Néanmoins, l'atmosphère libre joue un rôle considérable dans l'apparition des ICU/IFU puisque c'est ici que se forment les conditions météorologiques favorables ou non à leur apparition.

Les espaces urbains, par leurs conditions de surface différentes de celles observées à l'extérieur de la ville, modifient donc localement les propriétés de la CLA. Cette CLA modifiée est appelée la **couche limite urbaine (CLU)** (*urban boundary layer – UBL*). Lorsque le vent est très faible voire absent, cette couche prend la forme d'un dôme d'air chaud au-dessus de la ville (figure 2 (a)) et est marquée par des mouvements ascendants liés au réchauffement de l'air. Cette situation peut alors mener à un appel d'air plus frais provenant de la campagne. A l'inverse, lorsque le vent est présent, la couche limite urbaine prend la forme d'un panache (*urban plume*) qui s'étend dans le sens du vent, au-dessus de la couche limite rurale (*rural boundary layer – Rural BL*), parfois sur plusieurs dizaines de kilomètres (figure 2 (b)).

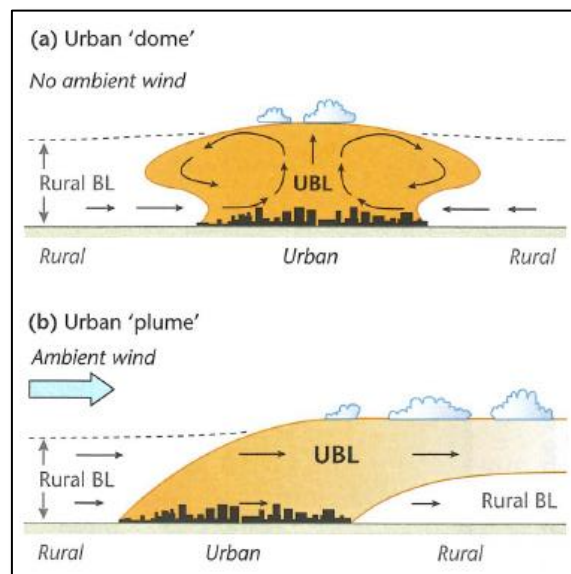


Figure 2: Schéma d'un dôme urbain et d'un panache urbain - (Oke, Mills, Christen, & Voogt, 2017)

La **couche limite urbaine (CLU)**, où l'on observe des modifications à l'échelle d'une ville entière, peut être divisée en plusieurs couches selon leur degré de sensibilité aux conditions de surface et l'échelle des phénomènes observés. Ces différentes couches et sous-couches sont représentées sur le schéma ci-dessous (figure 3).

En altitude, on parle de la **couche mixed/couche de mélange (mixed layer)**. Elle représente environ 90% de la couche limite urbaine. Comme son nom l'indique, les propriétés atmosphériques comme la température, l'humidité de l'air, la direction et la force du vent y sont homogénéisées et donc constantes, mais on y observe des flux d'air horizontaux importants liés au phénomène de convection (Hufty, 2001).

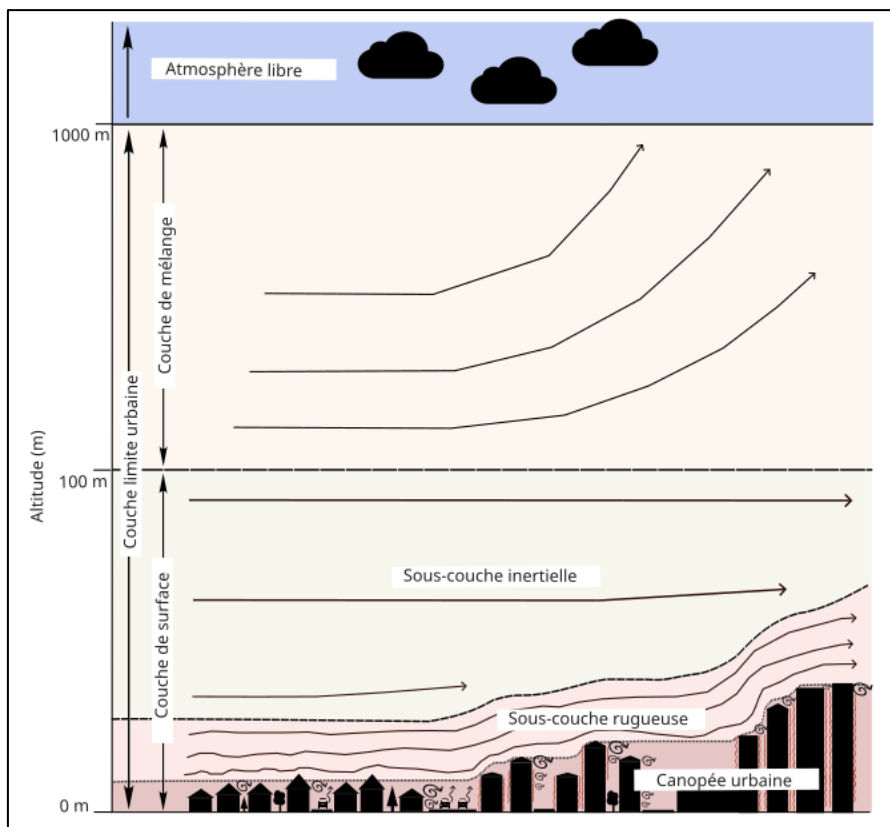


Figure 3: Schéma représentant les différentes couches et sous-couches de la couche limite urbaine (CLU) - Réalisation : C. Zangerl

La **couche de surface** occupe les 10% les plus proches du sol de la CLU. Cette couche est sensible à la rugosité engendrée par les éléments de la ville et aux échanges thermiques entre la surface et l'atmosphère. Elle peut à son tour être divisée en deux sous-couches : la **sous-couche inertielle** (*inertial sublayer*) et la **sous-couche rugueuse** (*roughness sublayer*).

La **sous-couche inertielle** est marquée par les effets des conditions de surface à l'échelle d'un quartier urbain, comme la modification de la direction du vent et la diminution de sa vitesse liée à la présence des bâtiments ou aux phénomènes de convection. Dans la **sous-couche rugueuse**, qui s'étend sur environ 2-5 fois la hauteur des bâtiments, les modifications de la force et de la direction des flux d'air sont directement liées à la présence des éléments urbains et aux échanges thermiques. C'est dans cette sous-couche que l'on observe les phénomènes microclimatiques.

La partie la plus proche de la surface terrestre, comprise entre le sol et la hauteur moyenne des bâtiments, est appelée la **canopée urbaine**. On y observe des phénomènes de cisaillement et d'échange thermiques entre les matériaux et l'air à une échelle micro (bâtiment, canyon urbain) avec des variations spatiales et temporelles importantes. Cette couche est représentative du climat vécu par la population et des microclimats urbains.

Nom de la couche	Définition	Etendue verticale
Atmosphère libre (Free atmosphere)	Partie de la troposphère située au-dessus de la couche limite atmosphérique/urbaine où l'influence des conditions de surface est négligeable	Entre CLU (100m – 3.000m) et la tropopause (8 – 15 km)
Couche limite urbaine (CLU) (Urban boundary layer)	Couche atmosphérique la plus proche du sol directement influencée par les conditions de surface	De la surface terrestre jusqu'à 100 m – 3.000 m selon les moments de la journée
Couche de mélange (Mixed layer)	Environ 90% de la CLU dans laquelle les propriétés atmosphériques sont homogénéisés	Entre la couche de surface et la limite supérieure de la CLU
Couche de surface (Surface layer)	Les 10% inférieurs de la CLU sous influence directe des caractéristiques de surface	Entre la surface terrestre et la couche de mélange
Sous-couche inertielle (inertial sublayer)	Partie supérieure de la couche de surface où les flux d'air répondent aux effets des conditions de surface à l'échelle d'un quartier urbain	Entre la sous-couche rugueuse et la limite supérieure de la couche de surface
Sous-couche rugueuse (roughness sublayer)	Partie inférieure de la couche de surface sensible aux conditions de surface	Entre la surface du sol et 2-5 fois la hauteur des bâtiments
Canopée urbaine (urban canopy)	Partie inférieure de la sous-couche rugueuse particulièrement influencée par les conditions de surface	Entre la surface du sol et la hauteur moyenne des bâtiments

Figure 4: Tableau récapitulatif des différentes couches et sous-couches de la couche limite urbaine (CLU)
Réalisation : C. Zangerl

La composition de la couche limite urbaine en plusieurs couches et sous-couches en constante interrelation montre bien l'importance de saisir l'imbrication des différentes échelles spatiales pour l'étude du climat urbain. Certains paramètres apparaissent plus importants à une certaine échelle. Les propriétés thermiques d'un matériau par exemple vont exercer une influence forte sur le stockage et la restitution de la chaleur et donc sur la température de l'air à l'échelle d'une rue, mais cet effet sera homogénéisé à l'échelle d'un quartier et exercera donc une influence indirecte sur les propriétés de la couche atmosphérique plus en altitude. La définition même de l'ICU dépend donc de l'échelle à laquelle on situe son analyse. Pour cela, les travaux récents de Oke, Mills, Christen et Voogt proposent des définitions de l'ICU pour chacune des échelles d'observation. Ils évoquent par exemple les ICU de surface en prenant en compte uniquement les températures de surface, les ICU de la canopée urbaine qui s'étudient à l'échelle d'une rue représentant les microclimats ou encore les ICU à l'échelle de la ville mesurés à une altitude plus importante (Oke, Mills, Christen, & Voogt, 2017).

L'étude des îlots de fraîcheur urbains quant à eux s'opère principalement à l'échelle d'une rue ou d'un quartier et concernent donc avant tout les températures dans la canopée urbaine. La végétation urbaine n'a en effet pas vocation à modifier les températures à l'échelle de la ville, mais de bien proposer des points frais perceptibles par la population. Les analyses effectuées dans le cadre de ce mémoire concernant l'étude des ICU et des IFU caennais sont basées sur des données relevées à une altitude de 3m au-dessus du sol et se situent donc à l'échelle de la canopée urbaine. Néanmoins, selon l'ouverture de l'espace dans lequel la station est située, on peut en déduire les conditions à l'échelle d'un quartier. Ainsi, les analyses présentées dans ce mémoire se font à deux échelles différentes selon les espaces étudiés, qui sont donc les échelles du microclimat et du topoclimat.

2.2) Le bilan énergétique des espaces urbains

L'existence du climat urbain et des phénomènes d'ICU et d'IFU est le résultat de la modification du bilan énergétique local. Il décrit les échanges énergétiques entre la surface du sol et l'atmosphère. Le bilan énergétique à l'équilibre s'écrit de la manière suivante (Guyot, 1999):

$$H^* + Q_s + Q_h + L * Q_w = 0$$

$$H^* = \text{rayonnement net}$$

$$Q_s = \text{densité de flux de chaleur par conduction dans le sol}$$

$$Q_h = \text{densité de flux convectif de la chaleur dans l'air}$$

$$Q_w = \text{densité de flux convectif de vapeur d'eau}$$

$$L = \text{chaleur latente de vaporisation de l'eau}$$

Cette équation exprime les apports et les pertes de chaleur dans un système à l'équilibre, c'est-à-dire dans un système où les apports d'énergie sont égaux aux pertes. Le rayonnement net correspond aux rayonnements solaires en journée qui constituent des apports d'énergie radiative. Durant la nuit, H^* correspond aux rayonnements terrestres absorbés par l'atmosphère qui constituent des pertes de chaleur à la surface. Les pertes d'énergies en journée et les apports d'énergie la nuit correspondent aux différents flux de chaleur, latente et sensible. La chaleur latente correspond à l'énergie utilisée par l'eau pour changer d'état, par exemple lorsque l'eau s'évapore. La chaleur sensible contribue à augmenter la température d'un corps en transformant l'énergie reçue en chaleur. Par l'effet de conduction, cette chaleur va pouvoir être stockée ou restituée ultérieurement par le corps en question. Le schéma ci-dessous représente ces différents flux de chaleur de jour et de nuit (Guyot, 1999).

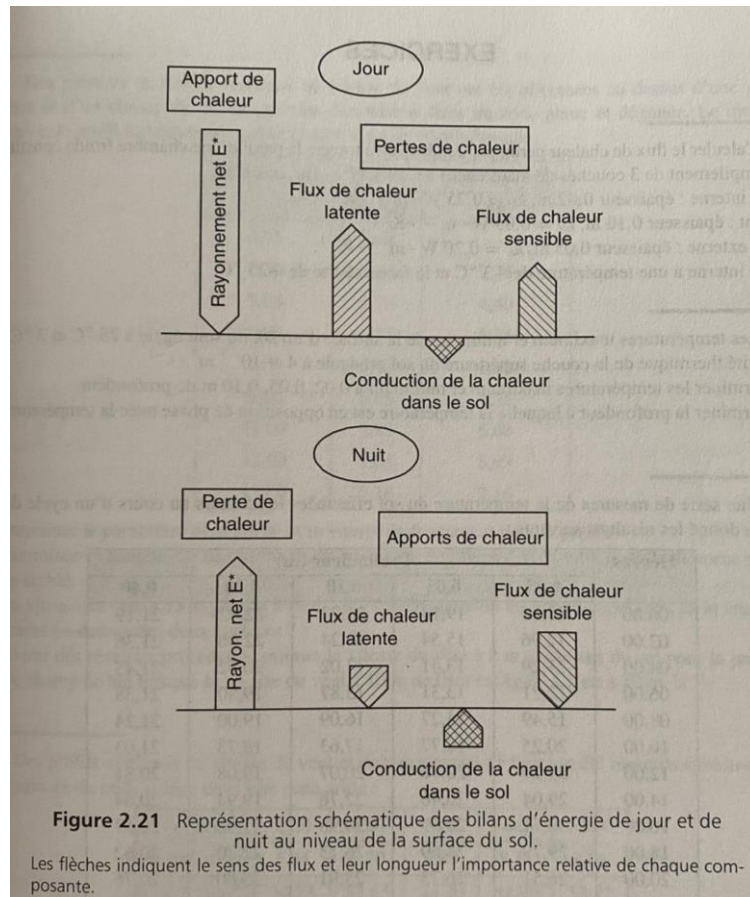


Figure 5: Schéma du bilan énergétique à la surface du sol – (Guyot, 1999)

En milieu urbain, ce bilan énergétique est différent de celui des milieux naturels puisque la présence des éléments urbains modifie localement les propriétés radiatives, thermiques, d'humidité et d'aérodynamisme de la surface terrestre. Sturman et Quenol proposent alors un bilan énergétique propre au milieu urbain qui s'écrit de la manière suivante :

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

Q^* = flux de rayonnement solaire net

Q_F = Chaleur anthropique

Q_H = Chaleur sensible

Q_E = Chaleur latente

ΔQ_S = chaleur stockée

ΔQ_A = chaleur advectée (apportée ou retirée par le vent)

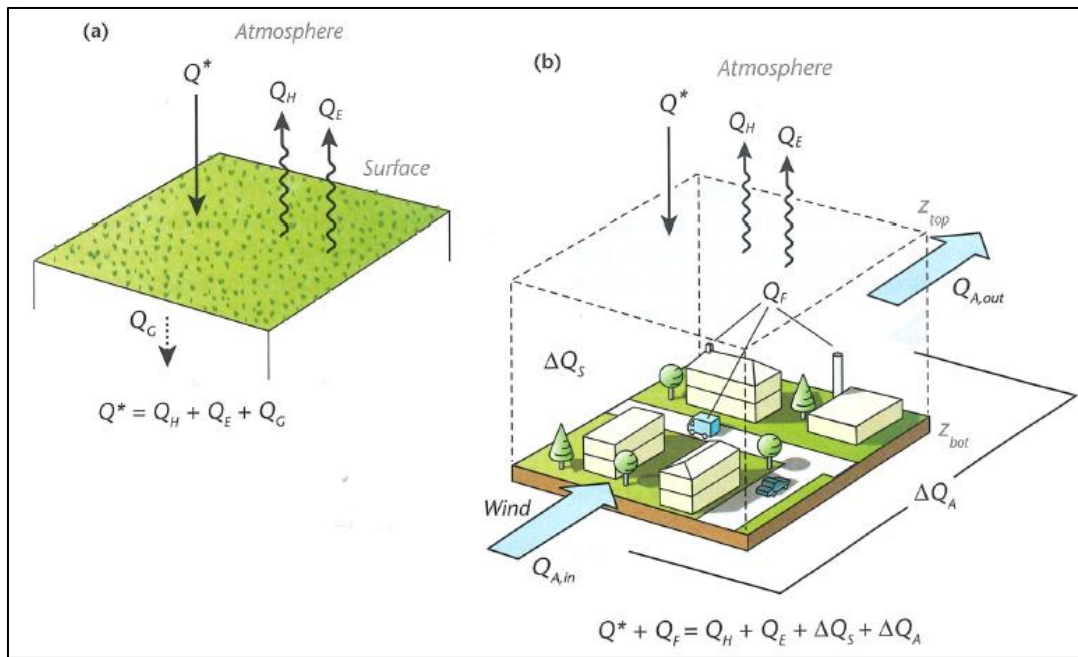


Figure 6: Schéma représentant le bilan radiatif en milieu naturel et en milieu urbain - (Sturman & Quenol, 2024)

En comparant le bilan énergétique d'un milieu naturel et d'un milieu urbain (figure 6), on observe l'ajout de variables radiatives en ville par rapport à la campagne. L'énergie reçue par le système ville est alors une combinaison de Q^* , c'est-à-dire le rayonnement solaire net incident, et l'énergie provenant des activités humaines (Q_F). Les éléments de surface entrent en interaction avec ces deux sources de chaleur par des échanges thermiques en transformant l'énergie en chaleur sensible (Q_H) ou en chaleur latente (Q_E). Toute chaleur qui n'est pas restituée à l'atmosphère est stockée par les matériaux qui composent la ville (Q_S) ou est transportée par les flux d'air vers l'extérieur du système (Q_A). Les différents paramètres propres au milieu urbain et la manière dont ils influencent bilan énergétique sont présentés de plus près dans les prochaines sous-parties.

2.2.1) Activités humaines

Les activités humaines (Q_F) sont une source de chaleur additionnelle en plus du rayonnement solaire. Il s'agit entre autres de la chaleur émise par les secteurs du transport et de l'industrie liée aux moteurs thermiques, mais également de la chaleur produite par les systèmes de chauffage en hiver et de climatisation en été. La climatisation renvoie le surplus de chaleur depuis l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur, contribuant alors localement au réchauffement de l'air et pouvant ainsi accentuer l'effet d'îlot de chaleur urbain. Concernant le chauffage, la chaleur de l'intérieur des bâtiments est transportée par les matériaux vers l'extérieur par le phénomène de conduction. La pollution de l'air par

l'émission de particules fines peut également limiter l'intensité du rayonnement solaire incident et donc l'échauffement de la surface et de l'air.

Bien que la part de chaleur créée par les activités humaines soit moindre comparée à celle du rayonnement solaire (Hufty, 2001), elle ne doit pas pour autant être négligée, surtout dans des contextes climatiques continentaux.

2.2.2) Occupation du sol

Le facteur le plus important pour expliquer la présence des îlots de chaleur urbains est l'occupation du sol. La ville présente une structure complexe et une multitude de types de matériaux avec des propriétés radiatives, thermiques, d'humidité et d'aérodynamisme différentes.

Les **propriétés physiques des matériaux** utilisés en ville jouent un rôle important dans le bilan énergétique d'un milieu urbain. En premier lieu, on peut mentionner le rôle de l'**albédo**. Ce dernier se définit comme le ratio entre le rayonnement réfléchi par une surface par rapport au rayonnement total incident. La part de rayonnement réfléchi dépend de la nature de la surface. Plus une surface est claire, plus elle réfléchit et donc plus l'albédo est élevé. Alors que la neige a un albédo avoisinant les 100%, les surfaces sombres tels que les enrobés utilisés pour les infrastructures routières ont un albédo faible compris entre 0,05 et 0,20. Elles ne réfléchissent donc qu'une petite part des rayonnements incidents, le restant étant absorbé et transformé en chaleur. On parle alors de chaleur sensible (De Parcevaux, 2007). La végétation quant à elle a certes un albédo assez limité (entre 0,15 et 0,18), mais le mécanisme d'évapotranspiration lui permet de transformer l'énergie reçue en chaleur latente et ses températures de surface n'augmentent donc pas ou très peu, selon le niveau de stress hydrique (Guyot, 1999).

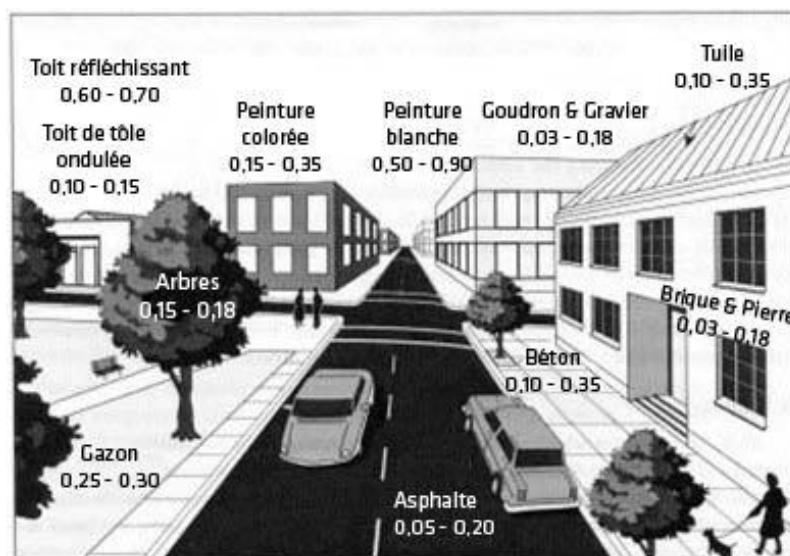


Figure 7: Représentation des valeurs de l'albédo des différentes surfaces en milieu urbain - (collectivitesviabiles.org, 2013)

Ensuite, chaque matériau possède une certaine **inertie thermique**, c'est-à-dire une capacité à stocker et à restituer la chaleur. Cette inertie dépend elle-même de la conductivité et de la diffusivité thermique du corps en question (Guyot, 1999). Plus un matériau est inerte, plus il met du temps à se réchauffer et à se refroidir. On observe alors un décalage entre le moment où l'apport d'énergie est maximal et le moment où le corps restitue la chaleur accumulée, appelé déphasage. Ce déphasage est alors à l'origine des températures de surface et de l'air plus importantes en milieu urbain qu'en milieu rural durant la nuit. Alors que les surfaces naturelles se refroidissent rapidement grâce à leur faible inertie, les surfaces urbaines restituent leur chaleur sur une bonne partie de la nuit. (Oke, Mills, Christen, & Voogt, 2017). En fonction des matériaux et donc de leurs propriétés physiques, la valeur ΔQ_s du bilan énergétique sera donc plus ou moins importante.

Un autre point à aborder pour comprendre la modification du bilan énergétique par l'occupation du sol est la question de **l'imperméabilisation des sols**. Par l'artificialisation des sols en ville, les surfaces y sont en moyenne bien plus sèches que dans les espaces ruraux. Alors que l'eau précipité peut s'infiltrer dans les sols naturels et être évaporé plus tard, soit directement par le sol soit par les plantes via le mécanisme d'évapotranspiration, l'imperméabilité des matériaux en ville diminue considérablement la quantité d'eau disponible à l'évaporation. La part d'énergie transformée en chaleur sensible est donc supérieure à celle transformée en chaleur latente. Or, le processus d'évaporation est capable de limiter l'échauffement d'une surface en absorbant l'énergie thermique et donc en agissant comme régulateur de la température. La présence de surfaces perméables et l'augmentation de la part de surface végétale dans les villes est alors un levier d'action courant pour limiter la surchauffe urbaine (Musy, 2014). L'imperméabilisation des sols influence donc la proportion de Q_H par rapport à Q_E .

La **morphologie urbaine**, c'est-à-dire la structure de la ville et l'emplacement des éléments les uns par rapport aux autres, est un paramètre clé dans le bilan énergétique d'une ville. La densité du bâti influence le bilan énergétique à deux niveaux. D'une part, les bâtiments peuvent créer de **l'ombre**, limitant alors le flux de rayonnement solaire incident et donc l'échauffement des surfaces. D'autre part, les façades des bâtiments peuvent **réfléchir les rayons solaires** et donc créer un piégeage radiatif, ce qui contribue finalement à accentuer l'échauffement (Sturman & Quenol, 2024). La nuit, la présence des bâtiments peut également **entraver le rayonnement terrestre** à l'origine du refroidissement des surfaces et ainsi limiter les échanges thermiques entre l'atmosphère et la surface terrestre. Le *sky view factor* est un indice fréquemment utilisé dans ce contexte. Il s'agit d'un indice permettant de caractériser la fraction du rayonnement émis à un point qui atteint le ciel situé au-dessus de ce dernier. Plus l'obstruction des rayonnements émis sera élevée, plus le *sky view factor* est faible.

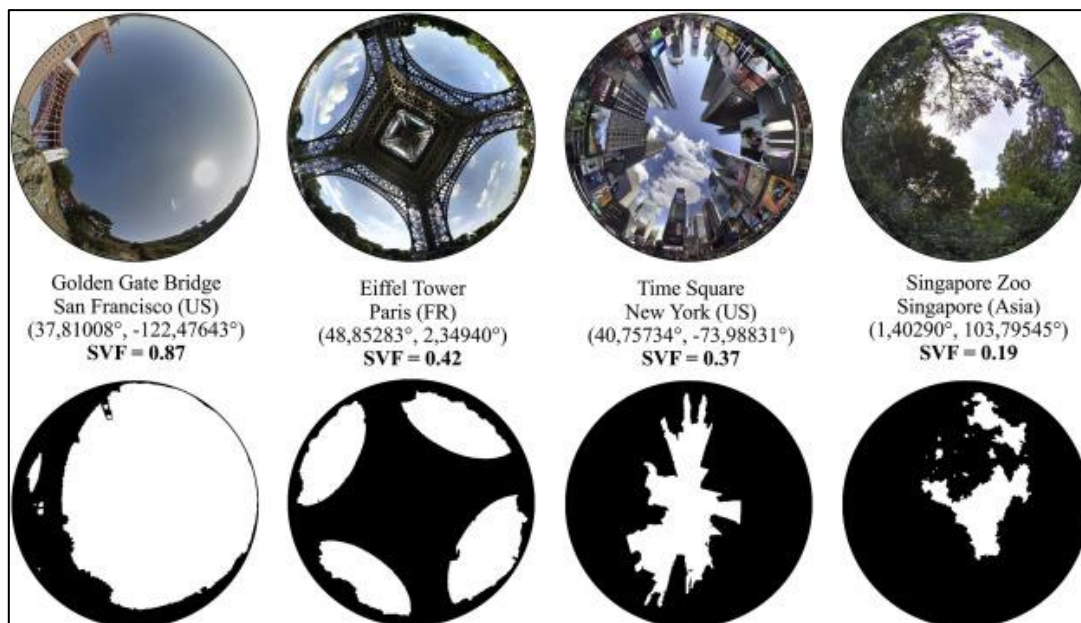


Figure 8: Représentation de l'indice du sky view factor à l'aide de photos "fisheye" et d'une schématisation en noir et blanc - (Middel, Lukasczyk, Maciejewski, Demuzere, & Roth, 2018)

Grâce à la figure ci-dessus (figure 8), on comprend également l'influence de la densité de la végétation arborée sur le rayonnement solaire incident et le rayonnement terrestre émis par la surface. Comme mentionné juste avant, les surfaces végétales présentent des températures de surface inférieures à celles des espaces minéralisés, ce qui est dû à l'effet de l'évapotranspiration et à la perméabilité du sol. De plus, l'ombrage apporté par le feuillage des arbres limite le rayonnement solaire incident et donc la part de rayonnement reçue par la surface. La chaleur accumulée durant la journée est rapidement restituée à l'atmosphère grâce à l'inertie faible des surfaces végétalisées. Ces échanges entre l'atmosphère et la surface du sol peuvent néanmoins être entravés par la présence du feuillage qui empêche le départ de la chaleur et qui crée donc un piégeage radiatif. Selon la composition végétale des espaces verts, le *sky view factor* peut y être inférieur à celui des espaces densément bâtis.

La **rugosité des surfaces** urbaines est bien supérieure à celle des espaces ruraux par la présence des différents éléments urbains. Ces derniers sont à l'origine de la modification de la direction et de la force du vent observées dans la couche de rugosité. La présence d'un obstacle va alors créer des flux tourbillonnaires et des phénomènes de cisaillement du vent. La figure 9 représente alors schématiquement l'effet brise-vent d'un obstacle, ici un arbre. D'une part, la vitesse du vent est réduite en amont et sur une longue distance en aval de l'obstacle. D'autre part, des flux tourbillonnaires vont être générés à l'arrière de l'obstacle, créant alors très localement des phénomènes de cisaillement. La multiplication de ces obstacles en milieu urbain engendre la diminution de la vitesse du vent en ville par rapport à un contexte non-urbain et donc la part de la chaleur qui peut être emportée par le vent (Oke, Mills, Christen, & Voogt, 2017), représentée par la valeur ΔQ_A dans le bilan énergétique.

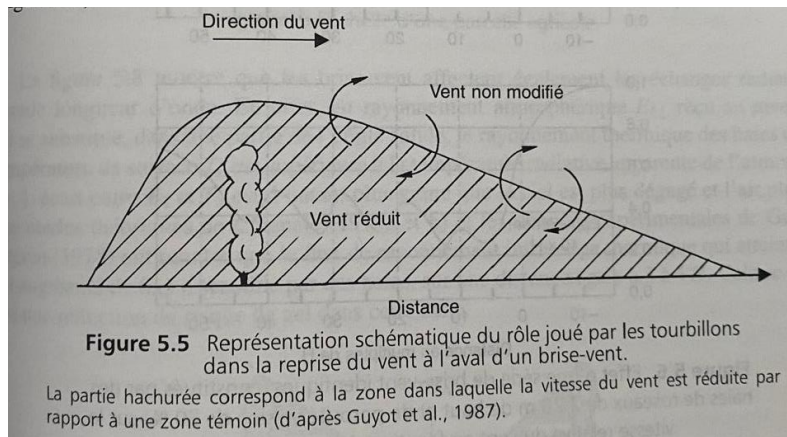


Figure 9: Schéma représentant l'effet brise-vent d'un obstacle - (Guyot, 1999)

L'effet d'îlot de chaleur urbain est donc un phénomène de surchauffe urbaine qui s'explique principalement par les modes d'occupation du sol modifiant localement le bilan énergétique. Il existe **un grand nombre de facteurs** qui contribuent à l'apparition du phénomène, qui sont liés à la fois aux propriétés physiques des matériaux (albédo, inertie thermique), à l'imperméabilité des surfaces et à la morphologie urbaine (modification et réflexion du rayonnement solaire et terrestre, circulation de l'air). A cela s'ajoute les sources de chaleur supplémentaires liées aux activités humaines tels que le transport, l'industrie ou encore le chauffage et la climatisation des bâtiments. Ces différents mécanismes sont résumés dans le schéma ci-dessous (figure 10), produite par l'Agence Parisienne du Climat et Météo France.



Figure 10: Schéma synthétisant les principaux mécanismes à l'origine de la modification du bilan énergétique en ville - (Agence Parisienne du Climat, 2024)

Dans cette partie, il a été montré que les propriétés de la ville sont à l'origine d'une modification locale du bilan énergétique par rapport aux espaces naturels. Il s'agit donc des paramètres fixes, c'est-à-dire de facteurs contribuant à l'existence des îlots de chaleur urbains qui ne changent pas fondamentalement dans le temps. Lorsque l'on étudie les ICU à l'échelle d'un quartier, on observe une variabilité spatiale du phénomène qui est liée aux différents types d'occupation du sol. C'est de ce constat que sont nées les classifications en zones climatiques locales (LCZ) de Stewart et Oke.

Il existe d'autres paramètres fixes à une échelle spatiale plus vaste comme la situation géographique d'une ville ou encore des paramètres dynamiques comme les conditions météorologiques qui conditionnent tout autant l'existence mais également la variabilité spatio-temporelle des ICU.

2.3) La variabilité spatio-temporelle du phénomène d'îlot de chaleur urbain

Les villes ne sont pas toutes égales face aux ICU. Bien que les propriétés de surface puissent être très proche d'une ville à une autre, l'intensité des ICU et leur variabilité dans l'espace et dans le temps est conditionnée par un cadre géographique et climatique à plusieurs échelles.

2.3.1) Les différences d'occupation du sol – une variation spatiale à fine échelle

La question de l'échelle spatiale, fondamentalement géographique, est une question indispensable pour aborder la question des îlots de chaleur urbains. A l'échelle de la ville entière, on observe une opposition entre les espaces ruraux et les espaces urbains par l'existence d'un dôme ou

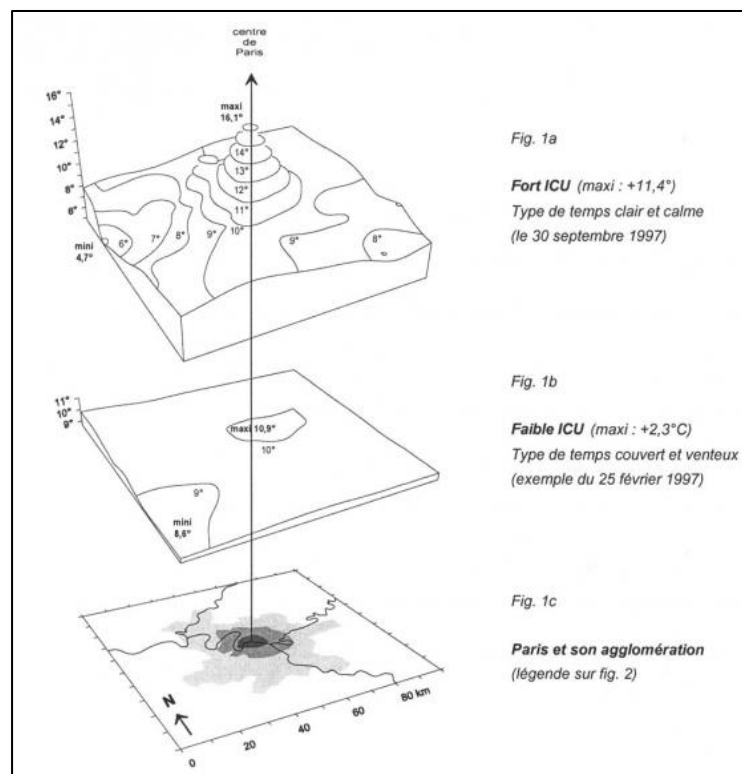


Figure 11: Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain à Paris à l'aide d'isolignes de température - (Cantat, 2004)

d'un panache d'air chaud au-dessus de la ville. C'est à partir de cette observation qu'est né le terme de d'îlot, puisque les isolignes de température observées à cette échelle ressemblent aux courbes de niveau d'une île. A une échelle plus fine, on constate néanmoins des différences parfois importantes entre les différents quartiers urbains, ce qui donne à l'ICU une forme bien moins régulière que ce que le terme d'îlot pourrait laisser penser. Selon l'échelle spatiale de l'analyse, il serait donc probablement préférable de parler d'îlots de chaleur urbains au pluriel afin de bien saisir la variabilité spatiale de ce phénomène.

Les types d'occupation du sol peuvent varier fortement au sein de la ville selon le quartier. Alors que les cœurs de ville sont souvent marqués par une grande part de surfaces minérales et une densité de bâti importante accentuant alors la surchauffe de l'air, les quartiers résidentiels intègrent souvent des espaces verts et une densité de bâti bien plus faible. L'évapotranspiration et la ventilation de l'espace urbain y sont alors bien plus importantes, contribuant à limiter l'effet de surchauffe.



Figure 12: Photo du centre-ville de Caen (rue Saint Pierre), fortement minéralisé – Source : Google Earth



Figure 13: Photo d'un quartier résidentiel à Caen (rue Maurice Souriau) – Source : Google Earth

A une échelle encore plus fine, on peut également observer des effets microclimatiques accentuant ou diminuant l'ICU. Une cour intérieure fortement minéralisée d'un îlot de bâtiment, par la conjugaison des effets de piégeage radiatif et de ventilation très faible, peut alors présenter une température bien supérieure à celle observée dans la rue adjacente. A l'inverse, un espace vert peut, par l'effet de l'ombrage et l'évapotranspiration des plantes, constituer un lieu de fraîcheur par rapport aux espaces construits proches.



Figure 14: Photo de la station météo installée dans l'îlot de bâtiment permettant d'affirmer une surchauffe à l'intérieur de la cour - Source : O. Cantat

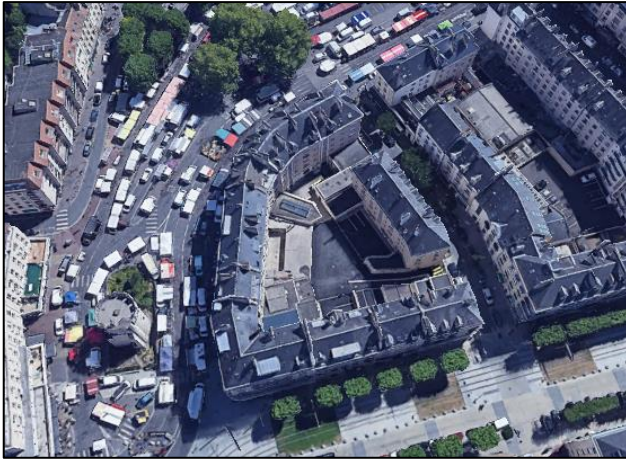


Figure 16: Vue aérienne d'un îlot de bâtiment en centre-ville de Caen (Tour Leroy) - Source : Google Earth

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain est donc variable dans l'espace à l'intérieur de la ville en fonction des caractéristiques d'occupation du sol. C'est à partir de ce constat que Stewart et Oke ont développé la notion des *Local Climate Zones (LCZ)*, largement utilisées aujourd'hui pour aider à analyser les types d'occupation du sol plus ou moins propices à une certaine intensité des ICU. Chaque LCZ correspond alors à un certain type d'occupation du sol, de structure urbaine, de

matériaux et d'activités humaines étant affilié à un certain type de régime thermique (Stewart & Oke, 2012).

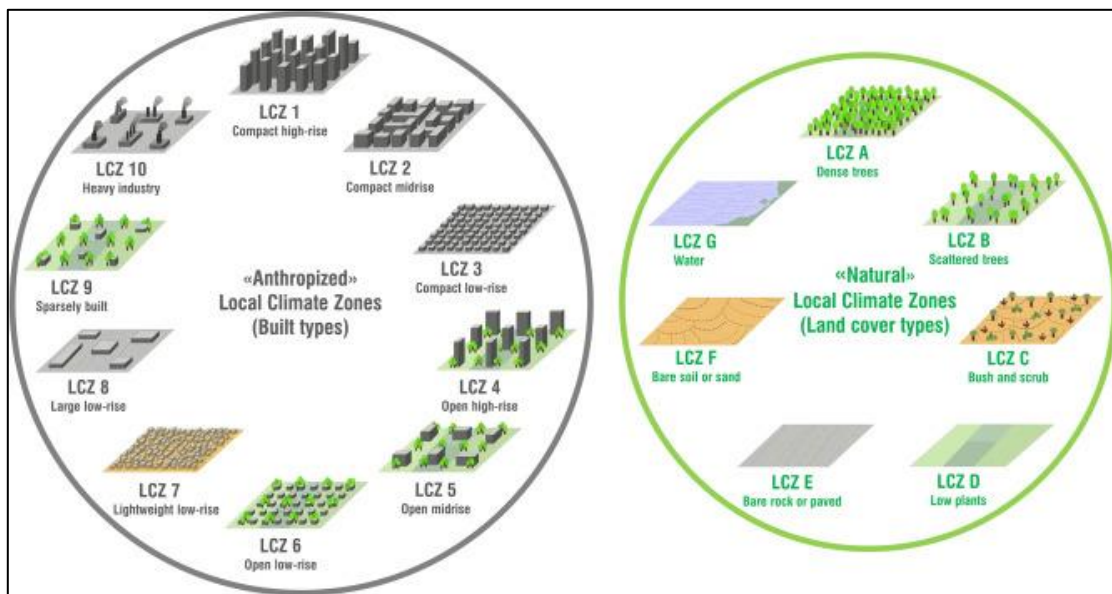


Figure 15: Représentation synthétique de la classification LCZ selon Stewart et Oke (2012) - Source : (Migliari, Briche, Despax, Chesne, & Baverel, 2024)

2.3.2) La situation géographique d'une ville – l'influence de la topographie et de la proximité de l'eau

La situation géographique d'une ville prend également une place importante dans la variation spatio-temporelle du phénomène d'îlot de chaleur urbain, notamment par la topographie et par la proximité de la ville d'une grande étendue d'eau comme la mer, un lac voire un cours d'eau.

La **topographie** est un paramètre fixe qui influence la circulation de l'air et qui peut donc modifier l'extension spatiale de l'ICU. Elle peut alors être à l'origine de la mise en place de systèmes de

vents locaux comme les brises de pente. Il s'agit d'une brise dont l'origine réside dans le refroidissement de la surface du sol par rayonnement durant la nuit et la mise en circulation de l'air frais le long des pentes par effet de gravité (Météo France, 2022). A l'inverse, la topographie peut également favoriser la stagnation de l'air dans des dépressions topographiques. On peut alors observer la mise en place d'un trou à froid (Météo France, 2023), où l'air froid s'accumule durant la nuit, ou à l'inverse, un effet de cuvette en journée engendrant l'accumulation d'air chaud sur place. Ces effets liés à la topographie se manifestent à différentes échelles spatiales et peuvent donc être très localisés ou concerner une ville entière (Oke, Mills, Christen, & Voogt, 2017).

D'autres systèmes de vents locaux, bien plus connus dans les régions côtières comme la Normandie, peuvent être liés à la **présence de grandes étendues d'eau** comme la mer. Il s'agit alors des brises de mer et des brises de terre liées aux différences de températures de surface observées entre l'eau et la terre. La surface terrestre s'échauffant plus rapidement que l'eau, on y observe par le phénomène de convection des mouvements d'air ascendant créant un appel d'air. Ce dernier va engendrer la mise en place d'une brise soufflant depuis la mer, où l'air est plus frais, vers la terre. Lorsque la nuit tombe, les surfaces terrestres et donc l'air s'y refroidissent plus rapidement qu'au-dessus des surfaces maritimes. L'ascendance de l'air a donc lieu en mer, formant alors la brise de terre. (Météo France, 2022). Lorsque le vent synoptique est faible et selon la distance de la ville par rapport à la mer, ces brises peuvent faire « déborder » la chaleur vers l'extérieur de la ville ou encore permettre l'arrivée de l'air frais dans une partie de la ville.

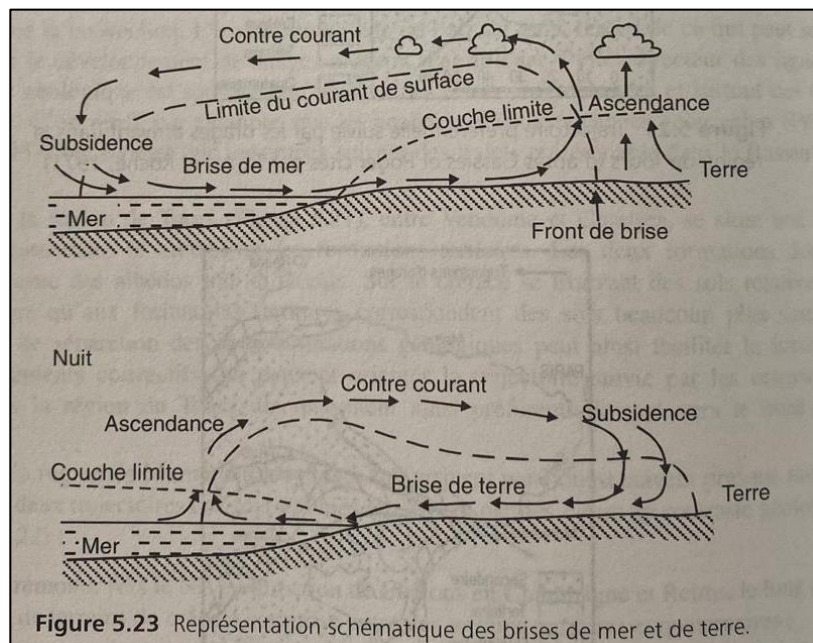


Figure 17: Schéma représentant les mécanismes de brise de mer et de terre - (Guyot, 1999)

Dans l'agglomération caennaise, cette brise de mer se fait ressentir lors des journées ensoleillées sous forme d'un léger vent provenant du Nord apportant de l'air frais depuis la côte. Sur le graphique ci-dessous montrant la force et la direction du vent entre le 10 et le 11 mai 2024 (figure 18), on observe clairement la mise en place de ce vent du nord dès la fin de matinée aux alentours de 10 h locale (8 h UTC) jusqu'à environ minuit (22 h UTC) où il tourne au sud/sud-ouest, marquant alors le basculement de la brise de mer en brise de terre.

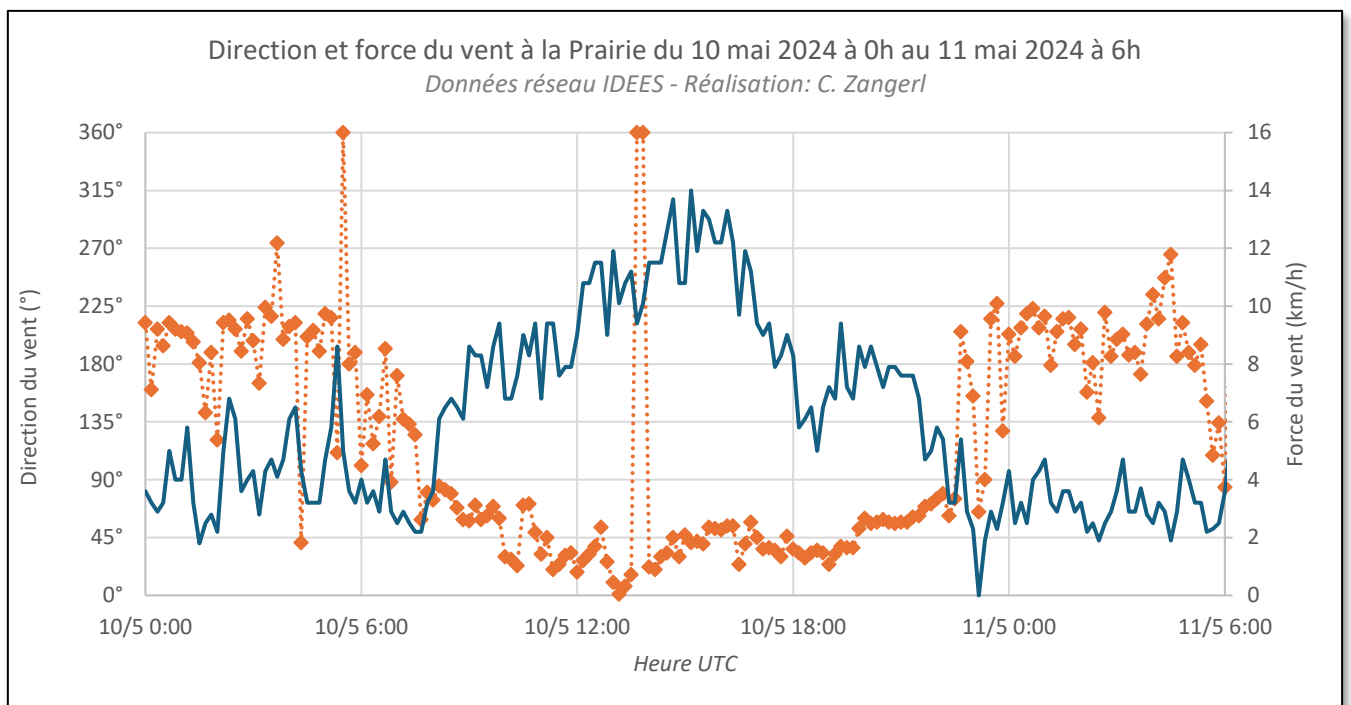


Figure 18: Graphique représentant la force et la direction du vent entre le 10 et le 11 mai 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Finalement, la situation géographique d'une ville influence l'intensité, mais également la fréquence des ICU par les conditions climatiques qui règnent à l'échelle régionale. Les îlots de chaleurs sont des phénomènes observables sur tous les continents, sous tout type de climat et dans tout type de villes, mais présentent des dynamiques différentes en fonction de la région du monde dans laquelle on se trouve et donc des types de temps qu'on y observe.

2.3.3) L'importance des types de temps

Afin que l'îlot de chaleur urbain puisse se développer pleinement, certaines conditions météorologiques doivent être réunies. On peut alors parler de la notion de types de temps, qui se définit comme « l'unité temporelle de base durant laquelle agit une combinaison d'éléments atmosphériques sensiblement identiques et produisant des effets pratiquement semblables sur un espace donné » (O. Cantat, 2004, L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps, p. 3). L'analyse par type de temps constitue en effet une méthode adaptée aux études géographiques par la

lecture synthétique des différents paramètres capable de rendre compte des conditions météorologiques perçues et de ses influences sur un espace donné. Il n'existe pas de classification universelle des types de temps à cause des débats scientifiques en cours sur leur définition et la méthode à utiliser. Dans le 3e volet de son mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Olivier Cantat propose une typologie simplifiée des types de temps basée sur quatre paramètres météorologiques qui sont l'état du ciel, l'ambiance thermique, l'occurrence des précipitations et l'occurrence du vent soutenu. L'objectif de cette classification est de rendre compte des combinaisons possibles des paramètres atmosphériques qui influencent l'écosystème terrestre et donc le comportement des êtres vivants (Cantat, 2015).

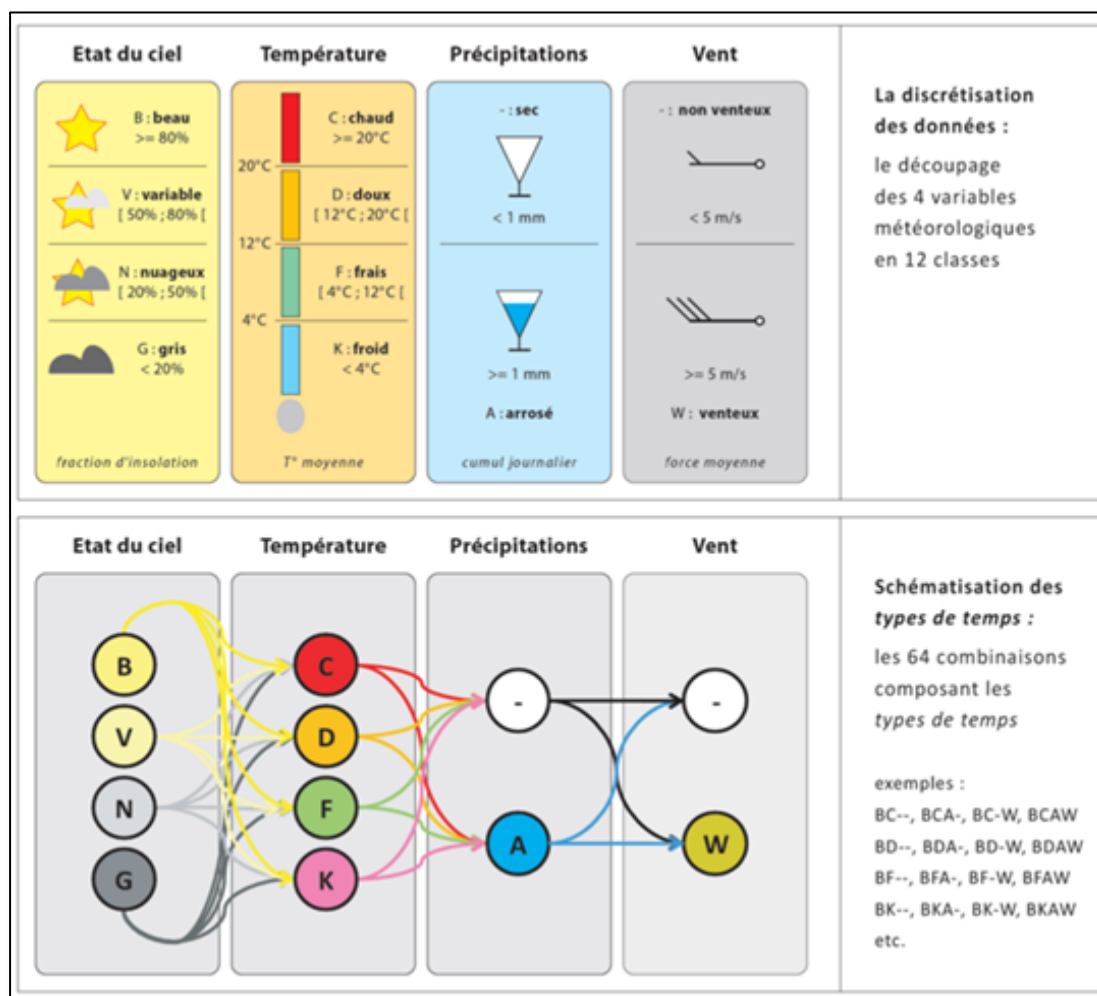


Figure 19: Présentation des variables météorologiques et de leur discrétisation pour la classification des types de temps - (Cantat, 2015)

La formation des ICU est intrinsèquement liée à la récurrence de certains types de temps, ce qui montre l'importance des paramètres dynamiques en plus des paramètres fixes comme les types d'occupation du sol. Afin que les ICU se mettent en place, trois paramètres sont particulièrement importants : l'état du ciel, les précipitations et le vent. Plus concrètement, le **type de temps doit être**

beau (ciel dégagé), sec et non venteux. La présence de nuage limite le rayonnement solaire incident et donc le réchauffement des surfaces urbaines ainsi que le rayonnement terrestre en empêchant le refroidissement des surfaces par les échanges thermiques entre la surface terrestre et l'atmosphère. Un vent trop fort favorise le brassage de l'air et entrave donc également la mise en place des différences de température entre les différents espaces. La température en elle-même n'exerce pas une grande influence sur la formation de l'ICU, mais plutôt sur les conséquences de l'ICU sur la population. Lorsque les températures sont élevées, l'ICU peut entraîner des conséquences sanitaires en augmentant localement les températures, mais avant tout en empêchant le refroidissement de l'air la nuit dans les espaces urbains.

2.3.4) La cyclicité des îlots de chaleur urbains

Les paramètres dynamiques, c'est-à-dire les conditions météorologiques et donc l'occurrence d'un certain type de temps favorable, sont tout aussi importants dans la formation des ICU et des IFU que les paramètres fixes comme les types d'occupation du sol et la topographie. Alors que les paramètres fixes vont plutôt influencer la variabilité spatiale de l'ICU, les paramètres dynamiques via l'occurrence des types de temps conditionnent la variabilité temporelle du phénomène à plusieurs échelles.

Premièrement, les ICU sont soumis à une **variabilité interannuelle**. D'une année à une autre, les conditions météorologiques peuvent être très variables. Cela peut entre autres être en lien avec des phénomènes à l'échelle mondiale, comme le phénomène El Niño qui se produit tous les deux à sept ans. Ce phénomène a lieu dans l'océan Pacifique et peut influencer le climat dans le monde entier. En Europe de l'Ouest, l'occurrence du phénomène El Niño corrèle avec des conditions dépressionnaires plus fréquentes, des températures plus douces et des précipitations plus abondantes durant le début de l'hiver (Météo France, 2023). Ainsi, un phénomène à l'échelle mondiale influence les types de temps observés en Normandie et donc la fréquence des ICU. Même sans l'existence d'un phénomène mondial, les conditions météorologiques d'une année à une autre peuvent être très différentes. En Normandie, les étés 2023 et 2024 n'ont pas été particulièrement marqués par des types de temps clairs et calmes et donc favorables aux ICU et aux IFU, alors que l'été 2022 a apporté beaucoup de beau temps et de chaleur. Sur le graphique ci-dessous (figure 20) présentant les différences de température ville/campagne à Caen d'avril 2022 à juin 2024, on peut observer cette variabilité interannuelle avec des ICU plus intenses et plus fréquents en 2022 qu'en 2023 et 2024.

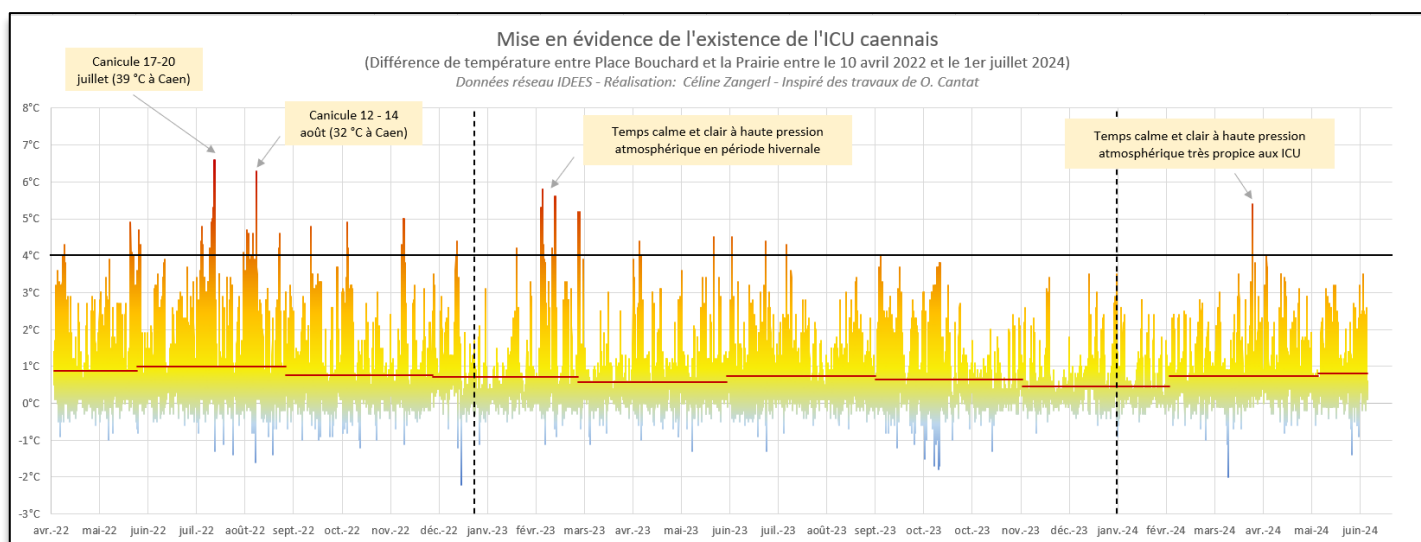


Figure 20: Graphique présentant les différences de températures entre le centre-ville de Caen et la Prairie à pas de temps de 10 minutes entre le 10 avril 2022 et le 1er juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl, inspiré des travaux de O. Cantat

Deuxièmement, l'occurrence des types de temps varie non seulement d'une année à une autre, mais également **selon les saisons**. La Normandie est marquée par un climat océanique des latitudes moyennes, caractérisé par des hivers frais et des étés doux ainsi que des précipitations plus ou moins marquées pendant toute l'année. En hiver, on observe le passage régulier de perturbations atmosphériques des latitudes moyennes, amenant alors des types de temps pluvieux et venteux peu propices à la formation des ICU. En été, en revanche, la présence plus régulière d'anticyclones augmente la probabilité d'un temps clair et calme. Ainsi, pour le contexte climatique de la Normandie, les ICU sont davantage **des phénomènes estivaux**.

De plus, les ICU peuvent avoir lieu sur un ou plusieurs jours, induisant donc **une variabilité interjournalière**. Les types de temps peuvent être liés à un certain type de circulation, qui décrit les caractéristiques de l'atmosphère à une plus vaste échelle spatiale et temporelle. Il peut s'agir par exemple de la circulation induite par un anticyclone qui est généralement propice au temps stable. Un certain type de temps peut alors être présent pendant une période de plusieurs jours, comme lors d'épisodes caniculaires. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain peut alors s'étendre à une échelle de plusieurs jours. Néanmoins, plusieurs types de temps peuvent avoir lieu sous un même type de circulation (Durand-Dastès, 2004).

Finalement, le graphique montrant l'exemple d'un ICU fort durant l'été 2022 à Caen (figure 21) permet de comprendre que les ICU sont des phénomènes nocturnes puisqu'ils sont en grande partie liés à la restitution durant la nuit de la chaleur accumulée pendant la journée. Ce **cycle journalier** est marqué par des écarts entre la ville et la campagne faibles en journée et élevés durant la nuit. Ces écarts nocturnes peuvent parfois dépasser les 10°C pour les grandes agglomérations comme Paris

(Cantat, 2004) et peuvent même être très importants pour des plus petites agglomérations comme le montre l'exemple de Caen présenté ci-dessus (figure 20).

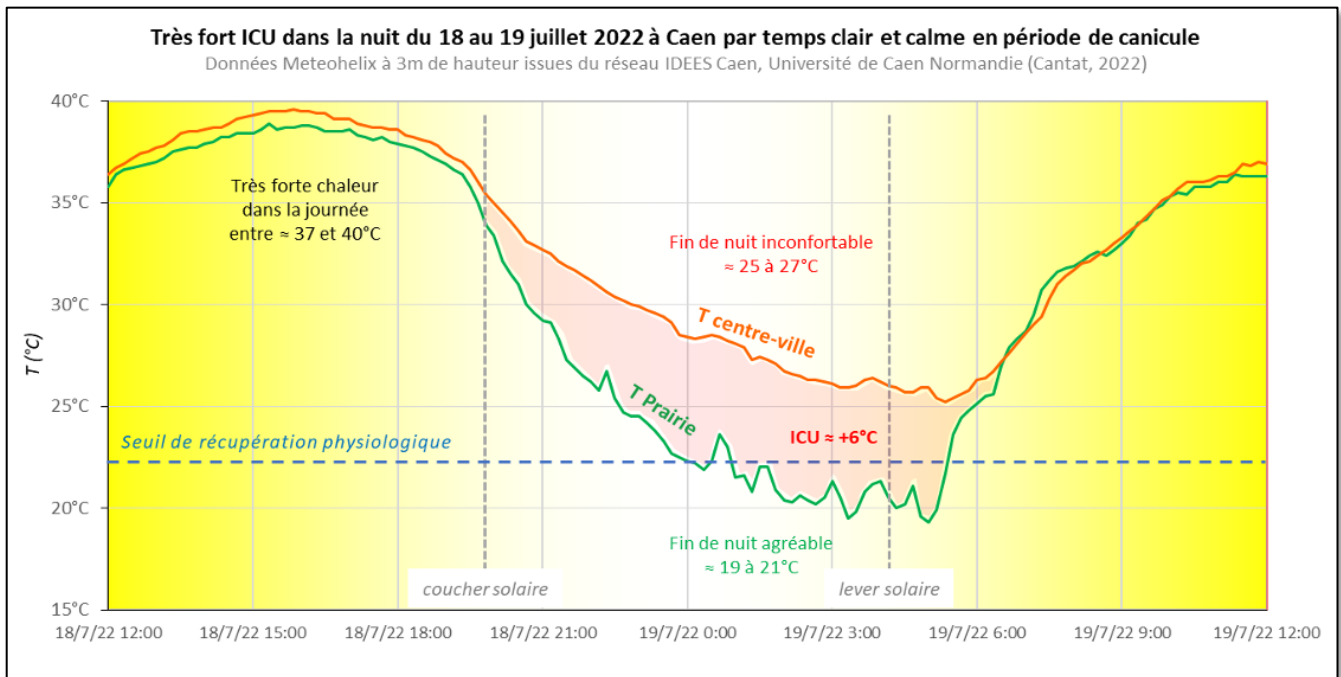


Figure 21: Exemple d'un ICU très fort observé dans la nuit du 18 au 19 juillet 2022 – Source : O. Cantat

Les ICU sont donc des phénomènes variables dans le temps et dans l'espace qui sont régis par plusieurs paramètres fixes et dynamiques. Premièrement, l'intensité de l'ICU est variable dans l'espace selon les différents types d'occupation du sol, créant alors des différences entre les quartiers d'une ville. Deuxièmement, cette intensité peut également être modifiée par les phénomènes de vents et de brises locaux, capables d'apporter de la fraîcheur sur une partie de la ville. La topographie peut avoir des effets positifs ou négatifs sur la chaleur en ville, notamment dans les dépressions topographiques où la chaleur ou la fraîcheur peuvent s'accumuler. Finalement, l'apparition des ICU est soumise à la présence d'un type de temps calme et clair. Leur fréquence est donc conditionnée par la fréquence de ces types de temps, induisant une variabilité temporelle à l'échelle annuelle, saisonnière, inter-journalière et journalière.

Une chaleur trop intense, accentuée par l'ICU, peut être particulièrement dangereuse lorsque les températures trop élevées ne permettent pas au corps humain de récupérer durant la nuit, induisant alors des risques sanitaires qui feront l'objet de la partie suivante.

3) La chaleur en ville – un réel problème de santé publique

Au regard des dernières prévisions du GIEC, il est clair que la chaleur sera de plus en plus un problème pour les populations urbaines. En plus de l'augmentation moyenne des températures, la multiplication des canicules liée au changement climatique à laquelle s'ajoute le phénomène d'îlot de chaleur urbain montre la vulnérabilité particulière des villes face à cet aléa.

Une canicule est définie comme une période d'au moins trois jours et trois nuits consécutives où les températures dépassent un certain seuil d'alerte fixé par les autorités sanitaires (Santé publique France) et Météo France et varie selon les départements (Santé Publique France, 2022). Ces périodes peuvent alors causer des problèmes de santé et une surmortalité parfois importante en fonction de l'intensité et de la longueur des canicules.

La canicule la plus meurtrière en France fut celle de 2003, qui a marqué les esprits par son intensité et sa durée exceptionnelle d'une quinzaine de jours. Santé publique France a enregistré un excès d'environ 15.000 décès par rapport à la mortalité attendue, ce qui équivaut à une augmentation de 60 % (Santé publique France, 2004). Cette situation a mené à la création d'une Vigilance canicule par Météo France, afin d'évaluer la dangerosité de la situation et ainsi d'avertir la population sur les mesures à prendre pour se protéger des effets potentiellement meurtriers d'une canicule (Météo France, 2023). Sans en arriver au décès, les fortes chaleurs peuvent avoir d'autres conséquences importantes sur le corps humain et donc la santé de la population, d'autant plus si la population est vulnérable et défavorisée.

3.1) Les effets des fortes chaleurs sur le corps humain

Il existe deux pathologies qui sont directement liées à des températures élevées : l'hyperthermie – également appelée coup de chaleur – et la déshydratation. La déshydratation peut provoquer des symptômes tels que des bouffés de sueur lorsque l'on boit de l'eau, des crampes, une fatigue intense, des vertiges et peut mener jusqu'à la perte de connaissance. L'hyperthermie, quant à elle, peut être particulièrement dangereuse (Santé Publique France, 2021). Le corps humain peut contrôler sa température par les mécanismes de thermorégulation en échangeant de la chaleur avec son environnement par convection via la peau ou encore par la transpiration. Lors de fortes chaleurs, les vaisseaux de la peau se dilatent et provoquent alors des battements de cœur plus rapides et plus forts, ce qui peut représenter un danger pour les personnes atteintes de maladies cardio-vasculaires.

On parle d'hyperthermie lorsque le corps est incapable de réguler sa température centrale qui est de l'ordre de 35,7°C à 37,3°C en temps normal. De cette situation résultent des symptômes tels qu'une température corporelle élevée, le dysfonctionnement du système nerveux jusqu'à la défaillance de certains organes (Buguet, Radomski, Reis, & Spencer, 2023).

De plus, les températures élevées la nuit empêchent la bonne récupération du corps et peuvent accentuer les problèmes de santé. En plus des cycles lumière-obscurité qui présentent un signal synchronisateur du sommeil, la température ambiante conditionne également le système thermorégulateur du corps et donc les mécanismes à l'origine de la phase de sommeil profond. Or, un sommeil réparateur est nécessaire au bon fonctionnement du corps (Buguet, Radomski, Reis, & Spencer, 2023). En plus des sollicitations importantes du corps lors des journées de forte chaleur, une période prolongée d'exposition aux températures trop élevées la nuit peut altérer considérablement la santé de la population.

3.2) La vulnérabilité thermique accentuée par l'âge, l'état de santé et les inégalités sociales

La vulnérabilité thermique se définit comme la capacité des personnes à faire face aux effets d'un stress thermique (Lareau & Baudouin, 2015). Certains groupes de personnes sont particulièrement vulnérables face aux problèmes liés aux fortes chaleurs. Les premiers concernés sont les personnes âgées de plus de 65 ans et les bébés, mais un grand nombre de pathologies chroniques peuvent également influencer la vulnérabilité des personnes. Il s'agit entre autres des maladies cardiovasculaires, endocriniennes (comme le diabète ou l'hyperthyroïdie), neurologiques ou encore des maladies d'ordre psychiatrique. De plus, certains comportements peuvent augmenter la vulnérabilité, comme la sous-estimation des besoins d'hydratation, l'exercice sportif sans tenue adaptée ou encore la consommation d'alcool, qui contribue à la déshydratation du corps (Santé Publique France, 2021).

D'autres facteurs, cette fois-ci liés à l'environnement des personnes, peuvent influencer cette vulnérabilité thermique. En effet, les inégalités sociales sont parfois à l'origine d'une capacité d'adaptation moins importante. Un bon état d'isolation des bâtiments est important pour empêcher la chaleur d'entrer dans les logements, tout comme la présence de volets ou de rideaux occultants en bon état. De plus, les logements situés directement sous les toits ont tendance à s'échauffer plus rapidement que ceux situés dans les étages inférieurs (Santé Publique France, 2021). Selon les données du dernier rapport de la Fondation Abbé Pierre sur les « logements bouillottes », publié le 22 août 2024, les populations défavorisées ne profitent alors pas toujours de logements dans un état adéquat pour garantir une température agréable à l'intérieur des bâtiments. Selon une enquête nationale

menée par la fondation, plus de 55% des Français auraient souffert de la chaleur dans leur logement en 2023 pendant au moins 24h. Les personnes les plus touchées seraient alors les jeunes, les locataires d'appartements en ville et les populations les plus modestes (Fondation Abbé Pierre, 2024). Les moyens financiers étant moins importants, la rénovation des bâtiments et l'accès aux technologies de climatisation restent souvent réservés aux plus favorisés (Buguet, Radomski, Reis, & Spencer, 2023).

Les différents groupes d'habitants des villes ne sont donc pas égaux face aux risques sanitaires liés aux fortes chaleurs et accentués par les ICU. Des travaux intéressants ont alors été menés à Montréal sur la cartographie de la vulnérabilité des populations (Lareau & Baudouin, 2015). Ce genre de travail peut constituer par la suite une aide à la décision politique afin de mieux cibler les actions de lutte contre les effets des îlots de chaleur et de protéger le mieux possible les populations particulièrement vulnérables.

3.3) La menace du changement climatique

La mise en place de la vigilance Météo France et les campagnes de sensibilisation de la population aux risques lors des canicules ont permis d'améliorer la gestion des vagues de chaleur. Néanmoins, les canicules restent encore aujourd'hui un problème de santé publique qui risque de s'aggraver durant les décennies à venir (Météo France, 2023).

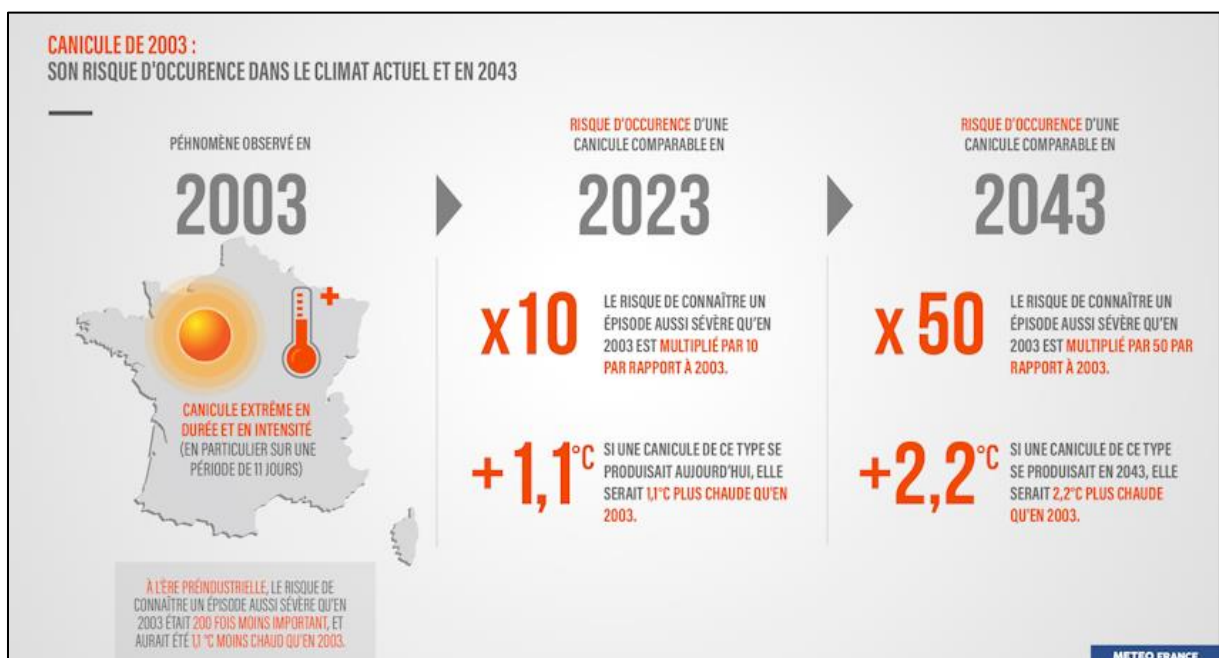


Figure 22: Infographie sur le risque d'occurrence d'une canicule semblable à celle de 2003. – Source : (Météo France, 2023)

Les données récoltées par Météo France sur les canicules observées entre 1947 et aujourd'hui montrent une tendance claire concernant leur fréquence et leur intensité. Alors qu'on observait une

vague de chaleur à un rythme de 5 ans avant 1989, elles sont devenues un phénomène annuel depuis les années 2000, avec plusieurs canicules observables sur une période estivale. De plus, selon les prévisions de Météo France (figure 22), une canicule du même genre que celle observée en 2003 aura 50 fois plus de chance de se produire en 2043 tout en étant environ 2,2°C plus chaude qu'en 2003. (Météo France, 2023).

En Normandie, les autorités de santé publique ont enregistré près de 20 000 recours aux soins d'urgence pour des problèmes liés aux fortes chaleurs comme l'hyperthermie et la déshydratation, et plus de 5 000 décès attribuables à la chaleur durant la période du 1^{er} juin au 15 septembre 2022 (Santé Publique France, 2022). Bien que la Normandie soit pour l'instant moins impactée que les régions du Sud de la France, la menace du changement climatique et donc de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes caniculaires menace bel et bien la santé des Normands, moins habitués aux fortes chaleurs que les habitants du sud du pays. Une étude menée par l'Université de Zurich ayant comme objectif de trouver des moyens de sensibilisation du grand public aux conséquences du changement climatique a proposé une manière de représenter le climat d'une ville d'ici 2050. Ils concluent, en se référant au scénario RCP 4.2 du GIEC prévoyant une augmentation des températures entre 3,5°C et 4,7°C selon les saisons, que le climat des villes européennes sera équivalent à leur déplacement d'environ 1000 km vers le sud. Ainsi, le climat de Londres ressemblerait davantage à celui de Barcelone d'ici une trentaine d'années (Bastin, Clark, Elliott, Hart, & Van den Hoogen, 2019). Si l'on imagine ce scénario pour la ville de Caen, son climat pourrait ressembler à celui des villes du sud de la France voire du nord de l'Espagne, la ville de Perpignan par exemple étant située à environ 760 km (vol d'oiseau) de Caen. Bien qu'il ne s'agisse que d'un moyen de représenter les conséquences du changement climatique d'ici 2050, cette comparaison permet néanmoins de saisir l'intensité de l'augmentation des températures à laquelle les villes devront s'adapter d'ici quelques décennies.

Les tendances des dernières années ont révélé que les villes ne cessent de grandir, agrandissant donc la part de la population totale soumise aux effets de l'îlot de chaleur urbain. De plus, le vieillissement de la population ainsi que le creusement des inégalités sociales contribuent à augmenter la vulnérabilité des populations urbaines face aux fortes chaleurs. Au regard des prévisions concernant le changement climatique, l'urgence pour les villes et les acteurs locaux à agir pour la diminution des îlots de chaleur et le rafraîchissement urbain devient de plus en plus claire.

4) Conclusion de la partie I

La climatologie urbaine est une branche de la climatologie qui est née de l'observation des différences de températures entre la ville et sa campagne environnante, phénomène que l'on définit aujourd'hui comme un îlot de chaleur urbain. Comme il a pu être démontré dans cette partie, l'étude du phénomène d'îlot de chaleur est complexe et prend en compte un grand nombre de variables à la fois liées aux conditions atmosphériques (facteurs dynamiques) et aux caractéristiques de surface (facteurs statiques). La présence de la ville modifie localement le bilan énergétique et peut mener, lorsque les conditions météorologiques sont claires et calmes, à la mise en place d'un dôme ou d'un panache d'air chaud au-dessus de la ville. La restitution de la chaleur accumulée en journée par les matériaux de la ville pendant la nuit couplée à un vent faible mène à des différences de température parfois importantes entre la ville et la campagne, ce qui fait de l'ICU un phénomène avant tout nocturne. A une échelle spatiale plus fine, les différences d'occupation du sol peuvent mener à des intensités d'ICU différentes selon les quartiers, montrant alors une certaine variabilité spatiale du phénomène à l'intérieur de la ville. Cette variabilité spatiale peut également être accentuée par des effets topographiques ou des systèmes de vent locaux. La variabilité temporelle des ICU, quant à elle, est foncièrement liée à l'occurrence des types de temps favorables. En Normandie, la saison estivale est bien plus propice au temps clair et calme, favorisant donc la mise en place d'ICU de forte intensité durant l'été.

L'îlot de chaleur urbain estival peut poser des problèmes de santé publique importants, surtout lorsque les températures nocturnes élevées ne permettent pas aux habitants de récupérer durant la nuit. La vulnérabilité des populations peut être accentuée par l'âge ou l'état de santé des personnes, mais également par les inégalités sociales. Les personnes les moins aisées vivent souvent dans des logements mal isolés et l'accès aux technologies de climatisation peut s'avérer difficile à cause du manque de moyens financiers.

Face à la menace du changement climatique, qui apportera probablement des vagues de chaleur et des canicules plus fréquentes et plus intenses dans les prochaines décennies, l'adaptation des villes à la chaleur via la lutte contre les îlots de chaleur et pour le rafraîchissement urbain devient nécessaire et de plus en plus urgente. Il existe plusieurs approches à ce titre, dont celle basée sur les solutions fondées sur la nature. La nature en ville est alors souvent mise en avant à ce titre, puisqu'elle offre un grand nombre de services à l'écosystème urbain.

Partie II – Après la chaleur, la quête de la fraîcheur en ville

La surchauffe urbaine est un phénomène aujourd’hui bien étudié et bien connu des scientifiques, mais également de plus en plus des acteurs locaux de l’aménagement urbain. En effet, il existe un grand nombre de projets qui sont actuellement menés en France afin d’identifier les caractéristiques climatiques des villes. On peut en ce sens mentionner des villes françaises comme Paris, Lyon ou encore Toulouse, mais également des villes de taille moins importante comme Dijon, Rennes et bien entendu les études sur la ville de Caen dans lesquelles s’inscrit ce mémoire. L’étude de l’îlot de chaleur urbain ne doit pas, à mon sens, constituer une fin en soi, mais surtout apporter des clés de compréhension de l’espace mobilisées dans le cadre de l’adaptation des villes aux conséquences du changement climatique.

Il existe un grand nombre de mesures qui peuvent être mises en place dans le cadre de la lutte contre la chaleur en ville permettant également de diminuer l’intensité des îlots de chaleur urbains. Ces différentes mesures ainsi que leur efficacité selon les études menées en France et à l’international seront alors présentées dans ce chapitre, avec une attention particulière portée aux solutions fondées sur la nature. Cet état de l’art constitue alors la base de réflexion concernant l’étude des îlots de fraîcheur urbains à Caen et le rôle de la végétation dans la lutte contre la chaleur en ville.

1) Quelles approches pour le rafraîchissement urbain ?

Outre l’adaptation de l’individu à la chaleur par ses activités ou encore son habillement, l’être humain peut modifier son environnement afin de le rafraîchir. Concernant l’environnement urbain, il existe un grand nombre d’approches qui visent à lutter pour le rafraîchissement de la ville et qui jouent sur différents paramètres à l’origine de la surchauffe urbaine.

A ce titre, on différencie généralement les solutions grises et les solutions vertes, également connues sous le nom des solutions fondées sur la nature (SFN). Ces dernières ont gagné en popularité les dernières années dans le cadre des projets d’aménagement, non seulement parce qu’elles semblent plus adaptées au contexte actuel de la lutte contre le changement climatique, mais surtout parce qu’elles peuvent offrir un grand nombre de services à l’écosystème urbain. Cette sous-partie définira plus précisément les termes de solutions grises et de solutions fondées sur la nature et présentera des exemples d’application.

1.1) Les solutions « grises »

Les solutions grises comprennent toutes les mesures basées sur des éléments techniques comme le travail sur les revêtements du sol, le mobilier urbain ou encore un travail sur la forme urbaine, souvent en amont de projets d'aménagements (Leroy, et al., 2021).

Parmi ces solutions, on retrouve des mesures qui visent à **augmenter l'albédo** des matériaux ou à utiliser des matériaux de construction à fort albédo dans le but d'augmenter la part des rayonnements solaires réfléchis. Comme évoqué dans le chapitre précédent, plus la couleur d'un matériau est claire, plus il réfléchit les rayonnements solaires et moins il aura tendance à les absorber et à se réchauffer.

En France, on observe les dernières années plusieurs projets visant à repeindre les toits des bâtiments industriels en blanc afin de limiter l'échauffement de la surface. Certaines peintures, comme les peintures réfléchissantes, ont été développées précisément pour ce genre de cas et présentent un albédo supérieur à 0,7 (Leroy, et al., 2021). A ce titre, on peut mentionner la ville de Grenoble qui a décidé de repeindre en blanc le toit de la « Bifurk », une ancienne friche industrielle réhabilitée en centre associatif (Barletta, 2023). L'efficacité de ce genre de mesure a surtout été étudiée sous l'angle de son impact sur la température intérieure d'un bâtiment. Bien que cela change la part de rayonnement absorbée par une surface, l'effet concret de l'augmentation de l'albédo d'une surface sur la température de l'air, surtout lorsqu'il s'agit d'un toit, n'est pas connu. Lorsque des revêtements à fort albédo sont utilisés pour les surfaces au sol, son impact sur la température de l'air ressentie par le piéton peut être plus importante, mais peut donner une sensation d'inconfort liée à la réflexion des rayons vers le piéton (Leroy, et al., 2021).

D'autres propositions pour la réduction des températures de surface consistent à mettre en place des **systèmes d'arrosage de l'espace urbain** par l'installation de jets d'eau ou de fontaines. L'objectif de ce genre de mesures est d'augmenter la part d'énergie transformée en chaleur latente et ainsi limiter l'échauffement des surfaces minérales. Plusieurs collectivités ont mis en place des expérimentations sur l'efficacité de l'arrosage de la chaussée, notamment à Lyon (figure 23) ou à Paris où les camions de nettoyage ont répandu de l'eau au sol dans la rue du Louvre (Hendel, 2015). En général, les mesures d'arrosage se sont avérées très peu efficaces sur la réduction de la température de l'air. En effet, 80% de l'eau répandue dans la rue ruisselle ou s'infiltre et ne contribue donc pas directement à la réduction de la température de surface, constituant alors un gaspillage d'eau important durant les périodes estivales qui peuvent parfois être marquées par une situation de manque d'eau (Leroy, et al., 2021).



Figure 23: Expérimentation d'arrosage de la chaussée à Lyon (juillet 2012) - Source : (Métropole de Lyon, 2012)

Finalement, des solutions grises **apportant de l'ombrage** à l'espace urbain existent sous différentes formes, par exemple par l'installation de pergolas, de toiles d'ombrages ou encore par l'installation d'abris sur lesquels sont fixés des panneaux solaires permettant de produire en même temps de l'énergie. Bien que ces dernières puissent apporter de l'ombre et donc limiter les rayonnements solaires reçus par une surface, elles sont considérées comme moins efficaces que la végétation qui contribue activement au rafraîchissement de l'air par le mécanisme d'évapotranspiration (Perrin, 2020).

Face à l'efficacité assez faible des solutions grises, les collectivités territoriales intègrent de plus en plus de solutions vertes, également appelées solutions fondées sur la nature, dans leurs projets d'aménagements.

1.2) Les solutions fondées sur la nature – la végétalisation de l'espace urbain

Les solutions fondées sur la nature sont régulièrement mises en avant par la communauté scientifique et par les services d'urbanismes. A l'inverse des solutions grises, les solutions vertes s'appuient sur l'utilisation de la végétation et de l'eau apportant de nombreux services écosystémiques. La notion de services écosystémiques, également appelées services écologiques, renvoie généralement aux services rendus par la végétation pour augmenter la qualité des écosystèmes et les bénéfices que les humains tirent de son fonctionnement. Parmi ces services, on retrouve des services de provision (ressources en nourriture, en matière première, en eau, etc.), des services de maintien et d'habitat (biodiversité), des services culturels (loisirs, bien-être général des êtres humains) et bien entendu des services de régulation (qualité d'air, climat, séquestration du carbone, etc.) qui nous intéressent particulièrement dans l'étude de la nature en ville en lien avec l'atténuation de la surchauffe urbaine

(UICN France, 2018). Ce sont ces services apportés à la communauté qui font des solutions intégrant la végétation des alliés de plus en plus importants dans les projets d'aménagement urbain.

L'effet « climatiseur » de la végétation repose sur deux mécanismes de base qui sont l'effet d'ombrage et l'évapotranspiration. **L'effet d'ombrage** de la végétation est un facteur important dans la lutte pour le rafraîchissement urbain. Cet effet résulte de l'interception d'une grande partie des rayonnements solaires incidents par le feuillage de la végétation et de la réflexion d'une autre part des rayonnements vers l'atmosphère. Les surfaces végétales présentent un albédo plus élevé que la plupart des matériaux minéraux de l'espace urbain. Alors que l'albédo du goudron bitumé s'élève à environ 0,1, celui de la végétation est compris entre 0,2 et 0,3. De plus, selon certains auteurs, un arbre aurait la capacité d'intercepter jusqu'à 80% du rayonnement solaire incident selon la densité et la forme du feuillage (Perrin, 2020). L'interception et la réflexion des rayonnements solaires empêchent alors que ces derniers atteignent la surface du sol, ce qui limite l'augmentation des températures de surface (Bowler, Buyung-Ali, Knight, & Pullin, 2010).

L'évapotranspiration est un mécanisme qu'utilisent les végétaux pour réguler leur température et ainsi transformer l'énergie en chaleur latente plutôt qu'en chaleur sensible. Cet effet est souvent mis en avant dans les études concernant le rôle de la végétation dans le rafraîchissement de l'air. Les racines des végétaux vont puiser l'eau présente dans le sol pour l'acheminer jusqu'aux feuilles. Cette force motrice provient d'un mécanisme créé par l'évaporation de l'eau au niveau des feuilles, aspirant alors l'eau vers ces dernières (Office Nationale des Forêts, 2022). L'énergie apportée par les rayons solaires est alors utilisée pour l'évaporation des molécules d'eau et ne participe alors pas au réchauffement de l'air et des surfaces (Bowler, Buyung-Ali, Knight, & Pullin, 2010).

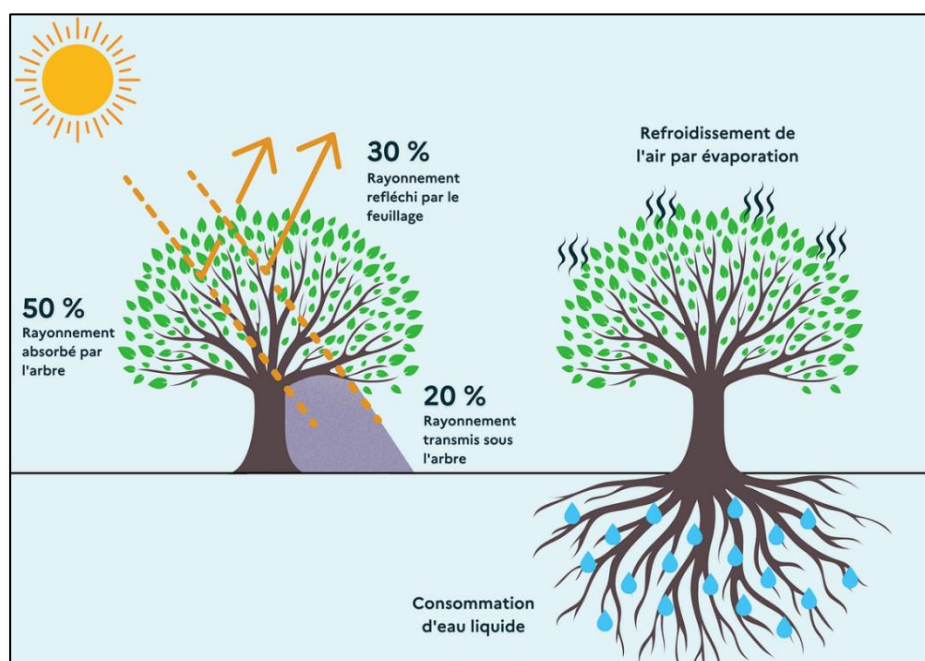


Figure 24: Rôle de l'arbre dans l'interception et la réflexion des rayons solaires et explication du mécanisme d'évapotranspiration – Source : (Office Nationale des Forêts, 2022)

Les valeurs présentées dans la figure 24 concernent les arbres, mais la végétation urbaine peut prendre un grand nombre de formes différentes, allant de la végétation rase avec des surfaces en herbe, de la végétation arbustive et arborée avec les haies et les arbres d'alignement jusqu'aux ensembles constitués par les parcs urbains qui intègrent souvent plusieurs strates de végétation. Il existe également des formes innovantes d'intégrer la nature en ville, comme les toitures et les façades végétales.

2) Les différentes formes de la végétation urbaine

La renaturation des villes peut prendre un grand nombre de formes différentes. Ces dernières ont été étudiées, entre autres, pour le cas de la France, dans le cadre du projet VegDUD évoqué plus tôt, dont l'objectif affiché est celui d'élaborer une typologie de la végétation urbaine et de comprendre son impact sur le système urbain, notamment sur les conditions climatiques. Ce projet, porté par l'organisme national d'études et d'expérimentations « Plante et Cité » et financé par l'Agence nationale de la recherche, a été mené en collaboration avec plusieurs institutions de recherche comme le Laboratoire central des ponts et chaussées et l'IRSTV de Nantes sur une durée de 7 ans, entre 2007 et 2014 (Plante & Cité, 2014). L'ouvrage de Marjorie Musy intitulé « *Une ville verte : Les rôles du végétal en ville* » fait une synthèse des résultats obtenus dans le cadre de ce projet ainsi que des recherches menées dans le monde entier (Musy, 2014).

2.1) La végétalisation des surfaces urbaines

Un premier moyen pour réintégrer la nature en ville est de travailler sur la **végétalisation des surfaces**. Il peut s'agir de surfaces horizontales comme les sols, de surfaces inclinées comme les toits ou encore de surfaces verticales comme les façades des bâtiments.

Concernant les sols, on peut évoquer les mesures de **désimperméabilisation des sols urbains**. Il s'agit de remplacer des surfaces recouvertes par des types de sols imperméables comme les enrobés par des sols végétalisés, souvent sous forme de pelouse. On peut mentionner en ce sens les campagnes de désimperméabilisation entreprises par de nombreuses villes en France, par exemple à Caen, où le programme lancé en 2020 prévoit la végétalisation des trottoirs représentant une surface totale de quatre hectares à l'échelle de la ville (Bugnot, 2023). L'objectif premier de ce genre de végétalisation se concentre généralement sur une meilleure infiltration des eaux pluviales. Bien que le remplacement des surfaces minérales par des surfaces végétales permette de limiter la surchauffe des surfaces urbaines, les effets sur la température de l'air et donc sur les ICU semblent être assez négligeables (Musy, 2014). Il semble tout de même important de mentionner ici que lorsque les surfaces recouvertes

de pelouse sont d'une superficie plus conséquente, ces espaces verts peuvent s'avérer d'une grande importance quant à la production d'air frais la nuit. Les espaces verts avec un indice de vue du ciel (*Sky view factor*) élevé permettent le refroidissement rapide de la surface par rayonnement terrestre et peuvent alors potentiellement générer localement la formation d'air frais. Ces espaces verts ouverts s'avèrent particulièrement intéressants lorsqu'ils constituent un point de départ pour un potentiel écoulement d'air frais vers la ville (Baumüller, Reuter, Hoffmann, & Hesswein, 2008).

D'autres surfaces comme **les toits et les façades** peuvent également faire l'objet d'une végétalisation dont l'influence sur le climat local dépend de plusieurs facteurs comme l'orientation de la face végétalisée par rapport au soleil ainsi que le type de végétation et de substrat utilisé. Les effets des toitures et des façades sont de trois sortes : les effets radiatifs qui interceptent les rayons solaires, les effets conductifs en isolant les murs et les toits et en modifiant leur inertie ainsi que les effets convectifs en limitant la vitesse de l'air et donc les échanges thermiques (Musy, 2014). Plusieurs villes européennes ont mis en place des projets concernant la végétalisation des façades et des toitures. La ville de Hambourg en Allemagne, par exemple, subventionne ces projets et met en avant leurs bienfaits d'un point de vue esthétique, climatique, hydrologique et pour la biodiversité (IFB Hamburg, 2024). On peut également évoquer le projet phare et mondialement connu du « Bosco Verticale » créé par l'architecte Stefano Boeri à Milan, qui s'insère dans une politique de verdissement plus large de la municipalité italienne. Bien que ces projets soient remarquables en termes d'esthétisme et d'architecture, les recherches scientifiques à ce sujet se sont principalement concentrées sur leur intérêt en termes d'efficacité énergétique des bâtiments. Davantage d'études sont alors nécessaires pour confirmer leur réel impact sur le climat à l'échelle de la rue, du quartier ou encore de la ville dans son ensemble (Musy, 2014).



Figure 26: Façade végétale à Hambourg - Source : (Stadt Hamburg, 2024)



Figure 25: Bosco verticale à Milan - Source : (Centre-ville en mouvement, 2016)

2.2) Les arbres

Les **arbres** ont reçu une attention particulière les dernières années, que ce soit de la part de la communauté scientifique ou des acteurs locaux. Ces derniers sont souvent mis en avant pour leurs services écosystémiques, mais surtout pour leur capacité à séquestrer du carbone (Musy, 2014). De nombreux acteurs de la vie publique se sont alors dernièrement prononcés en faveur de la plantation d'arbres en grand nombre sur leur territoire. Un des projets connus à l'international est celui lancé à Montréal en 2012, intitulé « Plan d'action canopée ». Après avoir développé un indice de canopée calculé à partir d'images satellites, ce plan d'action prévoit d'augmenter cet indice de 5% en passant de 20% à 25% de surface couverte par des arbres d'ici 2025, ce qui implique la plantation de plus de 70.000 arbres dans l'espace public et privé de l'agglomération montréalaise (Direction des grands parcs et du verdissement, 2012). A l'échelle de la France, on peut également mentionner la promesse faite par le Président Emmanuel Macron de planter 1 milliard d'arbres d'ici 2032 sur le territoire national (Service d'information du Gouvernement, 2024).

Les études concernant les services rendus par l'arbre en milieu urbain se sont multipliées ces dernières années. Ces recherches intègrent toute sorte de projets, allant de mesures empiriques à la création de modèles numériques de simulation des effets de l'arbre sur l'environnement urbain. A ce titre, on peut mentionner le projet ANR Cooltrees mené par l'INRAE dont l'objectif est de développer un logiciel de modélisation 3D permettant d'évaluer l'impact des projets d'aménagement urbain intégrant de la végétation pour la gestion des îlots de chaleur (Triollet, 2023). A Liège, des recherches ont été menées afin d'évaluer les services écosystémiques rendus par l'arbre en ville en combinant des méthodes de terrain et de modélisation. Les résultats ont alors montré leur efficacité dans l'amélioration de la qualité de l'air, dans le stockage et la séquestration de carbone ainsi que dans la gestion améliorée des eaux pluviales (Selmi & Teller, 2021).

Les arbres sont alors particulièrement reconnus pour les nombreux services écosystémiques qu'ils rendent à l'environnement. En plus de la gestion des eaux, du captage de carbone et de l'amélioration de la qualité de l'air mentionnée juste avant, ils constituent également un habitat pour la faune et la flore urbaine, améliorant alors la biodiversité urbaine. De plus, l'arbre peut également rendre des services socio-économiques, notamment en augmentant la qualité esthétique de la ville et donc le bien-être des habitants ainsi que la valeur foncière des biens immobiliers.

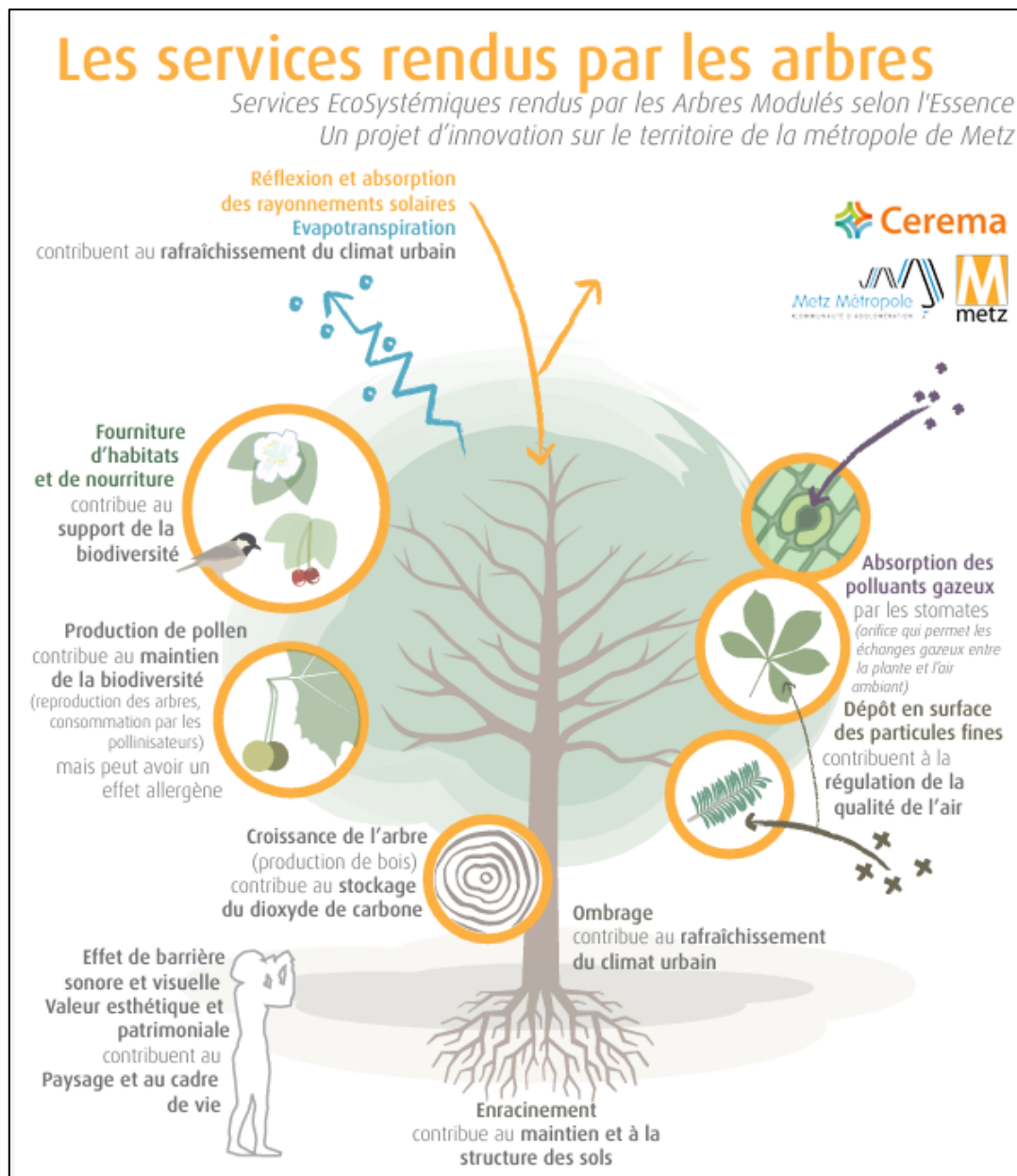


Figure 27: Infographie présentant les services écosystémiques rendus par l'arbre - Source : (Cerema, 2019)

Au regard de tous ces bienfaits, l'arbre apparaît comme un réel couteau suisse pour l'aménagement urbain durable. Bien qu'un grand nombre d'études semblent donc montrer l'efficacité de l'arbre pour le rafraîchissement urbain, l'effet concret d'un arbre sur la température de l'air n'est pas toujours facile à quantifier. L'arbre isolé, bien qu'il procure de l'ombre aux surfaces à proximité, ne peut probablement pas suffire à réduire la température de l'air. Selon les données présentées dans la synthèse de Marjorie Musy, le rôle des arbres d'alignement se limite principalement à son effet d'ombrage, l'air potentiellement plus frais dans le houppier étant rapidement dissipé par l'effet du vent. Leur réel intérêt dans la lutte contre la surchauffe urbaine réside alors dans leur regroupement et leur association à d'autres types de végétation, comme dans les parcs urbains (Musy, 2014).

3) Les parcs urbains : des îlots de fraîcheur à fort potentiel rafraichissant

Alors que le pouvoir rafraichissant des mesures de végétalisation des façades et des toits et donc leur réel intérêt dans la lutte contre les ICU reste à prouver, un grand nombre d'études ont démontré l'intérêt des grands espaces verts en tant qu'îlot de fraîcheur urbain (IFU). Les résultats de ces études seront présentés dans ce chapitre après une discussion sur la définition du terme d'IFU.

3.1) L'îlot de fraîcheur urbain – des définitions diverses selon l'objet d'étude

L'étude de la végétation dans les villes et de leur effet sur le climat urbain est assez récente comparée à l'étude des ICU (Musy, 2014). La définition du terme d'îlot de fraîcheur urbain (IFU) ne semble d'ailleurs pas faire l'unanimité dans la littérature scientifique. Dans un travail sur l'existence des IFU à Strasbourg, les chercheurs de l'Université de Strasbourg définissent ces derniers comme le phénomène inverse des ICU, c'est-à-dire des espaces urbains qui sont plus frais que la campagne environnante. Ce phénomène résulte selon eux de la morphologie urbaine, lorsque l'on observe des espaces urbains très denses avec des rues particulièrement étroites et profondes capables de procurer de l'ombre et de bloquer les rayonnements solaires en journée (Kastendeuch, Massing, Philipps, & Najjar, 2022). Concernant la ville de Caen, cette configuration très dense est présente dans la rue Froide en centre-ville, dont le nom laisse penser qu'elle pourrait effectivement être plus fraîche, du moins que le reste du centre-ville, et qu'elle pourrait constituer un îlot de fraîcheur tel qu'il est défini par les chercheurs strasbourgeois.

Néanmoins, dans le cadre de l'étude du pouvoir rafraichissant de la végétation, la définition d'îlot de fraîcheur urbain diverge de celle utilisée pour Strasbourg. Dans la littérature anglophone, les auteurs des études sur l'effet des espaces verts dans le rafraichissement urbain évoquent régulièrement le terme de « *parc cool island* », que l'on pourrait traduire par « *îlot de fraîcheur de parc* » ou encore plus simplement par « *zone de fraîcheur* ». S. Oliveira, qui a étudié l'effet d'un parc urbain à Lisbonne, définit alors le « *parc cool island* » comme la différence de température de l'air mesurée à l'intérieur et à l'extérieur d'un parc urbain, le but étant de mesurer l'influence d'un espace vert sur les environs (Oliveira, Andrade, & Vaz, 2011). Alors que le terme de « *parc cool island* » est assez répandu dans la littérature scientifique anglophone, on retrouve également le terme de « *island of freshness* », qui est alors défini comme la somme des facteurs à l'origine d'un effet de rafraichissement par un milieu naturel (Bouketta, 2023).

La Ville de Paris semble donner la définition de l'îlot de fraîcheur urbain la plus adéquate dans le cadre de l'étude sur les espaces verts de ce mémoire. Les IFU sont alors considérés comme « *des lieux de halte et/ou de repos, accessibles au grand public et repérés comme source de rafraîchissement par rapport à leur environnement proche en période chaude ou caniculaire* » (Ville de Paris, Îlots de fraîcheur – Espaces verts « frais », 2020). La municipalité a également créé un jeu de données identifiant ces îlots de fraîcheur selon leur taux de couverture végétale haute. Un parc couvert à plus de 50% par de la végétation haute (arbres de plus de 8m) sera alors considéré comme frais, alors qu'un espace vert à moins de 25% de végétation haute sera considéré comme chaud. De plus, tous les espaces verts sont considérés comme frais la nuit (Ville de Paris, 2020). Une carte interactive de ces îlots de fraîcheur est mise à disposition en ligne par la Ville de Paris.

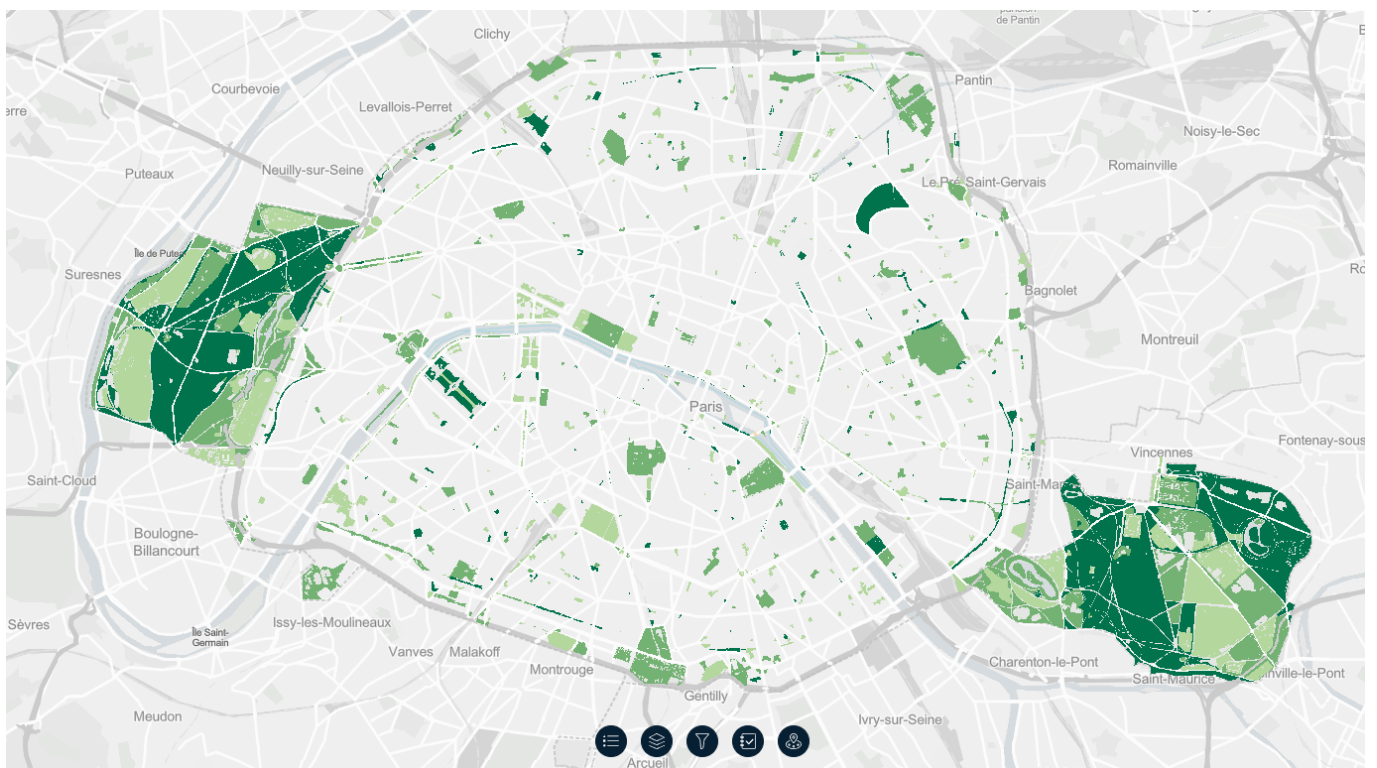


Figure 28: Carte des îlots de fraîcheur à Paris - Source : (Ville de Paris, 2020)

La classification de l'efficacité des îlots de fraîcheur uniquement selon leur part de surface couverte par de la végétation haute semble néanmoins discutable. Tout comme les ICU, les IFU sont des phénomènes complexes qui dépendent de plusieurs facteurs, dont le type de végétation fait partie, mais qui comprend également la taille, la forme (Bowler, Buyung-Ali, Knight, & Pullin, 2010) ou encore la topographie et la situation géographique du parc dans la ville. L'importance de ces facteurs devient claire au regard de l'analyse des résultats obtenus à Caen grâce aux données empiriques, qui sera présentée dans la partie IV de ce mémoire.

La diversité des termes utilisés pour qualifier les îlots de fraîcheur urbains montre bien qu'il s'agit d'un sujet encore assez récent qui manque encore de clarté sur les définitions. Cela résulte probablement d'un questionnement autour de l'échelle à laquelle on doit étudier ce phénomène, qui se pose également pour le terme d'îlot de chaleur urbain. On peut alors chercher à identifier l'influence de la végétation sur l'ICU à l'échelle de la ville. La mise en place de ce genre de mesure semble néanmoins difficile à mettre en place. Lorsque l'on mesure la température de l'air, il est impossible d'isoler les différents facteurs qui influencent cette dernière. La modélisation numérique, quant à elle, peut apporter des indications sur l'effet de la végétation, mais ces données ne peuvent être vérifiées sur le terrain.

L'échelle d'étude la plus adéquate pour l'étude du rôle de la végétation sur les températures de l'air semble être celle des habitants, puisque ce sont ces derniers qui profitent de ses effets. A cette échelle, qui est celle de la canopée urbaine, il est possible de mesurer des différences de températures entre les espaces verts et les espaces minéraux et donc d'observer potentiellement des effets microclimatiques à l'origine des IFU.

Dans ce mémoire, l'îlot de fraîcheur urbain ne sera donc pas considéré comme l'effet inverse d'un îlot de chaleur urbain (selon l'opposition ville/campagne), mais comme l'équivalent de ce que les auteurs anglophones entendent sous le terme de « parc cool island », c'est-à-dire, **un espace vert intra-urbain où l'on observe des températures inférieures à celles de ses environs.**

L'existence de ces îlots de fraîcheur urbains et donc l'efficacité de la végétation dans le rafraîchissement de l'air a été démontrée dans de nombreuses études concernant des villes de différents types de climat, dont quelques-unes sont présentées à la suite de cette partie.

3.2) Exemple d'études des parcs urbains dans le cadre des IFU

Tout comme les ICU, les îlots de fraîcheur sont des phénomènes observables sous tout type de climat et ont été étudiés dans les villes à travers le monde entier, avec une attention particulière portée aux parcs urbains. Les résultats montrent que les différences de températures observées entre le parc et l'espace minéralisé dépendent de plusieurs facteurs, dont la superficie du parc, sa forme, la composition végétale ou encore l'état de santé de la végétation.

C'est ce qu'a conclu une équipe de chercheurs chinois menant des recherches sur l'efficacité des espaces verts sur le rafraîchissement urbain à travers 30 villes dans le monde (Wang, et al., 2022).

A partir des données satellites Landsat 8, ces chercheurs ont calculé et analysé les relations entre les types d'occupation du sol et leurs effets sur les températures du sol et, par extension, les températures de l'air. Les résultats de leur étude ont montré qu'en moyenne, la différence de température entre l'espace urbain et l'espace vert est de l'ordre de 2,14 °C. Les écarts les plus importants ont généralement été observés dans les climats continentaux en Amérique du Nord, en Europe et en Asie de l'Est, alors que les écarts étaient faibles proche de l'Equateur. Les climats tempérés affichent des écarts proches de la moyenne globale.

En plus de la différence de température, les chercheurs ont également tenté d'analyser l'influence d'un parc urbain sur les températures aux alentours. En faisant le ratio entre l'écart des températures et la distance entre la parcelle et le point où la tendance de la courbe des températures s'inverse, les résultats ont montré une différence de température moyenne de 0,35°C par tranche de 30m de distance au parc.

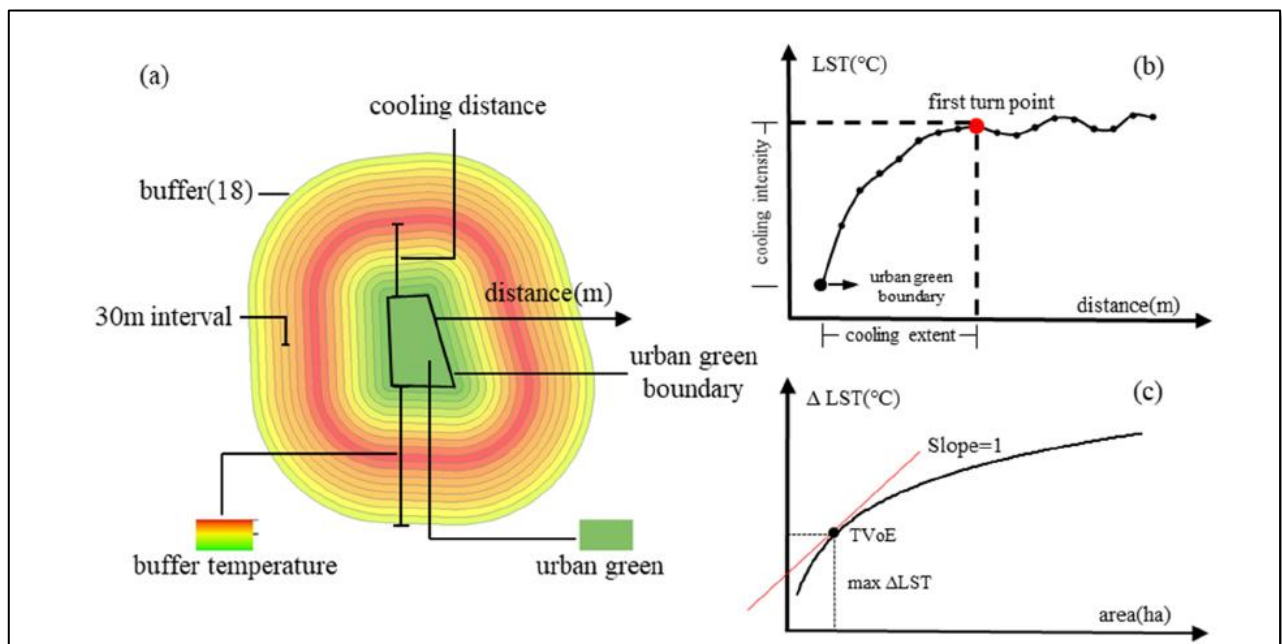


Figure 29: (a) Zone tampon élaborée par l'étude ; (b) Illustration de la variation des températures de surface selon la distance ; (c) Efficacité de refroidissement selon le modèle - Source : (Wang, et al., 2022)

Bien que les résultats aient montré l'efficacité des espaces verts dans le rafraîchissement urbain, ces chiffres ne représentent que des valeurs moyennes calculées à partir d'images satellites. Dans une étude plus approfondie des IFU, il est important de prendre en compte les spécificités de chaque ville comme les facteurs naturels (précipitations, vent, ...) et anthropiques (configuration de l'espace urbain, densité de population). Dans une même zone climatique, l'effet de refroidissement des espaces verts peut donc être très différent d'une ville à l'autre.

La synthèse proposée par Bowler et al. en 2010 donne un aperçu des recherches menées sur les espaces verts basées, à l'inverse des recherches de Wang et al. (2022), sur des données empiriques. En se basant sur les 16 études retenues dans sa synthèse, la moyenne des écarts de température entre les espaces verts et la ville en journée est donnée à 0,94°C. Les études étant peu nombreuses et menées sur un faible nombre d'espaces verts, il est néanmoins difficile d'en tirer des conclusions généralisables. Les écarts moyens nocturnes sont très proches de ceux observés en journée, avec une moyenne de 1,15°C (7 études).

De plus, les écarts urbain/vert ont été moins élevés lorsque la température de référence urbaine était située à proximité du parc, ce qui pourrait indiquer la possible diffusion de l'air frais du parc vers ses environs. Une étude menée par Chen et Wong (2006) cherche à répondre à cette question en mesurant l'impact de 2 grands espaces verts à Singapour sur les environs. Les températures ont été enregistrées jusqu'à une distance de 500m du parc. Les résultats ont montré que les températures augmentent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'espace vert (Chen & Wong, 2006). Une autre étude menée à Göteborg en Suède par Upmanis et al. en 1998 suggère que l'influence d'un parc de 156 ha pouvait atteindre 1 km au-delà de la limite du parc (Upmanis, Eliasson, & Lindqvist, 1998).

Finalement, la part de couverture végétale et le type de végétation ont également montré une influence sur les dynamiques thermiques des espaces verts. Certaines études ont montré que les espaces verts densément boisés affichaient des températures moins élevées en journée, mais que la canopée des arbres peut également retenir la chaleur la nuit et donc limiter le rafraîchissement nocturne (Bowler, Buyung-Ali, Knight, & Pullin, 2010).

Il existe un grand nombre d'études menées en Asie, notamment en Chine et au Japon, ou encore dans les climats plus chauds comme en Méditerranée. A ce titre, on peut mentionner l'étude menée par Potcher et al. en 2006 à Tel Aviv sur trois parcs urbains à configuration végétale différente. Lorsque la végétation arborée y était dense, les températures observées dans l'espace vert ont été jusqu'à 3,5°C inférieures à celles de l'espace urbain. A l'inverse, les espaces à végétation rase n'ont pas montré de différence significative (Potcher, Cohen, & Bitan, 2006).

Oliveira et al. ont réalisé une étude à Lisbonne en 2011 dans un jardin de 0,24 ha situé dans le quartier de Campo de Ourique. Sur les 6 jours de campagne, les différences entre le jardin et les rues environnantes ont atteint jusqu'à 6,2°C, avec des écarts qui diminuent au fur et à mesure que l'on s'approche de l'espace vert (Oliveira, Andrade, & Vaz, 2011).

Pour les climats plus tempérés océaniques comme à Caen, les recherches sont beaucoup moins nombreuses. On peut néanmoins mentionner les recherches menées pendant 5 mois par Doick et al. (2014) sur un grand parc urbain à Londres. L'objectif de cette étude était de fournir des données empiriques sur l'étendue du rafraîchissement généré par le parc dans l'optique de réduire l'ICU nocturne. Le parc en question, Kensington Parc, est d'une superficie de 111 ha et contient deux étendues d'eau. Entre le 1^{er} août et le 28 décembre, 8 stations ont été installées dans le parc et 12 stations ont mesuré la température le long d'un transect dans l'espace urbain.

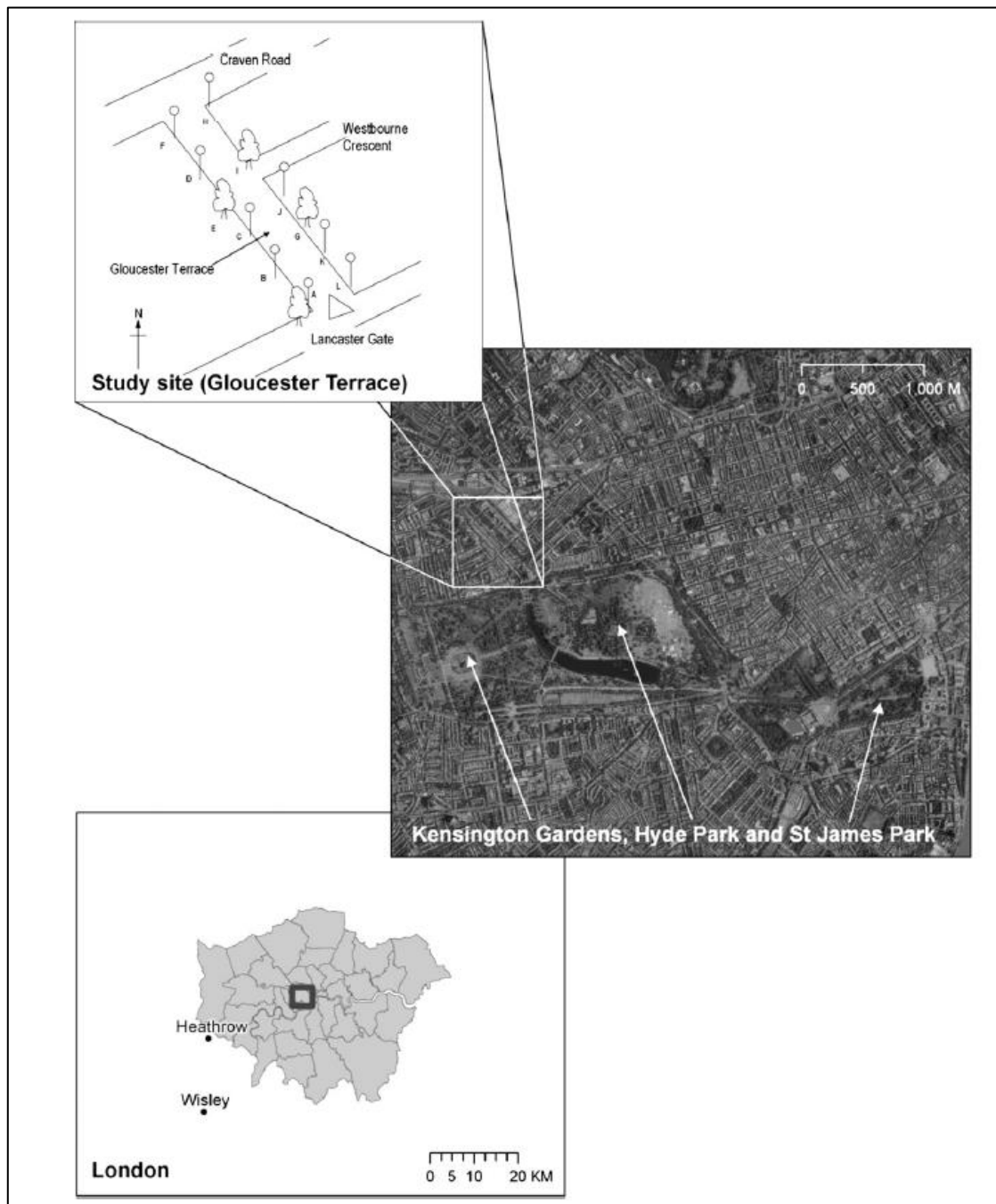


Figure 30: Zone d'étude au centre de Londres dans le cadre des recherches de Doick et al. (2014) - Source : (Doick, Peace, & Hutchings, 2014)

En combinant ces données empiriques avec des modélisations numériques d'ICU, les résultats obtenus ont montré une réduction moyenne des températures de 1,1°C dans les environs par l'effet de refroidissement du parc, avec un maximum à plus de 4°C. Les distances sous influence du parc ont varié entre 20 m et 440 m selon les nuits. Plus le vent est faible, plus le parc semble se rafraichir et plus la diffusion de son air frais sur les environs est importante. Autrement dit, plus les conditions semblent être propices aux ICU, plus elles le sont également pour les IFU (Doick, Peace, & Hutchings, 2014).

Bien que les chercheurs s'accordent globalement sur le fait que la végétation sous forme de parc urbain est capable de rafraichir l'espace urbain, il est difficile de trouver des études qui s'intéressent à mesurer l'efficacité de ces îlots de fraîcheur urbains végétaux en France. L'attention semble encore bien plus tournée vers l'étude des îlots de chaleurs urbains. Pourtant, le terme d'îlot de fraîcheur semble bien avoir trouvé sa place dans les politiques d'aménagement urbain cherchant à lutter contre la surchauffe urbaine, comme le montre l'exemple de la Ville de Paris présenté auparavant.

Les différentes études présentées dans cette sous-partie ont permis de mettre en avant plusieurs points sur la capacité des parcs urbains à constituer des îlots de fraîcheur urbains. Premièrement, les espaces verts sont en moyenne plus frais de 1 à 2°C que les espaces urbains. Néanmoins, ces valeurs moyennes cachent des écarts parfois importants. Comme cela est le cas pour les ICU, les différences de températures peuvent atteindre des niveaux élevés lorsque les conditions météorologiques sont favorables. C'est ce que montre l'étude menée à Lisbonne, où les écarts ont atteint jusqu'à 6°C entre le parc et l'espace urbain.

De plus, des facteurs comme la taille ou encore la composition végétale des espaces verts peuvent avoir un impact sur la capacité de ces derniers à produire et à diffuser de l'air frais. Logiquement, plus un espace vert est grand, plus la quantité d'air frais possiblement formée dans ce dernier est importante. Une végétation arborée dense peut limiter le réchauffement de l'air en journée par l'effet d'ombrage et d'évapotranspiration, mais peut tout de même provoquer le piégeage du rayonnement terrestre nocturne à l'origine du rafraichissement de l'air. Cela limite alors la diminution des températures à la tombée de la nuit et donc la capacité de ces espaces verts à produire de l'air frais. Pour favoriser les échanges entre l'atmosphère et la surface durant la nuit et donc le rafraichissement de l'air, la végétation basse semble alors jouer un rôle important. La diffusion de l'air peut également être entravée par une végétation trop dense sur les pourtours du parc, puisque ces derniers peuvent présenter des obstacles à la circulation de l'air.

La diffusion de cet air frais vers les environs a pu être prouvée par les différentes études menées à travers le monde, mais dépend, tout comme l'intensité du rafraîchissement, entre autres des conditions météorologiques. Il semblerait également, au regard des résultats présentés ici, que la taille de l'espace vert joue un rôle sur l'étendue de la zone sous influence du parc. Plus le parc est grand, plus il pourrait être capable de diffuser la fraîcheur sur une grande distance. Les exemples de Göteborg, de Singapour et de Londres montrent que cette influence peut dans certains cas dépasser les 500 m de distance pour des espaces verts de plus de 100 ha de superficie. Néanmoins, le degré de confinement des espaces verts, qui peut être lié à la topographie ou encore à la présence d'obstacles sur les alentours du parc comme des murs ou des bâtiments de grande taille, peut entraver la circulation de l'air frais depuis l'espace vert vers les quartiers environnants.

Dans beaucoup de cas, les études concernant les IFU ne semblent pas ou peu prendre en compte la question de la topographie, qui semble pourtant fondamentale dans la formation et la diffusion de l'air frais. Les dépressions topographiques peuvent constituer des trous à froid, c'est-à-dire des espaces où l'air frais s'accumule par effet de gravité et qui sont donc particulièrement efficaces dans la formation de potentiels IFU. De plus, la diffusion de l'air frais peut être initiée par une topographie en pente et donc la mise en circulation de l'air. Il est possible que dans les études présentées ici, la topographie ne joue pas un rôle fondamental, ce qui expliquerait le fait qu'elle ne soit pas présentée en détail. Le rôle du géographe dans la compréhension de l'espace devient néanmoins clair, puisque ce dernier étudiera tous les aspects de l'espace en question afin de comprendre le fonctionnement du système dans son intégralité.

En ce sens, l'étude des ICU et des IFU à l'intérieur de la canopée urbaine et donc à l'échelle vécue par les habitants, comme cela est le cas dans ce mémoire, est particulièrement intéressante et pertinente pour les géographes. L'étude des températures à cette échelle fait particulièrement sens lorsque l'on s'intéresse à l'aménagement de l'espace urbain et donc à l'espace vécu par les habitants de la ville. Cet espace vécu, particulièrement cher aux géographes, comprend l'ensemble des espaces pratiqués quotidiennement où ont lieu les interrelations sociales et qui sont donc des lieux appropriés par les habitants auxquels ils attachent des représentations. La manière dont les habitants perçoivent l'espace urbain dépend d'un grand nombre de facteurs. Le confort thermique en ville, lié à la température de l'air, mais également à la température ressentie et à la qualité esthétique de l'espace urbain en général, peut donc influencer le bien-être de la population. L'étude des ICU et IFU à l'échelle vécu de l'habitant est donc, en plus d'être une question de climatologue, une question foncièrement géographique.

4) Conclusion de la partie II

Le problème de la surchauffe urbaine étant bien identifié aujourd'hui, il existe de nombreuses possibilités pour agir contre la chaleur en ville. Les solutions grises, basées sur les réponses techniques, sont parfois préférées aux solutions vertes pour leur facilité à être mises en place ou encore pour des sites où la place pour de grands projets verts est limitée. Néanmoins, les solutions fondées sur la nature proposent de nombreux services écosystémiques en diminuant le stress thermique, mais également en améliorant la gestion des eaux pluviales, en captant du carbone ou encore en contribuant à constituer un habitat pour la biodiversité urbaine.

L'intégration de la végétation en ville peut prendre des formes différentes qui s'avèrent plus ou moins efficaces dans la lutte contre les ICU. Certains projets sont mondialement reconnus pour leur qualité esthétique et architecturale, comme le Bosco Verticale à Milan, mais l'impact de la végétalisation des façades et des toits sur la température de l'air à l'échelle d'une rue ou d'un quartier est peu connu. La plantation des arbres est devenue une mesure de plus en plus populaire dans les projets d'aménagements et ces derniers sont souvent mis en avant pour leur capacité à stocker du carbone et à limiter la surchauffe urbaine grâce aux mécanismes d'ombrage et d'évapotranspiration. L'arbre à lui seul ne suffit pourtant pas à constituer un réel îlot de fraîcheur, c'est-à-dire un espace intra-urbain plus frais que ses environs.

Dans le cadre de l'étude des îlots de fraîcheur urbains, de nombreuses études se sont alors concentrées sur les parcs urbains. Les différents exemples présentés auparavant indiquent que les parcs urbains sont capables de limiter la surchauffe de l'air et de diffuser cet air plus frais sur les espaces urbains situés à proximité. Leur efficacité dépend d'un grand nombre de facteurs qui, comme pour les ICU, sont à la fois dynamiques (conditions météorologiques) et statiques (composition végétale, état de santé de la végétation, surface, etc.). Les écarts moyens observés dans les différentes études se situent aux alentours de 1°C à 2°C, mais ces moyennes cachent des situations aux écarts certainement plus importants. De plus, comme il a été évoqué pour les ICU, chaque ville et chaque espace possède son propre fonctionnement thermique. Bien que l'on puisse observer certaines tendances générales, il semble indispensable d'étudier en détail un espace vert précis si l'on veut connaître sa capacité de rafraîchissement et de diffusion de cet air frais.

C'est dans cette logique que s'inscrit ce mémoire. Les parties qui suivent présentent alors brièvement la zone des études avant de passer sur l'analyse en détail de l'ICU caennais, puis des dynamiques thermiques des différents espaces verts de l'agglomération caennaise dans le but d'identifier l'existence ou non d'îlots de fraîcheur urbains.

Partie III – L’agglomération caennaise – présentation de la zone d’étude

Comme mentionné dans la première partie, les caractéristiques d’une ville conditionnent en partie le climat urbain. Avant de procéder à l’analyse détaillée du climat urbain de l’agglomération caennaise, il convient de présenter plus précisément le terrain de l’étude, notamment par sa situation géographique, l’occupation du sol, la topographie, mais également le contexte climatique régional.

1) Caractéristiques démographiques et situation géographique

L’agglomération de Caen se situe dans le Calvados en Normandie et compte environ 208.000 habitants répartis sur les 24 communes de l’unité urbaine. Elle constitue ainsi la troisième plus grande agglomération de Normandie après Rouen et Le Havre (INSEE, 2024). L’unité urbaine de Caen fait partie de la communauté urbaine de Caen La Mer qui compte plus de 270.000 habitants et 48 communes sur une superficie de 366 km² allant jusqu’à la côte. La densité démographique moyenne s’élève à environ 1.200 habitants/km² pour l’unité urbaine, et à 4.100 hab./km² pour la commune de Caen et donc le centre de l’agglomération. En plus de constituer une aire d’attraction importante dans le Calvados, notamment par la présence de l’Université et des nombreuses entreprises installées dans le secteur, la communauté urbaine accueille également un grand nombre de visiteurs en lien avec le tourisme estival ou encore historique lié aux plages du débarquement (Caen La Mer, 2024).

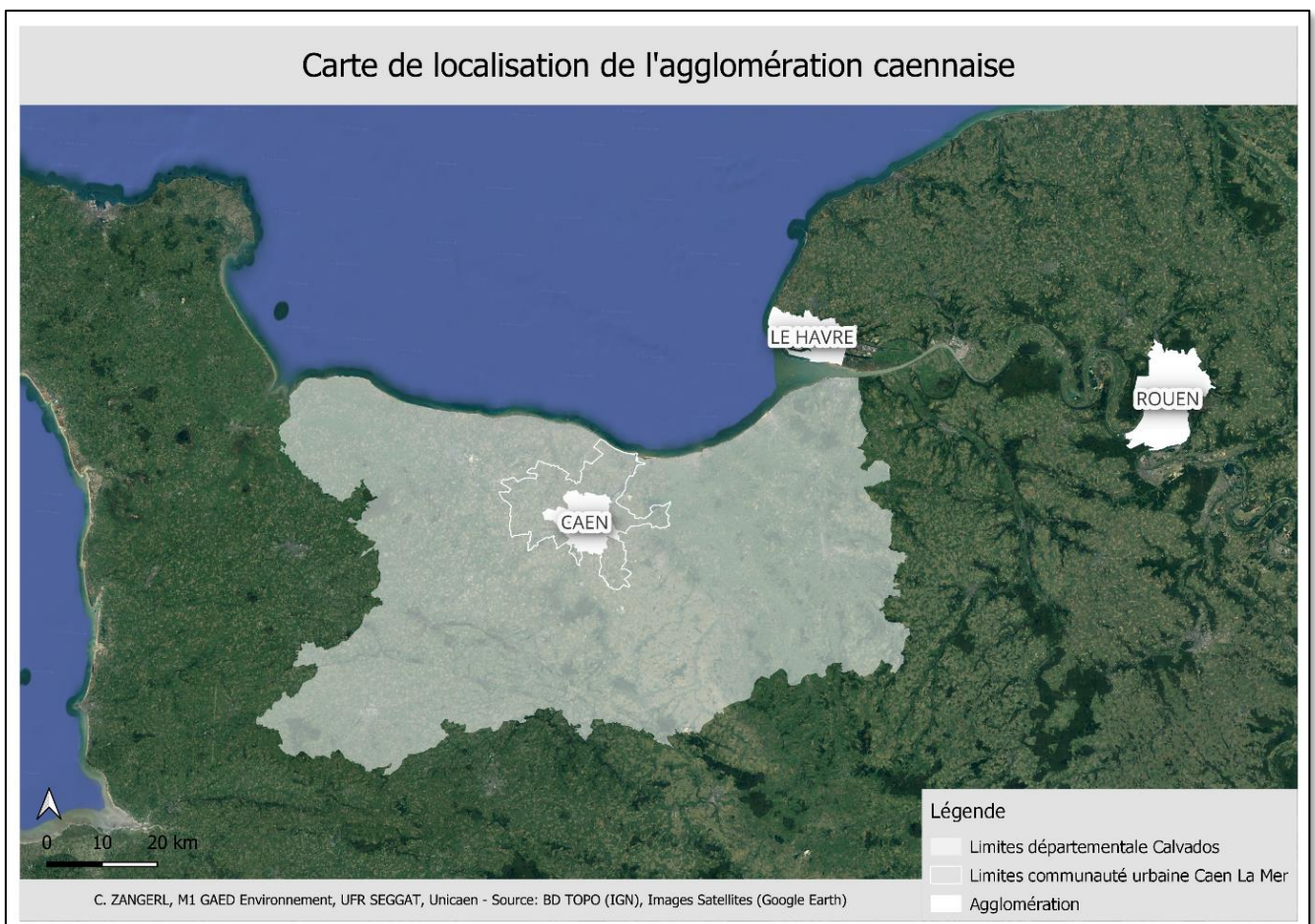


Figure 31: Carte de localisation de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl

2) Topographie

L'agglomération caennaise se situe dans le Bassin parisien, sur le plateau calcaire et à une quinzaine de kilomètres au sud de la mer de la Manche. L'Orne, qui s'écoule du sud-ouest vers le nord-est pour se jeter dans la mer à Ouistreham, a formé une large vallée à fond plat dans laquelle s'est développée la ville. Le centre-ville de Caen, qui présente une forte densité de bâtiments et des espaces particulièrement imperméabilisés, se situe dans le fond de vallée à une altitude entre 5 et 6 m. Le point culminant de l'agglomération se situe à environ 80 m d'altitude dans le parc de la Colline aux Oiseaux, situé sur le plateau au nord-ouest du centre-ville. Alors que l'altitude du plateau au nord de l'agglomération est comprise entre 60 m et 75 m, la partie située au sud ne s'élève qu'à environ 30 m. Le versant exposé sud-est présente une pente plutôt régulière, mais très légère (environ 1,3% pour la majeure partie). A l'inverse, le versant exposé nord-ouest est marqué par un escarpement d'environ 20 mètres qui délimite le plateau calcaire au sud.

Bien que l'altitude et le dénivelé ne soient pas assez marquants pour que l'on observe un gradient thermique adiabatique, la topographie peut exercer une influence sur la circulation de l'air, notamment en ce qui concerne la stagnation de l'air dans les dépressions topographiques ou encore son écoulement le long des pentes.

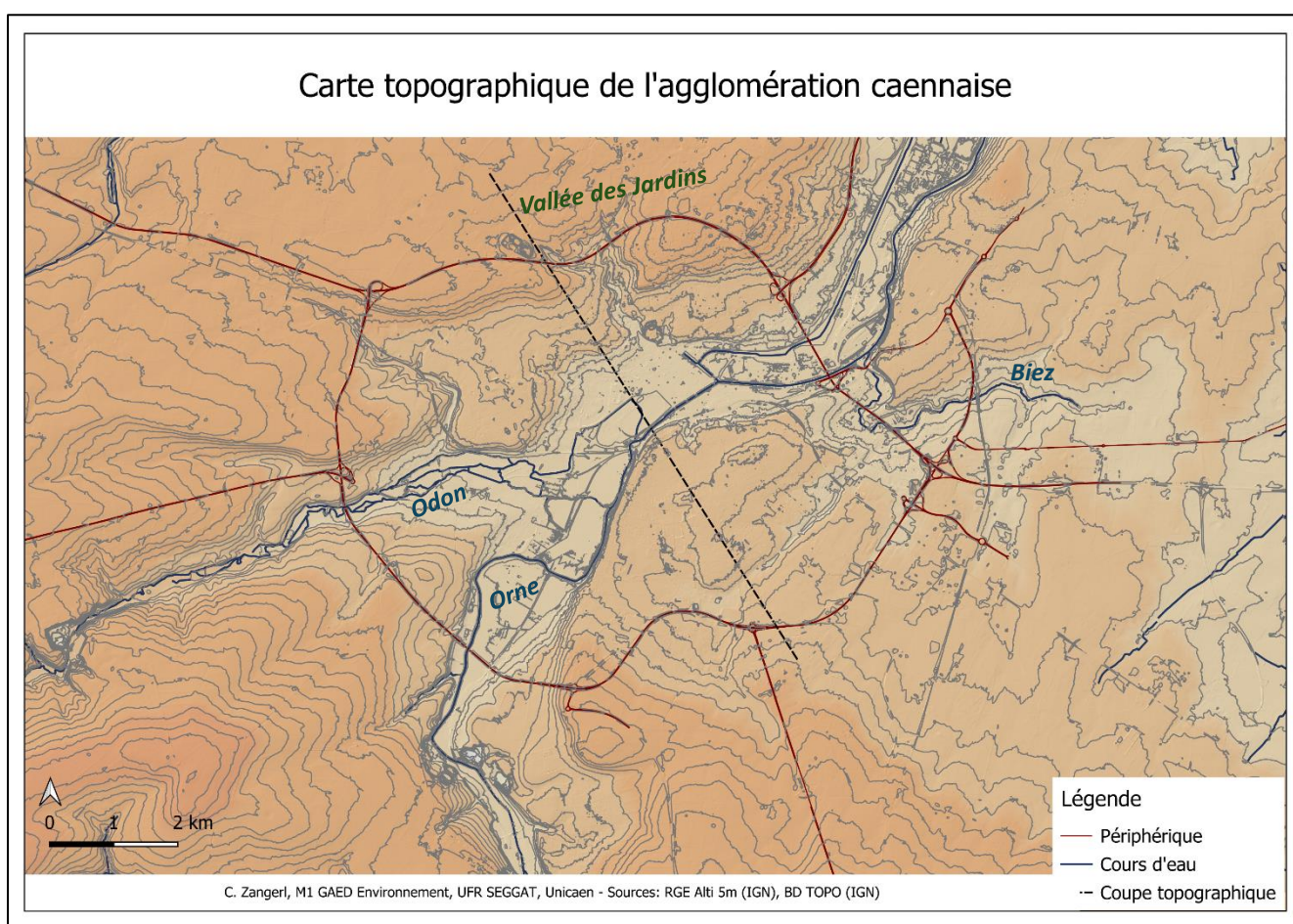


Figure 32: Carte topographique de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl

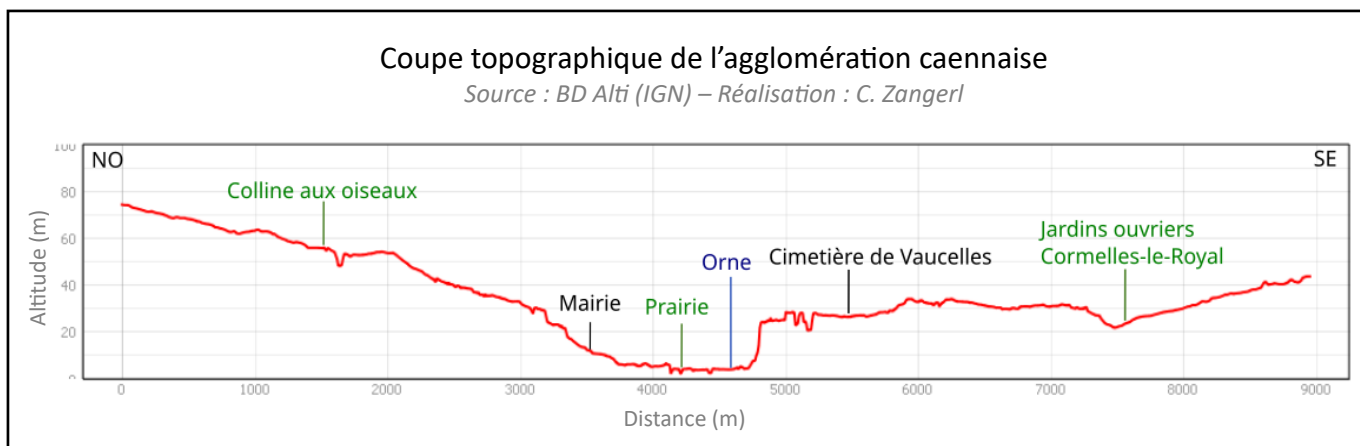


Figure 33: Coupe topographique de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl

Sur les figures 32 et 34, on distingue clairement la vallée de l'Orne qui coupe l'agglomération caennaise en rive droite et rive gauche. A l'ouest, on distingue également la vallée de l'Odon qui se jette dans la vallée de l'Orne en amont du centre-ville. Le versant exposé sud-est est marqué par la présence de petits vallons secs, dont la Vallée des Jardins qui sera étudiée de plus près dans le cadre de l'étude des îlots de fraîcheur urbains. A l'est de l'agglomération s'écoule le Biez qui a également creusé un vallon qui rejoint la vallée de l'Orne à Mondeville. L'escarpement sur le versant exposé nord-ouest est également clairement visible sur le bloc diagramme (figure 34).

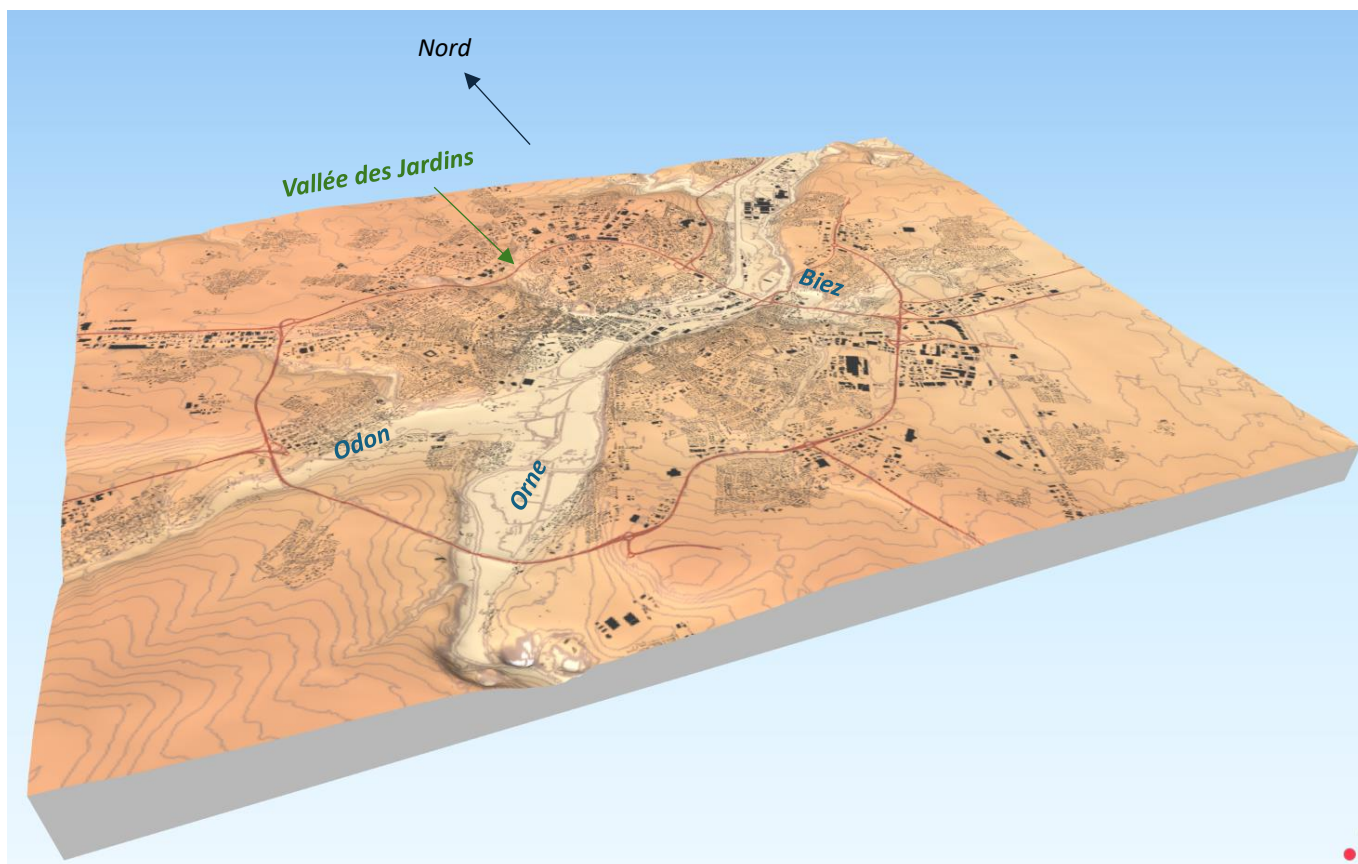


Figure 34: Bloc diagramme de l'agglomération caennaise montrant la topographie, les bâtiments (noirs) et les principales voies de communications (rouge) - Réalisation : C. Zangerl

3) Occupation du sol

L'occupation du sol est une caractéristique clé dans l'analyse du climat urbain. Elle peut être caractérisée de différentes manières. En climatologie urbaine, il est fréquent d'utiliser la classification en LCZ (Local Climate Zones) selon la méthode présentée par Stewart et Oke. Néanmoins, cette classification étant plus adaptée aux grandes villes américaines qu'aux villes européennes de taille intermédiaire comme Caen, je préfère proposer ma propre classification. On peut alors identifier 5 grands types d'occupations du sol (hors espaces verts).

Type 1 : Le quartier St. Jean est marqué par une très grande proportion de surface imperméable et des bâtiments d'une hauteur d'environ 4 à 6 étages agencés en forme d'îlots carrés ou rectangulaires. Le quartier est traversé par des rues rectilignes qui quadrillent le quartier. Cette forme en damier est l'héritage de la reconstruction du quartier après la Seconde Guerre mondiale.

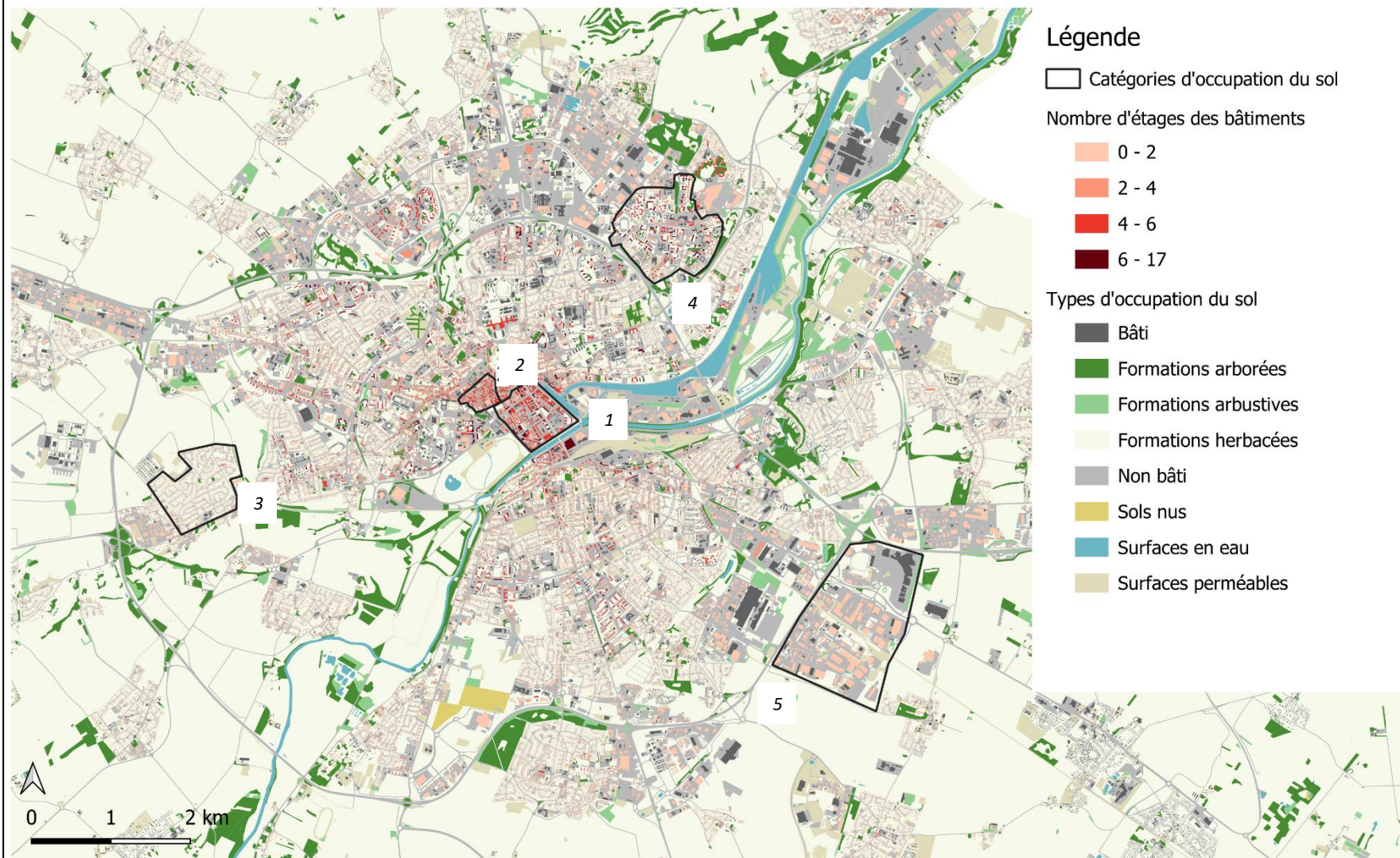
Type 2 : A l'inverse, l'ancien centre-ville de Caen a gardé sa morphologie urbaine d'avant-guerre, avec des bâtiments plus petits d'une hauteur entre 2 et 4 étages pour la majorité et des rues étroites. On y retrouve donc également une importante densité de bâtiments et une très grande part de surfaces imperméables, mais avec des rues plus étroites et moins rectilignes que dans le quartier Saint Jean. Ce type de morphologie urbaine s'étend également le long de la rue Caponnière.

Type 3 : Sur une grande partie du reste de l'agglomération caennaise, on retrouve des quartiers résidentiels qui se caractérisent par la présence de maisons individuelles dotées d'un jardin plus ou moins grand selon les quartiers. La densité de bâtiments y est alors bien moins importante que dans le centre-ville et la part de la surface végétale perméable est largement supérieure à celle observée dans les deux autres cas présentés juste avant.

Type 4 : Certains quartiers sont marqués par des grands-ensembles d'après-guerre et des 30 glorieuses et se caractérisent donc par la présence de logements collectifs sous forme de bâtiments en barre ou en tour construits entre 1950 et 1980. Concernant la ville de Caen, on peut ici mentionner les quartiers de la Grâce de Dieu, de la Guérinière, de la Pierre Heuzé, du Chemin vert et du Calvaire Saint-Pierre, mais également des quartiers en périphérie de Caen comme à Hérouville.

Type 5 : Finalement, en ce qui concerne les espaces urbanisés, il reste à mentionner les zones commerciales et industrielles, qui présentent généralement une très grande part de surfaces imperméables et des bâtiments d'une surface importante. Ces derniers se situent au sud-ouest de l'agglomération (Mondeville, Colombelles), au nord (Hérouville, La Folie Couvrechef) et au nord-ouest (Rots, Carpiquet).

Carte d'occupation du sol de l'agglomération caennaise



C. Zangerl, M1 GAED Environnement, UFR SEGGAT, Unicaen - Sources: OCS (AUCAME), BD TOPO (IGN)

Figure 35: Carte d'occupation du sol de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl

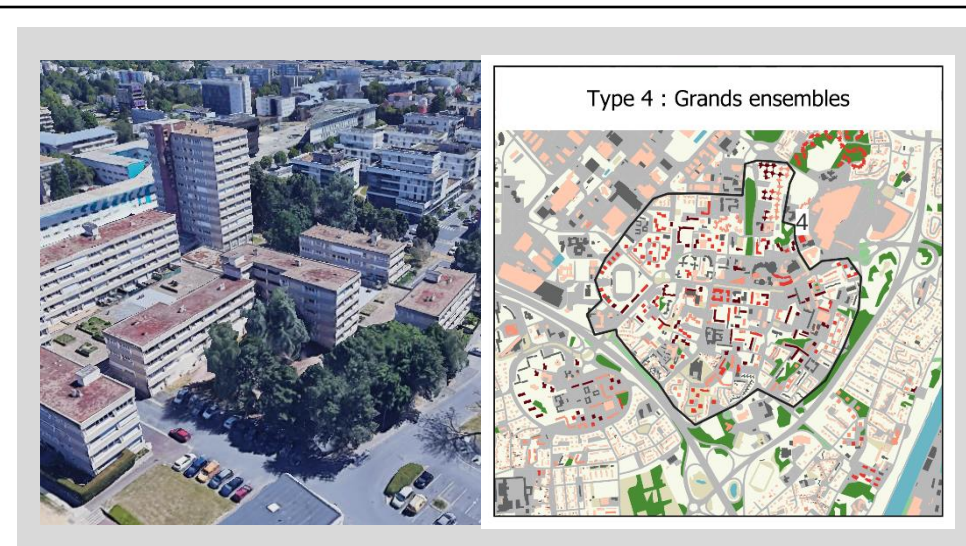
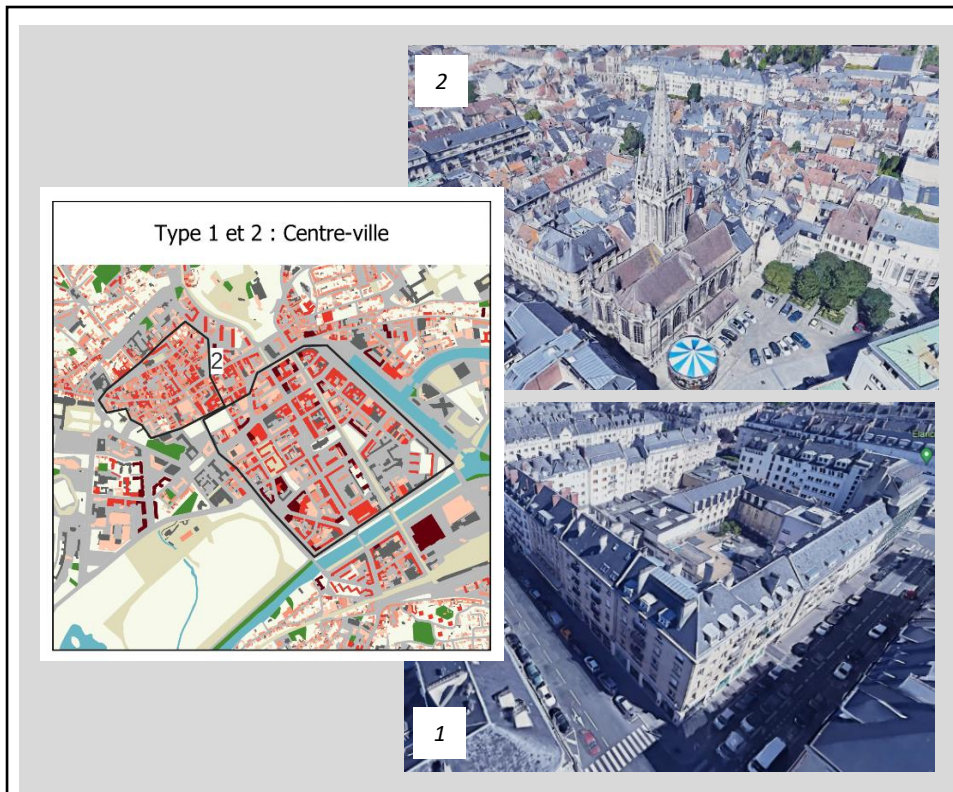


Figure 36: Planche photographique des 5 grands types d'occupation du sol de l'agglomération caennaise - Source : Google Earth

4) Espaces verts de l'agglomération caennaise

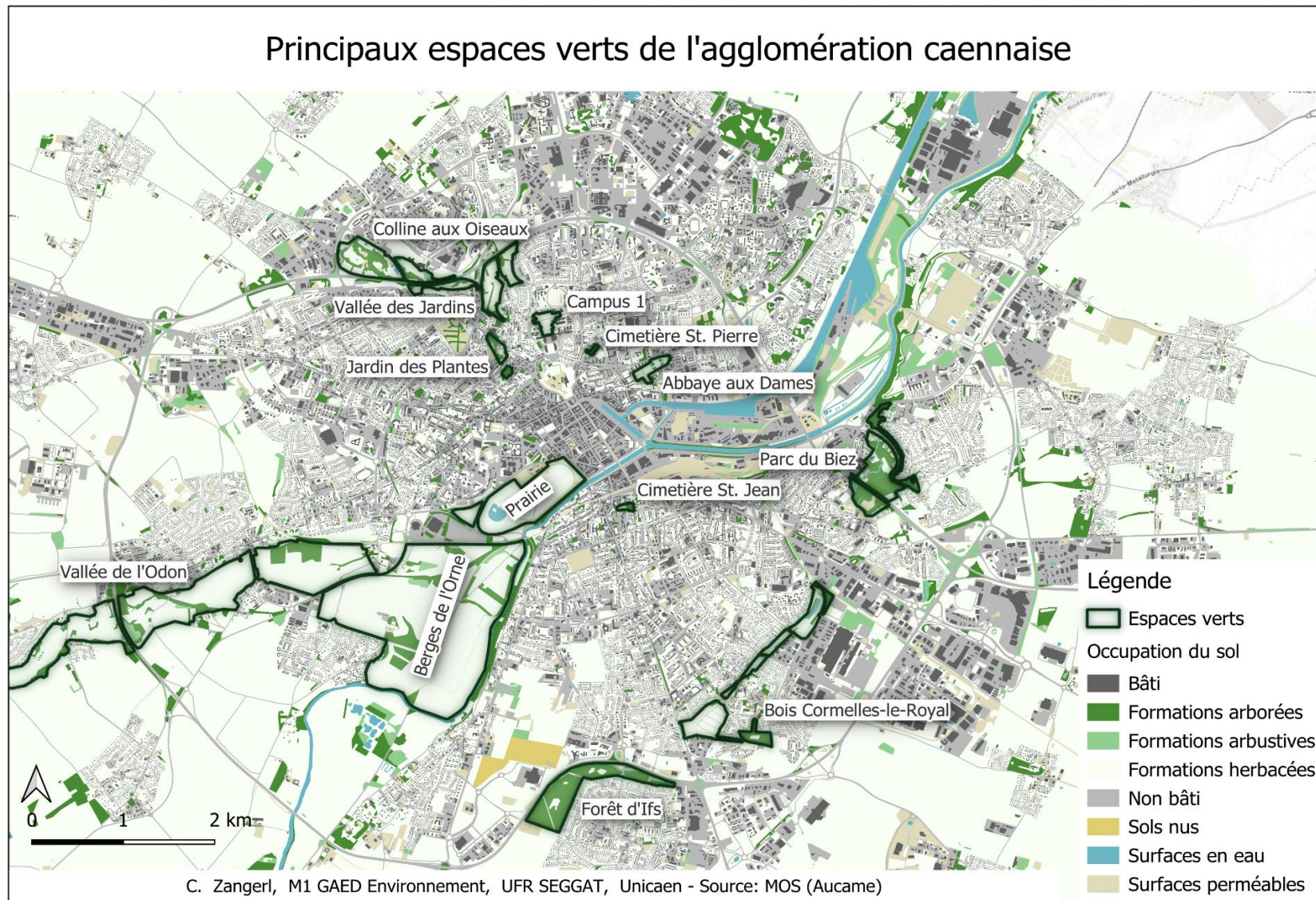


Figure 37: Carte des principaux espaces verts de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl

En plus des différents types d'occupation du sol présentés juste avant, l'agglomération caennaise possède un certain nombre d'espaces verts avec chacun des caractéristiques différentes en termes de superficie, de topographie, de composition végétale ainsi que de fréquentation. Selon ces différents paramètres, les espaces verts caennais peuvent avoir un impact sur le climat urbain et ainsi constituer des îlots de fraîcheur urbains plus ou moins efficaces. Les espaces verts ayant servi à l'analyse des IFU dans l'agglomération caennaise dans ce mémoire sont présentés ici de plus près.

4.1) La Prairie

La Prairie est un grand espace vert situé aux portes du centre-ville qui s'étend sur une superficie de plus de 90 hectares (Caen La Mer Tourisme, s. d.). On y retrouve des chemins aménagés pour la pratique du sport comme le footing ou les promenades, mais également l'Hippodrome de la ville accueillant régulièrement des compétitions, faisant ainsi de cet espace un lieu très fréquenté.

La Prairie est marquée par la présence de l'eau avec l'Orne qui s'écoule au sud de la parcelle, la zone inondable dans la partie sud-ouest ainsi que le ruisseau de la Noë qui longe la parcelle au nord et au centre. Sur l'ensemble de la Prairie, on retrouve une végétation basse constituée principalement de pelouse ainsi que des espèces caractéristiques des milieux humides dans la partie inondable. Elle est délimitée au nord-ouest, au nord-est et au sud-est par des alignements d'arbres et au sud-ouest par le boulevard des Baladas, le Parc des expositions et la voie ferrée.

Elle est située à une altitude d'environ 4 mètres sur l'ensemble de la superficie. Au sud-est, l'escarpement d'une hauteur d'environ 20m coupe le fond de vallée du plateau sud. La station météorologique du réseau IDEES, installée depuis avril 2022, se situe à la limite sud-ouest de l'espace vert et sert comme référence « campagne proche » aux études sur les ICU.

Concernant l'étude des îlots de fraîcheur dans la ville de Caen, cet espace s'avère particulièrement intéressant. En effet, sa taille conséquente ainsi que sa position aux portes du centre-ville font de cet espace vert un lieu de fraîcheur important pour la ville, d'autant plus qu'il est sous l'influence des autres espaces verts encore plus conséquents situés en amont de la vallée de l'Orne.

Présentation de l'espace de vert de la Prairie Végétation et topographie



C. Zangerl, M1 GAED Environnement, UFR SEGGAT, Unicaen - Sources : BD Alti (IGN), Photographies aériennes (IGN)

Figure 38: Carte présentant l'espace vert de la Prairie - Réalisation : C. Zangerl

Coupes topographiques de la Prairie

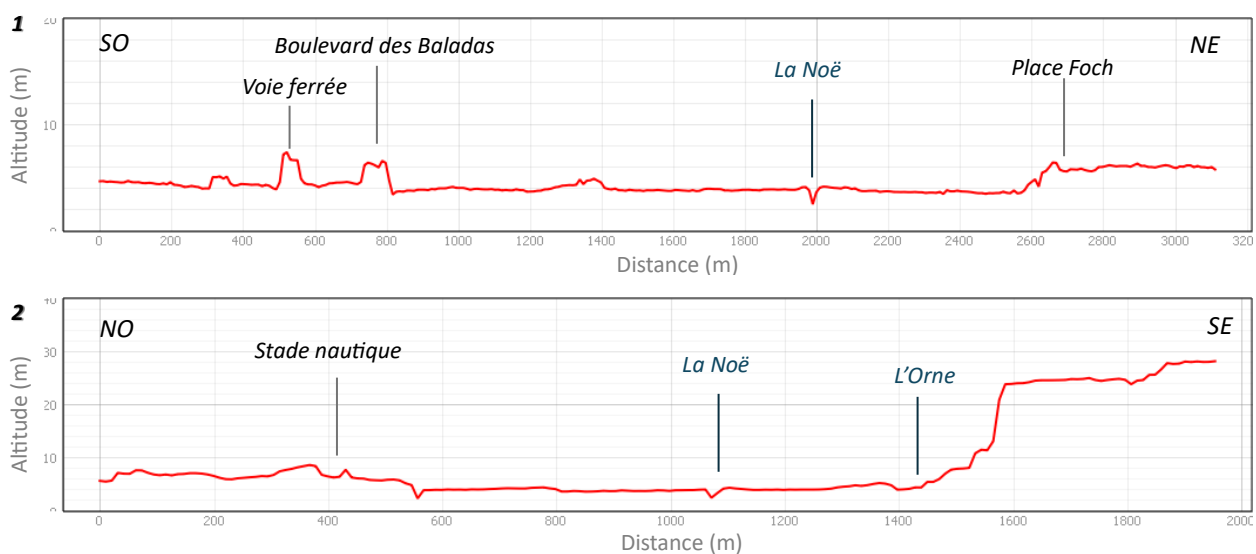


Figure 39: Coupes topographiques de la Prairie - Réalisation : C. Zangerl

4.2) L'ENS des Marais de l'Orne et de la Noë

L'espace naturel sensible des marais de l'Orne et de la Noë s'étend sur les communes de Caen, de Fleury-sur-Orne et de Louvigny sur une surface de plus de 200 ha. Comme la Prairie, ce site est un espace particulièrement apprécié des habitants de l'agglomération qui y pratiquent des sports d'extérieur sur les sentiers aménagés et gérés par le Département du Calvados (Département du Calvados, s. d.).

Comme l'indique son nom, cet espace vert suit les berges de l'Orne et ses zones marécageuses en amont de la Prairie. On y retrouve également la Noë ainsi que l'Odon qui se jette dans l'Orne à environ 1 km en amont de la Prairie. La végétation que l'on retrouve dans l'ENS est caractéristique des zones humides et comporte des mares, des prairies inondables ainsi que quelques zones de boisement suivant principalement les différents cours d'eau, à l'exception du boisement situé à l'Est de Louvigny (figure 40).

Les marais de l'Orne et de la Noë se situent à une altitude entre 4 et 5 mètres et ne présente que très peu de dénivelé en raison de leur situation en fond de vallée. Comme la Prairie, cet espace est délimité sur la bordure Ouest par l'escarpement situé sur la rive droite de l'Orne constituant la limite entre le fond de vallée et le plateau (figure 41).

L'intérêt de ce site pour l'étude des îlots de fraîcheur résulte de sa superficie importante et de sa topographie, de la présence de végétation basse possiblement propice à la formation d'air frais durant la nuit ainsi que de la présence de l'eau renforçant probablement cet effet. De plus, sa situation en amont de la Prairie et donc du centre-ville de Caen rend cet espace intéressant d'un point de vue de la circulation de l'air et donc de l'entrée d'air frais dans la ville, d'autant plus lorsque le vent provient du Sud-Ouest.

Située dans la rue du Québec, à la jonction entre cet espace naturel sensible et celui de la vallée de l'Odon, la station météorologique implantée depuis juin 2023 a fourni des données permettant d'observer des températures souvent bien plus fraîches que celles enregistrées par la station de la Prairie, elle-même généralement plus fraîche que les stations du centre-ville. Cette situation confirme alors l'intérêt d'étudier plus en profondeur les dynamiques thermiques de cet espace vert.

Présentation de l'ENS des Marais de l'Orne et de la Noë

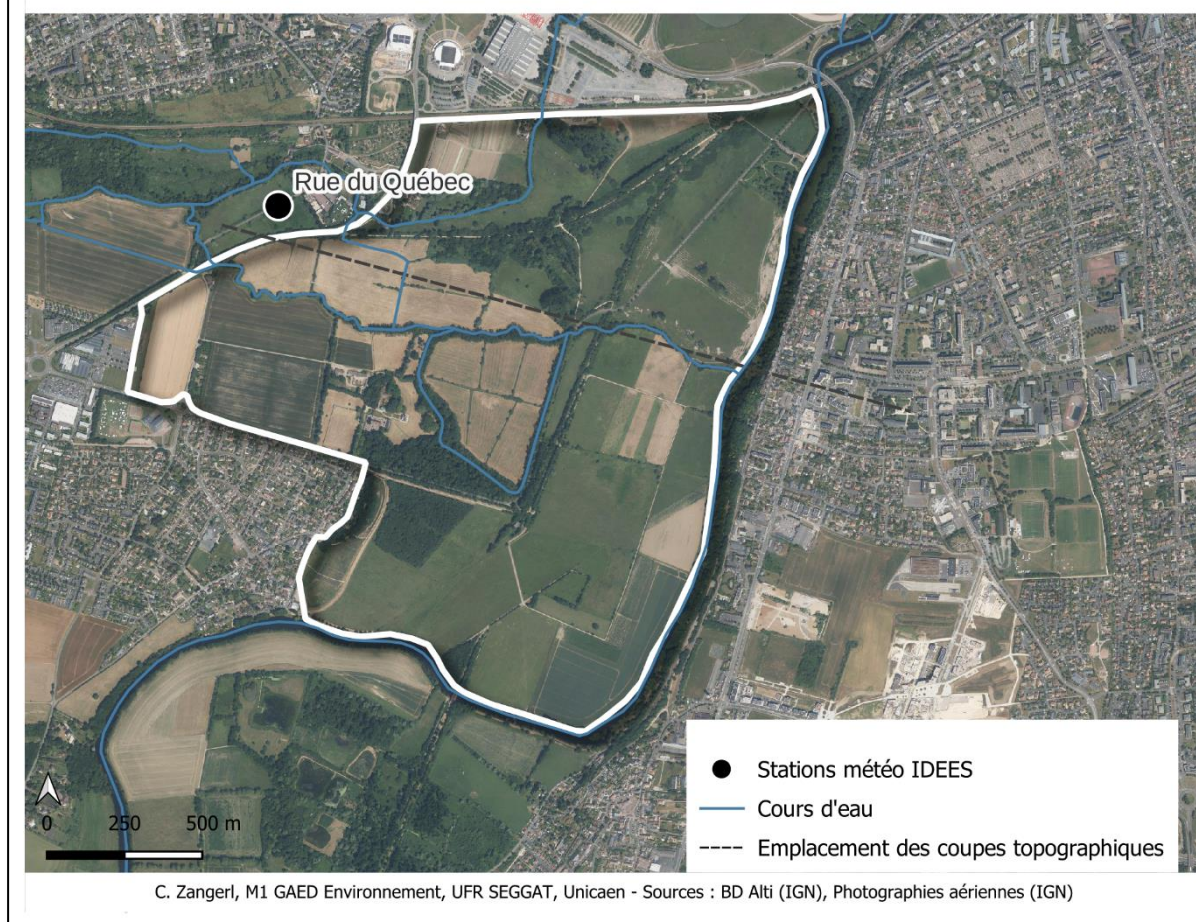


Figure 40: Carte présentant l'ENS des Marais de l'Orne et de la Noë - Réalisation : C. Zangerl

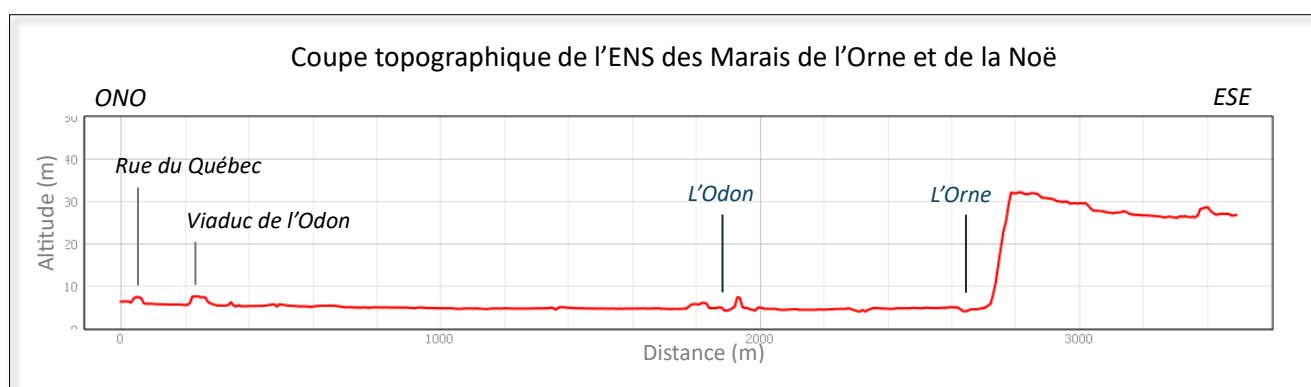


Figure 41: Coupe topographique de l'ENS des Marais de l'Orne et de la Noë - Réalisation : C. Zangerl

4.3) L'ENS de la vallée de l'Odon

L'espace naturel sensible de la vallée de l'Odon s'étend sur une distance d'environ 10 km entre la commune de Mondrainville, située au Sud-Ouest de l'agglomération, jusqu'à la ville de Caen où l'Odon se jette dans l'Orne (figure 43). Cette vallée, gérée et aménagée par le département du Calvados, comporte des chemins de randonnée aménagés qui suivent le cours d'eau au niveau des communes de Bretteville-sur-Odon, Eterville et Verson (Calvados Tourisme, 2018).

En termes de végétation, on y retrouve une succession de prairies encadrées par des haies, de bois et de ripisylve qui longe l'Odon. Cette vallée, encaissée et étroite dans la partie amont et qui s'élargit au fur et à mesure que l'on s'approche de la ville de Caen (figure 42), se jette dans la vallée de l'Orne au nord de la commune de Louvigny, à l'endroit où se situe la station météorologique de la rue du Québec.

On pourrait émettre l'hypothèse que cette station capte davantage l'air provenant de la vallée de l'Odon, ce qui la rend également intéressante d'un point de vue de l'étude des îlots de fraîcheur et de la circulation de l'air frais provenant de la campagne et entrant dans la ville par le biais de la vallée de l'Orne et de la Prairie.

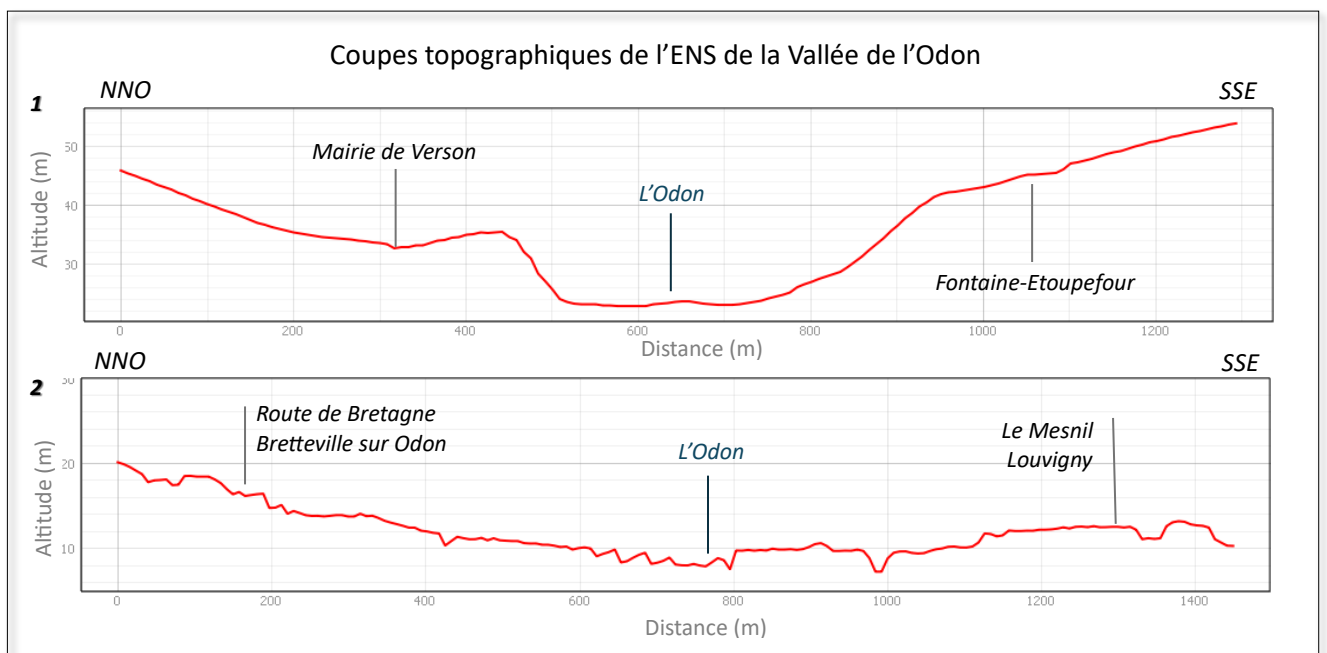


Figure 42: Coupes topographiques de l'ENS de la Vallée de l'Odon - Réalisation : C. Zangerl

Présentation de l'ENS de la Vallée de l'Odon

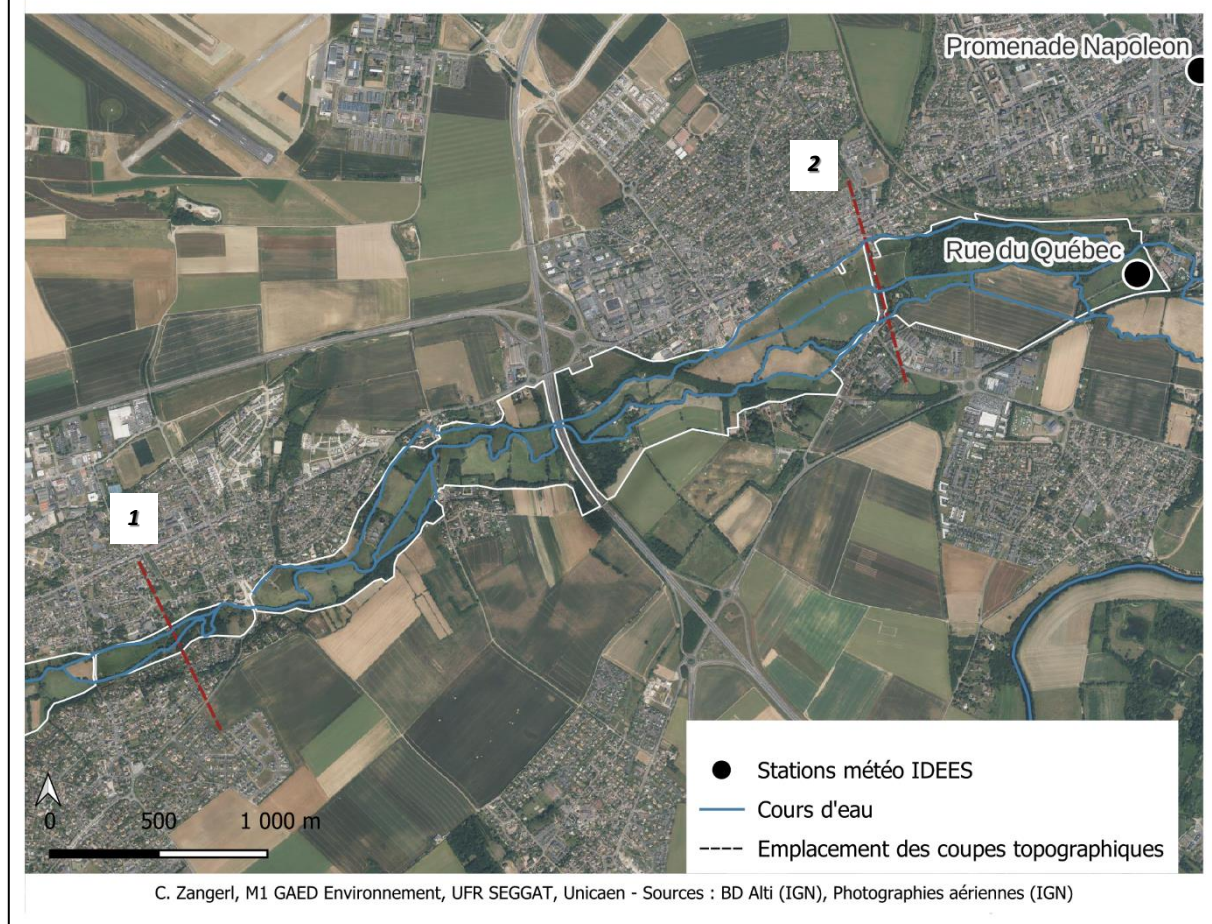


Figure 43: Carte présentant l'ENS de la Vallée de l'Odon - Réalisation : C. Zangerl

4.4) Le Jardin des Plantes

En plus de ces grands espaces verts particulièrement intéressants pour l'étude de la formation et de la circulation de l'air frais de l'extérieur vers l'intérieur de la ville, l'agglomération caennaise possède également d'autres espaces verts d'une taille moins conséquente. Ces parcs urbains présentent un grand intérêt dans l'étude des îlots de fraîcheur urbains, puisqu'ils peuvent constituer des espaces frais possiblement capables d'influencer les températures des environs.

En premier lieu, on peut mentionner le **Jardin des Plantes** qui est instrumenté par une station météo depuis mai 2022. Ce parc urbain se situe dans la partie Nord de Caen, entre le cœur de la ville et le périphérique.

Accueillant plus de 8.000 espèces végétales, des serres ainsi que l'Institut botanique sur une superficie d'environ 3 ha, cet espace est ouvert au public 7j/7j (Calvados Tourisme, 2018). Une grande partie du Jardin des Plantes est couverte par une végétation arborée concentrée sur la partie nord et la limite ouest. Au centre se situent le restaurant de l'Orangerie ainsi que les serres, entourées de surfaces imperméables. Le reste du site présente une végétation herbacée (figure 45).

Le Jardin des Plantes se situe sur le versant d'un vallon qui débute au nord du périphérique et qui descend jusque dans le centre-ville vers la Place de la Mare. Ce vallon encaissé d'une quinzaine de mètres comporte également d'autres espaces verts comme le parc de la Vallée des Jardins qui sera présenté par la suite. La partie nord, marquée par une végétation arbustive, se situe à une altitude d'environ 30m et la partie sud, où se trouvent les bâtiments et où la végétation herbacée est dominante, se situe en contre-bas, à environ 20m d'altitude (figure 44).

La station météorologique du laboratoire IDEES a été installée dans la partie Sud. Les données récoltées depuis plus de deux ans ont révélé la particularité thermodynamique de cet espace, que l'on pourrait définir comme un microclimat correspondant à une continentalisation des conditions climatiques avec des journées plus chaudes et des nuits plus fraîches qu'au centre-ville. La présence de murets qui entourent le Jardin des Plantes pose quelques questions sur la diffusion de l'air frais nocturne sur les quartiers environnants, possiblement bloquée par ces derniers ainsi que par la végétation arborée tout autour de l'espace vert. De plus, on peut s'interroger sur la dynamique thermique à l'échelle du vallon dans lequel se situe le Jardin des Plantes et donc sur l'influence de la topographie sur la circulation de l'air à l'intérieur de l'espace vert et dans l'intégralité du vallon.

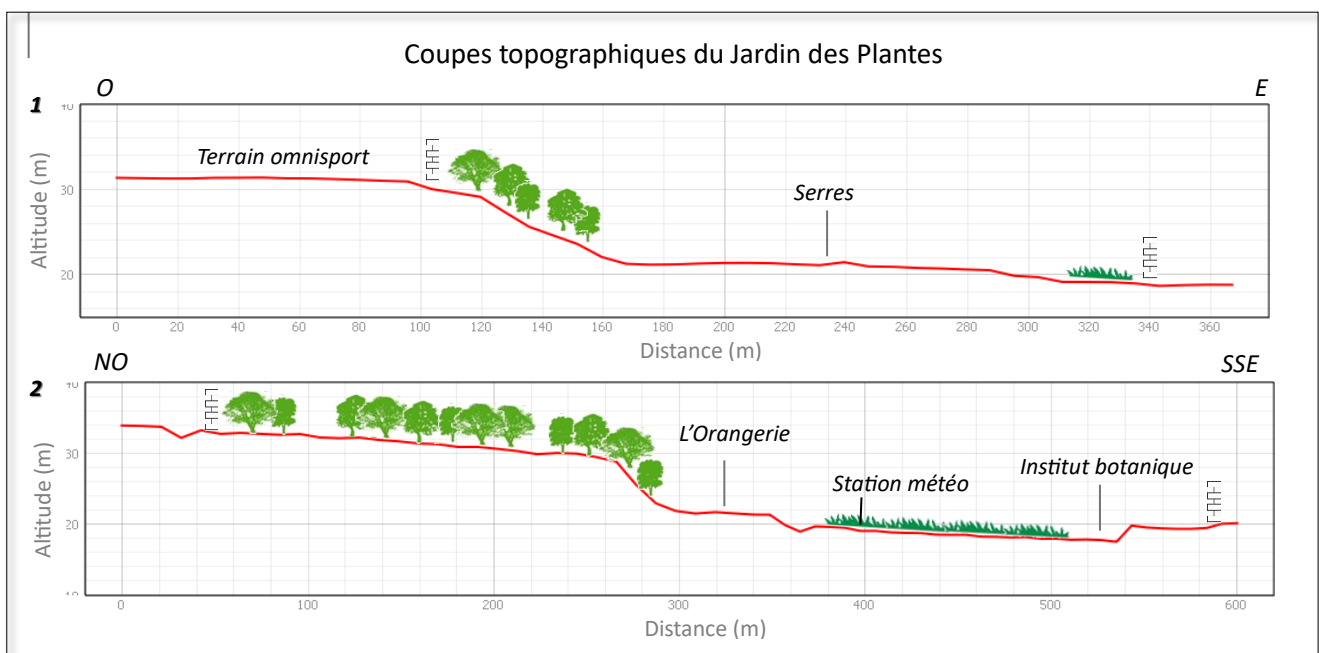


Figure 44: Coupes topographiques du Jardin des Plantes - Réalisation : C. Zangerl

Présentation du Jardin des Plantes

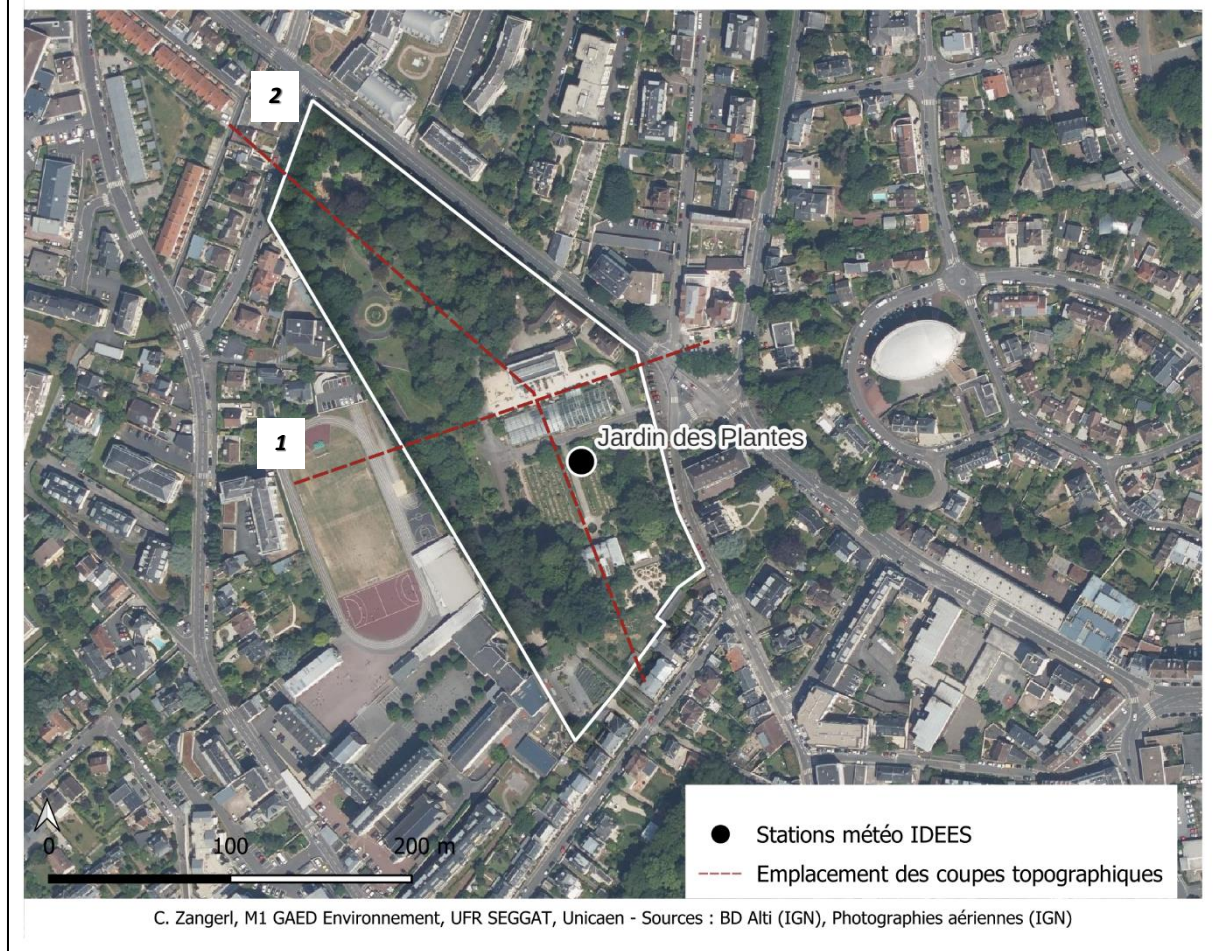


Figure 45: Carte présentant le Jardin des Plantes - Réalisation : C. Zangerl

4.5) La Vallée des Jardins

La **Vallée des Jardins**, mentionnée juste avant, est un espace vert libre d'accès d'une superficie d'environ 11 ha doté de sentiers qui permettent d'y circuler. (Calvados Tourisme, 2018) En dehors des sentiers, le sol est intégralement couvert de végétation herbacée ainsi que de végétation arborée sur tout le pourtour du parc. On y retrouve également un alignement d'arbres au centre ainsi que des arbres isolés sur l'intégralité du site.

Ce parc représente la majeure partie du vallon en amont du Jardin des Plantes. Le dénivelé entre le fond de vallée et le plateau est d'environ 10 m sur toute la longueur du site. Alors que la partie nord est large d'environ 200m, le parc se resserre vers le sud pour atteindre une largeur d'environ 50m. Le talweg à l'extrémité nord du parc se situe à une altitude d'environ 25 m et à 18 m d'altitude à l'extrémité sud. Sur l'intégralité du talweg du vallon, on remarque plusieurs ruptures de pente formant

des sortes de cuvettes à certains endroits, dont deux qui se situent à l'intérieur du parc de la Vallée des Jardins (figure 48).

La présence de végétation basse et la topographie en creux rendent la Vallée des Jardins a priori propice à la formation de l'air frais et à sa circulation de l'amont vers l'aval. Néanmoins, les ruptures de pentes pourraient entraver la circulation de cet air vers le centre-ville. Ne disposant actuellement pas de station météorologique permanente, il est nécessaire de procéder à des campagnes de mesure temporaires afin de mieux comprendre le fonctionnement thermodynamique de cet espace.

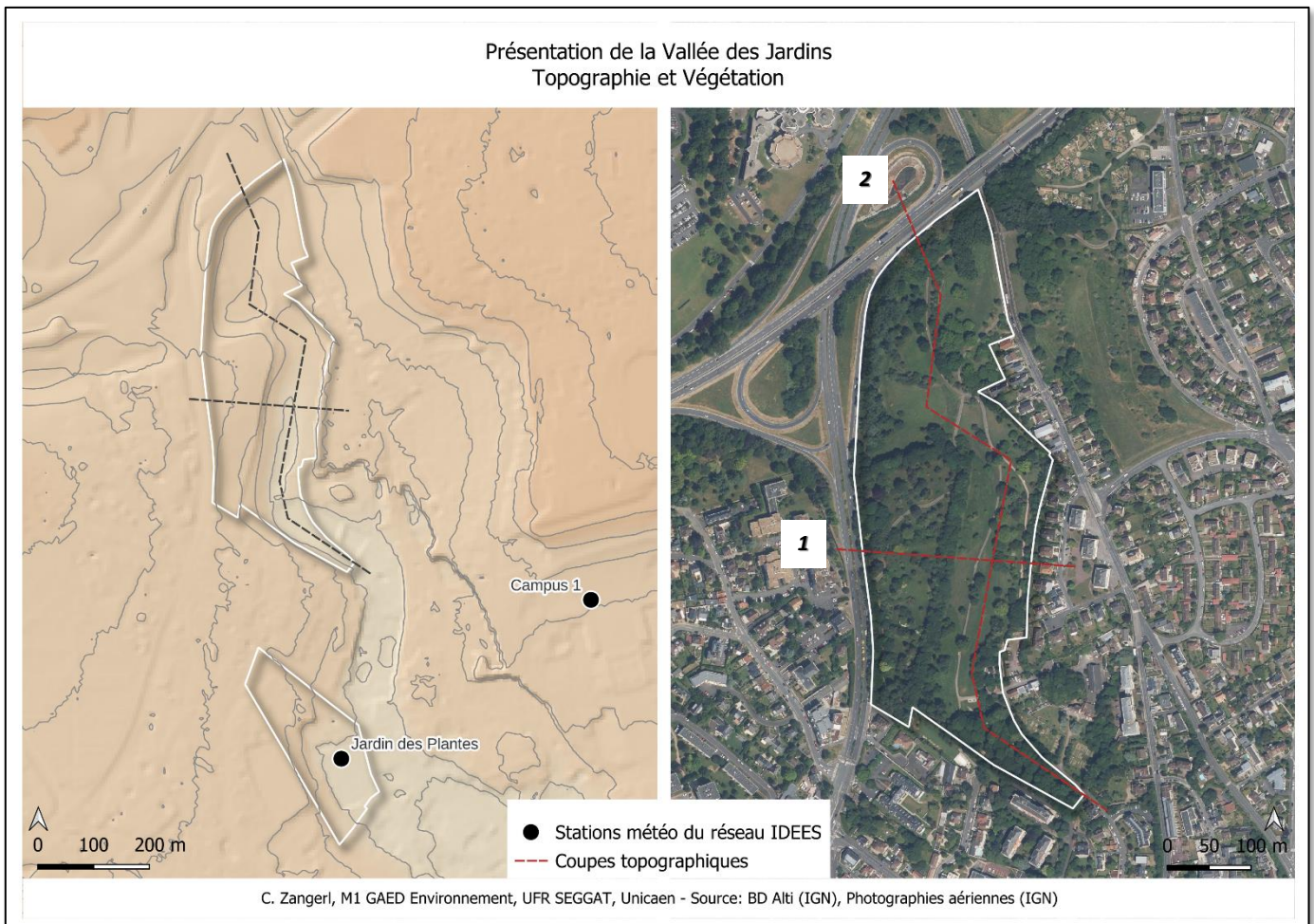


Figure 47: Carte présentant la topographie et la végétation à la Vallée des Jardins - Réalisation : C. Zangerl

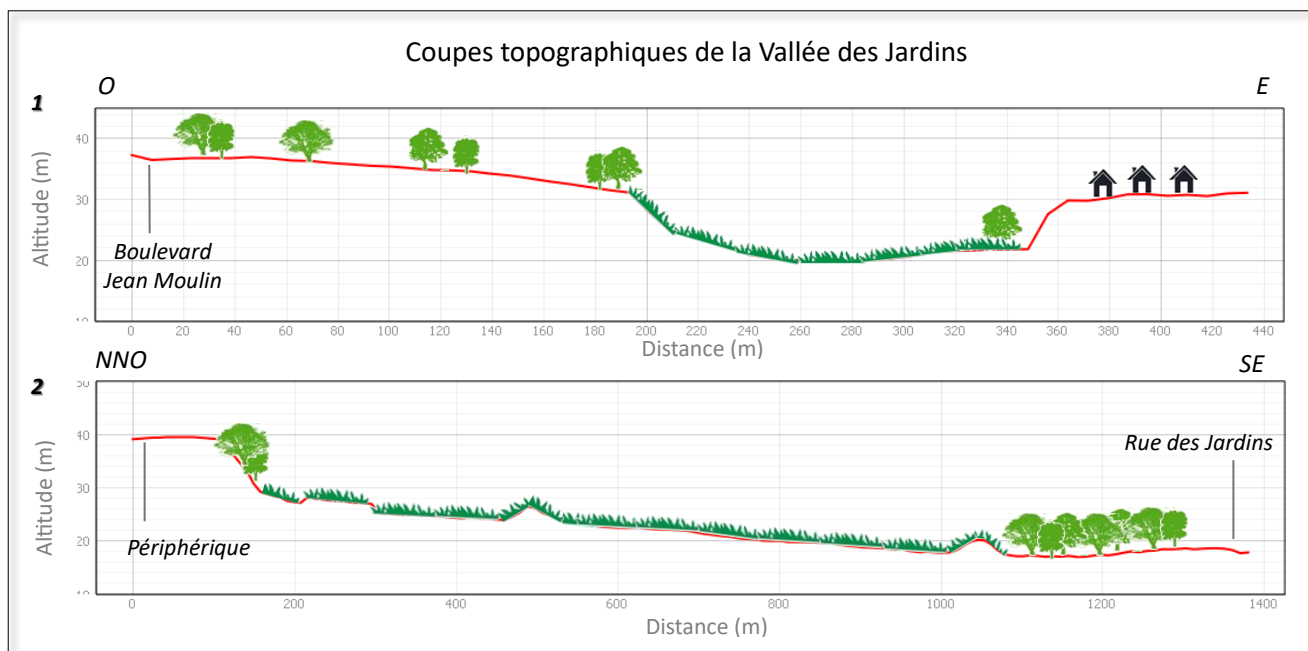


Figure 48: Coupes topographiques de la Vallée des Jardins - Réalisation : C. Zangerl

4.6) Les Jardins du souvenir et la Colline aux Oiseaux

Au nord-ouest de la Vallée des Jardins, de l'autre côté du périphérique, on retrouve deux ensembles d'espaces verts qui sont les **Jardins du souvenir** (7 ha) et la **Colline aux Oiseaux** (17 ha).

Les Jardins du souvenir, également connus comme le parc du Mémorial de Caen, sont un lieu consacré à la commémoration des morts en Normandie lors de la délibération de la France à la fin de la Seconde Guerre mondiale (Mémorial de Caen, 2023).

Ce parc se situe à l'arrière du Mémorial, en contre-bas du musée, dans un autre vallon qui finit par rejoindre la Vallée des Jardins. Alors que la végétation herbacée est dominante sur la partie centrale du parc, on retrouve une végétation arborée dense sur toute la partie sud, longeant le périphérique et l'avenue de l'Amiral Mountbatten. C'est cette avenue qui sépare les Jardins du souvenir de la Colline aux Oiseaux.

Cette dernière est un espace vert particulièrement connu et fréquenté par les Caennais, proposant plusieurs jardins à thème, une roseraie ainsi que des espaces de jeux et un parc animalier. Situé sur une ancienne décharge, ce lieu a été réhabilité et inauguré lors du 50^e anniversaire du débarquement (Calvados Tourisme, 2018). Comme l'indique son nom, ce parc est surplombé par une colline dont le point culminant se situe à environ 83 m d'altitude, ce qui correspond à un dénivelé d'environ 20 m par rapport aux environs. En dehors des sentiers aménagés, la végétation arborée est dominante sur la majorité du site.

Au regard de la composition végétale et de la topographie de ces deux parcs, on peut se poser la question d'une possible connexion en termes de circulation de l'air entre la Colline aux Oiseaux, les Jardins du souvenir et la Vallée des Jardins. Néanmoins, il est fort probable que le périphérique fasse obstacle à cette dernière, empêchant alors l'air possiblement frais de passer d'un côté à l'autre. De plus, à la différence des autres espaces verts situés dans des dépressions topographiques, le parc de la Colline aux Oiseaux est intéressant à étudier d'un point de vue topographique, notamment concernant la formation d'air frais sur un point haut, certes potentiellement plus exposé au vent, mais qui pourrait constituer un point de départ pour initier les écoulements. Comme pour la Vallée des Jardins, ces deux espaces verts ne sont pour l'instant pas équipés de stations météo permanentes. Des campagnes de mesures ponctuelles sont donc nécessaires pour analyser leur fonctionnement.

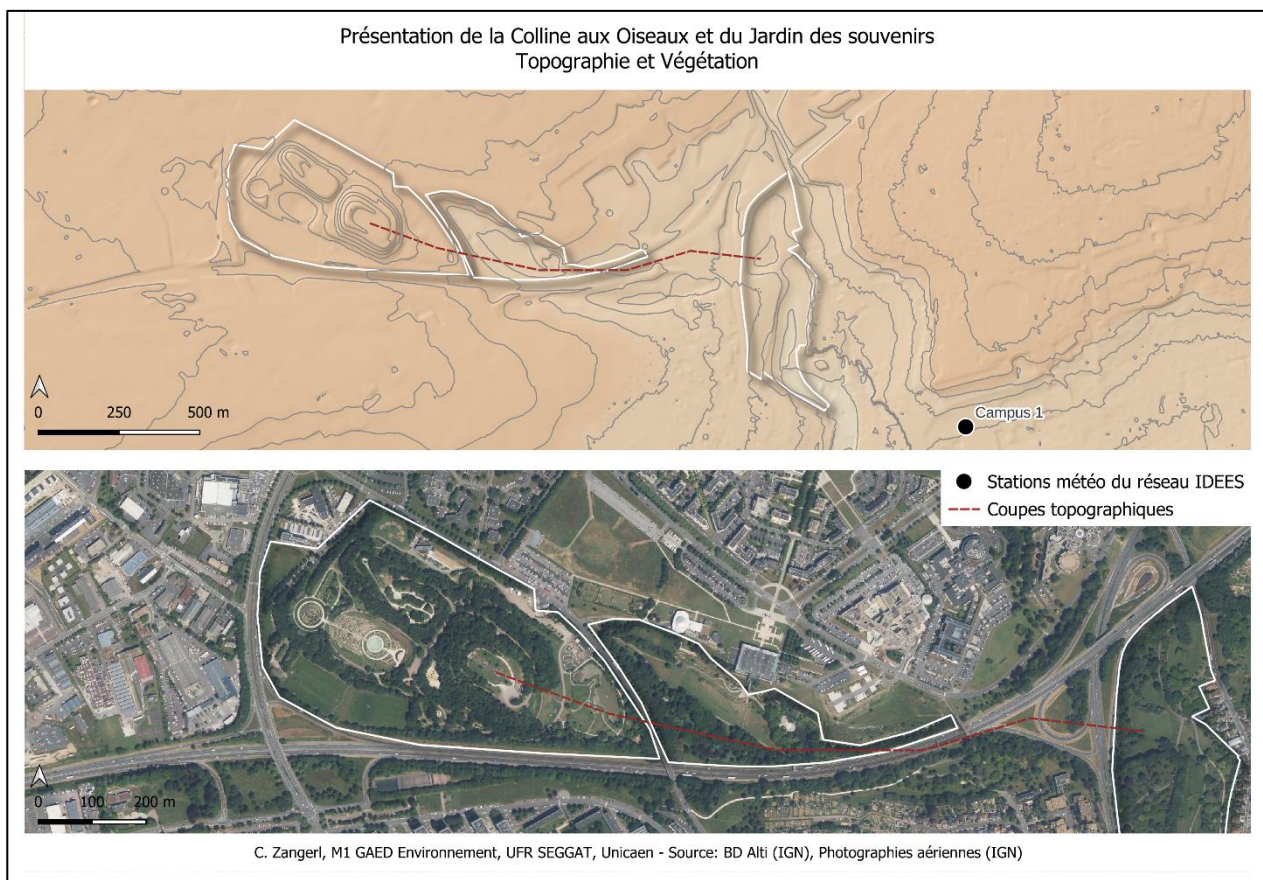


Figure 49: Carte présentant la topographie et la végétation à la Colline aux Oiseaux et aux Jardins du souvenir
Réalisation : C. Zangerl

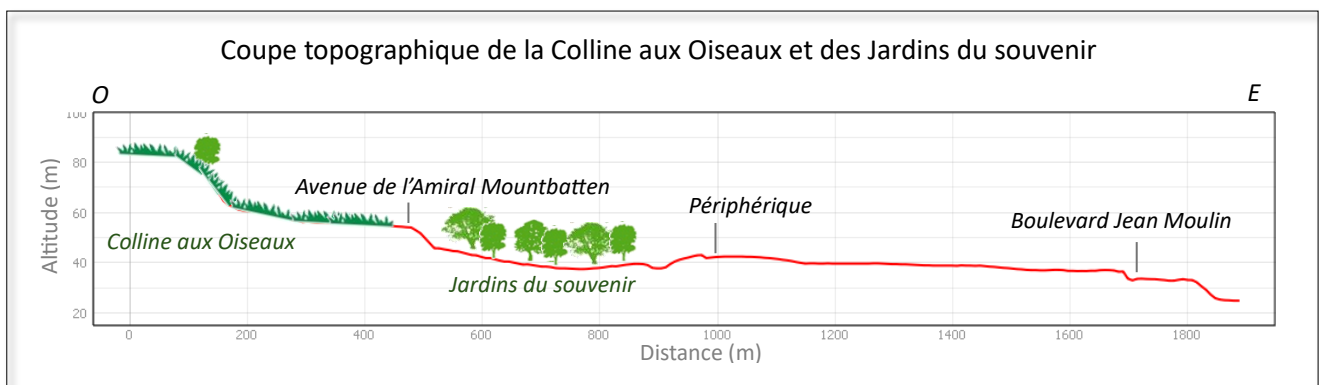


Figure 50: Coupe topographique à la Colline aux Oiseaux et aux Jardins du souvenir – Réalisation : C. Zangerl

4.7) Le Campus 1 de l'Université de Caen

Le Campus 1 de l'Université de Caen, très fréquenté et non loin du centre-ville, s'étend sur une superficie d'environ 4,5 ha. Depuis le 1^{er} décembre 2023, une station météorologique permanente y est installée devant le bâtiment de la MRSH. A l'exception des chemins et des routes goudronnées, on y retrouve majoritairement de la végétation basse sous forme de pelouse et quelques arbres isolés répartis sur le site. Situé sur le versant nord de la vallée de l'Orne, on y observe une pente assez marquée sur la partie nord du campus, entre le restaurant universitaire et la Cour d'honneur, avec un dénivelé d'environ 20 m. L'ouverture de cet espace vert sur le ciel, la faible densité de bâtiments et la topographie font du campus 1 un espace a priori propice à la formation de l'air frais et à la circulation de l'air le long de la pente. Des mesures à l'anémomètre en plus des températures permettraient d'avoir des informations sur un possible effet de la pente sur la circulation de l'air frais.

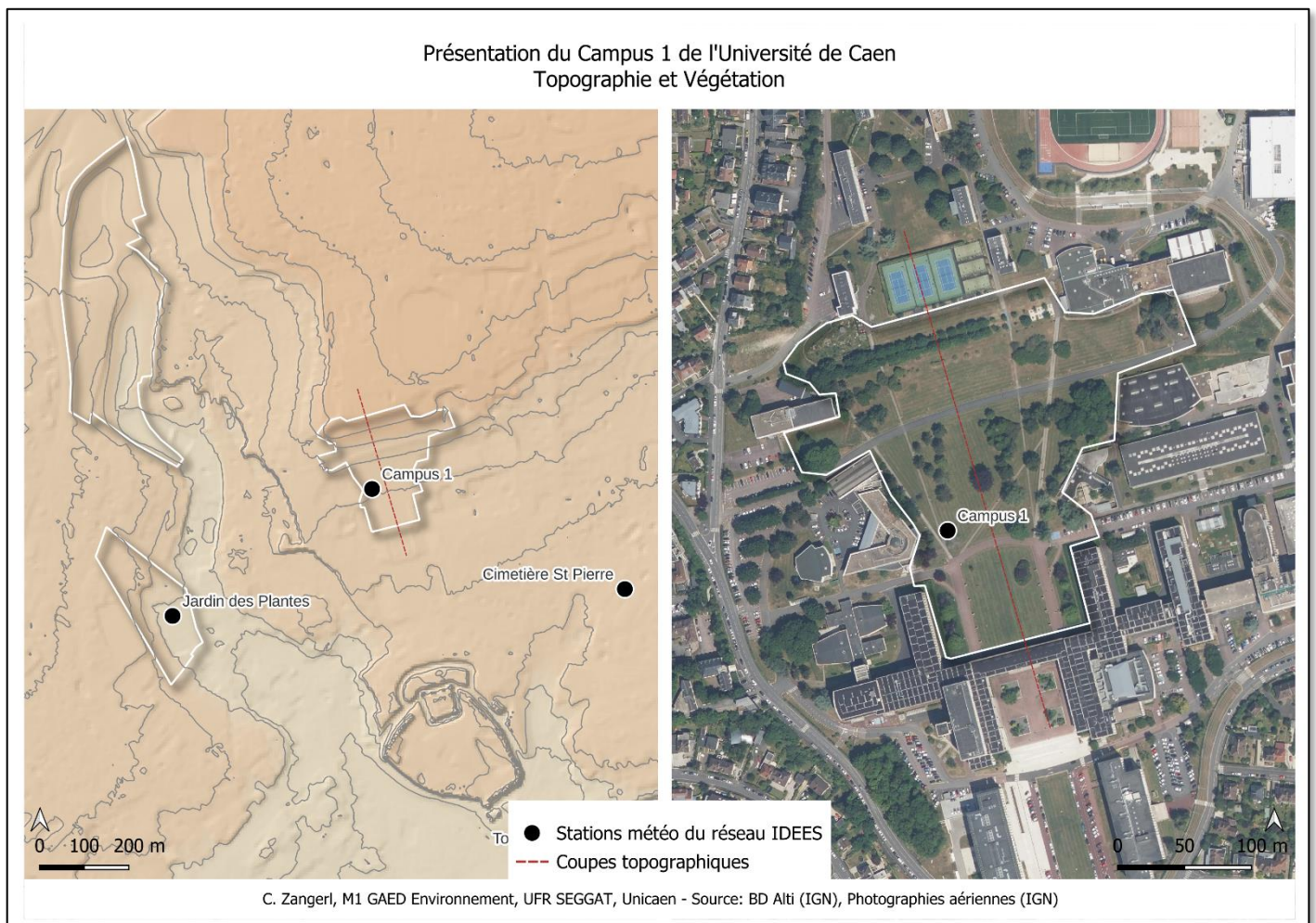


Figure 51: Carte présentant le Campus 1 de l'Université de Caen - Réalisation : C. Zangerl

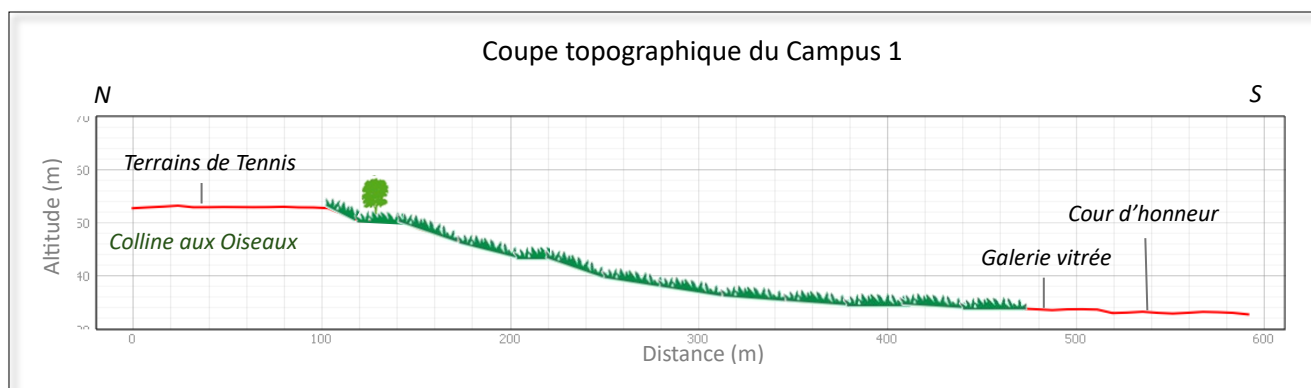


Figure 52: Coupe topographique du Campus 1 - Réalisation : C. Zangerl

4.8) Les cimetières dormants de St. Pierre et St. Jean

Depuis fin octobre 2023, deux cimetières dormants de la ville de Caen sont équipés de stations météo pérennes : le **cimetière St. Pierre** et le **cimetière St. Jean**. Les cimetières dormants sont des anciens cimetières abandonnés qui servent aujourd'hui de petits espaces verts intra-urbains. Bien que peu connus et donc relativement peu fréquentés, ces derniers peuvent s'avérer intéressants d'un point de vue des îlots de fraîcheur et constituer des petits espaces verts de proximité pour les habitants.

Le **cimetière St. Pierre**, d'une superficie d'environ 0,7 ha, se situe à quelques centaines de mètres à l'est du château et de l'Université, à l'arrière du collège St. Pierre. En termes de végétation, cet espace vert est totalement recouvert d'une végétation arborée dense, ne laissant passer que très peu de soleil lorsque le feuillage est bien développé. Située sur un replat topographique du versant nord de la Vallée de l'Orne, le dénivelé est très faible, de l'ordre d'environ 1 m entre la partie nord et la partie sud du parc (figure 53).

La présence d'une végétation arborée dense sur ce site pose plusieurs questions en termes de dynamiques thermiques. En journée, l'ombre apporté par les arbres pourrait effectivement limiter la surchauffe au niveau du sol et donc faire de cet espace un potentiel point de fraîcheur comparé aux environs plus imperméabilisés. Néanmoins, on pourrait également y observer la stagnation de l'air due au ralentissement du vent par la végétation et le blocage du rayonnement terrestre nocturne, empêchant potentiellement le rafraîchissement de l'air. De plus, comme beaucoup de petits espaces verts de l'agglomération caennaise, le cimetière St. Pierre est entouré de murs d'une hauteur dépassant les deux mètres, créant probablement un effet de confinement qui pourrait limiter la diffusion de l'air sur les environs du parc.

Présentation des cimetières dormants St. Pierre et St. Jean
Topographie et Végétation



C. Zangerl, M1 GAED Environnement, UFR SEGGAT, Unicaen - Source: BD Alti (IGN), Photographies aériennes (IGN)

Figure 53: Carte présentant les cimetières St. Pierre et St. Jean - Réalisation : C. Zangerl

Coupe topographique du cimetière St. Jean



Figure 54: Coupe topographique du cimetière St. Jean - Réalisation : C. Zangerl

Le **cimetière St. Jean** (1,3 ha), situé dans le quartier de Vaucelles sur la rive droite de l'Orne, se trouve sur le site d'une ancienne carrière à ciel ouvert (Caen La Mer Tourisme, 2024). En plus de sa position sur le versant sud de la vallée de l'Orne, il présente donc des caractéristiques topographiques intéressantes du fait de son passé. Semi-enterré et entouré de murs, il forme un replat topographique ressemblant en quelque sorte à une marche d'escalier (figure 54).

Ce cimetière peut être découpé en deux parties. La partie à l'est est marquée par une végétation arborée dense, alors que la moitié ouest du parc est principalement constituée de végétation basse, de chemins aménagés et de quelques arbres isolés (figure 53). La station météorologique du réseau IDEES se situe dans la partie Est et est fixée sur un arbre.

Cet espace vert interroge sur les mêmes points que le cimetière St. Pierre, mais présente probablement un fonctionnement différent du fait de sa topographie. Son influence sur les environs, s'il y en a une compte tenu de son caractère confiné, se limite probablement aux espaces situés en contre-bas. Néanmoins, des campagnes de mesures ponctuelles permettraient non seulement d'en savoir plus sur la circulation de l'air depuis le parc vers l'extérieur, mais également sur d'éventuelles différences en termes de dynamiques thermiques entre la partie Est et la partie Ouest.

Il existe d'autres cimetières dormants dans la ville de Caen, comme celui des Quatre-Nations (proche du Jardin des Plantes), le cimetière St. Nicolas (quartier Hastings) ou encore le cimetière St. Ouen (quartier St. Ouen).

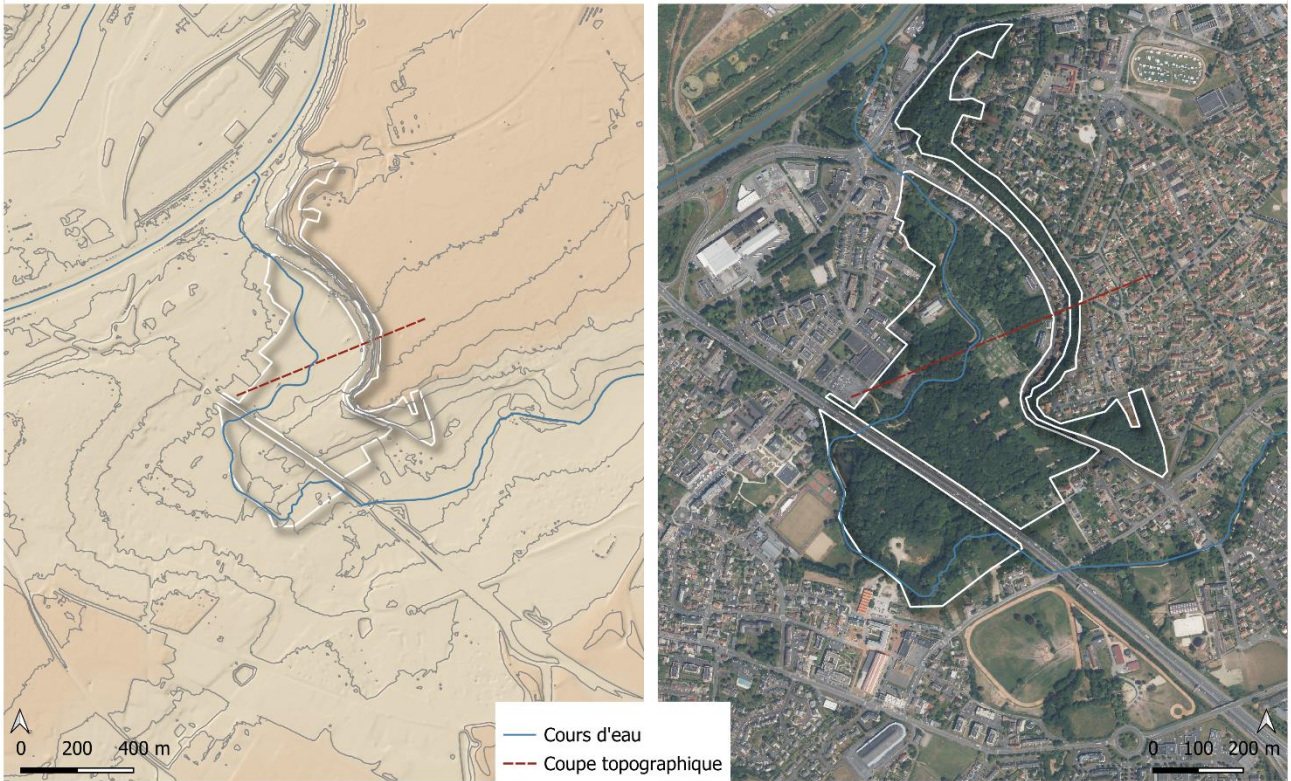
4.9) Le parc du Biez à Mondeville

Le **parc du Biez** s'étend sur une superficie de plus de 30 ha dans l'est de l'agglomération caennaise. Il est traversé par le Biez, un petit cours d'eau qui prend source à Giberville sous le nom de la Gronde.

Il est recouvert sur presque l'intégralité de sa surface par une végétation arborée dense et est coupé en trois parties par les voies de circulation, dont une située à l'intérieur du périphérique, une autre à l'extérieur et une dernière qui longe l'escarpement entre la rue des Roches et le Plateau de Colombelles (figure 55).

Il se caractérise donc par sa situation en fond de vallée, au pied d'une pente abrupte, et par la présence du cours d'eau. Ce parc a déjà fait l'objet d'une campagne de mesure dans le cadre des études sur les îlots de chaleur menées par les étudiants de Master 1 MADURA de l'Université de Caen. Cette campagne ayant eu lieu au mois de janvier et se concentrant surtout sur les différences entre le Plateau et le parc, davantage de campagnes sont nécessaires, notamment lors de périodes estivales, pour comprendre son fonctionnement thermique ainsi que son influence sur les espaces urbanisés à proximité.

Présentation du parc du Biez à Mondeville
Topographie et Végétation



C. Zangerl, M1 GAED Environnement, UFR SEGGAT, Unicaen - Source: BD Alti (IGN), Photographies aériennes (IGN)

Figure 55: Carte présentant la topographie et la végétation du parc du Biez - Réalisation : C. Zangerl

Coupe topographique du parc du Biez

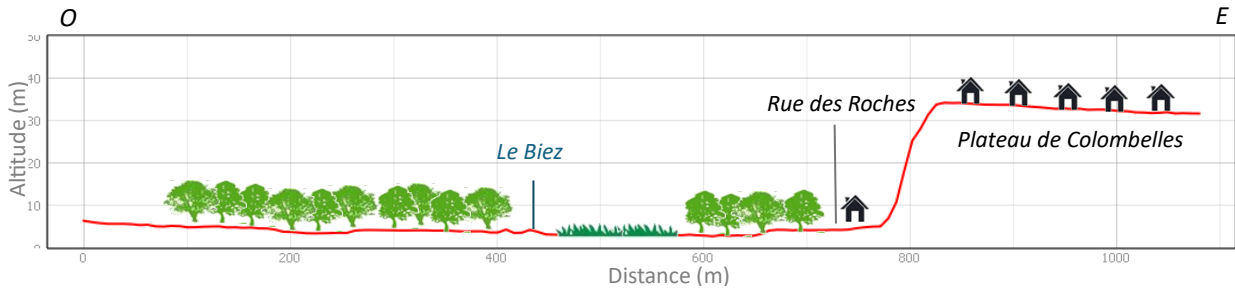


Figure 56: Coupe topographique du parc du Biez - Réalisation : C. Zangerl

4.10) La forêt d'Ifs

La **forêt d'Ifs**, un ensemble boisé de plus de 35 ha situé à Ifs au sud de Caen, paraît particulièrement intéressante par sa forme et sa position séparant le périphérique sud des quartiers résidentiels du centre de la commune. En plus de constituer potentiellement un espace vert frais par la présence des arbres apportant de l'ombre, on peut s'interroger sur une possible diffusion de cet air frais sur les espaces urbanisés à proximité. Néanmoins, en vue des caractéristiques d'occupation du sol du quartier résidentiel comprenant des maisons individuelles dotées de jardins, les différences de températures entre le parc et l'espace urbanisé risquent d'être moins importantes.

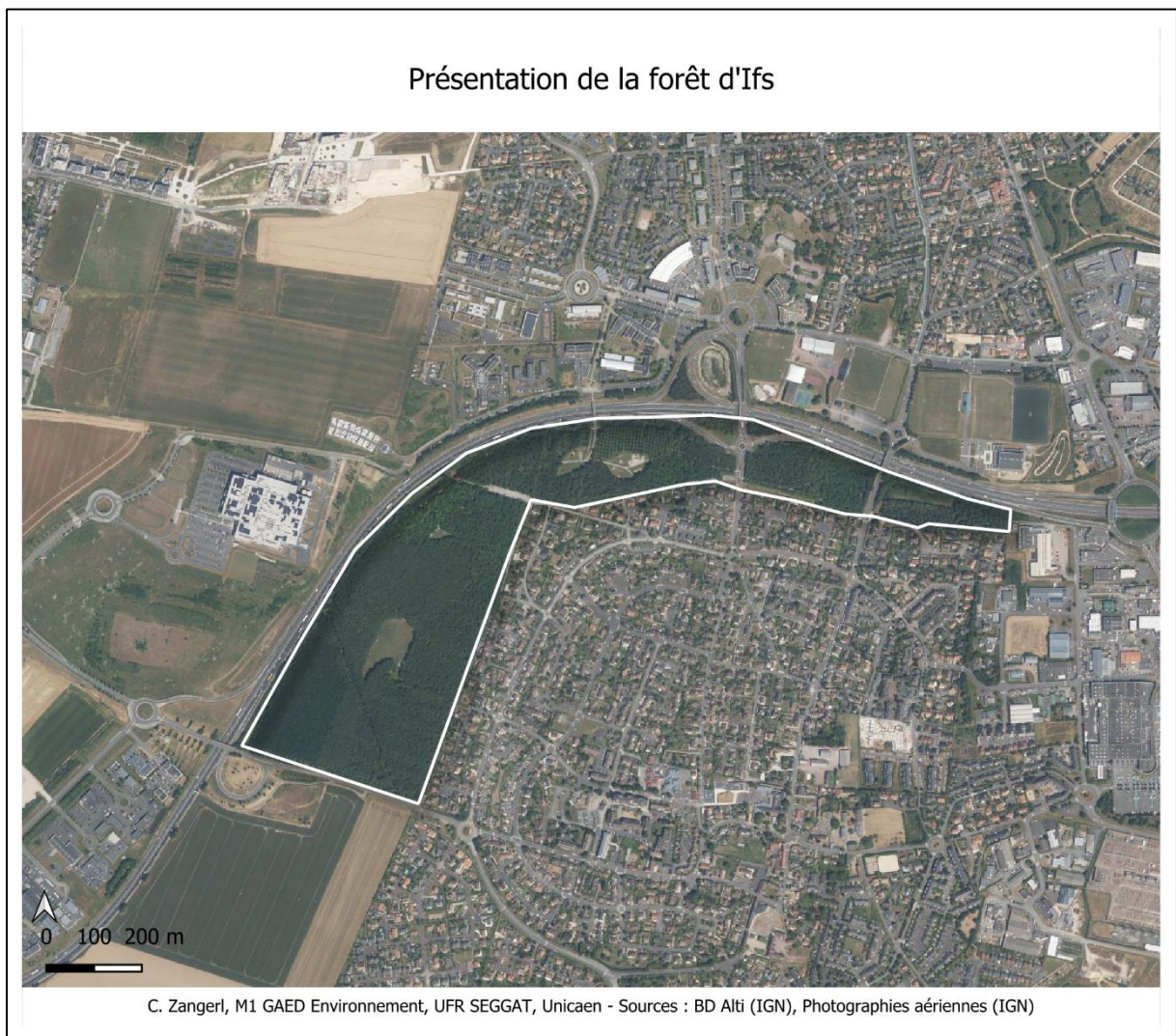


Figure 57: Carte présentant la forêt d'Ifs - Réalisation : C. Zangerl

Nom	Situation	Superficie	Végétation/Eau	Topographie	Données
La Prairie	Caen (<i>Bas-Venoix / Prairie</i>)	90 ha	Végétation rase (pelouse, végétation hygrophile) Arbres d'alignement (NO, NE, SE) Ecoulement de l'Orne, de la Noë Zone inondable (SO)	Fond de vallée de l'Orne Altitude : 4 m Pas de dénivelé	Station météo réseau IDEES (Prairie)
ENS Marais de l'Orne et de la Noë	Caen (<i>Bas-Venoix / Prairie</i>) Fleury-sur-Orne Louvigny	+ 200 ha	Végétation rase (pelouse, végétation hygrophile) Ripisylve (arbres et arbustes) Quelques boisements (Louvigny) Ecoulement de l'Orne, de la Noë et de l'Odon Mares et Prairies inondables	Fond de vallée de l'Orne Altitude : 4 – 5 m Pas de dénivelé Escarpeement (25m) sur la rive droite de l'Orne	Station météo réseau IDEES (rue du Québec)
ENS Vallée de l'Odon	Entre Caen (<i>Bas-Venoix / Prairie</i>) et Mondrainville	+ 300 ha	Végétation rase (prairies), arbustive et arborée (ripisylve, petits boisements) Ecoulement de l'Odon	Fond de vallée de l'Odon Vallée étroite en amont qui s'élargit vers l'aval	Station météo réseau IDEES (rue du Québec)
Jardin des Plantes	Caen (<i>Verte vallée</i>)	3 ha	Végétation rase (jardin au centre) Végétation arborée assez dense (N, SO)	Sur versant du vallon de la Vallée des Jardins Altitude : entre 30 m et 20 m	Station météo réseau IDEES (Jardin des Plantes)
Vallée des Jardins	Caen (<i>Verte vallée</i>)	11 ha	Végétation rase (pelouse) Végétation arborée (alignements, petit boisement, arbres isolés)	Fond de vallon Altitude : entre 25m et 12m	Pas de station pérenne
Jardins du souvenir	Caen (<i>La Folie-Couvrechef</i>)	7 ha	Végétation rase (pelouse, centre) Végétation arborée (S, SO)	Fond de vallon Altitude : 40 m	Pas de station pérenne
Colline aux Oiseaux	Caen (<i>La Folie-Couvrechef</i>)	17 ha	Végétation arborée dense Végétation rase	Plateau Altitude : entre 83 m (colline) et 60m	Pas de station pérenne

Campus 1	Caen (<i>Université</i>)	4,5 ha	Végétation rase (pelouse) Arbres isolés	Plateau Altitude : entre 55 m et 35 m	Station météo réseau IDEES (Campus 1)
Cimetière St. Pierre	Caen (<i>Saint Gilles</i>)	0,7 ha	Végétation arborée dense	Plateau Altitude : 30m	Station météo réseau IDEES (St. Pierre)
Cimetière St. Jean	Caen (<i>Vaucelles</i>)	1,3 ha	Végétation arborée dense (E) Végétation rase et arbres isolés (O)	Haut de versant (ancienne carrière) Altitude : 20 m	Station météo réseau IDEES (St. Jean)
Parc du Biez	Mondeville	30 ha	Végétation arborée dense Ecoulement du Biez	Fond de vallée Altitude : 3 m Escarpement (E) (altitude plateau : 30 m)	Pas de station pérenne
Forêt d'Ifs	Ifs centre	35 ha	Végétation arborée dense	Plateau Sud Altitude : entre 40 et 25 m	Pas de station pérenne

Figure 58: Tableau récapitulatif des principaux espaces verts de l'agglomération caennaise

5) Climat régional

Comme expliqué dans la partie I, le contexte climatique régional dans lequel s'inscrit une ville constitue la trame de fond du climat urbain et conditionne la probabilité des types de temps favorables aux ICU et aux IFU. Le climat normand se caractérise par un climat tempéré océanique marqué par de faibles amplitudes thermiques liées à l'effet adoucissant de la mer et par la présence de précipitations durant toute l'année, mais plus abondantes durant l'hiver. En raison du passage fréquent de dépressions provenant de l'Atlantique, l'hiver est souvent marqué par des types de temps humides et venteux. Les temps clairs et calmes, particulièrement propices à la formation des îlots de chaleur, surviennent principalement en été lorsque les anticyclones remontent vers le nord et apportent des conditions météorologiques stables (Cantat & Beauvais, 2022).

Selon les données de la période 1991-2020 enregistrées à Carpiquet, station de référence pour le climat régional, la température moyenne annuelle s'élève à 11,5°C. Quant aux températures moyennes estivales, elles avoisinent les 18°C tandis que les moyennes hivernales se situent aux alentours de 6°C. L'amplitude thermique moyenne est donc d'environ 12°C. Concernant les précipitations, il pleut en moyenne 740 mm par an à Carpiquet, dont les mois les plus pluvieux sont les mois d'octobre, de novembre et de décembre avec plus de 78 mm en moyenne pour chacun des mois.

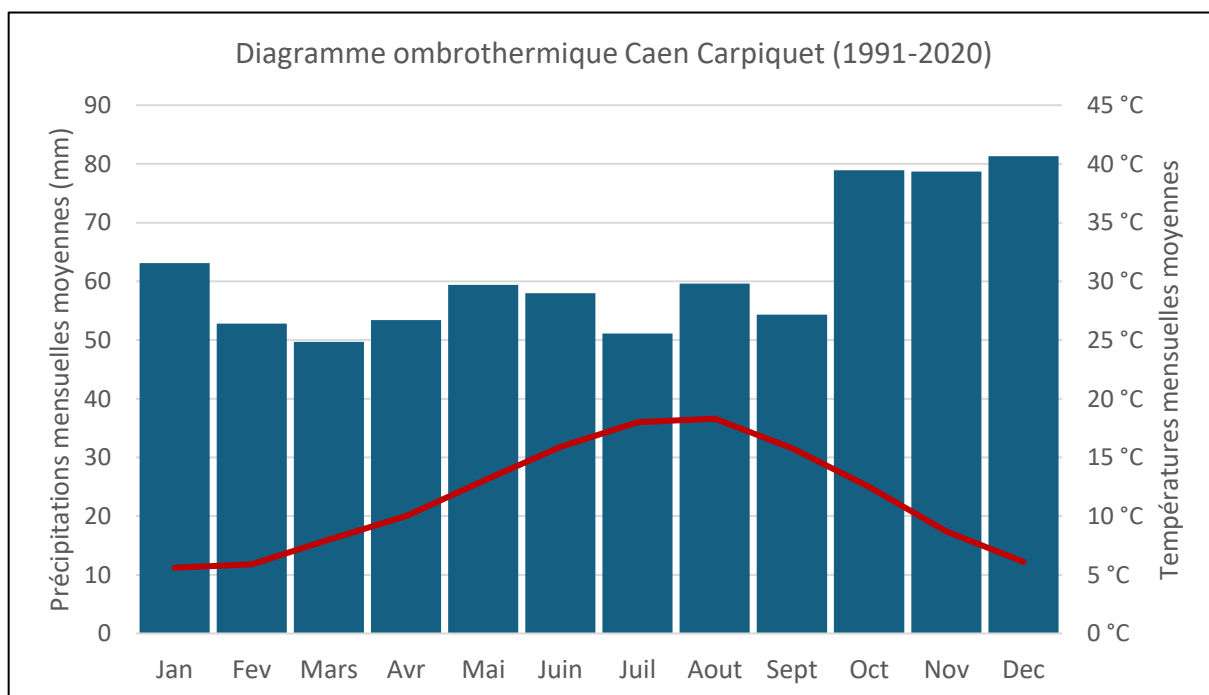


Figure 59: Diagramme ombrothermique pour Caen (Carpiquet) selon la normale de 1991 à 2020 - Données : Météociel; Réalisation : C. Zangerl

Caen-Carpiquet	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Année
Temp, max, (°C)	8,3	9,1	11,7	14,4	17,4	20,5	22,9	23,2	20,4	16,2	11,8	8,8	15,4
Temp, moy, (°C)	5,6	5,9	8	10	13	15,9	18	18,3	15,8	12,5	8,7	6,1	11,5
Temp, min, (°C)	2,9	2,8	4,2	5,5	8,5	11,2	13,1	13,3	11,1	8,8	5,6	3,3	7,5
Jours Tx > 25°C	0	0	0	0,2	1,3	3,5	7,8	7,7	2,9	0,4	0	0	23,9
Jours Tn < 0°C	7,6	6,9	3,6	1,3	0	0	0	0	0	0,4	2,1	6,8	28,7
RR mensuel (mm)	63,1	52,8	49,7	53,4	59,4	58	51,1	59,6	54,3	78,9	78,7	81,3	740,3

Figure 60: Tableau représentant les normales de température et de précipitations à Caen (Carpiquet) pour la période de 1991 à 2020 - Données : Météociel; Réalisation : C. Zangerl

Le tableau ci-dessus (figure 60) montre que les jours où la température maximale dépasse les 25°C sont répartis sur les mois de juin à septembre et sont peu nombreux. En moyenne, durant les mois les plus chauds de l'année qui sont le mois de juillet et le mois d'août, on ne compte que 7,8/7,7 jours de chaleurs, ce qui ne représente que 25% des jours d'un mois. En se basant sur la moyenne des 30 dernières années, les fortes chaleurs ne semblent donc pas être un réel enjeu à Caen.

Ces moyennes cachent néanmoins les événements extrêmes qui ont lieu à une échelle de temps plus courte, comme les canicules, qui sont pourtant bien présentes en Normandie. Sans évoquer la canicule de 2003 qui est restée dans les mémoires, les départements normands ont connu plusieurs épisodes caniculaires durant les 10 dernières années. En effet, depuis 2010, la France a connu 22 vagues de chaleur. En Normandie, entre 2019 et 2023, 8 vagues de chaleurs et canicules ont eu lieu durant la période estivale, entre juin et début septembre, avec des températures maximales journalières avoisinant voire dépassant les 40°C sur plusieurs jours en juillet 2022 (Santé Publique France, 2022).

Bien que les travaux de Météo France et des institutions de santé permettent aujourd'hui de mieux anticiper ces épisodes de fortes chaleurs et ainsi préparer la population, la menace de la multiplication et de l'intensification de ces épisodes météorologiques extrêmes dues au changement climatique montre bien la nécessité d'adapter au mieux les espaces urbains pour lutter pour la fraîcheur en ville. En effet, selon les scénarios envisagés par le GIEC Normand, un groupe d'experts régionaux dont les travaux visent à traduire les prévisions du GIEC international à l'échelle locale, le nombre de jours de chaleur avec des températures supérieures ou égales à 25°C risque de se multiplier. Selon le scénario pessimiste, la Normandie pourrait passer de moins de 15 jours de chaleur actuellement observés à plus de 40 d'ici 2100, voire à plus de 60 à 90 jours pour les territoires situés vers l'intérieur des terres. Les vagues de chaleur seraient également plus longues et plus intenses que ce que l'on observe actuellement. En dehors des vagues de chaleur, la température moyenne augmenterait sur l'ensemble du territoire normand et les températures maximales atteindraient très régulièrement plus de 30°C durant la période estivale (GIEC Normand, 2023).

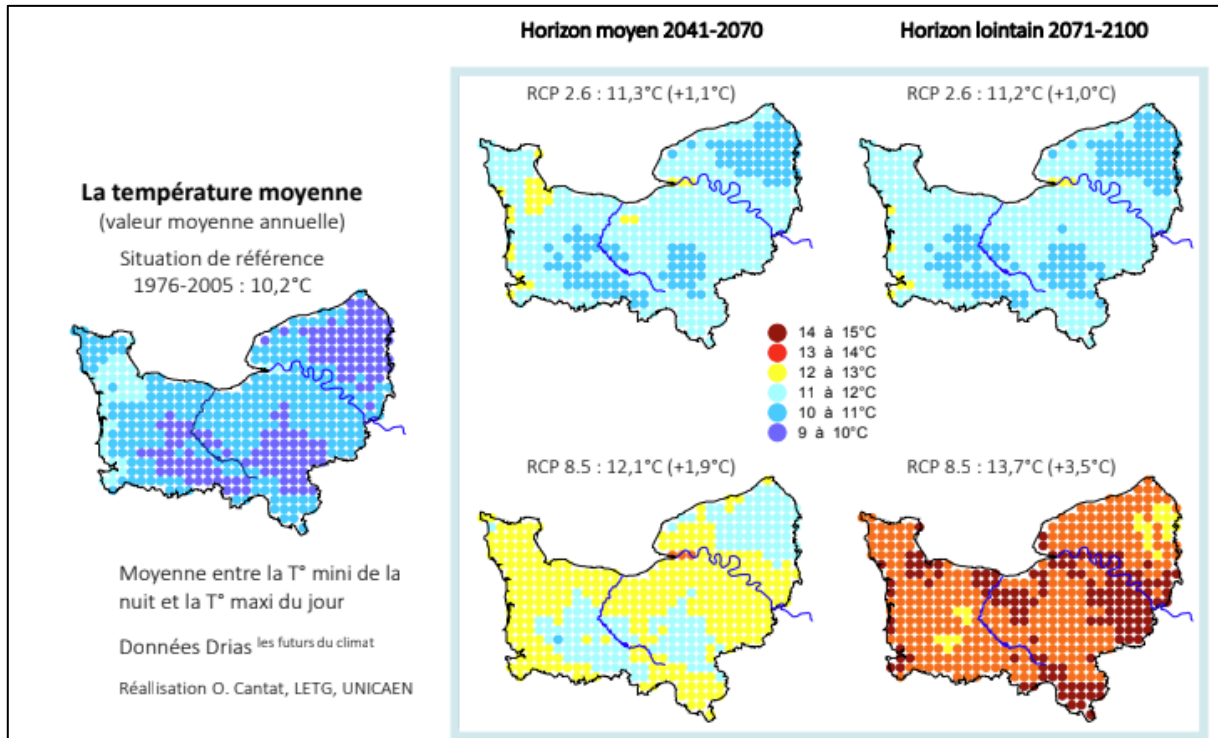


Figure 61: Projections du climat normand à l'horizon moyen et lointain selon les scénarios optimistes et pessimistes du GIEC - Source : (GIEC Normand, 2023)

Au regard de ces projections, on comprend que les types de temps favorables aux îlots de chaleur urbains, c'est-à-dire des temps clairs et calmes avec beaucoup d'ensoleillement et un vent faible, seraient également de plus en plus fréquents. Sur la période de 2001 à 2023, ce type de temps survient principalement durant les mois printaniers et estivaux. Les temps très favorables à moyennement favorables représentent aujourd'hui 31,4% des temps observés entre mars et mai et 40,6% entre juin et août. Avec les effets du changement climatique, cette part pourrait augmenter considérablement, ce qui engendrerait la multiplication des nuits à forts ICU.

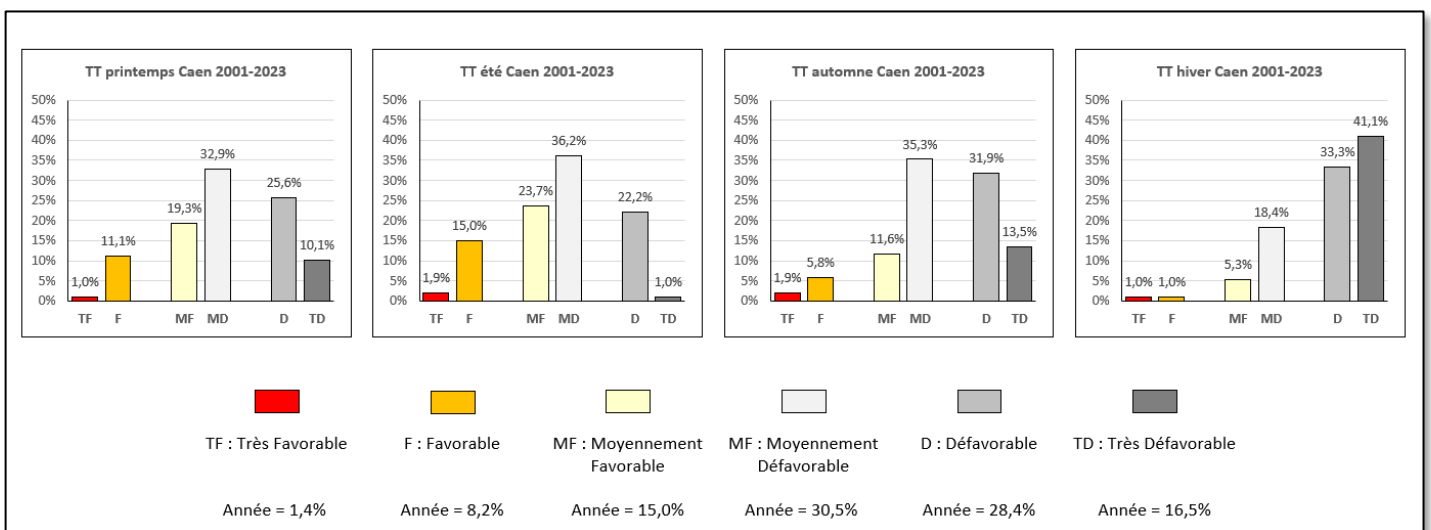


Figure 62: Graphique représentant la part des types de temps favorables à défavorables aux ICU selon les saisons à Caen basé sur la période de 2001 à 2023 - Réalisation : O. Cantat

6) Conclusion de la partie III

L'agglomération caennaise concentre un grand nombre de personnes et d'activités sur son territoire. Comme toute ville, elle est marquée par une grande part de surfaces imperméables et par certains quartiers particulièrement minéralisés en centre-ville, comme l'ancien centre de Caen ou encore le quartier St. Jean. Au cours des dernières années, les études sur les îlots de chaleur urbains à Caen, qui ont été possibles grâce à la mise en place d'un réseau de stations météorologiques, ont permis de prouver l'existence de ce phénomène à Caen. Lorsque les conditions météorologiques sont favorables, les écarts de températures entre le cœur de la ville et la Prairie, qui sert de référence campagne, ont pu atteindre jusqu'à 6°C.

La présence de cet îlot de chaleur, couplée aux projections climatiques comme celles du GIEC normand qui prévoit une augmentation générale des températures et des épisodes de forte chaleur plus longs et plus intenses, peut alors rapidement poser un problème. On peut donc s'interroger sur le rôle que les différents espaces verts de l'agglomération caennaise peuvent jouer dans la lutte contre la chaleur en ville.

La prochaine partie de ce mémoire a comme but de présenter les résultats obtenus grâce aux stations météorologiques mises en place par le laboratoire IDEES depuis avril 2022 et grâce aux différentes campagnes de mesure menées dans le cadre de ce mémoire. Dans un premier temps, il sera question de présenter les caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain caennais puis, dans un deuxième temps, d'analyser plus en détail les espaces verts et leurs dynamiques thermiques.

Partie IV – L'étude du climat caennais – îlots de chaleur et îlots de fraîcheur

Après avoir constaté l'existence des îlots de chaleur à Caen et son potentiel impact sur la santé de la population, la question de la lutte contre ces derniers s'impose. Bien que l'été 2024 peine à démarrer et que le début de l'année ait surtout été marqué par une météo assez défavorable aux ICU, les données du Service Copernicus pour le changement climatique du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme indiquent que le mois de juin 2024 a été le 12e mois consécutif à dépasser la limite des +1,5°C de température moyenne mondiale par rapport à l'ère préindustrielle (Copernicus Climate Change Service, 2024). L'objectif de l'Accord de Paris, qui vise à maintenir la hausse des températures en dessous de 2°C, semble donc de plus en plus difficile à atteindre, ce qui implique non seulement d'intensifier les efforts d'atténuation du changement climatique, mais également l'adaptation des populations et ainsi des villes aux possibles conséquences de ce dernier.

Que ce soit dans la littérature scientifique ou dans le cadre de projets d'aménagement urbain, les solutions fondées sur la nature et plus précisément la végétation en ville prennent une place de plus en plus importante dans la lutte contre la surchauffe urbaine. En effet, les études mentionnées dans la partie II ont conclu que la végétation pouvait contribuer à limiter la surchauffe de l'air en ville par l'ombrage et l'évapotranspiration, avec des effets plus ou moins importants selon le type de végétation urbaine (toits et façades, parcs, etc.). Les parcs urbains se sont montrés particulièrement intéressants à ce sujet puisqu'ils pouvaient représenter des îlots de fraîcheur que les habitants peuvent fréquenter pour se rafraîchir lors de périodes de fortes chaleurs et qui sont capables, dans une certaine mesure, de diffuser cette fraîcheur sur les alentours la nuit.

L'agglomération caennaise possède, comme montré dans la partie III, un grand nombre d'espaces verts intéressants à étudier dans le cadre des IFU. Pour rappel, ces derniers sont présentés en détail à partir de la page 57. Les questions qui ont alors guidé l'analyse des îlots de fraîcheur urbains dans l'agglomération caennaise sont les suivantes :

- Existent-ils des îlots de fraîcheur dans l'agglomération caennaise et, si oui, dans quelle mesure sont-ils capables de produire de l'air frais et de le diffuser sur les environs en journée et pendant la nuit ?
- Quelles sont les dynamiques thermiques de ces espaces verts, notamment aux couchers et aux levers du soleil ?
- Comment les caractéristiques des espaces verts (types de végétation, présence ou non d'obstacles à la circulation, topographie) influencent-elles sur la formation et la circulation de l'air ?

1) Méthodologie

Il existe différentes méthodes pour étudier le climat urbain. Les dernières années, de nombreuses recherches se sont basées sur la modélisation numérique du climat urbain, comme le projet MAPUCE qui a été mené entre 2014 et 2018 et qui visait à développer une méthodologie applicable à n'importe quelle ville française (Centre National de Recherche Météorologique, 2018). Bien que ces modélisations soient de plus en plus élaborées, la mise en place de réseaux de mesure afin de collecter des données empiriques pour vérifier l'exactitude des modélisations et avoir une compréhension plus proche de la réalité du fonctionnement climatologique d'une ville reste à mon avis indispensable. C'est pour cette raison que l'étude des espaces verts présentée dans ce mémoire est basée uniquement sur des données récoltées sur le terrain par différentes méthodes présentées dans ce chapitre. Ces données pourront, dans le cadre d'autres études menées au sujet des IFU à Caen, servir de base pour la comparaison des résultats ou l'élaboration de modèles numériques.

1.1) Le réseau de stations météorologiques du laboratoire IDEES

Le réseau mis en place à partir de 2022 par Olivier Cantat, maître de conférences et membre du laboratoire IDEES de l'Université de Caen, n'a pas cessé de s'agrandir au fil des années. En juin 2024, ce réseau est composé d'une vingtaine de stations météorologiques dotées d'un Logger placé dans un abri MétéoHelix de la marque Barani. Ce dernier enregistre les valeurs de température, d'humidité de l'air, d'ensoleillement et de pression atmosphérique à un pas de temps de 10 minutes. Les abris MétéoHelix, par leur forme héliçoïdale, garantissent une bonne ventilation et empêchent ainsi toute surchauffe à l'intérieur de l'abris, rendant les mesures particulièrement fiables (Barani, 2024). De plus, afin de garantir les mêmes conditions de mesure pour chaque site et donc la comparabilité des données, les stations sont fixées à une hauteur de 3m au-dessus du sol sur du mobilier urbain ou sur des arbres selon les possibilités sur place. En plus des stations MeteoHelix, 2 stations MeteoWind permettent également d'enregistrer la direction et la force du vent, qui est un paramètre clé dans l'étude des ICU. Ces données sont automatiquement transmises par le réseau SigFox et un tableau de bord permettant d'observer la température en temps réel a été mis en place.



Figure 63: Photo d'une station météorologique avec abri MétéoHelix – Source : (Barani, 2024)

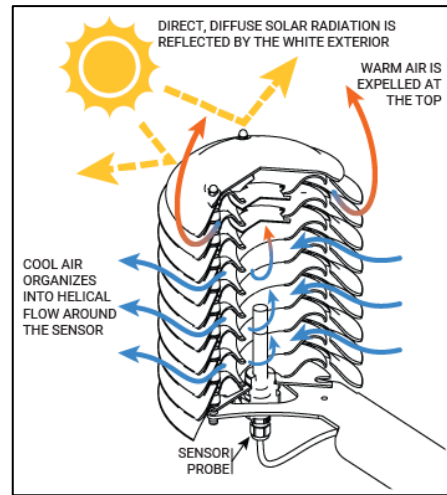


Figure 64: Fonctionnement d'un abri MeteHelix - Source : (Barani, 2024)

L'emplacement des stations a été pensé de manière à représenter des sites avec des caractéristiques d'occupation du sol variées à différents endroits de la ville, l'objectif étant d'étudier le fonctionnement thermique de chaque type d'espace rencontré dans l'agglomération. Le tableau ci-dessous (figure 65) présente les différentes stations visibles sur la carte (figure 66).

Nom du lieu	Description	Début de la série	Echelle climatique
Espaces minéralisés			
Tour Leroy	Espace minéral dense ouvert (centre-ville)	11/04/2022	Topoclimat
Ilot urbain St-Jean	Espace minéral dense confiné (centre-ville)	04/02/2023	Microclimat
Place Bouchard	Espace minéral dense semi-confiné (centre-ville)	11/04/2022	Topoclimat
Place Foch	Espace minéral dense (centre-ville) à proximité d'un espace vert (Prairie)	05/07/2022	Topoclimat
Pont Winston Churchill	Espace minéral dense ouvert (centre-ville) sur l'axe de l'Orne et à proximité d'arbres	11/04/2022	Topoclimat
Place de la Gare	Espace minéral ouvert (Sud)	03/06/2022	Topoclimat
Claude Decaen	Espace minéral ouvert (sud) à proximité d'un parc (Parc Claude Decaen)	19/07/2023	Topoclimat
Espaces verts			
Place de la Résistance	Place végétalisée (pelouse, centre-ville)	11/04/2022	Topoclimat
Prairie	Très grand espace vert à végétation basse (centre)	11/04/2022	Topoclimat
Rue du Québec	Très grand espace vert à végétation variée (Sud-Ouest, hors contexte urbain)	14/06/2023	Topoclimat
Jardin des Plantes	Petit espace vert confiné à végétation variée (centre)	11/04/2022	Microclimat
Campus 1	Espace vert ouvert à végétation basse + quelques arbres isolés (centre)	01/12/2023	Topoclimat
Cimetière St Pierre	Petit espace vert à végétation arborée (centre)	27/10/2023	Microclimat
Cimetière St-Jean	Petit espace vert à végétation arborée (Sud)	27/10/2023	Microclimat
Promenade Napoléon	Couloir vert encaissé sous arbres (NO à SO)	19/06/2024	Microclimat

Hors agglomération			
Mairie Colomby-Anguerny	Espace minéral ouvert (Nord de Caen)	no data	Topoclimat
Colomby-Anguerny Ecole	Espace minéral ouvert (Nord de Caen)	no data	Topoclimat
Colomby-Anguerny Champ	Champ hors contexte urbain (Nord de Caen)	no data	Topoclimat
Cambes-en-Plaine	Champ hors contexte urbain (Nord de Caen)	17/02/2023	Topoclimat

Figure 65: Tableau récapitulatif des stations météorologiques du réseau IDEES et leurs principales caractéristiques

En juillet 2024, le réseau IDEES compte 19 stations réparties entre les espaces minéralisés, les espaces verts et les espaces hors agglomération. Ces différentes stations ont chacune un rôle précis en ce qui concerne l'étude du climat urbain.

Comme expliqué dans la première partie de ce mémoire, l'étude du climat urbain peut se faire à différentes échelles selon le niveau de détail recherché. Le premier objectif du réseau IDEES est la caractérisation du climat urbain à l'échelle de la ville pour l'identification d'un effet d'îlot de chaleur urbain. Ainsi, la majorité des stations du réseau ont été mises en place le plus possible dans des espaces ouverts et dégagés afin d'être représentatif des conditions climatiques à l'échelle d'un quartier. Ceci est nécessaire afin d'éviter que des effets microclimatiques liés à la présence d'objets urbains ou de végétation viennent modifier très localement les températures.

L'étude des microclimats, c'est-à-dire des conditions climatiques différentes du climat à l'échelle de la ville ou d'un quartier que l'on observe très localement dans des espaces confinés, est l'objectif de quelques-unes des stations du réseau. En premier lieu, on peut mentionner la station située dans l'îlot de bâtiments à proximité directe de la Tour Leroy. Le but de cette station est de permettre l'étude des températures à l'intérieur de la cour de bâtiments et de comparer ces dernières à celles observées à l'extérieur de cet îlot. On peut également évoquer les stations du Jardin des Plantes et des deux cimetières dormants. Ces dernières ont comme objectif de fournir des informations sur les possibles effets microclimatiques dans ces espaces verts entourés de murs et qui présentent donc un certain confinement par rapport aux espaces alentours. Finalement, la station de la promenade Napoléon, installée depuis peu, permet également une analyse du microclimat lié à la végétation et son encaissement.

Les planches photographiques à la page 87 – 89 (figures 67 à 69) montrent l'emplacement des principales stations minérales du centre-ville ainsi que des espaces verts étudiés dans ce mémoire. Elles permettent de voir la différence entre les stations mesurant le topoclimat dans des espaces ouverts (figure 67 et 69) et celles mesurant les effets microclimatiques dans des espaces confinés (figure 68 et 67 à droite).

L'analyse des îlots de chaleur urbains à Caen se fait par le calcul des différences de températures entre les espaces minéraux et une station de référence censée représenter le climat rural. Le choix de la station de référence « campagne » est alors primordial pour représenter le plus justement possible l'ICU. Il existe plusieurs stations situées hors de l'agglomération caennaise, comme à Cambes-en-Plaine ou à Colomby-Anguerny. Les données récoltées sur ces stations ont néanmoins montré que, par leur situation au nord de la ville et donc à proximité de la mer, l'influence de la brise de mer semble être trop importante pour être représentative du climat « hors ville ». Elles restent pertinentes pour comprendre l'étude du climat des campagnes proches de la mer, ce qui est leur rôle principal aujourd'hui. La rue du Québec, située au sud-ouest de la ville de Caen, ne peut pas non plus être considérée comme une station de référence adéquate. Par sa topographie en creux et donc l'effet d'accumulation d'air frais à cet endroit, les températures se sont souvent avérées particulièrement basses par rapport au centre-ville. Ainsi, c'est la station de la Prairie, en attendant de pouvoir agrandir le réseau et donc de tester d'autres emplacements, qui sert de référence campagne à l'analyse des ICU.

En plus d'être la station de référence campagne, la Prairie constitue également une station permettant d'analyser son comportement thermique en tant que grand parc urbain. Le réseau actuel est doté de 8 stations représentant des espaces verts. A l'exception de la place de la Résistance, qui constitue plus une place urbaine recouverte de pelouse qu'un réel espace vert, et de la promenade Napoléon n'ayant été installée que fin juin 2024, les 6 autres stations ont servi à l'étude des dynamiques thermiques des espaces verts et donc à l'étude des îlots de fraîcheur urbains.

Grâce à des financements de la communauté urbaine de Caen La Mer, ce réseau va bientôt pouvoir être agrandi d'une vingtaine de stations supplémentaires, permettant alors d'affiner les connaissances sur les ICU et les IFU de l'agglomération caennaise.

Carte de localisation des stations météorologiques du réseau IDEES (juillet 2024)

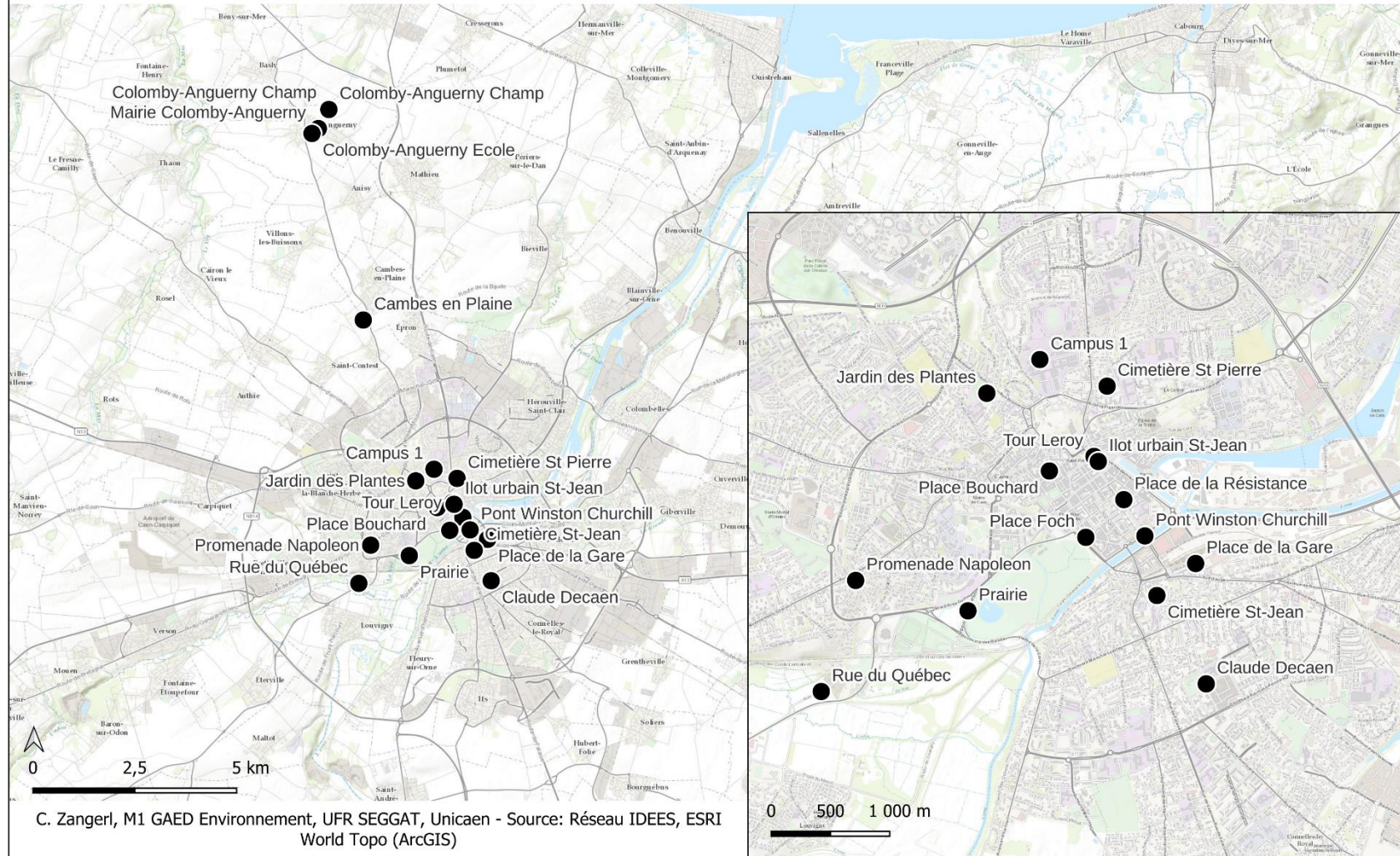


Figure 66: Carte de localisation des stations météorologiques du réseau IDEES

Stations météo des espaces minéraux du cœur de la ville de Caen

Tour Leroy - Espace minéral dense ouvert au centre-ville



Îlot St. Jean - Espace minéral confiné à l'intérieur d'une cour de bâtiment



Place Bouchard - Espace minéral dense semi-confiné au centre-ville



Figure 67: Plage photographique des stations météo des espaces minéraux du centre-ville de Caen - Source : C. Zangerl; O. Cantat

Cimetières dormants de St. Pierre (gauche) et St. Jean (droite) – Petits espaces verts confinés à végétation arborée



Jardin des Plantes – Espace vert confiné à végétation variée



Stations météo des espaces verts confinés de l'agglomération caennaise

Promenade Napoléon – Couloir vert confiné, encaissé et arboré



*Figure 68: Planche photographique des espaces verts confinés de l'agglomération caennaise -
Source : C. Zangerl*

Campus 1 – Grand espace vert ouvert à végétation basse et arborée



Rue du Québec – Très grand espace vert à végétation variée



Stations météo des grands espaces verts ouverts de l'agglomération caennaise

Prairie – Très grand espace vert ouvert à végétation basse



Figure 69: Planche photographique des grands espaces verts ouverts de l'agglomération caennaise - Source : C. Zangerl, Google Earth

1.2) Méthodes utilisées pour l'analyse des îlots de fraîcheur

Pour rappel, les îlots de fraîcheur urbains sont définis dans le cadre de ce mémoire comme des espaces verts intra-urbains où les températures sont plus fraîches que dans les espaces minéraux situés à proximité de ces derniers. L'analyse des IFU selon cette définition suppose la disponibilité de données météorologiques à une échelle plus fine que celle que propose le réseau IDEES. Le réseau actuel a comme objectif de fournir des informations sur les dynamiques thermiques observées pour différents types d'occupation du sol et ainsi de pouvoir mieux comprendre l'intensité de l'ICU et son extension spatiale à l'échelle de l'agglomération. L'étude de l'IFU, tel qu'il est défini ici, s'opère à une échelle plus fine qui est celle de l'analyse d'effets microclimatique, nécessitant alors non pas une station de référence campagne pour l'agglomération, mais bien une station de référence pour l'espace minéral situé à proximité du parc, et ce pour chacun des espaces verts. Actuellement, le réseau IDEES ne possède pas assez de stations météo pour la mise en place de mesures permanentes à cette échelle.

Deux méthodes peuvent alors être envisagées. Premièrement, il est possible d'appliquer la même méthodologie que celle utilisée pour l'étude des ICU, c'est-à-dire de définir une station de référence représentative de l'espace urbain et de comparer les températures entre les différents espaces verts et cette station urbaine.

Afin de définir cette station de référence à partir du réseau IDEES, l'occupation du sol de l'espace où se situe cette station devrait, dans l'idéal, être représentative de celle des espaces minéraux situés à proximité des parcs urbains. Pour la majorité des espaces verts intra-urbains, comme les cimetières dormants ou encore le Jardin des Plantes, les environs sont constitués d'espaces urbains résidentiels à logements individuels ou à petits collectifs avec des jardins. Malheureusement, aucune station météorologique permanente du réseau IDEES n'est située dans un espace avec une telle configuration. Faut d'autres options, il a donc été décidé d'utiliser les données de la station de la Tour Leroy. En sachant qu'il s'agit de la station généralement parmi les trois plus chaudes de l'agglomération, les différences entre cet espace et les espaces verts seront généralement négatives. Dans l'analyse des données, il est donc nécessaire de nuancer la « fraîcheur » observée dans les espaces verts.

Cette méthode est appliquée pour l'analyse des espaces verts dotés d'une station météo du réseau IDEES, qui sont donc la Prairie, la rue du Québec, le Jardin des Plantes, le Campus 1 et les cimetières dormants de St. Pierre et St. Jean. Puisque les trois dernières stations ont été mises en place en fin d'année 2023, l'analyse des IFU présentée dans ce mémoire débute en janvier 2024.

La deuxième méthode, plus en adéquation avec la définition donnée des IFU, est la mise en place de campagnes de mesure temporaires. Ces dernières permettent d'obtenir des données à une échelle plus fine que celle du réseau IDEES, mais sur une période limitée. Ces campagnes peuvent être itinérantes ou fixes en fonction des objectifs.

Les mesures itinérantes consistent à enregistrer des données grâce aux stations météorologiques en se déplaçant, à pied ou à vélo, par exemple. Les transects à vélo sont assez fréquents dans l'étude du climat urbain, notamment parce qu'ils permettent de mesurer la température sur une grande distance et ainsi de couvrir une grande surface en peu de temps (figure 70). Elles peuvent également se faire à pied, en mesurant la température à plusieurs points sur un transect prédéfini (figure 71). Cette méthode induit néanmoins un biais, qui est lié aux évolutions de la température pendant le temps de la mesure. En effet, lorsque l'on prend des mesures sur un transect, la température peut changer entre le début et la fin de la campagne, c'est-à-dire que la température mesurée au point 1 à un instant T peut avoir baissé ou augmenté à l'instant T+1 quand on mesure le point 2. Ainsi se pose la question de la comparabilité des données mesurées sur les différents points. Ce genre de mesure est alors conseillé à des moments où la température est stable.



Figure 70: Photo d'une station météo montée sur un vélo pour les campagnes de mesures itinérantes -
Source : L. Perier



Figure 71: Station météo montée sur un trépied utilisé pour les campagnes de mesures temporaires itinérantes ou fixes – Source : C. Zangerl

Les campagnes de mesure temporaires fixes consistent à installer une ou plusieurs stations météorologiques dans un espace durant un certain temps, sans pour autant les déplacer. (figure 71) Contrairement aux mesures itinérantes, les mesures fixes ne permettent pas de récolter des données sur une grande surface, à moins d'avoir beaucoup de stations et de personnes à disposition pour la campagne de mesure. Les mesures fixes présentent néanmoins l'avantage de garantir la comparabilité des données enregistrées, puisque l'on mesure la température à plusieurs points en même temps. Elles peuvent donc être mises en place à tout moment de la journée et peuvent permettre d'observer les dynamiques thermiques des espaces, notamment au coucher ou au lever du soleil. C'est pour cette raison qu'il a été décidé de favoriser les campagnes de mesures fixes dans le cadre de l'étude des IFU. Les espaces verts concernés par ce type de mesure ont été ceux qui ne possèdent pas de station météorologique fixe, c'est-à-dire la Vallée des Jardins, la Colline aux Oiseaux, la forêt d'Ifs et le parc du Biez à Mondeville.

La combinaison de ces deux méthodes permet de multiplier les données disponibles pour l'analyse des IFU. Néanmoins, les conditions météorologiques assez défavorables depuis le début de l'année et des difficultés d'ordre matériel et de disponibilité n'ont pas permis de procéder à un grand nombre de campagnes temporaires.

2) Résultats de l'étude des ICU

Cette partie a comme objectif de présenter une analyse de l'îlot de chaleur urbain à Caen. Comprendre la variabilité spatiale et temporelle de ce phénomène permet non seulement de saisir l'intérêt que présente l'étude des îlots de fraîcheur dans la lutte contre la chaleur en ville, mais également d'avoir une indication sur les mouvements d'air dans l'espace urbain qui concerne à la fois les ICU et les IFU.

En se basant sur les données récoltées par les données du réseau IDEES, ce chapitre présente dans un premier temps les caractéristiques générales de l'ICU caennais, comme sa fréquence et son intensité selon les saisons. Ensuite, une analyse plus détaillée de l'évolution des températures sur un cycle de 24h à l'aide de quelques exemples permettra de comprendre l'extension spatiale de l'ICU ainsi que les spécificités des différents espaces en termes de dynamique thermique.

2.1) L'ICU caennais : un phénomène nocturne et estival

Quand on observe les différences de températures à un pas de temps de 10 minutes entre le centre-ville, représenté par la station de la Place Bouchard, et la Prairie, on peut constater qu'il existe effectivement un effet d'îlot de chaleur à Caen (figure 72).

Si la moyenne des écarts observée est de l'ordre de 0,8°C toute saison et toute heure confondue, on remarque une forte variabilité inter journalière avec des intensités d'ICU dépassant régulièrement les 4°C et pouvant atteindre jusqu'à 6°C comme cela a été le cas durant l'été 2022. Ces valeurs ressemblent alors assez à ce qui a pu être observé dans d'autres études sur le rôle des espaces verts dans le rafraîchissement urbain présentées dans la partie II.

On observe également des variations saisonnières, avec des moyennes d'écart de température généralement plus élevées en été qu'en hiver. A l'image des années 2022, 2023 et 2024, certaines années s'avèrent donc plus propices aux ICU que d'autres. L'année 2022 a présenté des types de temps clairs et calmes plus fréquemment que les années 2023 et 2024 jusqu'ici. On remarque également des écarts négatifs, c'est-à-dire des situations où il fait plus frais au centre-ville que sur la Prairie. Cette situation s'observe généralement au lever du jour, lorsque le soleil commence à échauffer l'air sur la Prairie alors que l'ombre portée par les bâtiments décale le moment du réchauffement de l'air dans le cœur de la ville. Grâce à ce graphique, on comprend clairement la différence entre les valeurs moyennes, qui rendent compte d'une tendance générale mais qui lissent les données, et les valeurs en détail, qui montrent régulièrement des écarts très importants entre le centre-ville et la Prairie.

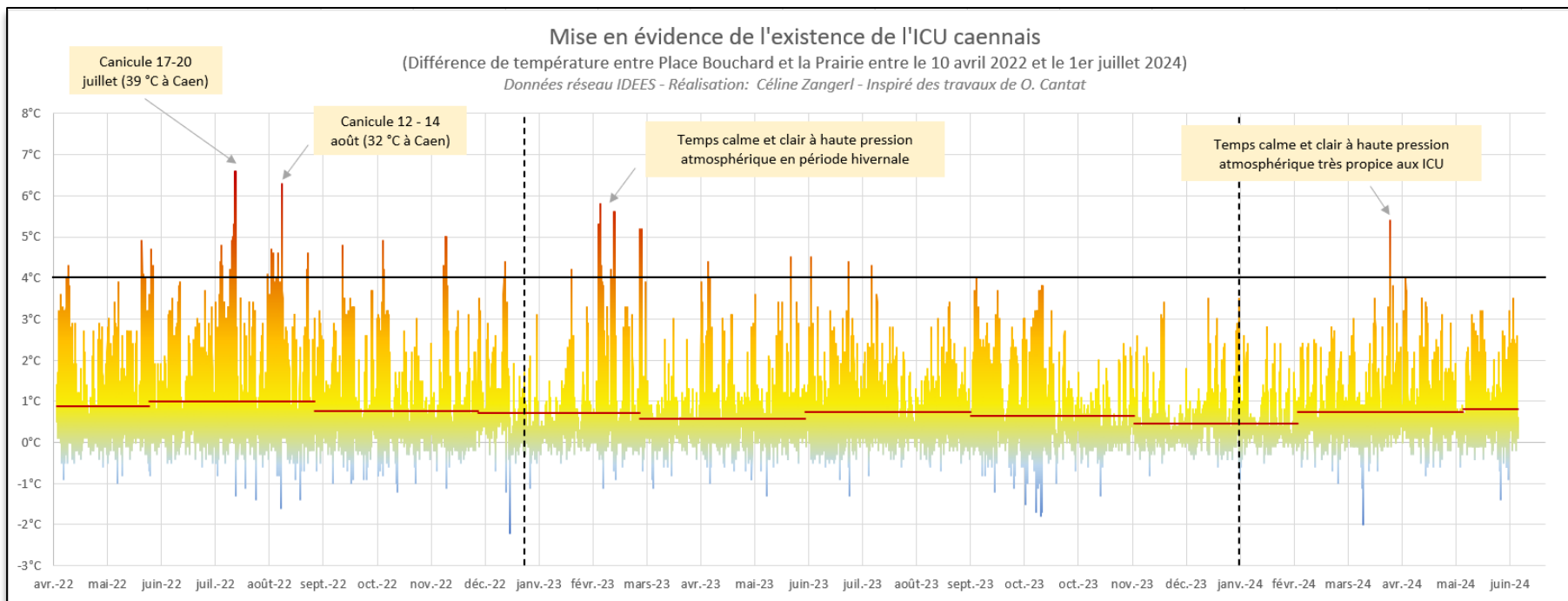


Figure 72: Graphique présentant les différences de températures entre le centre-ville de Caen et la Prairie à pas de temps de 10 minutes entre le 10 avril 2022 et le 1er juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl, inspiré des travaux de O. Cantat

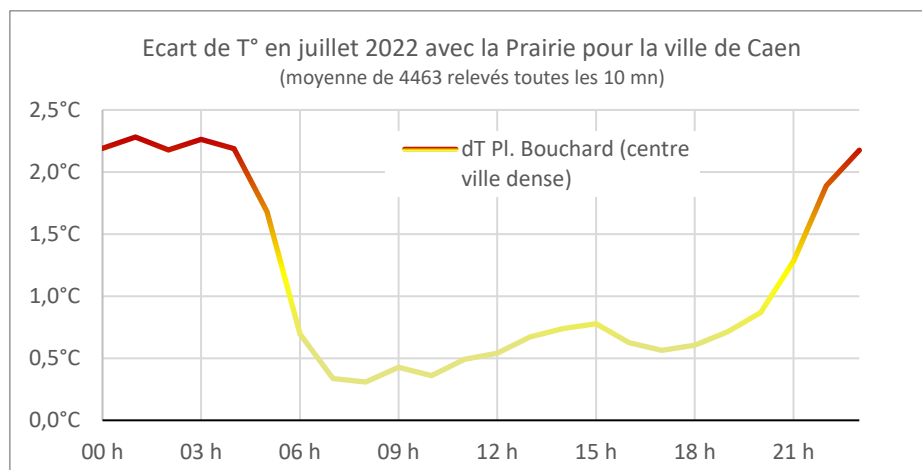


Figure 73: Graphique montrant l'écart de température moyen entre la Prairie et le centre-ville en juillet 2022 - Réalisation : C. Zangerl

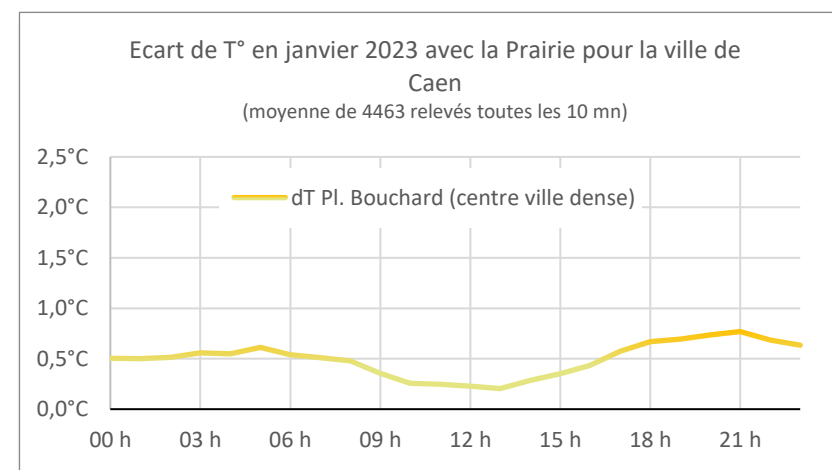


Figure 74: Graphique représentant l'écart de température moyen entre la Prairie et le centre-ville en janvier 2023 - Réalisation : C. Zangerl

Au regard des deux graphiques ci-dessus (figures 73 et 74), montrant les écarts moyens entre la Prairie et la Place Bouchard pour juillet 2022 et janvier 2023, on peut constater que l'intensité des ICU est bien plus prononcée pendant la période estivale. Cette situation est principalement due à la fréquence des types de temps propices ou non à la formation des ICU. Selon les données récoltées par le laboratoire IDEES, les temps couverts et venteux, donc défavorables aux ICU, représentent 81% de la totalité des types de temps observés en période hivernale. A l'inverse, les temps clairs et calmes en période estivale sont majoritaires (58%) (figure 62). Néanmoins, les ICU peuvent, lorsque les conditions météorologiques sont favorables, apparaître de manière plus ou moins intense pendant l'hiver, comme le montre l'exemple du mois de février 2023 (figure 72), où les écarts de températures ont pu atteindre plus de 5°C.

Comme il a été expliqué dans le premier chapitre de ce mémoire, les îlots de chaleur urbains sont des phénomènes avant tout nocturnes, c'est-à-dire que les écarts de température sont particulièrement élevés entre le coucher et le lever du soleil. C'est ce que l'on peut constater grâce à la figure 75 qui représente les écarts horaires moyens entre la Prairie et 3 stations du centre-ville de Caen pour la période du 11 avril 2022 au 23 juin 2024. Alors que les écarts en journée sont en moyenne inférieurs à 0,6°C et donc assez négligeables, les écarts doublent en période nocturne. Comme expliqué auparavant, ce rythme journalier assez prononcé résulte de la restitution de la chaleur accumulée pendant la journée par les matériaux de construction ainsi que d'une plus faible ventilation due à la présence des éléments urbains. De plus, les écarts sont plus prononcés à la place Bouchard, espace particulièrement minéralisé et dense, qu'à la place de la Résistance (place urbaine végétalisée et ouverte) et au Pont Churchill à proximité de l'Orne, ce qui indique un possible effet de la présence de l'eau et de la végétation sur les températures.

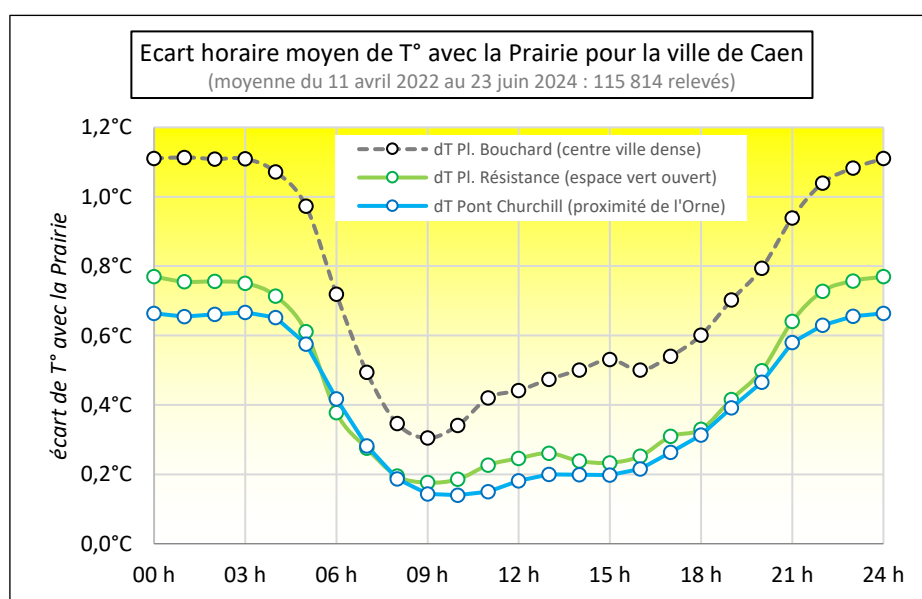


Figure 75: Graphique représentant les écarts de températures moyens entre la Prairie et le centre-ville pour la période du 11 avril 2022 au 23 juin 2024 – Réalisation : O. Cantat

Avant d’analyser plus en détail les différences d’écart entre les stations « vertes » et « bleues » et les espaces minéralisés, quelques exemples précis concernant les ICU permettent de comprendre plus concrètement l’extension spatiale et l’intensité des ICU dans la ville de Caen.

2.2) Exemple de la canicule de juillet 2022 – un fort ICU en période estivale

Le premier exemple illustre une situation à fort ICU en période estivale, plus précisément durant la nuit du 18 au 19 juillet 2022. Lors de cette canicule, la France se trouve sous l’influence d’un anticyclone avec une pression atmosphérique d’environ 1020 hPa pour la Normandie (figure 77). Ces hautes pressions sont particulièrement favorables aux temps calmes et clairs et les masses d’air chaudes provenant du sud du continent ont fait grimper les températures à presque 40 °C à Caen (figure 76). Avec l’absence de toute couche nébuleuse de jour (environ 15h d’ensoleillement) comme de nuit et un vent faible voire très faible (figure 78), toutes les conditions sont réunies pour l’installation d’un ICU de forte intensité.

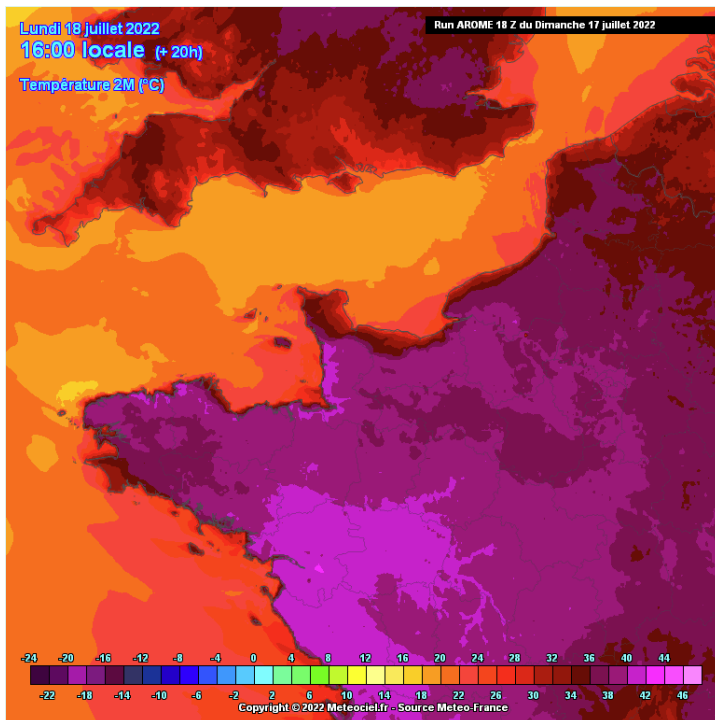


Figure 76: Températures observées dans le nord-ouest de la France dans l'après-midi du 18 juillet 2022 - Source : Météociel

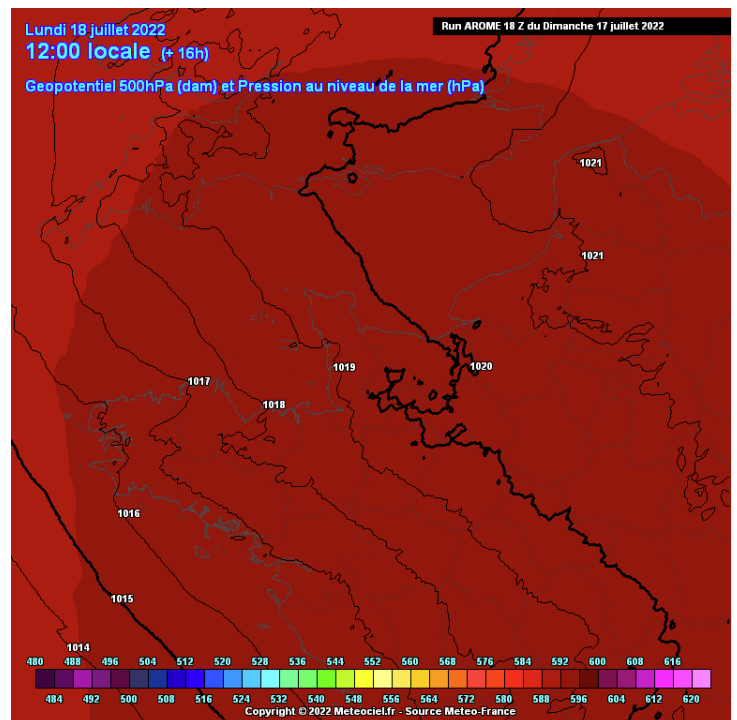


Figure 77: Géopotential à 500hPa et pression atmosphérique au niveau de la mer (hPa) le lundi 18 juillet à midi - Source : Météociel

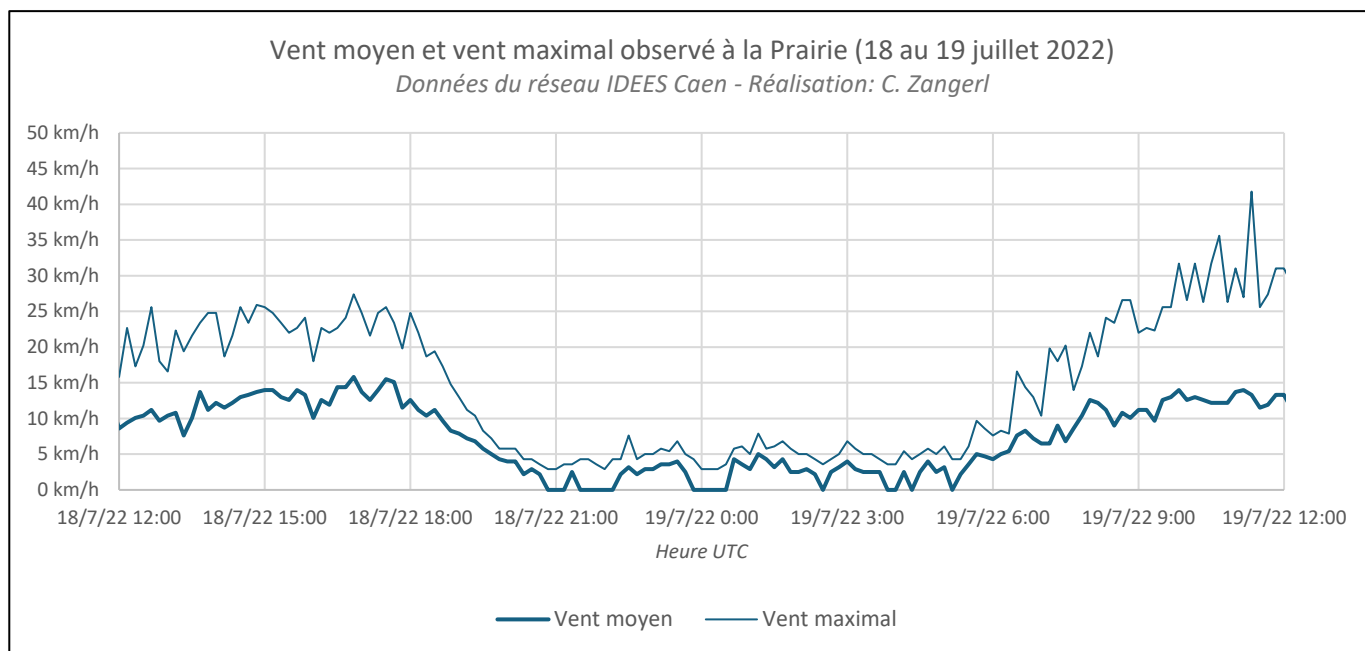


Figure 78: Graphique montrant la vitesse moyenne et maximale du vent à la Prairie entre le 18 juillet 2022 à midi et le 19 juillet 2022 à midi (Heure UTC) - Réalisation : C. Zangerl

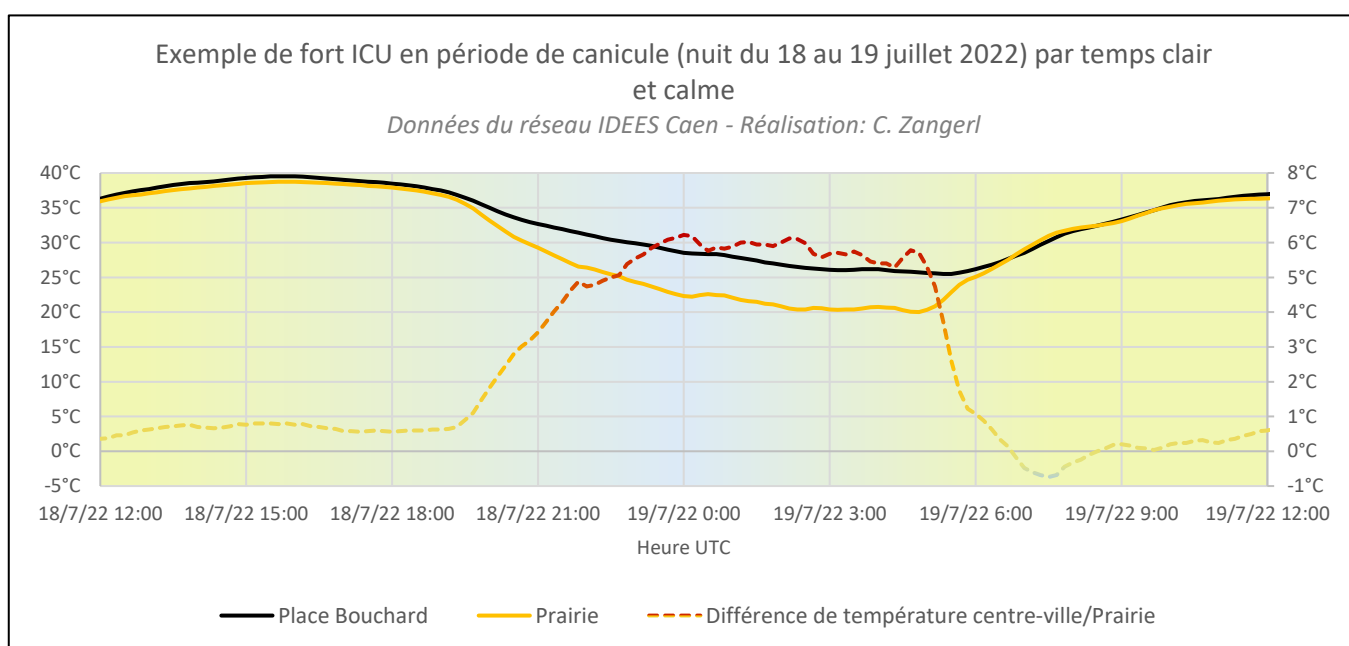


Figure 79: Graphique représentant les températures à la Place Bouchard et à la Prairie ainsi que les écarts du 18 au 19 juillet 2022 – Réalisation : C. Zangerl ; inspiré des travaux de O. Cantat

Lors de cette nuit, l'ICU s'est montré particulièrement intense avec des écarts de températures allant jusqu'à 6°C entre la Prairie et la Place Bouchard alors que la distance entre les deux espaces est inférieure à 1 km. Comme on peut le voir grâce au graphique ci-dessus (figure 79), les écarts de températures très faibles en journées commencent à se creuser vers 19h30 (UTC), donc vers 21h30 heure locale, soit environ une demi-heure avant le coucher du soleil. L'écart entre la Prairie et la Place

Bouchard est maximal à 0h (UTC). Cet écart reste fort jusqu'à environ 5h (UTC), peu après le lever du soleil. Le rayonnement solaire incident à ce moment-là permet de réchauffer l'air au-dessus de la Prairie, mais ne pénètre pas encore dans le centre-ville à cause de l'angle d'incidence faible, décalant ainsi le réchauffement de l'air au cœur de la ville d'une heure environ. Cette situation explique la présence de l'écart négatif en début de journée.

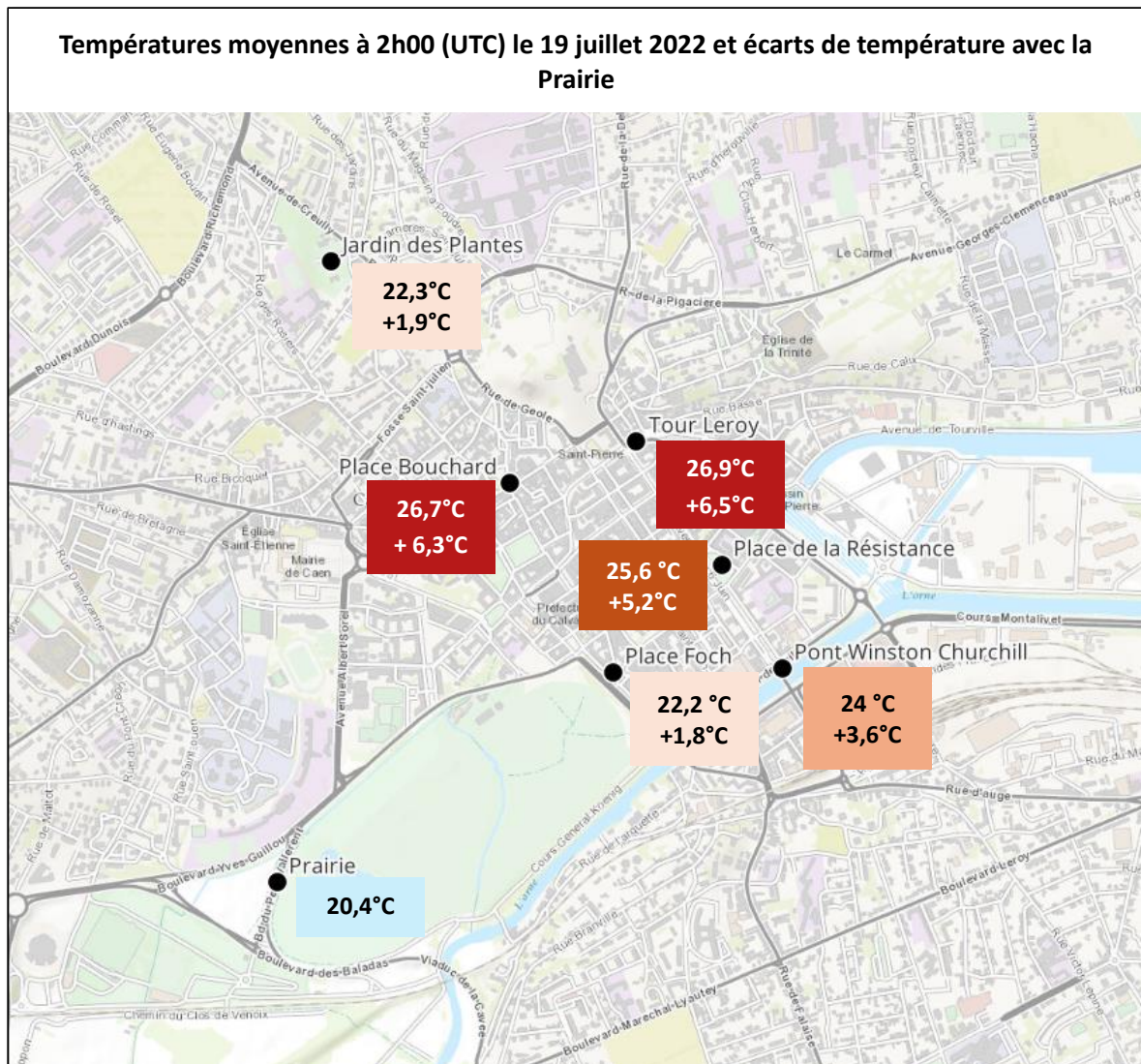


Figure 80: Carte montrant les températures aux différentes stations du réseau IDEES et les écarts à la Prairie le 19 juillet 2022 à 2h UTC - Réalisation : C. Zangerl

En comparant les températures enregistrées par les différentes stations du centre-ville de Caen à 02h00 le 19 juillet 2022 (figure 80), on peut constater plusieurs choses. Tout d'abord, on voit qu'il s'agit d'une nuit particulièrement inconfortable en termes de stress thermique pour les habitants des quartiers à fort ICU. Pour les stations de la Place Bouchard et de la Tour Leroy, les températures ne descendent pas en dessous de 25°C de toute la nuit.

La place Foch, bien qu'elle soit un espace urbain très minéralisé, semble profiter de la proximité du grand espace vert que constitue la Prairie, affichant alors un écart de seulement 1,8°C avec la station de référence. Cette situation donne alors une première indication de la capacité des espaces verts à diffuser de l'air frais sur les environs.

On remarque également des écarts moins marqués au Jardin des Plantes et, dans une moindre mesure, au pont Winston Churchill. Le Jardin des Plantes constitue un espace vert particulièrement intéressant qui présente des caractéristiques en termes de végétation et de topographie permettant de constituer un espace souvent plus frais que le reste du centre-ville pendant la nuit. Cet espace vert et son fonctionnement seront analysés de plus près dans la suite de ce mémoire.

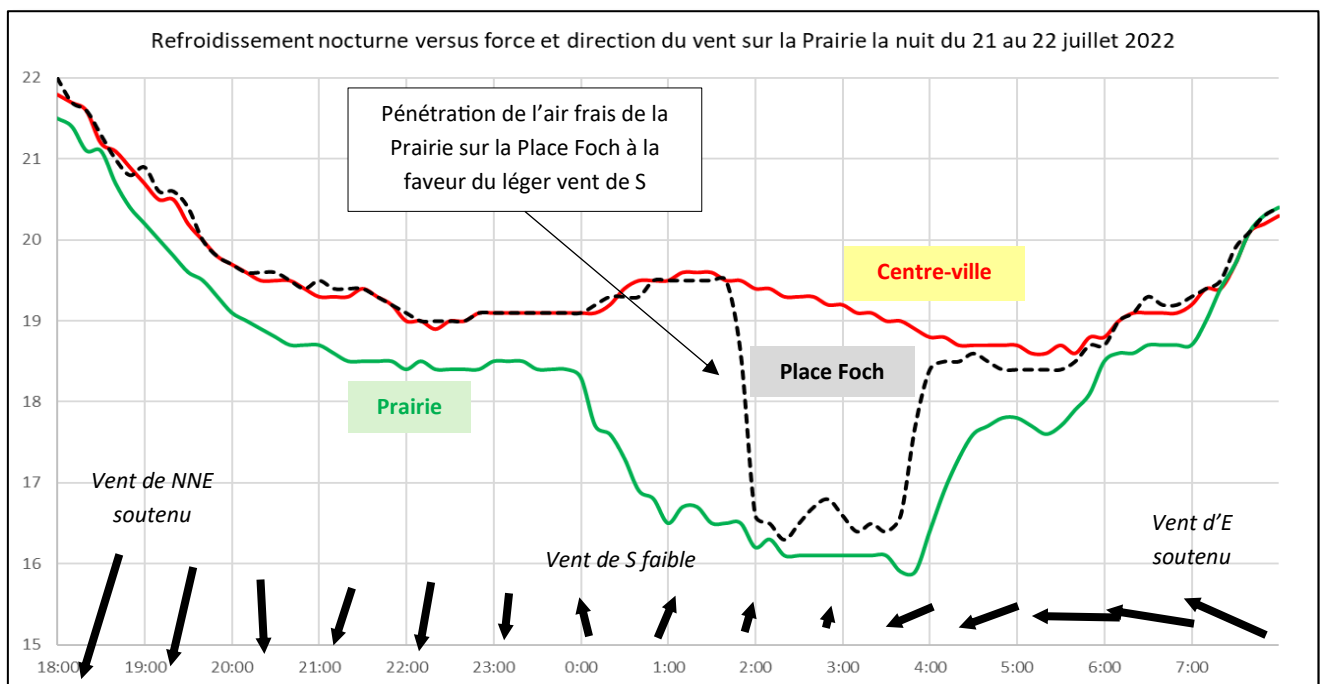


Figure 81: Graphique présentant la diffusion de l'air frais depuis la Prairie vers la Place Foch dans la nuit du 21 au 22 juillet 2022 - Source : O. Cantat

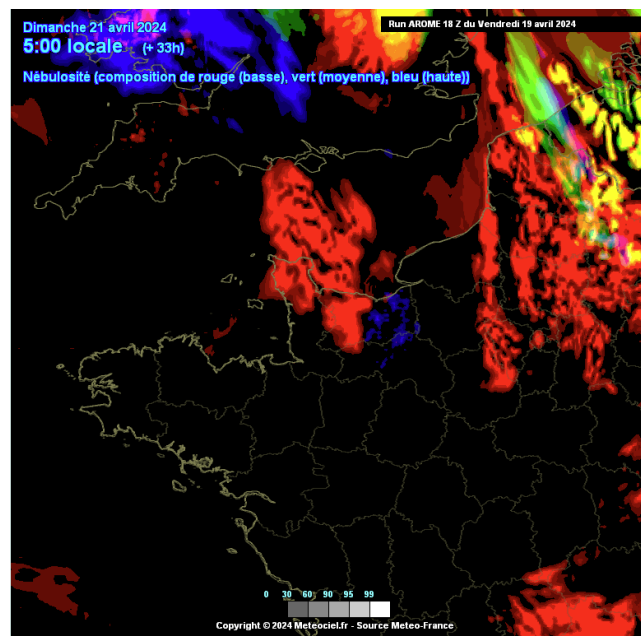
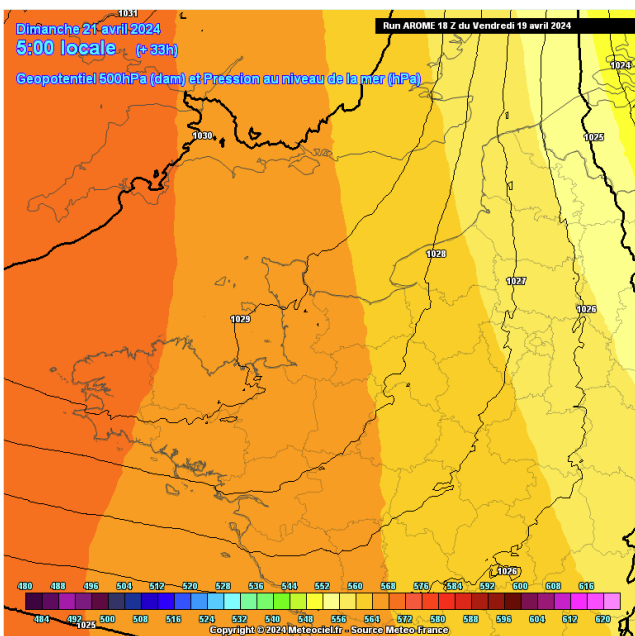
La diffusion de l'air frais depuis la Prairie vers la Place Foch est régulièrement observée. L'exemple de la nuit du 21 au 22 juillet 2022 présenté dans le graphique ci-dessus (figure 81) montre l'ampleur de l'influence de la Prairie sur l'espace urbain et l'importance de la force et de la direction du vent sur l'extension spatiale des ICU/de l'IFU.

En début de soirée du 21 juillet 2022, on observe la présence d'un vent assez soutenu en provenance du NNE qui s'affaiblit au fur et à mesure de la soirée. Il s'agit probablement de la brise de mer, un vent provenant de la mer qui résulte de la présence de températures plus élevées dans les terres qu'au-dessus de la mer. Aux alentours de minuit, la direction du vent change et tourne au sud-ouest, faisant entrer des masses d'air plus fraîches provenant de la campagne. Les températures de la

Prairie baissent alors rapidement dès que le vent tourne au sud-ouest. Ce changement de direction peut s'expliquer de deux manières. D'une part, il peut s'agir de l'effet inverse de la brise de mer, c'est-à-dire de la brise de terre qui se met progressivement en place. D'autre part, à une échelle plus fine, il pourrait également s'agir de l'effet de l'ICU lui-même. Les températures plus élevées en ville que dans les campagnes environnantes peuvent engendrer un mouvement ascendant de l'air chaud au-dessus de la ville, créant alors un appel d'air depuis la campagne plus fraîche. Dans tous les cas, l'air frais pénétrant sur la Prairie provoque quelques heures après une chute de température impressionnante à la Place Foch qui passe de températures égales à celles du centre-ville à des températures très proches de celles de la Prairie en quelques dizaines de minutes seulement. Dès la reprise du vent synoptique au lever du jour, les températures à la Prairie et à la place Foch augmentent rapidement sous l'effet du brassage de l'air et probablement sous l'effet de l'arrivée de l'air plus chaud du centre-ville vers la Place Foch et la Prairie. L'exemple de la Place Foch montre ainsi l'importance du vent dans l'extension spatiale de l'ICU et la diffusion de l'air frais dans les espaces urbains depuis les IFU.

2.3) Exemple du 20 au 21 avril 2024– un ICU moyen printanier

Alors qu'en 2022, le nombre de stations météorologiques dans l'agglomération caennaise était encore assez limité, l'agrandissement du réseau IDEES a permis d'avoir une compréhension plus fine du fonctionnement du climat urbain à Caen. Depuis janvier 2024, les conditions météorologiques n'ont pas été très favorables à la mise en place des ICU, puisque le début d'année a été marqué par des types de temps souvent couverts, pluvieux et venteux. Néanmoins, quelques jours au mois d'avril ont permis la mise en place d'un ICU dépassant les 5°C de différence entre le centre-ville, ici représenté par la station de Tour Leroy, et la Prairie. L'intérêt de se baser sur la Tour Leroy résulte entre autres du fait de l'ajout d'une station météorologique à proximité immédiate de la station à l'intérieur d'un îlot de bâtiment. En choisissant la Tour Leroy comme référence, il est possible d'analyser en même temps des effets microclimatiques par l'effet de confinement créé par les parois du bâtiment.



La période du 20 au 21 avril 2024 a été marquée par des hautes pressions atmosphériques, un temps très calme et assez clair avec quelques passages de nuageux. La situation observée pendant cette nuit est particulièrement intéressante à analyser, puisque l'on observe des intensités d'ICU assez différentes selon les heures. L'ICU diurne est globalement très faible, avec des écarts compris entre 0,5°C et 1°C jusqu'à environ 21h UTC (23h locale), donc environ 2h après le coucher du soleil. La baisse de température sur la Prairie coïncide avec le changement de force et de direction du vent, creusant alors les écarts avec le centre-ville.

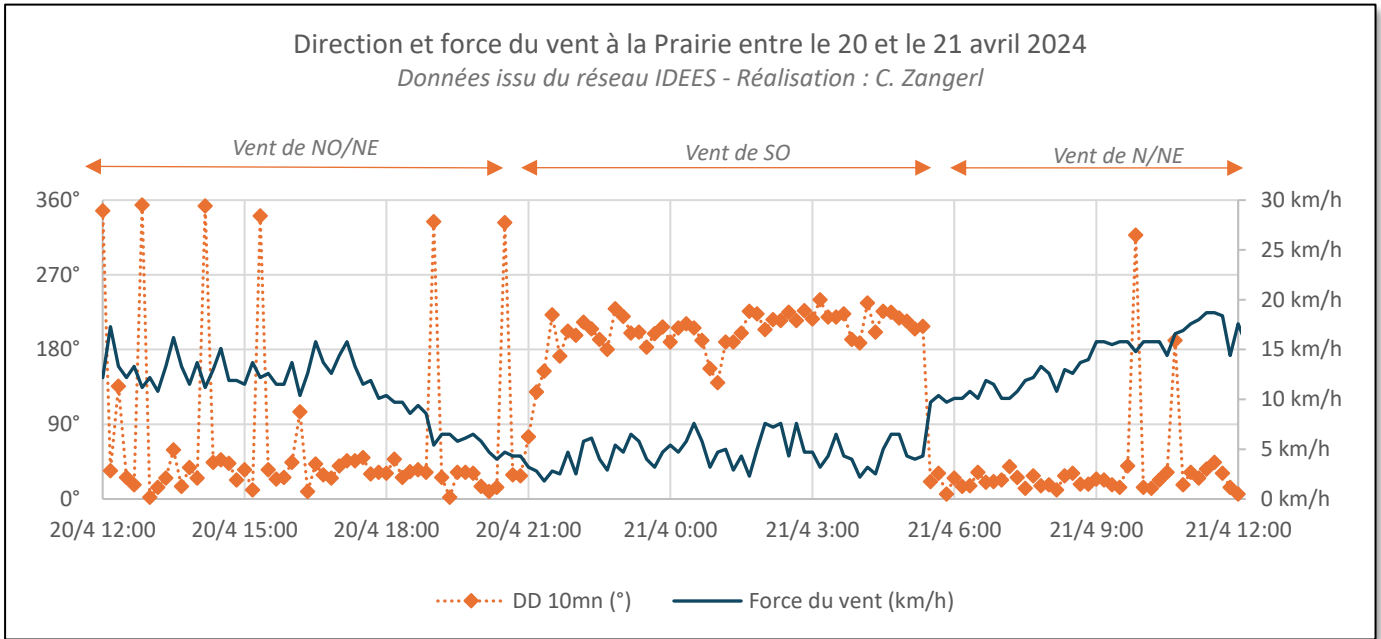


Figure 84: Graphique présentant la direction et la force du vent du 20 au 21 avril 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Alors que jusque-là, le vent du nord-est/nord-ouest était dominant, ce dernier commence à faiblir à partir de 18h UTC et tourne brusquement au sud-ouest vers 21h UTC (figure 84). Les écarts de températures se creusent alors progressivement au cours de la nuit puis rapidement à partir de 4h pour atteindre leur maximum (5,4°C) au moment du lever du soleil. Une fois que le vent reprend de la vitesse et tourne vers le Nord, les écarts disparaissent presque totalement vers 6h (figure 85).

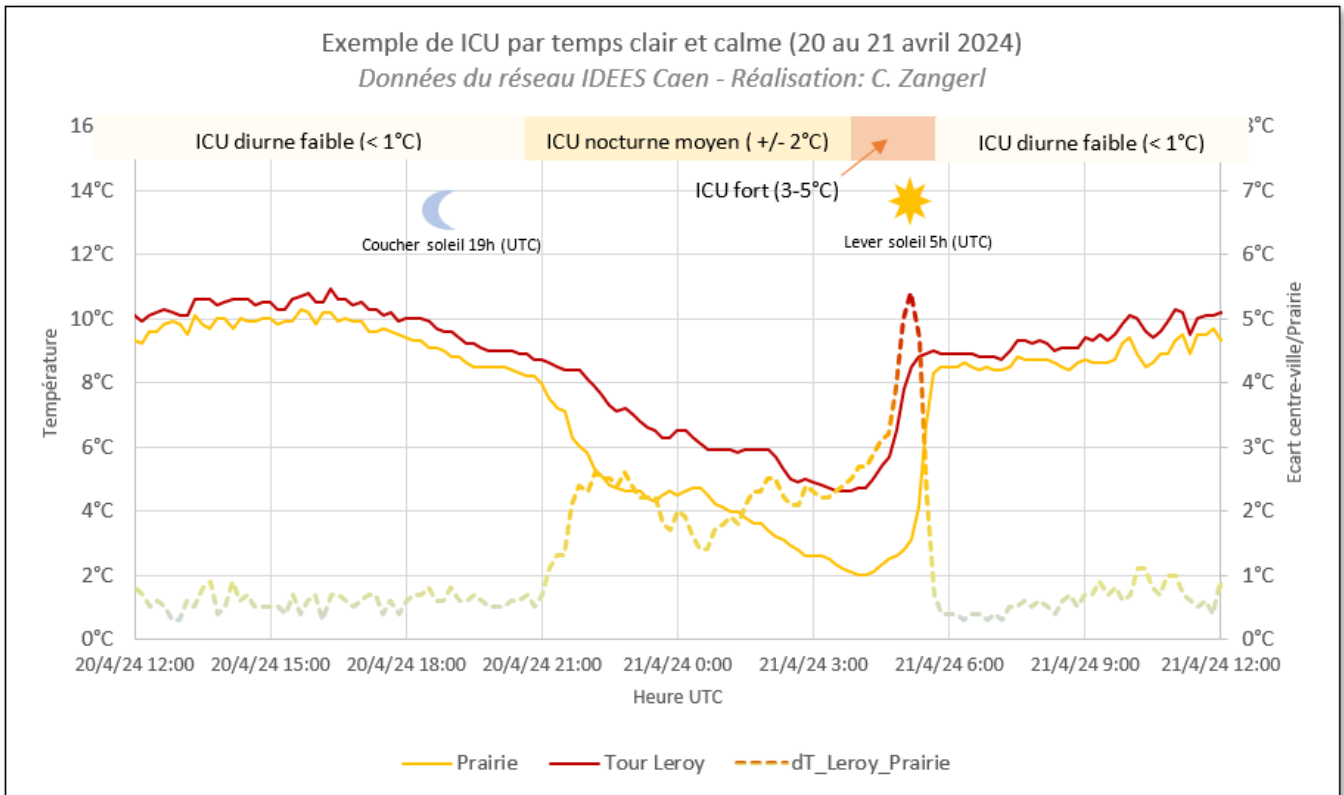


Figure 85: Graphique montrant l'ICU observée lors de la nuit du 20 au 21 avril 2024 - Réalisation : C. Zangerl

A l'inverse de l'exemple du mois de juillet 2022, on n'observe pas d'écarts négatifs au lever du jour, ce qui pourrait s'expliquer par les températures faibles et l'humidité de l'air élevée à la Prairie. Au moment de l'ICU maximal, l'humidité de l'air n'est que de 72% à la Tour Leroy contre 93% à la Prairie. La température à la Prairie se situant autour du point de rosée laisse penser que de la rosée s'est probablement formée. L'énergie reçue par le rayonnement solaire au lever du jour serait donc d'abord transformée en chaleur latente par l'évaporation de la rosée et réchaufferait l'air seulement par la suite, décalant ainsi l'augmentation de la température à la Prairie par rapport au centre-ville.

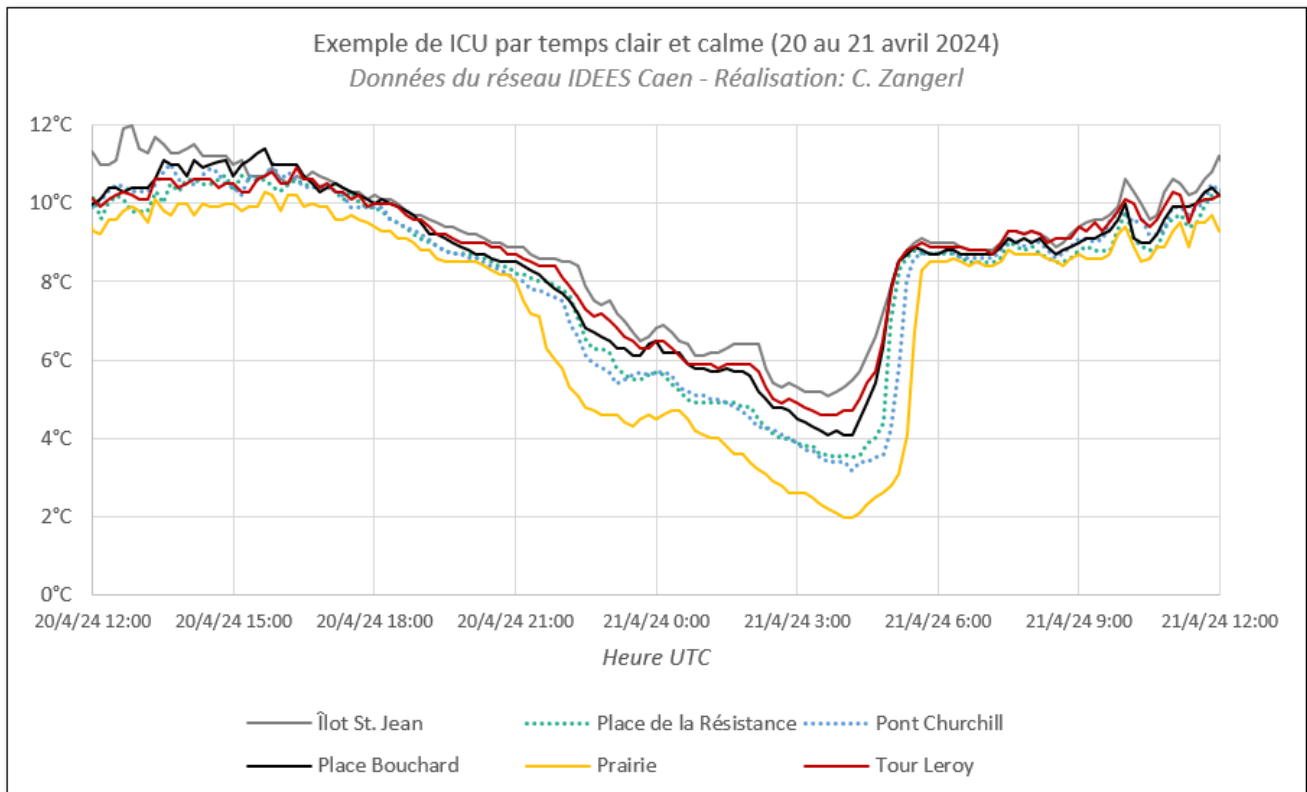


Figure 86: Graphique représentant les températures observées à la Prairie et aux 5 stations du centre-ville du 20 au 21 avril 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Si l'on compare les températures à la Prairie et avec les 5 stations situées dans le centre-ville, on observe globalement trois ensembles qui se dégagent.

Tout d'abord, les stations minérales du cœur de ville qui sont la place Boucard, la tour Leroy et l'îlot St. Jean, qui est l'îlot de bâtiment mentionné juste avant. Ces trois stations sont celles avec les températures les plus élevées, à noter que l'îlot semble se réchauffer plus fort que les autres en journée et se rafraichir le moins durant la nuit. Ceci témoigne d'un effet microclimatique certainement dû au confinement de l'espace, qui empêche une bonne aération et ainsi le brassage de l'air en plus de la multiple réflexion des rayons solaires incidents sur les parois des immeubles.

Puis, la Place de la Résistance et le Pont Churchill semblent suivre la même dynamique thermique que le centre-ville, avec néanmoins des températures légèrement inférieures à celle des stations minérales. Elles restent plus élevées que les températures observées à la Prairie, où l'on observe donc les températures les plus fraîches du centre-ville.

Les cinq prochaines figures montrent les températures ainsi que les écarts de température par rapport à la Prairie pour toutes les stations météorologiques situées à Caen durant la nuit du 20 au 21 avril. Cette analyse détaillée de l'ICU permettra de saisir toute la complexité de l'ICU induite par le déplacement des masses d'air ainsi que de donner des premières indications concernant le rôle des espaces verts sur les températures.

La figure 87 représente la situation à **2h UTC** (4h locale). Les trois stations aux écarts les plus importants identifiées auparavant grâce au graphique (figure 86) se situent au cœur du centre-ville. Les stations de la place de la Résistance et du Pont Churchill sont légèrement plus fraîches. La place Foch semble profiter de l'entrée de l'air frais via la Prairie apporté par le vent du sud-ouest. Il est possible que cet air entre dans le quartier St. Jean par les rues situées dans le prolongement de la place Foch ainsi que par l'axe de l'Orne, pouvant alors expliquer les écarts plus faibles dans ces espaces.

En s'éloignant du centre-ville, les températures sont globalement très proches de celles de la place de la Résistance, indiquant donc l'existence d'un ICU moyen sur une grande partie de la ville. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les deux cimetières dormants (petits espaces verts boisés) ainsi que le Campus 1 (grand espace vert ouvert), ne sont pas des espaces particulièrement plus frais que le reste de la ville, à l'inverse du Jardin des Plantes (espace vert, topographie en creux) et de la rue du Québec (espace vert hors agglo, topographie en creux). Ces deux espaces verts sortent du lot en présentant des températures moins élevées que sur la Prairie.

A 4h du matin (UTC), les températures arrivent au niveau le plus bas de la nuit. Comme pour la figure 87 montrant la situation à 2h, les mêmes ensembles se dégagent avec tout de même quelques changements (figure 88).

Alors que les trois stations du cœur de la ville continuent à montrer des écarts compris entre 2,1°C et 3,3°C par rapport à la Prairie, les températures au cimetière St. Pierre n'ont diminué que de 0,5°C, faisant de lui un îlot de chaleur au même titre que la Tour Leroy. Le cimetière St. Jean quant à lui, ne présente qu'un écart de 1,6°C avec la Prairie, ce qui mène à s'interroger sur la raison de ces dynamiques différentes. On peut également noter que la Prairie et la rue du Québec se sont rafraîchies davantage que le Jardin des Plantes. Concernant les stations de la rive droite ainsi que celles situées dans le quartier St. Jean, les écarts de températures sont globalement les mêmes qu'à 2h, avec une diminution de la température de l'ordre de 1°C – 1,5°C entre 2h et 4h.

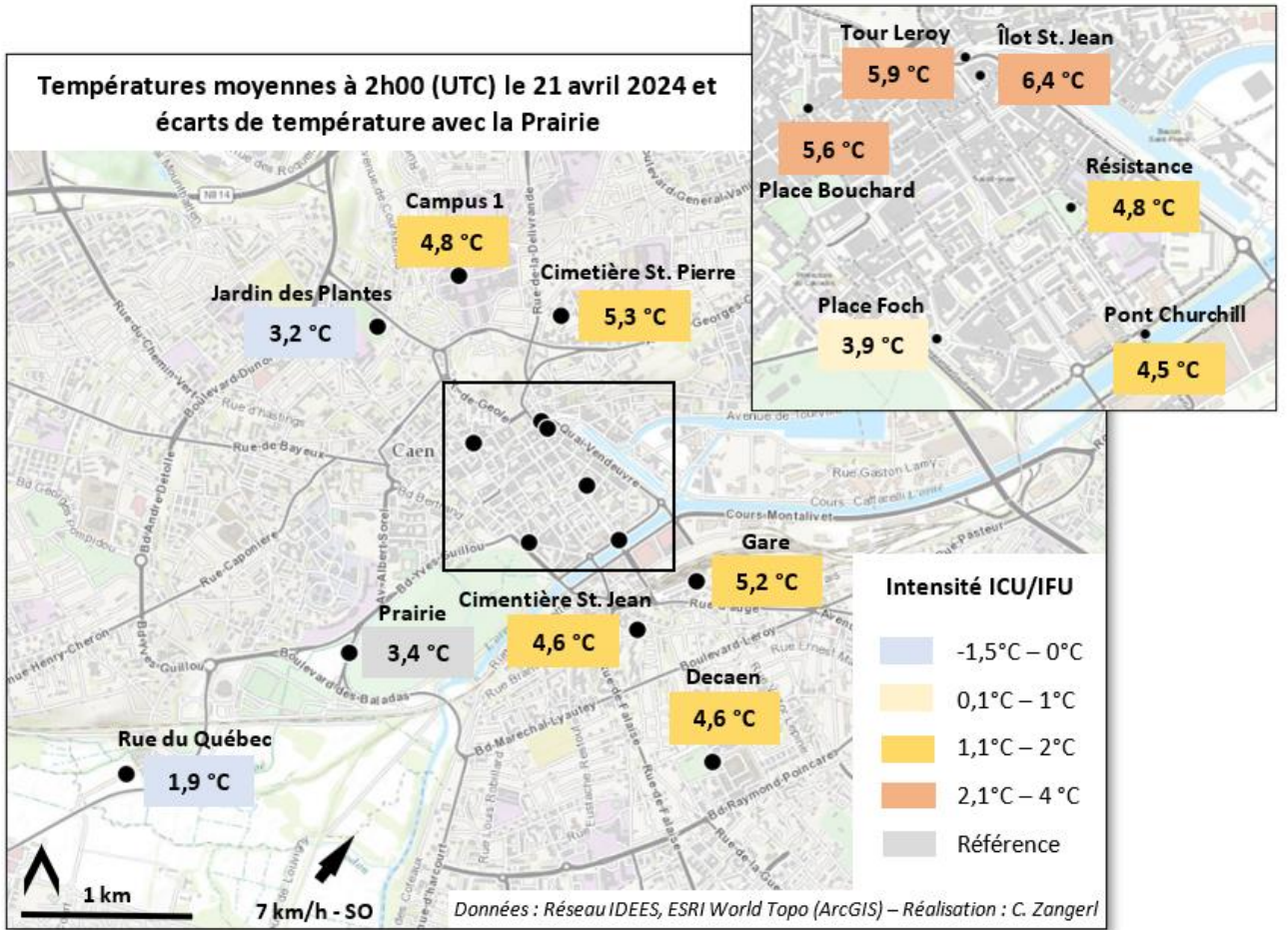


Figure 87: Carte indiquant les températures et les écarts à la Prairie à 2h UTC le 21 avril 2024
Réalisation : C. Zangerl

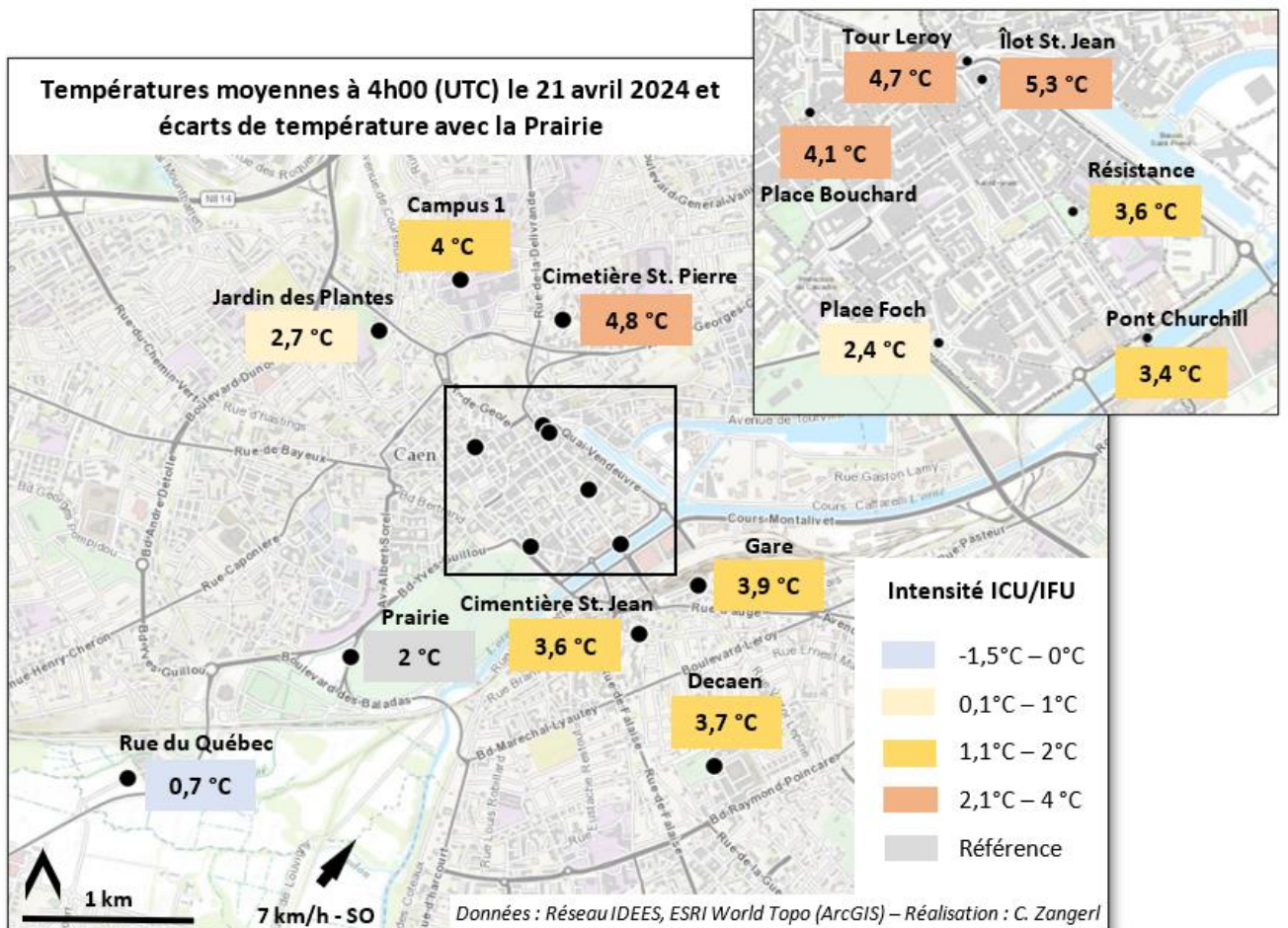


Figure 88: Carte indiquant les températures et les écarts à la Prairie à 4h UTC le 21 avril 2024
Réalisation : C. Zangerl

A l'approche du lever du soleil, à **4h50 UTC** (figure 89), l'observation de l'évolution des températures entre 4h et 4h50 permet de constater, en plus des écarts entre les différentes stations et la Prairie, des différences en termes de dynamiques de réchauffement. Ces écarts sont représentés par les valeurs écrites en petit sous la température relevée à chaque station (ex. +1,5°C).

Les premières stations concernées par l'augmentation des températures sont celles situées sur la rive gauche de l'Orne, affichant alors des écarts assez importants avec la Prairie (+ 4°C) et un réchauffement rapide d'environ 2°C en 50 minutes. Il s'agit plus particulièrement des trois stations du centre-ville (place Bouchard, Tour Leroy et îlot St. Jean) ainsi que de celles du cimetière St. Pierre et du Campus 1. Le Jardin des Plantes reste le petit espace vert intra-urbain le plus frais, affichant une température de 3,7°C et une augmentation de +1°C par rapport à 4h.

La place de la Résistance, le pont Churchill et la place Foch semblent continuer à profiter de l'air frais provenant du sud-ouest et leur température n'a augmenté que peu voire très peu entre 4h et 4h50. Sur la rive droite, les températures ont augmenté moins fort que sur la rive gauche. Le cimetière St. Jean ne s'est alors réchauffé que de 0,5°C en 50 minutes, contre 1,9°C au cimetière St. Pierre.

A 5h30 UTC, les lieux jusqu'ici restés assez frais se sont beaucoup réchauffés en l'espace de quarante minutes, donc entre 4h50 et 5h30 (figure 90). Alors que l'augmentation des températures au centre-ville, au Campus 1 et au cimetière St. Pierre est moins importante du fait de leur réchauffement sur l'heure précédente, les stations situées sur la rive droite ainsi que les stations du quartier St. Jean montrent une augmentation des températures assez remarquable.

Le changement de dynamique brusque observé à la place Foch, à la place de la Résistance et au pont Churchill pourrait s'expliquer par le changement de direction du vent qui s'opère à ce moment-là. Alors qu'il provenait du sud-ouest jusqu'ici, le vent a tourné au nord, faisant déborder la chaleur du centre-ville vers le sud et coupant ainsi la possible connexion entre la Prairie et l'espace urbain. Cet effet de débordement pourrait également expliquer l'augmentation rapide des températures à la Prairie par rapport à la rue du Québec, qui reste bien plus fraîche.

Avec l'arrivée du vent du nord, l'effet d'ICU s'efface progressivement jusqu'à disparaître totalement à **6h UTC** (8h locale) (figure 91), notamment à cause de l'arrivée de nuages couvrant le ciel puis de précipitations pluvieuses vers 9h locale.

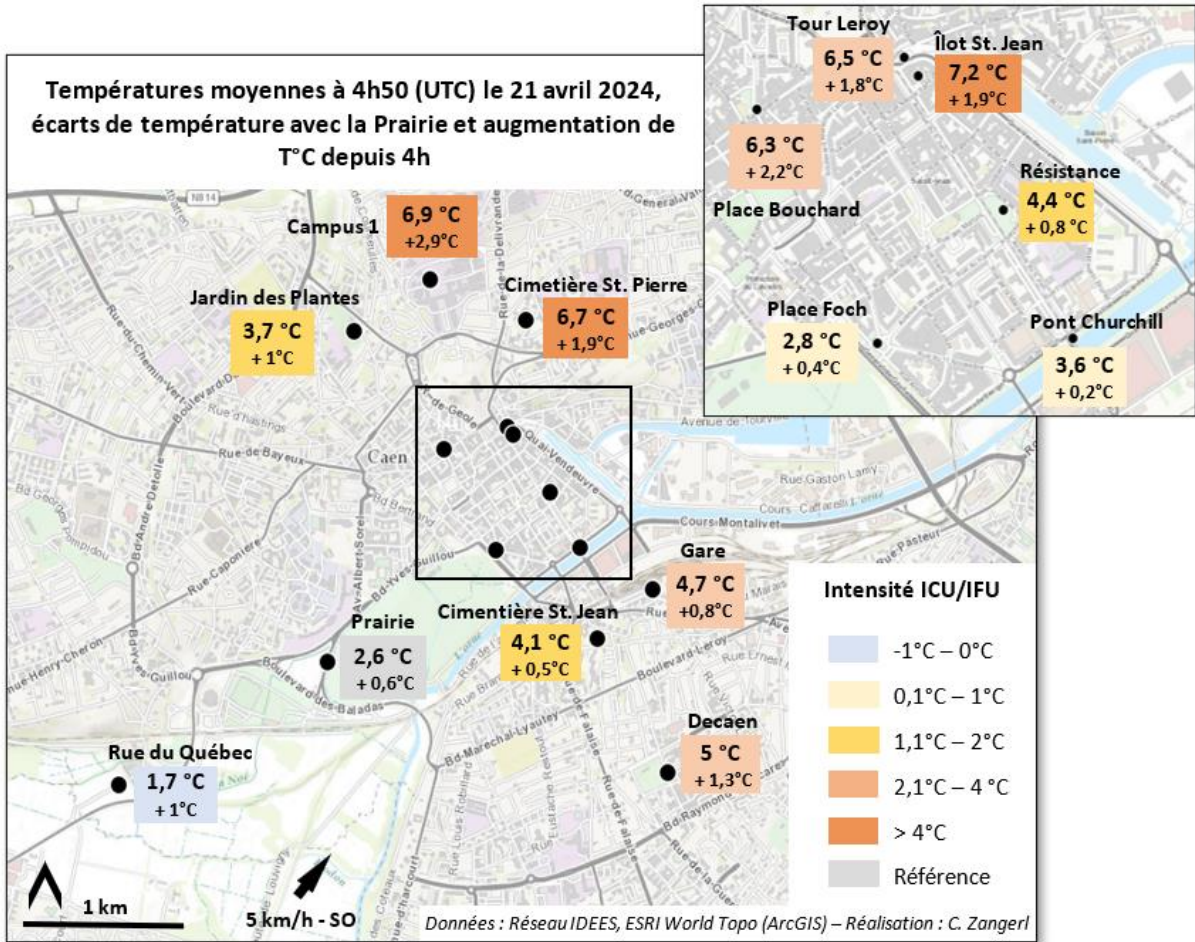


Figure 89: Carte indiquant les températures, les écarts à la Prairie et l'évolution de la température entre 4h et 4h50 UTC le 21 avril 2024 - Réalisation : C. Zangerl

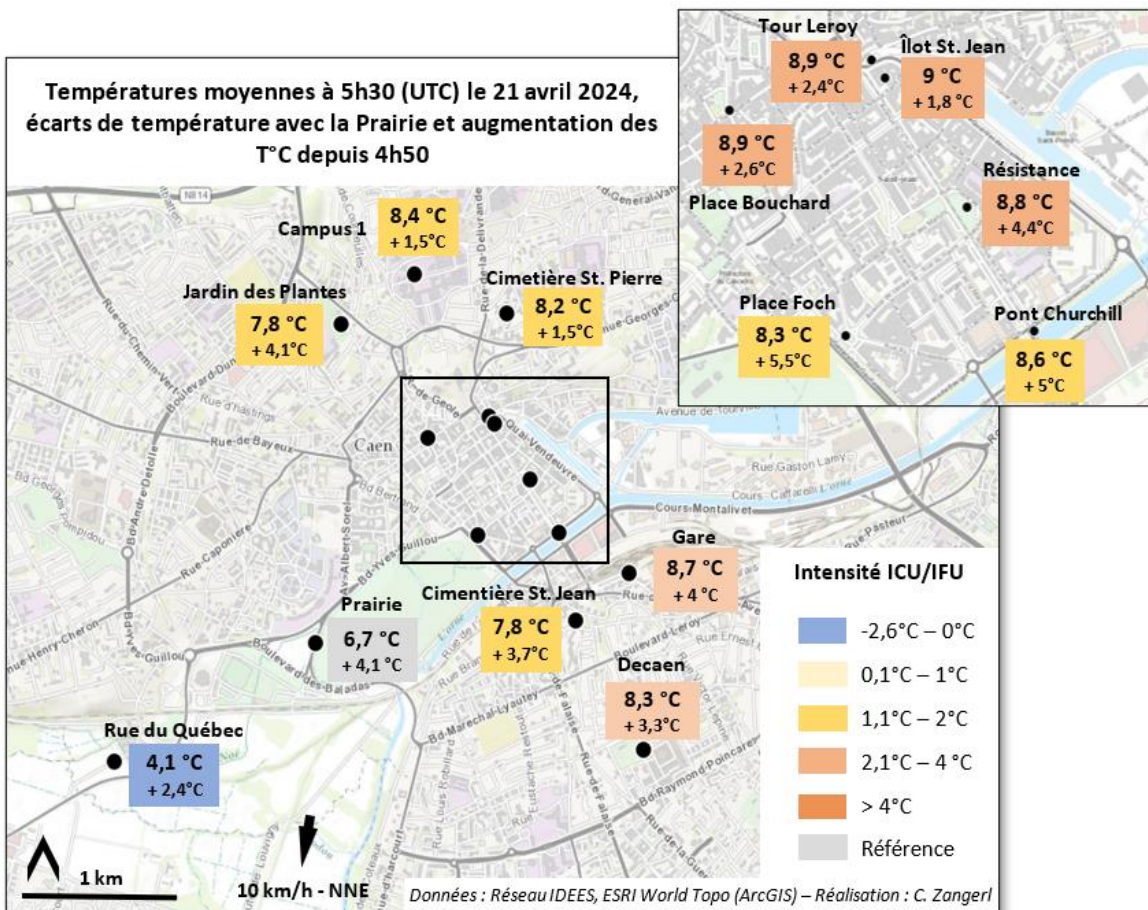


Figure 90: Carte indiquant les températures, les écarts à la Prairie et l'évolution de la température entre 4h50 et 5h30 UTC le 21 avril 2024 - Réalisation : C. Zangerl

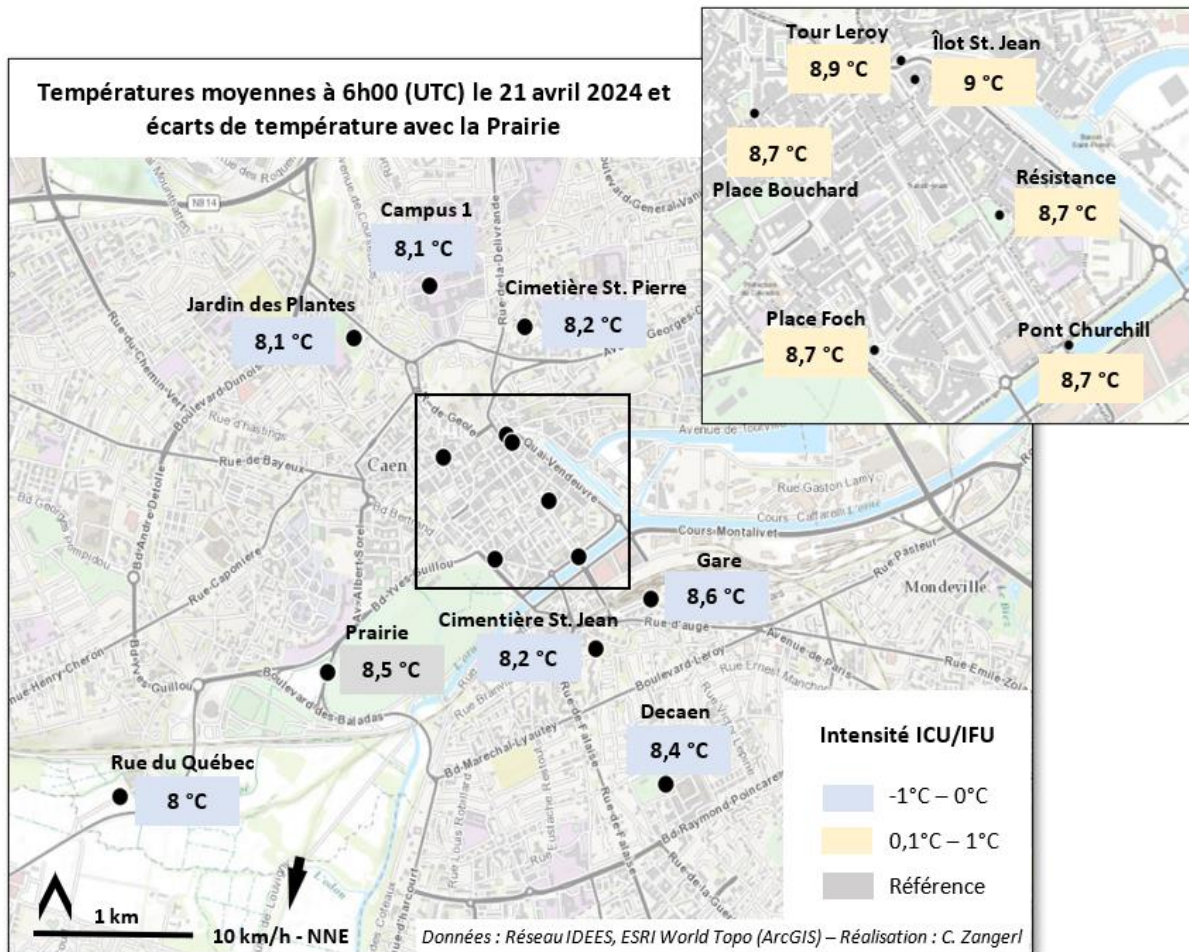


Figure 91: Carte indiquant les températures et les écarts à la Prairie à 06h UTC le 21 avril 2024
Réalisation : C. Zangerl

Grâce à cet exemple du mois d'avril 2024, plus récent que celui du mois de juillet 2022, on peut clairement confirmer l'influence de la direction du vent non seulement sur la place Foch mais également sur le reste de la ville, notamment au lever du soleil, comme cela a été le cas au matin du 21 avril 2024. On observe également des différences en termes de dynamique de réchauffement au lever du jour entre les différentes stations selon leur emplacement dans la ville et l'intensité et la direction du vent. De plus, le nombre plus important de stations météorologiques dans la ville permet d'affirmer que l'ICU ne se concentre pas uniquement sur le centre, mais est généralisé pour toute la ville de part et d'autre de l'Orne, touchant également des quartiers plus résidentiels et moins denses que le centre ancien.

Concernant la question des espaces verts, on observe des premiers points intéressants à analyser de plus près, notamment en ce qui concerne les cimetières dormants qui ne semblent a priori pas constituer de réels îlots de fraîcheur durant la nuit ou encore la particularité du Jardin des Plantes et de la rue du Québec, bien plus frais que le centre-ville durant la nuit.

2.4) Conclusion et discussion des résultats concernant les ICU

Grâce aux données récoltées entre avril 2022 et aujourd'hui, l'existence d'un îlot de chaleur urbain caennais a pu être clairement démontré. De manière générale, les espaces urbains sont effectivement plus chauds que la campagne environnante, qui est pour l'instant représentée par la station de la Prairie. Alors que l'écart moyen sur l'année est de l'ordre de 1°C, ces écarts peuvent monter jusqu'à 6°C lors de conditions météorologiques favorables aux ICU, augmentant alors les risques sanitaires liés au stress thermique pour les habitants de l'agglomération, même dans les quartiers résidentiels moins denses et moins minéralisés que le centre-ville.

Bien que la situation du 20 au 21 avril 2024 soit propre à une certaine configuration météorologique et donc pas entièrement généralisable, les observations qu'elle a permis de faire montrent bien la variabilité de l'extension spatiale et de l'intensité de l'ICU à l'intérieur de l'agglomération caennaise, notamment selon la direction du vent et l'exposition au soleil. Ainsi, lorsque le vent tourne au sud-ouest, ce qui est régulièrement le cas à la tombée de la nuit, on peut observer une entrée d'air frais via la Prairie vers la place Foch avec possiblement une influence visible jusqu'à la place de la Résistance. Néanmoins, lorsque le vent tourne au nord au lever du soleil, la chaleur de la ville peut déborder vers la Prairie, effaçant alors tout effet d'ICU si l'on se base sur la Prairie comme référence campagne.

Finalement, alors que les stations situées sur la rive droite de l'Orne (Decaen et Gare) affichent une dynamique qui suit globalement les autres espaces urbains, on observe des différences importantes entre les différents espaces verts. La Prairie, la rue du Québec et le Jardin des Plantes semblent être des espaces marqués par la fraîcheur, alors que le Campus 1 et les deux cimetières dormants affichent des températures qui se rapprochent beaucoup des espaces minéraux. Ce constat nous mène alors à s'interroger plus précisément sur le fonctionnement thermique des différents espaces verts de l'agglomération, ce qui constituera le sujet du chapitre suivant.

Avant de passer à l'analyse des espaces verts, il semble important de préciser que la question de la station de référence campagne, qui pour l'instant est celle de la Prairie, peut être discutée. En sachant que pour l'étude des ICU, on calcule des écarts de température entre deux points, le choix de la référence « campagne » est particulièrement important puisqu'elle peut changer considérablement les écarts observés. Comme mentionné lors de la présentation du réseau de stations météorologiques, la station située à Cambes-en-Plaines pourrait paraître plus adéquate pour l'étude des ICU, sachant qu'elle se situe à l'extérieur de l'agglomération. Néanmoins, la station de Cambes-en-Plaine ne peut fournir des données satisfaisantes à cause de l'influence de la brise de mer diminuant localement les températures par rapport aux espaces ruraux situés plus vers l'intérieur des terres.

La rue du Québec aurait également pu être utilisée comme référence campagne puisqu'elle se situe plus loin du centre-ville, entre le cœur de l'agglomération et la commune de Louvigny. Néanmoins, la topographie en creux semble provoquer l'accumulation de l'air frais et donc être à l'origine d'un possible effet trou à froid, ce qui ne serait également pas satisfaisant pour représenter correctement les températures hors contexte urbain. Finalement, il aurait pu être envisagé d'utiliser les données récoltées par la station Météo France située à Carpiquet, à l'ouest de l'agglomération, mais pour une raison de comparabilité des données, il est préférable d'utiliser une station du réseau IDEES qui présente les mêmes conditions de mesure que les autres stations.

Il sera donc nécessaire, lorsque nous aurons plus de stations météorologiques à disposition, de tester plusieurs emplacements hors contexte urbain, notamment vers le sud de l'agglomération, afin de tenter de trouver un emplacement correspondant le plus possible à la réalité du climat « rural », voire d'utiliser plusieurs stations de référence campagne. En effet, les alentours de Caen peuvent représenter des différences en termes de climat entre les espaces situés au nord et donc facilement sous l'influence de la mer, et les espaces ruraux situés au sud, à l'est ou à l'ouest. Ainsi, il n'y aurait pas un climat rural, mais plusieurs climats ruraux, rendant le choix de la station référence d'autant plus difficile.

3) Résultats de l'étude des IFU

Après avoir présenté la situation générale concernant les ICU de l'agglomération caennaise, ce chapitre se concentrera sur l'analyse des espaces verts dans l'objectif d'étudier leurs dynamiques thermiques et donc d'identifier l'existence ou non d'îlots de fraîcheur urbains à Caen. Après une analyse générale des données moyennes pour chaque espace vert doté d'une station météorologique permanente, plusieurs exemples en détail seront présentés dans un deuxième temps.

3.1) Analyse générale des différents espaces verts

Dans cette sous-partie, il sera question d'analyser l'existence et la variabilité temporelle des IFU à l'aide des écarts moyens de températures entre la station de référence (Tour Leroy) et les différentes stations situées dans les espaces verts calculés à partir des données réseau IDEES. Ces moyennes de températures permettent alors d'identifier une tendance générale des dynamiques thermiques des différents espaces, mais cachent des écarts importants lors des conditions météorologiques favorables.

3.1.1) Jardin des Plantes

Pour rappel, le Jardin des Plantes est un parc urbain d'une superficie d'environ 3 ha situé au nord-ouest du centre-ville dans une dépression topographique (page 63). Ce parc est constitué d'une végétation variée comprenant des parties plus boisées et des parties à végétation basse, où se situe la station météorologique du réseau IDEES (page 88).

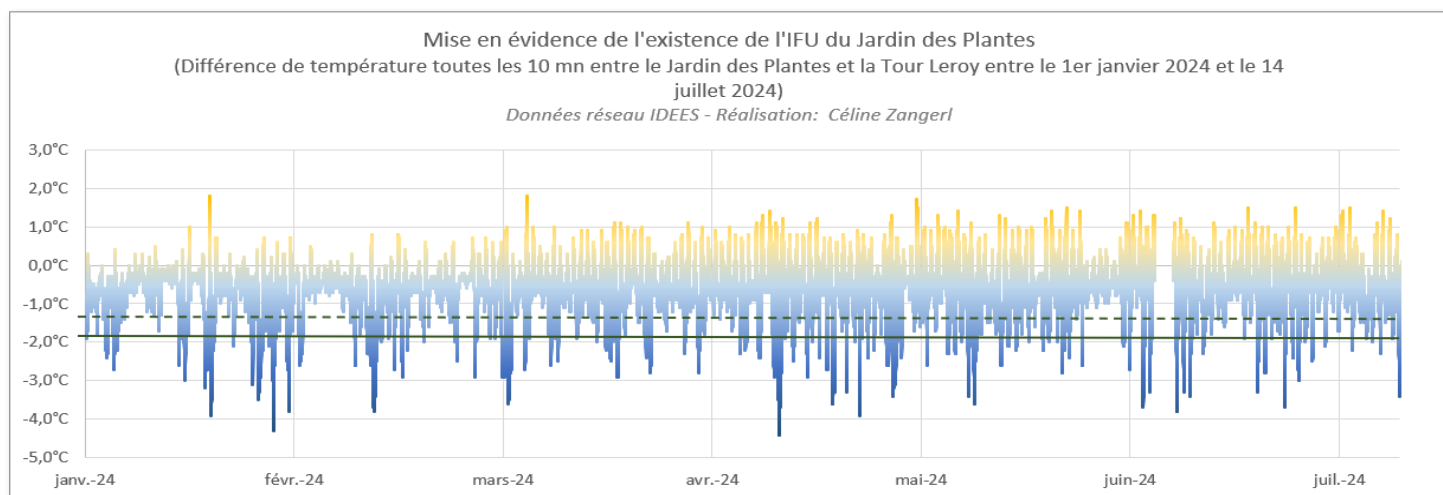


Figure 92: Graphique présentant les différences de température entre le Jardin des Plantes et la Tour Leroy du 1er janvier 2024 au 14 juillet 2024 – Réalisation : C. Zangerl

Ecart moyen	-0,7 °C
Ecart maximal	+ 1,8 °C
Ecart minimal	-4,4 °C
Part écarts < 0°C	82,9 %
Part jours t min <= -1,5 °C	77,8 %
Part jours t min <= -2 °C	56,2 %

Figure 93: Tableau statistique du Jardin des Plantes - Réalisation : C. Zangerl

Au regard du graphique présentant les écarts entre le Jardin des Plantes et la Tour Leroy entre le 1^{er} janvier et le 14 juillet 2024 et du tableau montrant des valeurs statistiques (figures 92 et 93), on voit que la grande majorité des écarts observés sont négatifs, ce qui prouve qu'il fait généralement plus frais au Jardin des Plantes que dans le centre-ville.

En fixant un seuil à -2°C par rapport à la Tour Leroy pour considérer un espace vert comme un îlot de fraîcheur, on peut voir que ce seuil est régulièrement dépassé au Jardin des Plantes, atteignant parfois des écarts de plus de 4°C. Les écarts négatifs s'observent sur toute la période du 1^{er} janvier au 14 juillet, ce qui veut dire qu'un îlot de fraîcheur dépassant les -2°C de différence entre le Jardin des Plantes et la Tour Leroy peut se mettre en place à toute saison. Ainsi, sur plus de la moitié des journées (56%) entre le 1^{er} janvier et le 14 juillet 2024, l'écart négatif observé dépasse les 2°C, ce qui montre que l'air au Jardin des Plantes se rafraîchit généralement bien plus qu'au centre-ville.

Néanmoins, les écarts positifs qui démontrent une situation où il fait plus chaud au Jardin des Plantes qu'à la Tour Leroy semblent bien plus élevés à partir du mois de mars que pendant le cœur de l'hiver, ce qui est également visible sur la figure 94 montrant les écarts maximaux et minimaux par jours. Cela pourrait être dû à la présence de feuillage sur les arbres et arbustes présents au Jardin des Plantes pendant la période estivale, pouvant alors être à l'origine d'une surchauffe de l'air provoquée par le blocage de la chaleur au sol.

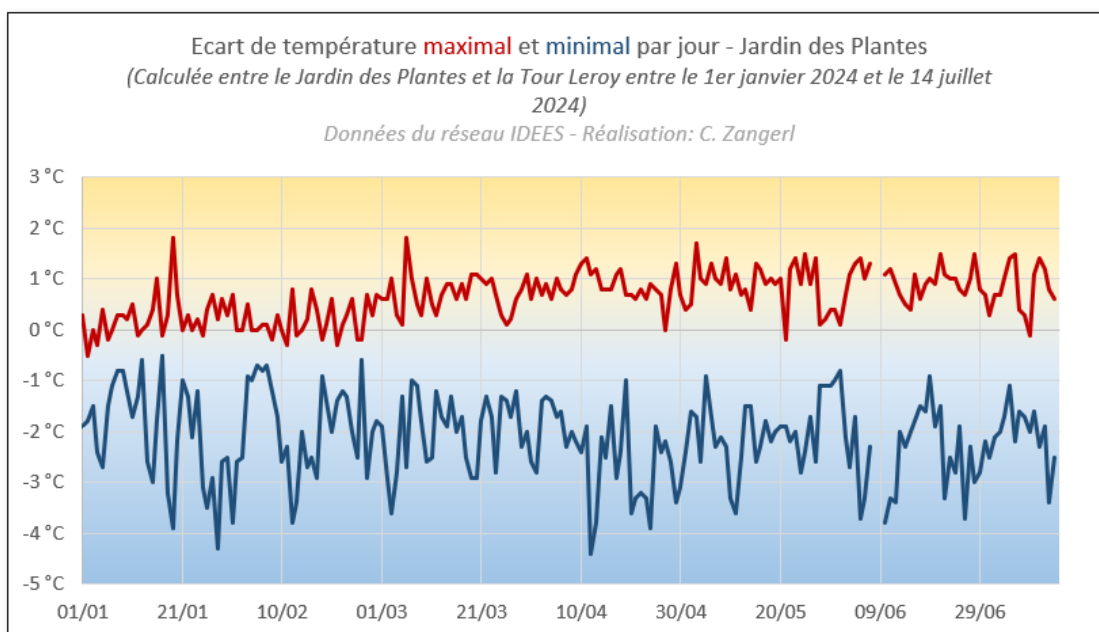


Figure 94: Graphique montrant l'écart de température maximal et minimal par jour entre le Jardin des Plantes et la Tour Leroy du 1^{er} janvier au 14 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl

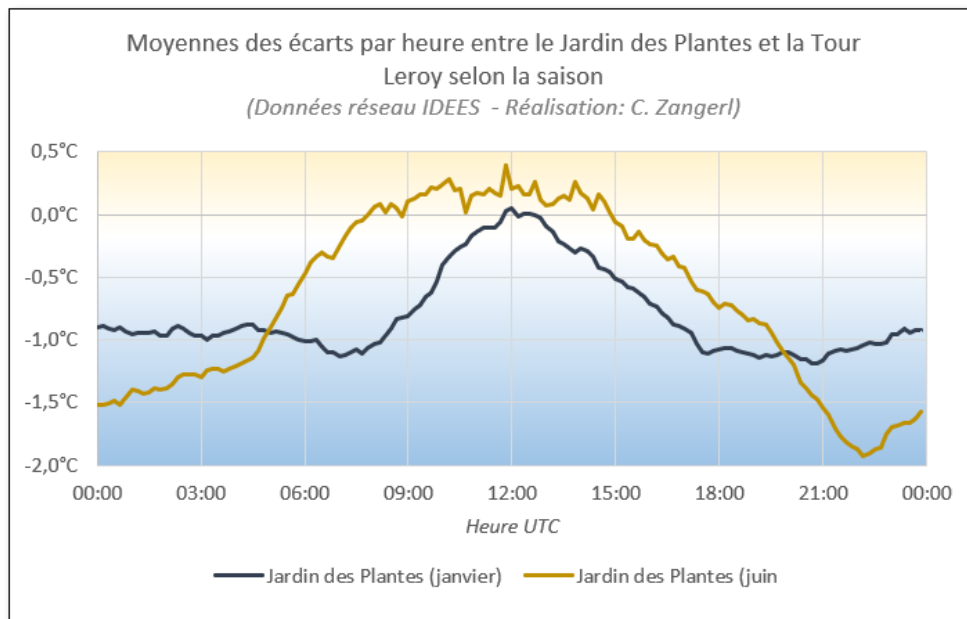


Figure 95: Graphique montrant l'écart moyen par heure pour le mois de janvier et de juin 2024 au Jardin des Plantes - Réalisation : C. Zangerl

Le graphique ci-dessus (figure 95) montre la moyenne des écarts par heure pendant le mois de janvier et le mois de juin 2024, ce qui permet d'apprécier la saisonnalité de l'IFU.

Premièrement, les écarts suivent un rythme journalier semblable à celui des ICU, avec des écarts très faibles voire positifs par rapport au centre-ville en journée et des écarts négatifs plus marqués pendant la nuit. Ce cycle est rythmé par le lever et le coucher du soleil, marquant alors la diminution ou l'augmentation des écarts à différentes heures selon la saison.

Deuxièmement, l'amplitude des écarts est plus importante en été qu'en hiver, c'est-à-dire que la différence entre les écarts en journée et pendant la nuit est plus élevée en période estivale. La moyenne des écarts à midi ne dépasse pas pour ainsi dire les 0°C en hiver, alors qu'en été elle approche les + 0,5°C. A l'inverse, on observe le creusement des écarts au coucher du soleil en été avec des écarts moyens pouvant atteindre - 2°C alors qu'en hiver, les écarts nocturnes restent aux alentours des -1°C. En résumé, cela signifie que la période estivale est davantage propice à la formation d'IFU nocturnes que l'hiver, mais que le Jardin des Plantes peut s'y avérer légèrement plus chaud que les espaces minéraux du centre-ville en journée. Ainsi, il ne semble pas constituer un point de fraîcheur en journée, mais peut néanmoins être perçu comme plus agréable à fréquenter par les habitants de la ville par l'effet d'ombrage apporté par la végétation.

3.1.2) Le cimetière St. Jean

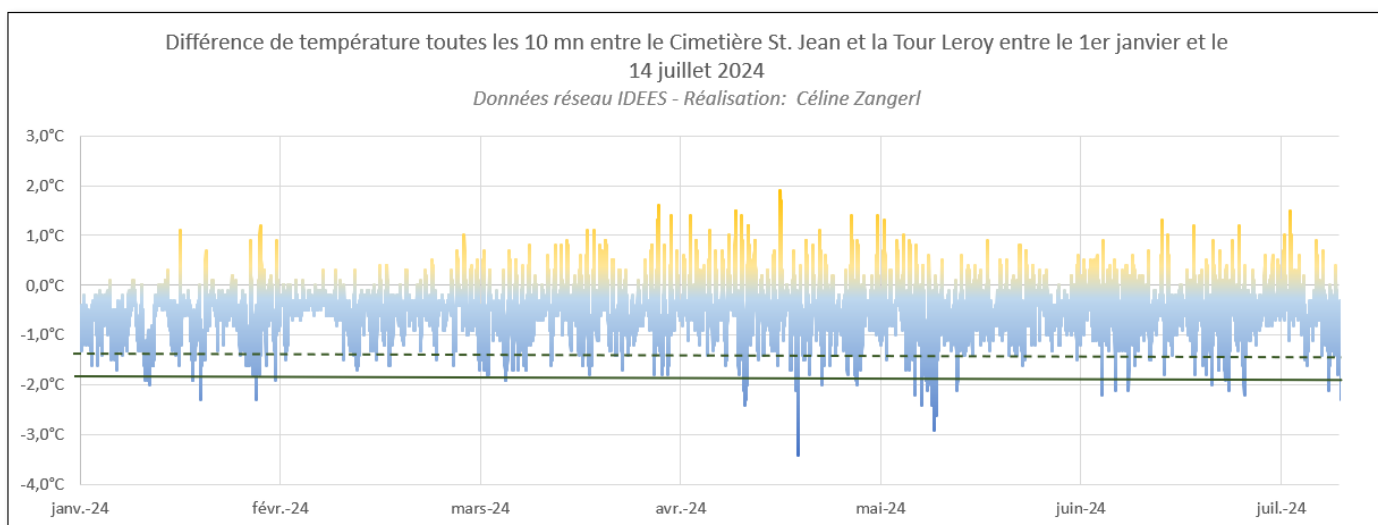


Figure 96: Graphique présentant les différences de température entre le cimetière St. Jean et la Tour Leroy du 1er janvier 2024 au 14 juillet 2024 – Réalisation : C. Zangerl

Ecart moyen	-0,5 °C
Ecart maximal	+ 1,9 °C
Ecart minimal	-3,4 °C
Part écarts < 0°C	89,6 %
Part jours t min ≤ -1,5 °C	44,9 %
Part jours t min ≤ -2 °C	11,2 %

Figure 97: Tableau statistique du cimetière St. Jean - Réalisation : C. Zangerl

Le cimetière St. Jean, comme expliqué auparavant, se distingue du Jardin des Plantes par sa taille, sa situation topographique et sa constitution végétale marquée par la présence d'une végétation arborée assez dense (pages 70 et 88). Ces différences se traduisent par des

dynamiques thermiques différentes de celles du Jardin des Plantes. Bien que 89% des écarts enregistrés dans cet espace vert soient négatifs, les jours où les écarts négatifs dépassent -2°C entre le cimetière et la Tour Leroy sont moins nombreux (11,2% contre 56,2% au JDP). Ainsi, le rafraîchissement de l'air y semble en général assez faible (figures 96 et 97).

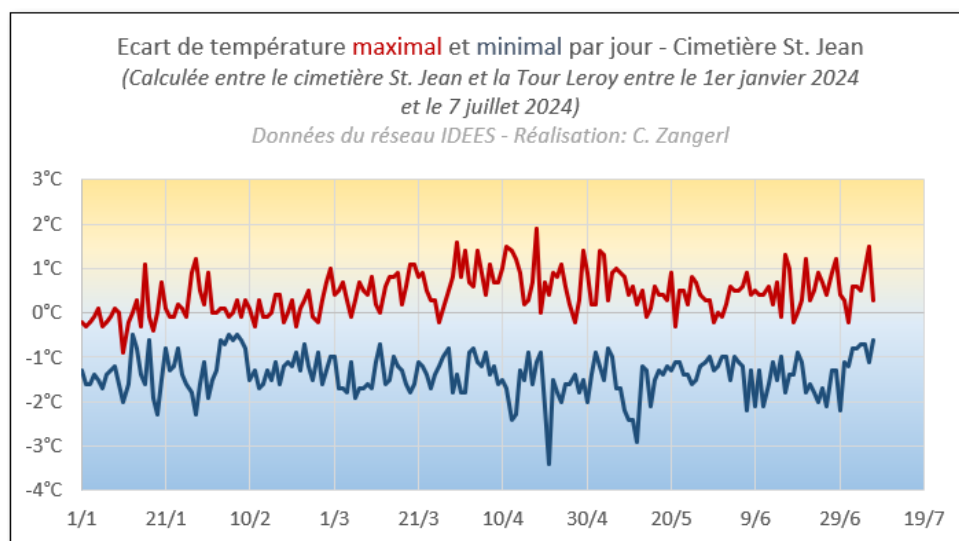


Figure 98: Graphique montrant l'écart de température maximal et minimal par jour entre le cimetière St. Jean et la Tour Leroy du 1er janvier au 14 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Tout comme au Jardin des Plantes, les écarts positifs, avec des températures plus élevées au cimetière St. Jean qu'à la Tour Leroy, sont plus fréquents durant la période estivale et particulièrement au printemps. Ces écarts positifs semblent également plus intenses à partir du mois de mars (figure 98).

Contrairement au Jardin des Plantes, les écarts de température entre le cimetière St. Jean et le centre-ville ne semblent pas réellement suivre une dynamique saisonnière. En effet, les écarts sont à peu de choses près les mêmes au mois de janvier qu'au mois de juin, comme on peut le constater grâce au graphique ci-dessous (figure 99). Les écarts moyens qui oscillent alors entre -1 °C et 0°C selon le moment de la journée, avec des écarts plus marqués la nuit et moins importants le jour, indiquent néanmoins un certain cycle journalier.

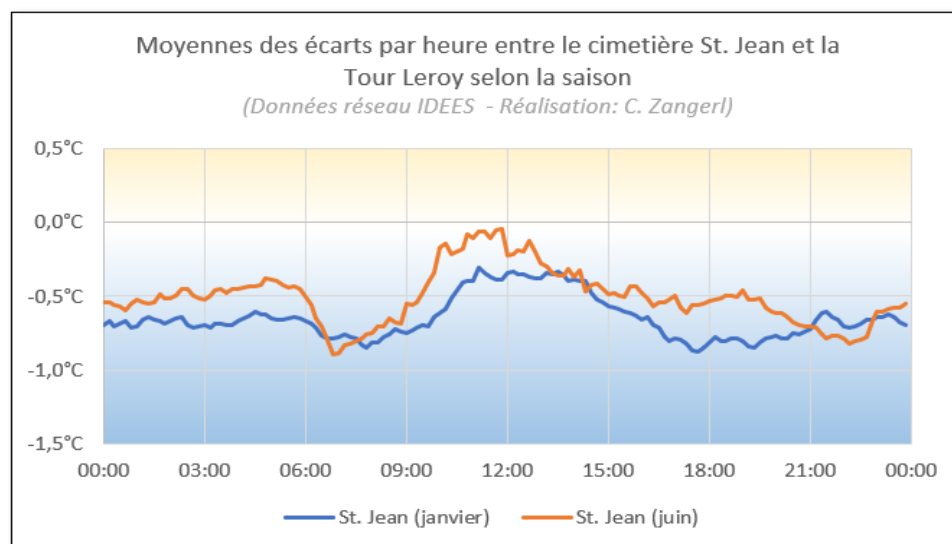


Figure 99: Graphique montrant l'écart moyen par heure pour le mois de janvier et de juin 2024 au cimetière St. Jean- Réalisation : C. Zangerl

Ces différences entre le Jardin des Plantes et le cimetière St. Jean peuvent s'expliquer de plusieurs manières. Premièrement, la végétation arborée est bien plus dense au cimetière St. Jean, ce qui peut bloquer le rayonnement terrestre lorsque le feuillage est bien établi et ainsi limiter le rafraîchissement de l'air une fois la nuit tombée. En journée, le feuillage limite le rayonnement solaire incident sans pour autant les bloquer complètement. L'air se réchauffe alors sous la canopée et y reste plus facilement à cause du brassage de l'air limité par la présence de la végétation. Ainsi, on observe une sorte de lissage des écarts au cimetière St. Jean par rapport au Jardin des Plantes. De plus, le Jardin des Plantes est situé dans une dépression topographique, permettant l'accumulation d'air frais durant la nuit, alors que le cimetière St. Jean se situe en haut du plateau sud sur une surface plane. Néanmoins, on aurait pu s'attendre à des dynamiques thermiques différentes en été et en hiver puisque le feuillage est absent en période hivernale.

3.1.3) Le cimetière St. Pierre

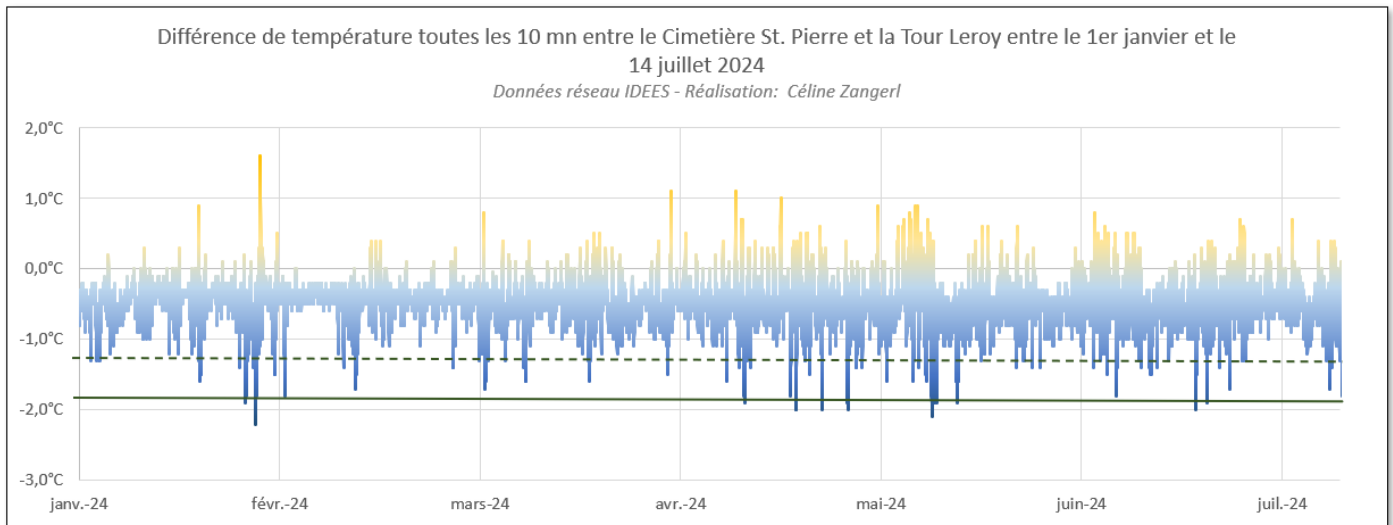


Figure 100: Graphique présentant les différences de température entre le cimetière St. Pierre et la Tour Leroy du 1er janvier 2024 au 14 juillet 2024 – Réalisation : C. Zangerl

Le cimetière St. Pierre possède des caractéristiques similaires à celles du cimetière St. Jean, avec une végétation arborée très développée et donc des houppiers qui protègent la très grande majorité de la surface des rayonnements solaires (pages 70 et 88). Le rôle de cette végétation arborée sur les températures y est d'ailleurs encore plus clair qu'au cimetière St. Jean. 94,4% des relevés montrent une température inférieure à celle de la Tour Leroy.

Ecart moyen	-0,5 °C
Ecart maximal	+ 1,6 °C
Ecart minimal	-2,2 °C
Part écarts <0	94,4 %
Part jours t min <= -1,5 °C	15,3 %

Figure 101: Tableau statistique du cimetière St. Pierre - Réalisation : C. Zangerl

Cette part élevée d'écarts négatifs contraste néanmoins avec la part de jours très faible où l'écart négatif dépasse les -2°C, qui est de seulement 3,1% (figures 100 et 101). Le rafraîchissement de l'air semble alors y être

particulièrement limité par rapport aux deux autres espaces verts présentés auparavant.

Quand on compare les écarts maximaux et minimaux du cimetière St. Pierre avec ceux du Jardin des Plantes (figure 102), ainsi que les moyennes d'écarts par heure selon la saison (figure 103), les différences en termes de fonctionnements thermiques de ces deux espaces verts deviennent assez claires. L'amplitude des écarts est bien moins élevée au cimetière St. Pierre qu'au Jardin des Plantes, ce qui signifie que l'air s'y réchauffe moins en journée, mais qu'il se rafraîchit également moins la nuit. Ce constat est d'autant plus clair au regard de la figure 103, on peut voir que les écarts de températures sont en moyenne les mêmes de jour comme de nuit et se situent aux alentours de -0,5°C.

Ainsi, alors qu'au Jardin des Plantes les écarts suivent un certain rythme diurne, avec en moyenne des écarts légèrement positifs en journée et négatifs durant la nuit, ce cycle diurne ne semble pas réellement présent au cimetière St. Pierre. De plus, on n'observe pas de réelle différence entre le mois de janvier et le mois de juin au cimetière St. Pierre.

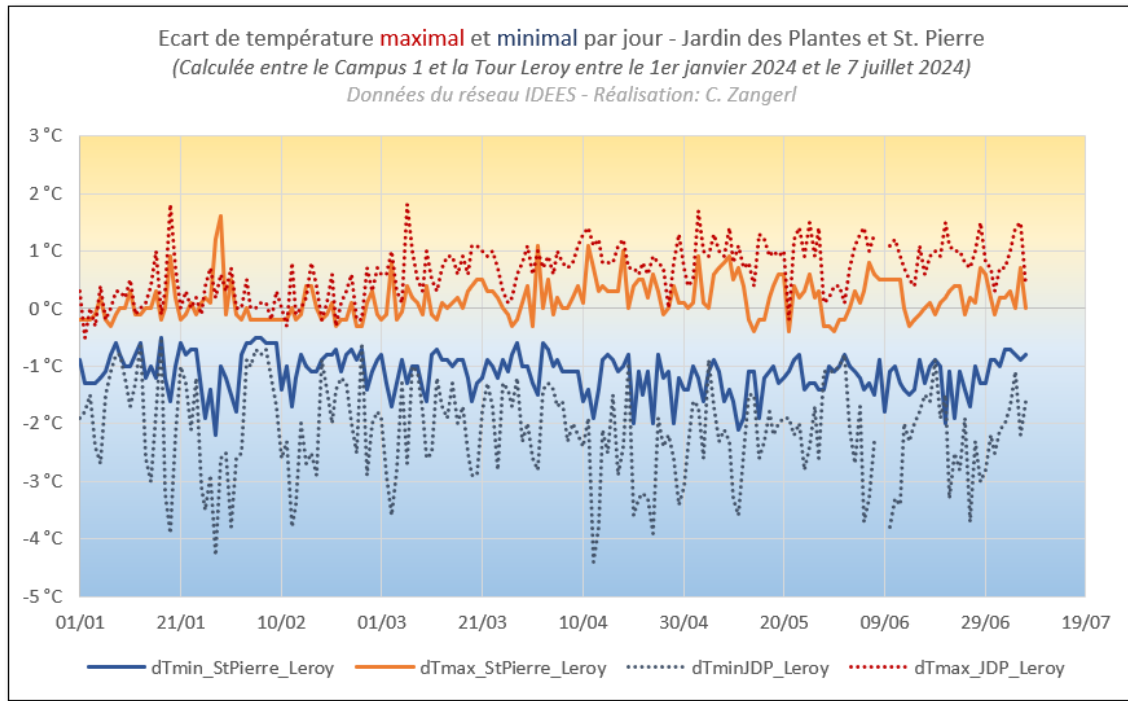


Figure 102: Graphique montrant l'écart de température maximal et minimal par jour entre le cimetière St. Jean, le Jardin des Plantes et la Tour Leroy du 1er janvier au 14 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl

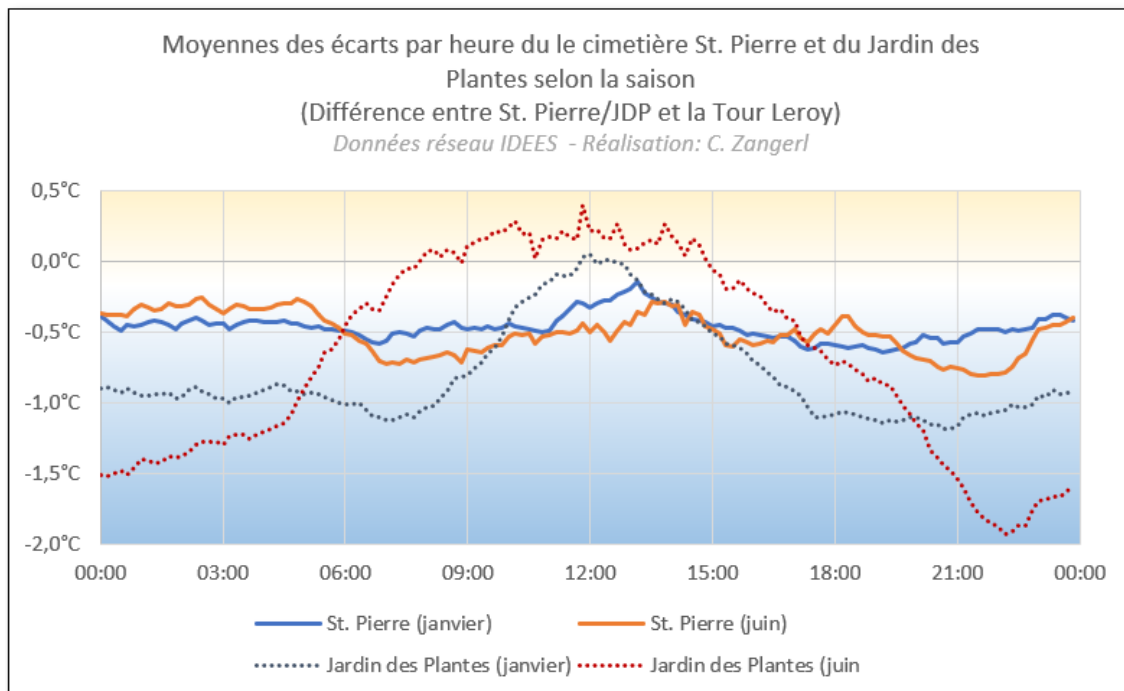


Figure 103: Graphique montrant l'écart moyen par heure pour le mois de janvier et de juin 2024 au cimetière St. Jean et au Jardin des Plantes - Réalisation : C. Zangerl

Les deux cimetières dormants semblent donc présenter le même type de fonctionnement thermique qui diffère de celui du Jardin des Plantes, avec des écarts en moyenne autour de $-0,5^{\circ}\text{C}$ par rapport au centre-ville et des variations diurnes et saisonnières très faibles. Le cimetière St. Pierre se situe sur le plateau nord et présente une topographie très plate. Cette topographie, couplée à une végétation arborée dense, semble donc ne pas être propice à la mise en place d'îlots de fraîcheur importants.

3.1.4) Le Campus 1

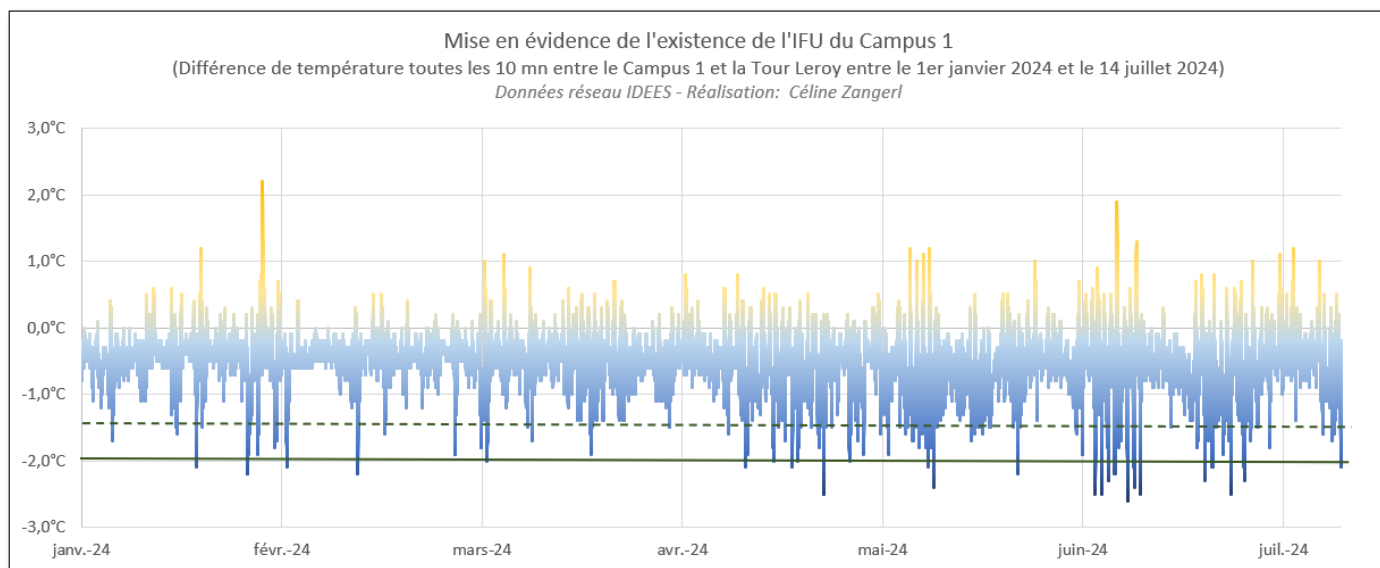


Figure 104: Graphique présentant les différences de température entre le campus 1 et la Tour Leroy du 1er janvier 2024 au 14 juillet 2024 – Réalisation : C. Zangerl

Le Campus 1 possède des caractéristiques assez différentes des trois premiers espaces verts. Alors que ces derniers sont des petits espaces verts assez confinés et marqués par une végétation arborée plus ou moins développée, le campus 1 est un espace vert assez vaste principalement constitué de végétation basse et de quelques arbres isolés (pages 69 et 89). Contrairement aux trois autres parcs, il n'est pas cloisonné par des murs, mais bien ouvert sur les quartiers aux alentours.

Ecart moyen	-0,5 °C
Ecart maximal	+ 2,2 °C
Ecart minimal	-2,6 °C
Part écarts <0	92,5 %
Part jours t min <= -1,5 °C	38,3 %
Part jours t min <= -2 °C	12,8 %

Figure 105: Tableau statistique du Campus 1 - Réalisation : C. Zangerl

Ainsi, la circulation de l'air y est plus aisée, ce qui implique à la fois que l'air frais peut potentiellement pénétrer l'espace urbain, mais également que l'air plus chaud provenant de l'espace urbain pourrait peut-être influencer les températures sur le campus 1.

La figure 104 et 105 indiquent que le Campus 1, tout comme les autres espaces verts analysés jusqu'ici, présente en moyenne des températures moins élevées que le centre-ville. Néanmoins, la part des journées où les écarts négatifs atteignent voire dépassent les -2°C de différence sont bien moins importants qu'au Jardin des Plantes et se rapprochent des valeurs du cimetière St. Jean (12,8% au Campus 1 contre 11,2% au cimetière St. Jean). Il est donc assez rare que le Campus 1 présente des températures bien inférieures à celles du centre-ville.

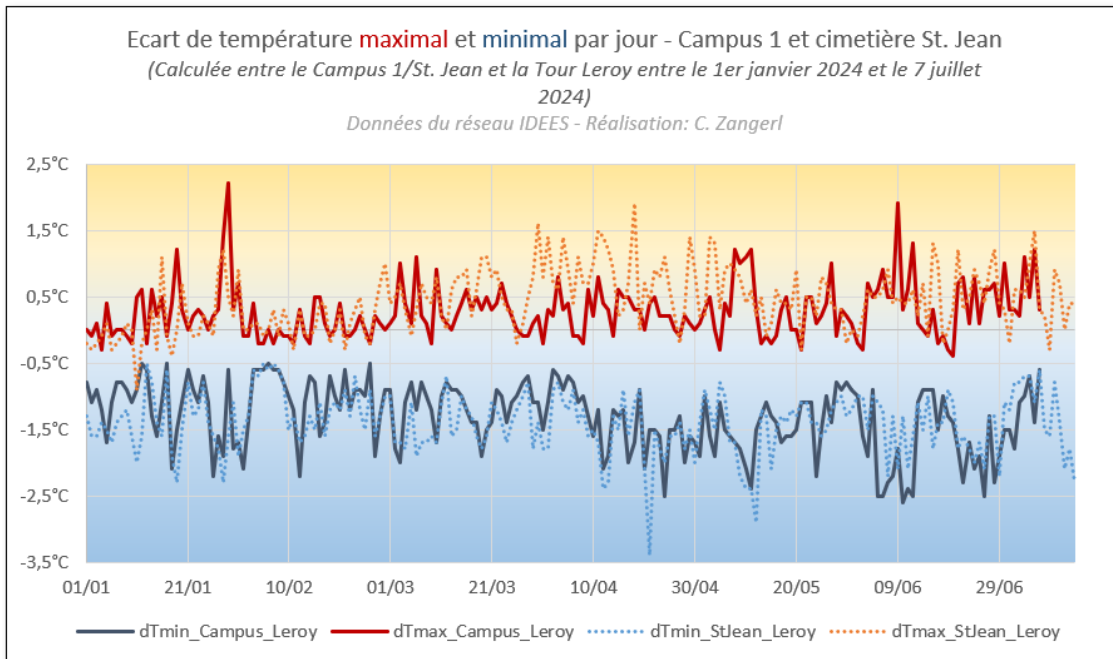


Figure 106: Graphique montrant l'écart de température maximal et minimal par jour entre le Campus 1, le cimetière St. Jean et la Tour Leroy du 1er janvier au 14 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Les écarts semblables entre ces deux espaces verts, bien que leurs caractéristiques en termes de taille, de topographie et de végétation soient assez différentes, peuvent s'observer sur le graphique ci-dessus (figure 106). En effet, mise à part le fait que le cimetière St. Jean montre des écarts positifs plus élevés à certains moments, les deux espaces verts semblent montrer des écarts au centre-ville assez similaires.

Les écarts moyens par heure et par saison (figure 107) permettent néanmoins de voir que les dynamiques thermiques ne sont pour autant pas les mêmes. Alors qu'en hiver, les dynamiques sont très similaires, avec des écarts négatifs légèrement plus importants au cimetière St. Jean, les dynamiques thermiques estivales semblent être bien différentes. Au cimetière St. Jean, les écarts négatifs les plus faibles sont observés vers 12h UTC (14h locale), ce qui semble assez logique puisque cela correspond au moment de la journée où il fait généralement le plus chaud. Au campus 1, les écarts les plus faibles sont observés vers 6h (UTC) et non au milieu de la journée. Au même moment, au cimetière St. Jean, on observe des écarts importants avec le centre-ville. En fin de nuit et en début de journée, ces deux espaces semblent donc avoir des dynamiques opposées. Au fur et à mesure de la journée, les écarts au campus 1 se creusent pour atteindre les valeurs les plus importantes vers 22h UTC (00h locale).

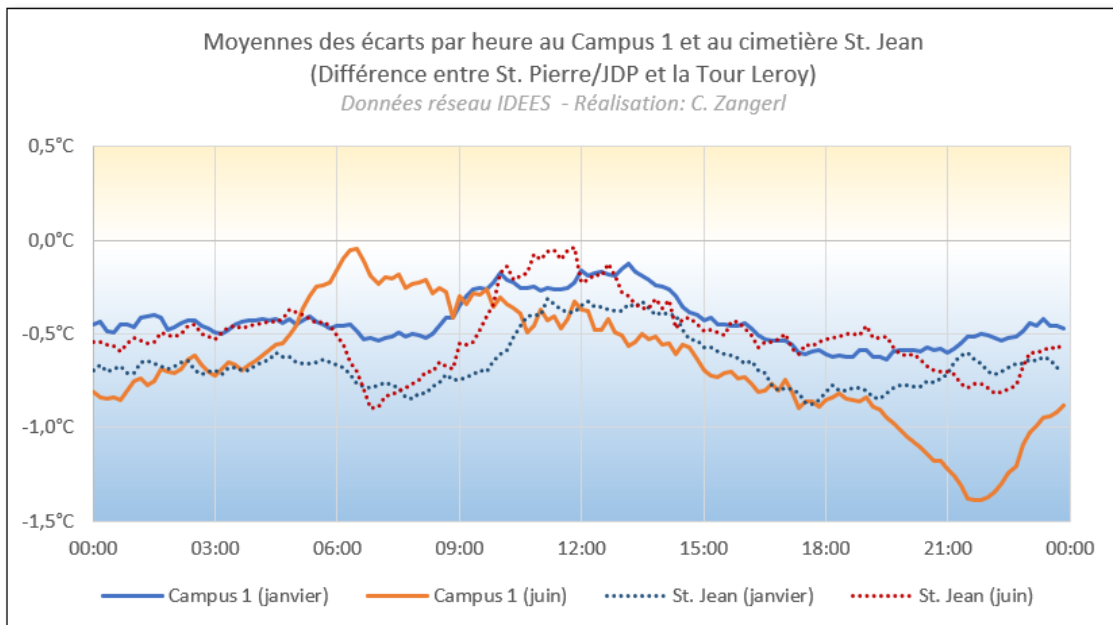


Figure 107: Graphique montrant l'écart moyen par heure pour le mois de janvier et de juin 2024 au Campus et au cimetière St. Jean - Réalisation : C. Zangerl

Ces différences en termes de dynamique thermique pourraient s'expliquer par plusieurs facteurs. D'une part, comme mentionné auparavant, l'ouverture du Campus 1 par rapport au reste de la ville, c'est-à-dire l'absence d'obstacles majeurs à la circulation de l'air, pourrait influencer les températures observées sur place. Selon la direction du vent, on pourrait alors mesurer l'effet de l'entrée d'air plus chaud depuis l'espace minéral vers le Campus 1 ou à l'inverse l'entrée d'air frais provenant du nord en journée, notamment sous l'effet de la brise de mer. Finalement, la position de la station météorologique proche des bâtiments pourrait également avoir un impact sur la température mesurée. En déplaçant la station plus vers le centre de l'espace vert, les données pourraient être plus représentatives de la réalité dans cet espace.

Finalement, au regard de la topographie en pente au Campus 1, il serait intéressant d'étudier de plus près les écoulements d'air dans cet espace vert afin de voir s'il existe des courants d'air s'écoulant du haut vers le bas du campus.

3.1.5) La Prairie

Après avoir analysé les tendances générales des petits espaces verts intra-urbains équipés d'une station météorologique, deux autres espaces verts méritent une attention particulière puisqu'ils constituent, par leur position dans la ville et leur grande superficie, de potentiels points d'entrée de l'air frais depuis la campagne vers la ville.

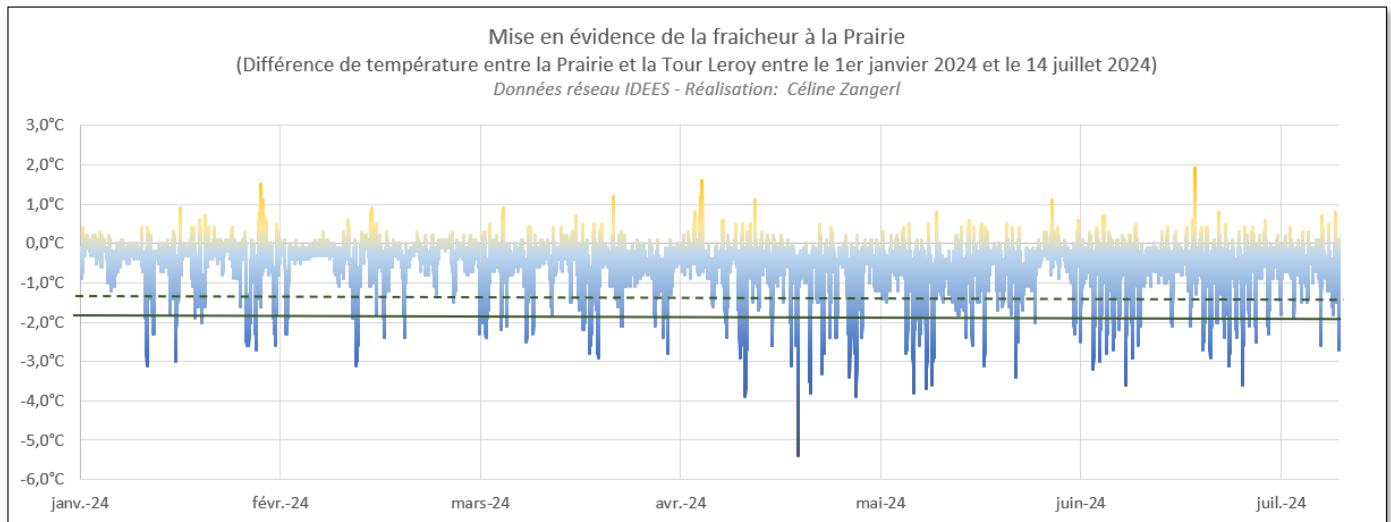


Figure 108: Graphique présentant les différences de température entre la Prairie et la Tour Leroy du 1er janvier 2024 au 14 juillet 2024 – Réalisation : C. Zangerl

La Prairie est un grand espace vert, principalement constitué de végétation basse et marqué par la présence de l'Orne et d'une zone humide (pages 58 et 89). Comme il a déjà été expliqué dans le cadre de l'étude des îlots de chaleur urbains, la Prairie a été choisie comme station de référence pour représenter les températures à la campagne.

Ecart moyen	-0,6 °C
Ecart maximal	+ 1,9 °C
Ecart minimal	-5,4 °C
Part écarts <0	89,3 %
Part jours t min ≤ -1,5 °C	62,2 %

Figure 109: Tableau statistique de la Prairie - Réalisation : C. Zangerl

Plus qu'une simple station de référence, la Prairie constitue un point de fraîcheur important dans le cadre de l'étude du climat urbain ainsi que de la fraîcheur en ville. Etant située à cheval entre la ville et l'espace hors agglomération au sud-ouest, elle n'entre pas totalement dans la définition de départ d'un îlot de fraîcheur, puisque ce dernier a été défini ici comme un espace intra-urbain. Néanmoins, l'étude du fonctionnement thermique de la Prairie trouve tout son intérêt dans l'étude de la fraîcheur en ville et plus largement du climat urbain par le fait de sa capacité à produire et à diffuser de l'air frais vers le cœur de l'agglomération.

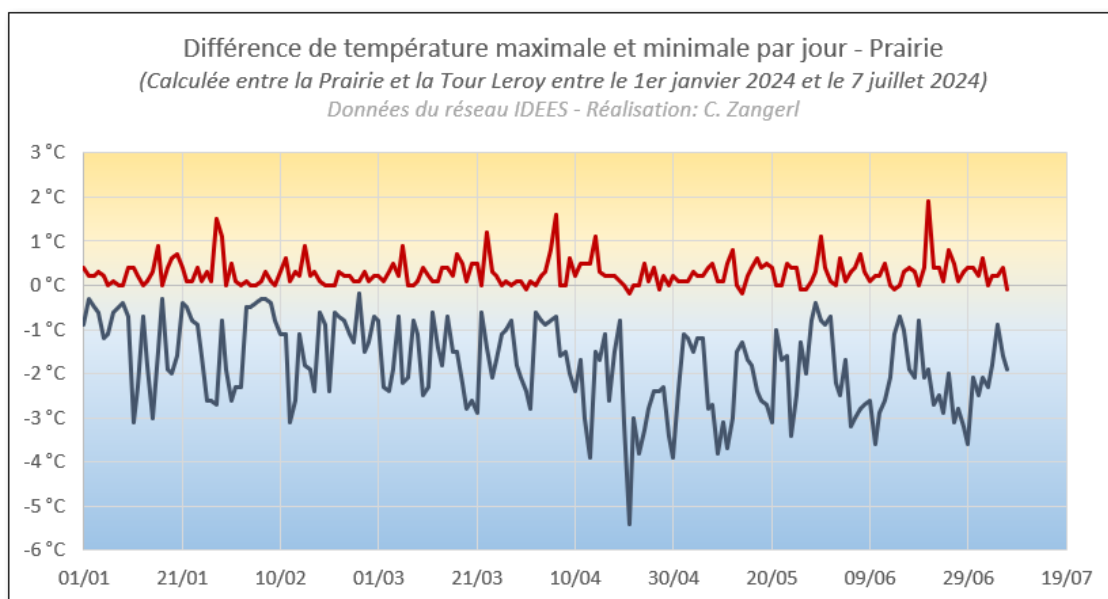


Figure 110: Graphique montrant l'écart de température maximal et minimal par jour entre la Prairie et la Tour Leroy du 1er janvier au 14 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Les données enregistrées par la station météorologique montrent que les températures à la Prairie sont, dans presque 90% des cas, inférieures à celles du centre-ville (figure 109). Les jours où les écarts négatifs sont supérieurs ou égaux à -2°C représentent 43,9% des jours entre le 1er janvier et le 14 juillet 2024, avec des écarts pouvant aller jusqu'à $-5,4^{\circ}\text{C}$ par rapport à la Tour Leroy (figure 108). L'influence de la Prairie sur ses environs a déjà été évoquée dans le cadre des ICU, où il a pu être démontré qu'elle influence largement les températures observées à la place Foch, voire qu'elle étend son influence sur le quartier St. Jean.

Comme on peut le voir sur le graphique ci-dessus (figure 110), les écarts négatifs par rapport au centre-ville atteignent régulièrement les -3°C , surtout à partir du mois d'avril, et les écarts positifs restent pour la très grande majorité inférieurs à $+1^{\circ}\text{C}$.

La saisonnalité de ces écarts devient claire lorsque l'on compare les écarts moyens par heure entre la Prairie et le centre-ville pour le mois de janvier et le mois de juin 2024 (figure 111). Alors que les écarts restent globalement assez faibles en période hivernale, un réel cycle diurne apparaît pour la période estivale, marqué par les levers et les couchers du soleil.

Pendant la journée, les écarts moyens estivaux varient entre $-1,5^{\circ}\text{C}$ et $-0,5^{\circ}\text{C}$. A l'inverse des petits espaces verts comme le Jardin des Plantes ou les cimetières dormants, la courbe des écarts moyens ne présente pas de réel pic et ne dépasse pas les 0°C . Ainsi, on peut en déduire que la Prairie a moins tendance à surchauffer pendant la journée et garde donc un écart faible mais constant avec le Tour Leroy. Cette situation est probablement due à la composition végétale de la Prairie, puisque l'absence d'arbres sur l'intégralité de l'espace, mis à part les arbres d'alignements qui l'entourent,

permet à l'air de circuler librement. De plus, le creusement des écarts très marqué à la tombée de la nuit montre bien l'effet de l'absence d'arbres sur les dynamiques de refroidissement. En effet, alors que le feuillage bloque le rayonnement terrestre à l'origine du refroidissement et garde donc la chaleur proche du sol, les espaces à végétation basse peuvent refroidir l'air très rapidement une fois le soleil couché.

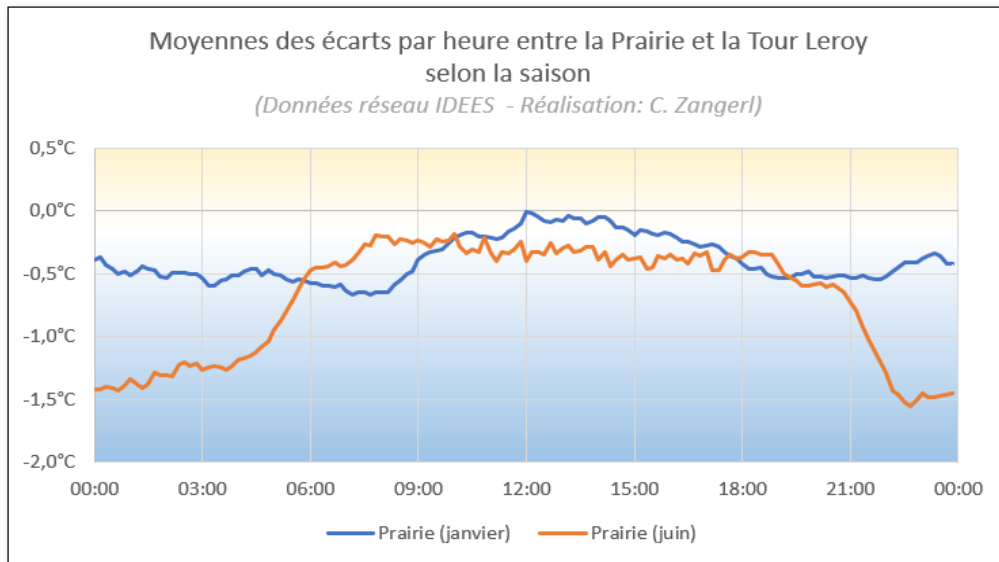


Figure 111: Graphique montrant l'écart moyen par heure pour le mois de janvier et de juin 2024 à la Prairie - Réalisation : C. Zangerl

Par sa situation géographique, la Prairie est un espace vert intégré plus largement à un ensemble formé par la vallée de l'Orne et de l'Odon. Contrairement aux autres espaces verts présentés auparavant qui fonctionnent indépendamment d'un réseau, la Prairie est donc fortement influencée par les dynamiques thermiques des espaces verts situés en amont. Comme il a été démontré dans le chapitre sur les ICU, un vent du nord peut facilement faire déborder la chaleur de la ville sur Prairie, mais un vent du sud-ouest peut, quant à lui, accentuer la fraîcheur à Prairie en apportant de l'air frais provenant de l'extérieur de la ville. Dans le cadre de l'analyse de la circulation de l'air frais, il convient donc de s'intéresser plus particulièrement aux espaces en amont de la Prairie, représenté ici par la station météorologique de la rue du Québec.

3.1.6) La rue du Québec

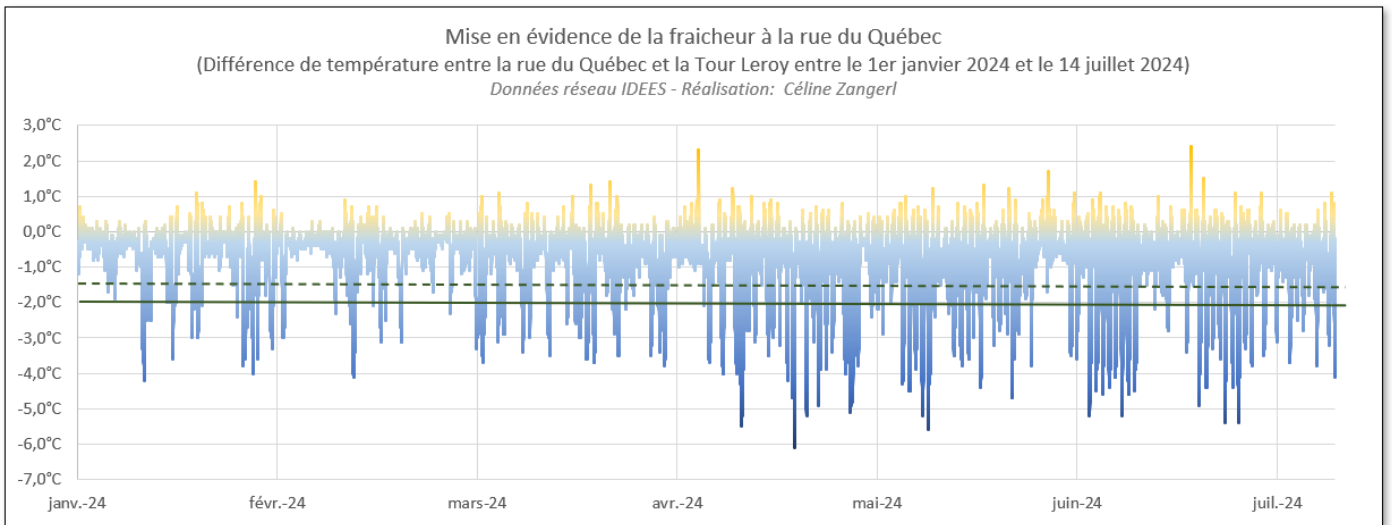


Figure 112: Graphique présentant les différences de température entre la rue du Québec et la Tour Leroy du 1er janvier 2024 au 14 juillet 2024 – Réalisation : C. Zangerl

Ecart moyen	-0,9 °C
Ecart maximal	+ 2,4 °C
Ecart minimal	-6,1 °C
Part écarts <0	87,8 %
Part jours t min ≤ -1,5 °C	76,0 %
Part jours t min ≤ -2 °C	66,8 %

Figure 113: Tableau statistique de la rue du Québec - Réalisation : C. Zangerl

La rue du Québec se présente comme un espace particulièrement frais, non seulement par rapport au centre-ville, mais même par rapport aux autres espaces verts. La station de la rue du Québec se situe en amont de la Prairie, proche de l'embouchure de la vallée de l'Odon dans la vallée

de l'Orne (pages 60 et 89). Sur le graphique ci-dessus (figure 112) on voit clairement que la limite des - 2°C d'écart avec la Tour Leroy est aisément atteinte.

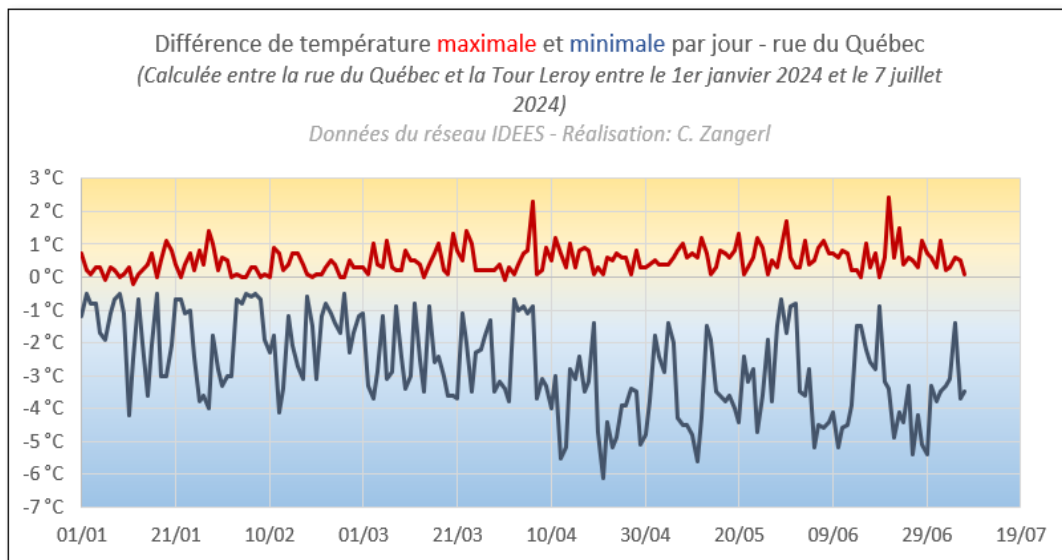


Figure 114: Graphique montrant l'écart de température maximal et minimal par jour entre la rue du Québec et la Tour Leroy du 1er janvier au 14 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Ce seuil est dépassé sur deux tiers des jours entre le 1er janvier et le 14 juillet (figure 113), avec des écarts qui semblent d'autant plus forts que l'on approche de la période estivale (figure 114). Ces données prouvent non seulement la capacité de cet espace vert à produire de l'air frais, mais également que les conditions météorologiques n'ont pas nécessairement besoin d'être très favorables pour dépasser le seuil des - 2°C.

La saisonnalité des écarts est particulièrement claire pour la station de la rue du Québec. Comme on peut le voir sur la figure 114, les écarts négatifs sur la première partie d l'année se concentrent autour des - 2°C et s'élèvent en moyenne à - 3,4°C à partir du mois d'avril. Cette saisonnalité est d'autant plus visible lorsque l'on compare les moyennes par heure pour le mois de janvier et le mois de juin (figure 115). En hiver, les écarts restent assez faibles de jour comme de nuit. Au mois de juin, ces écarts se creusent fortement à la tombée de la nuit et atteignent jusqu'à - 2,5°C de moyenne. Tout comme à la Prairie, la courbe des écarts en été forme une sorte de plateau en journée indiquant qu'il n'y a pas de surchauffe à cet endroit.

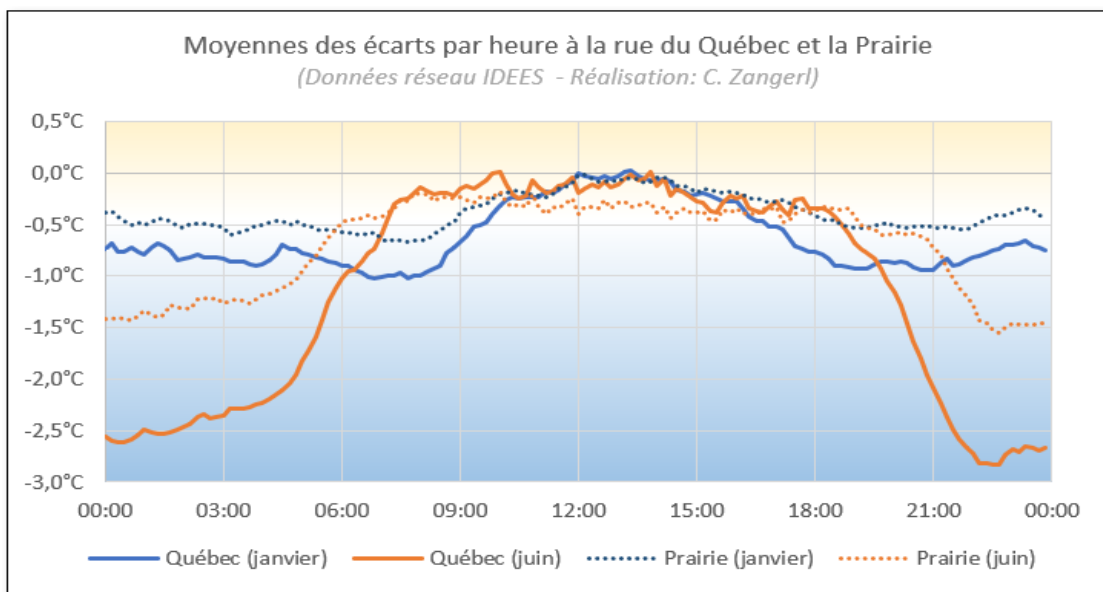


Figure 115: Graphique montrant l'écart moyen par heure pour le mois de janvier et de juin 2024 à la Prairie - Réalisation : C. Zangerl

En général, en comparant les courbes de la Prairie et de la rue du Québec, on observe que les dynamiques sont très proches, mais que les écarts sont bien plus importants à la rue du Québec. De plus, il existe un décalage entre les deux courbes estivales. A la rue du Québec, les écarts les plus faibles sont atteints légèrement plus tard qu'à la Prairie. En fin de journée, les écarts commencent à se creuser bien avant la Prairie.

Ces écarts importants peuvent s'expliquer par deux facteurs. D'une part, comme c'est le cas pour la Prairie, sa grande superficie et la composition végétale à la rue du Québec permettent une bonne circulation de l'air et un rayonnement terrestre nocturne qui n'est pas bloqué sous les houpiers des arbres. D'autre part, la topographie est particulièrement favorable à la mise en place d'un trou à froid. L'air frais plus dense se concentre dans les dépressions topographiques et crée alors localement des sortes de « lacs » d'air frais. La topographie en creux à la rue du Québec et le possible apport d'air frais par les vallées de l'Orne et de l'Odon à cet endroit en font un espace très propice à la formation d'air frais la nuit. Cet air, lorsque le vent souffle depuis le sud-ouest, peut alors facilement circuler vers la Prairie et y apporter de la fraîcheur pouvant même pénétrer jusque dans les espaces urbains. Plus qu'un petit îlot de fraîcheur intra-urbain, le système Orne-Odon-Québec-Prairie mérite une grande attention dans l'étude de la circulation d'air frais dans la ville, puisqu'il peut constituer un atout très important pour apporter de la fraîcheur depuis la campagne jusque dans le centre-ville.

3.1.7) Conclusion et discussion des résultats

Grâce aux données récoltées par les stations météorologiques du réseau IDEES, six espaces verts de composition, de superficie et de topographie différentes ont pu être analysés sur le long terme et ont donné des premières indications sur les dynamiques thermiques de chaque espace.

Tout d'abord, les **deux cimetières dormants de St. Jean et St. Pierre** ne semblent a priori pas présenter un fort potentiel en termes de point de fraîcheur dans la ville. Que ce soit en été ou en hiver, les écarts avec la station de la Tour Leroy restent en moyenne très faibles, c'est-à-dire aux alentours de $-0,5^{\circ}\text{C}$. A l'inverse du cimetière St. Jean, où l'on observe une légère surchauffe en journée, le cimetière St. Pierre semble garder un écart en moyenne très constant de jour comme de nuit, en été comme en hiver. La particularité du cimetière St. Pierre est sa végétation arborée très dense, qui ne laisse passer qu'une très petite part des rayonnements solaires en journée et des rayonnements terrestres la nuit, laissant donc peu de place à une forte surchauffe ou à un fort refroidissement la nuit.

Le **Jardin des Plantes**, moins marqué par la présence d'arbres et situé dans une dépression topographique, s'est avéré être un espace avec une dynamique assez intéressante. Alors que les écarts durant la nuit atteignent en moyenne -1°C en hiver et $-1,5^{\circ}\text{C}$ en été, ces derniers s'effacent totalement durant la journée. En période estivale, il est même très fréquent qu'il fasse plus chaud au Jardin des Plantes qu'au centre-ville. On pourrait alors parler ici d'une sorte de « continentalisation du microclimat », avec des journées plus chaudes et des nuits fraîches. La topographie couplée au cloisonnement de cet espace peut alors expliquer cette situation. Que ce soit l'air chaud ou l'air frais, ces masses d'air s'accumulent facilement dans la dépression topographique que représente le Jardin des Plantes. Ces effets cuvettes et trous à froid sont accentués par la présence de murs qui entravent la circulation de l'air et donc la communication avec les alentours. Bien que l'on observe une légère surchauffe en journée, les écarts négatifs parfois très importants la nuit permettent de considérer le Jardin des Plantes comme un potentiel IFU.

Les données du **Campus 1 de l'Université de Caen** ont révélé quelques points intéressants concernant les dynamiques thermiques dans cet espace. Alors que la dynamique en hiver semble assez proche de celle des petits espaces verts comme les cimetières dormants, malgré sa superficie plus importante et ses grands espaces ouverts, la courbe des écarts au centre-ville a montré une dynamique thermique estivale différente. Les écarts les moins élevés sont observés au lever du jour, augmentent ensuite tout au long de la journée et s'intensifient en fin de journée pour atteindre un pic vers minuit (heure locale). Cette situation pourrait être liée à l'influence de la direction du vent sur les températures mesurées à cet endroit, avec de l'air plus frais en journée apporté par le vent du nord depuis la mer. Néanmoins, il reste des interrogations sur le fonctionnement de cet espace qui

nécessitent l'observation de l'évolution des températures sur une journée précise et des mesures à une échelle plus fine, notamment par le biais de campagnes de mesures temporaires.

La **Prairie et la rue du Québec** constituent un ensemble capable de produire et de faire entrer de l'air frais dans la ville. Grâce à leur composition végétale, à leur superficie importante, à leur situation topographique et à leur position entre la ville et la campagne, ces deux espaces ne présentent pas de réelle surchauffe en journée et montrent des écarts parfois très importants la nuit, surtout à la rue du Québec. L'intérêt d'étudier ces deux espaces verts plus en détails devient alors assez clair. Il serait donc intéressant de placer d'autres stations météorologiques fixes intégrées au réseau IDEES plus en amont de la vallée de l'Orne et de la vallée de l'Odon afin d'observer plus concrètement les possibles apports d'air frais pouvant provenir de ces deux vallées et donc de comprendre le fonctionnement de l'ensemble de ce système.

Il semble important de nuancer les résultats présentés ici. En effet, la Tour Leroy ne constitue pas une station idéale pour l'étude des îlots de fraîcheur et de l'air frais en ville en général, mais elle a été utilisée faute d'autres options. Il sera intéressant de procéder à de nouvelles analyses en se basant sur une autre station météorologique lorsque l'agrandissement du réseau IDEES aura permis de trouver un emplacement plus adéquat.

De plus, la période sur laquelle ont été analysées les données s'étend du 1er janvier au 14 juillet 2024 et ne représente donc que 6 mois de mesures. Cette période a néanmoins été choisie pour plusieurs raisons. Les stations du cimetière St. Jean et du cimetière St. Pierre ainsi que celle du Campus 1 ont été installées en fin d'année 2023, alors que les autres stations du réseau sont plus anciennes. Afin de pouvoir analyser les données sur une même période pour toutes les stations, il a été décidé de se concentrer sur les 6 derniers mois. Les conditions météorologiques sur cette période ont été généralement assez peu propices aux ICU et donc également aux IFU. Les résultats présentés ici sont pour la grande majorité des moyennes d'écarts de températures. Ces moyennes peuvent alors cacher les situations où les écarts ont été assez importants. Il est donc important de s'intéresser davantage aux dynamiques thermiques observées à des moments précis, lorsque les conditions météorologiques ont permis la mise en place des ICU et des IFU, ce qui sera l'objet de la prochaine partie.

3.2) Analyse en détail des dynamiques thermiques à l'aide d'exemples précis

3.2.1) Exemple du 10 au 11 mai 2024

Le premier exemple présenté pour étudier les îlots de fraîcheur est celui du 10 et du 11 mai 2024. Les conditions météorologiques observées le 10 mai ont été plutôt calmes et stables, avec une pression atmosphérique comprise entre 1023 et 1020 hPa (figure 117). Les températures journalières ont atteint 22°C en milieu et fin de journée, ce qui est bien au-delà de la normale de température maximale moyenne du mois de mai pour la période 1991 – 2020 (17,4 °C). Alors que le ciel a été partiellement voilé par des nuages de haute altitude durant la journée, la nuit a été très claire et calme (figure 116). A la Prairie, le vent provenant du nord-est a atteint 14 km/h vers 15h UTC et s'est ensuite calmé au cours de la soirée pour tourner au sud-ouest vers 22h30 UTC (figure 118). Comme il a été mentionné au cours de l'analyse des ICU, ce genre de situations est caractéristique des périodes au temps calme et clair. En journée, la brise de mer remonte jusque dans l'agglomération caennaise et souffle avec une vitesse d'environ 10 km/h. Dès que la brise de mer perd de l'ampleur, le vent tourne au sud-ouest et se calme pour ne reprendre de la vitesse qu'au lever du jour et tourner à nouveau vers le nord.

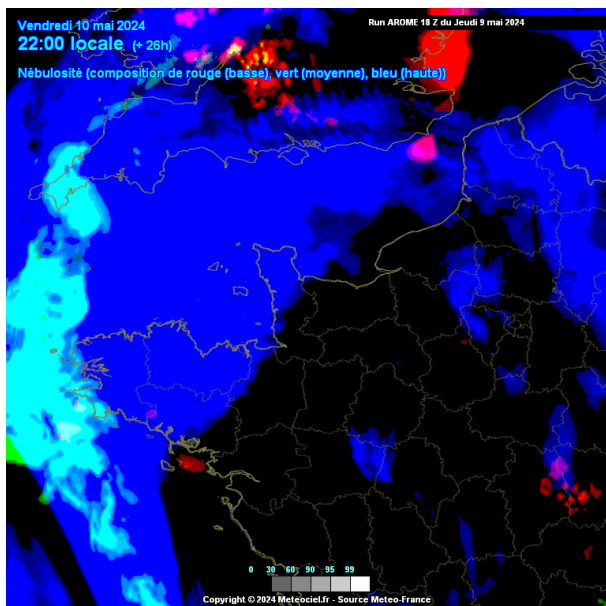


Figure 116 : Nébulosité sur le nord-ouest de la France le vendredi 10 mai 2024 à 22h locale - Source : Météociel

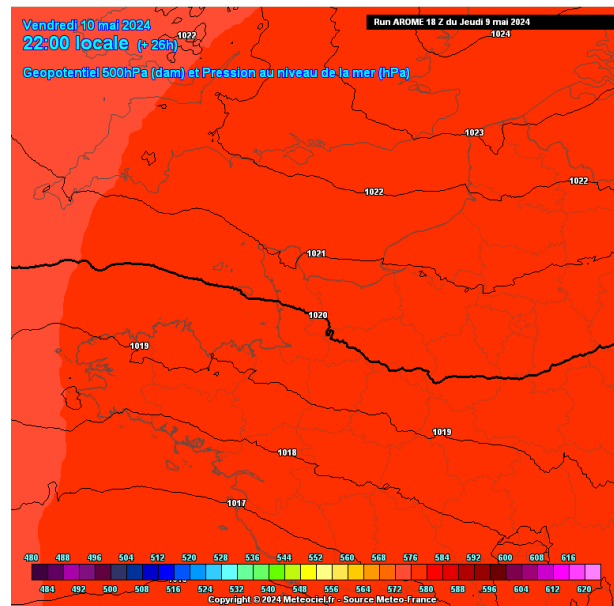


Figure 117: Géopotential à 500 hPa et pression atmosphérique au niveau del amer (hPa) - Source : Météociel

Ces conditions météorologiques claires et calmes, favorables aux ICU, se montrent également propices aux IFU, comme on peut le voir sur les deux graphiques ci-dessous (figure 119 et 120) montrant les températures mesurées dans les différentes stations vertes et la Tour Leroy ainsi que les écarts de températures.

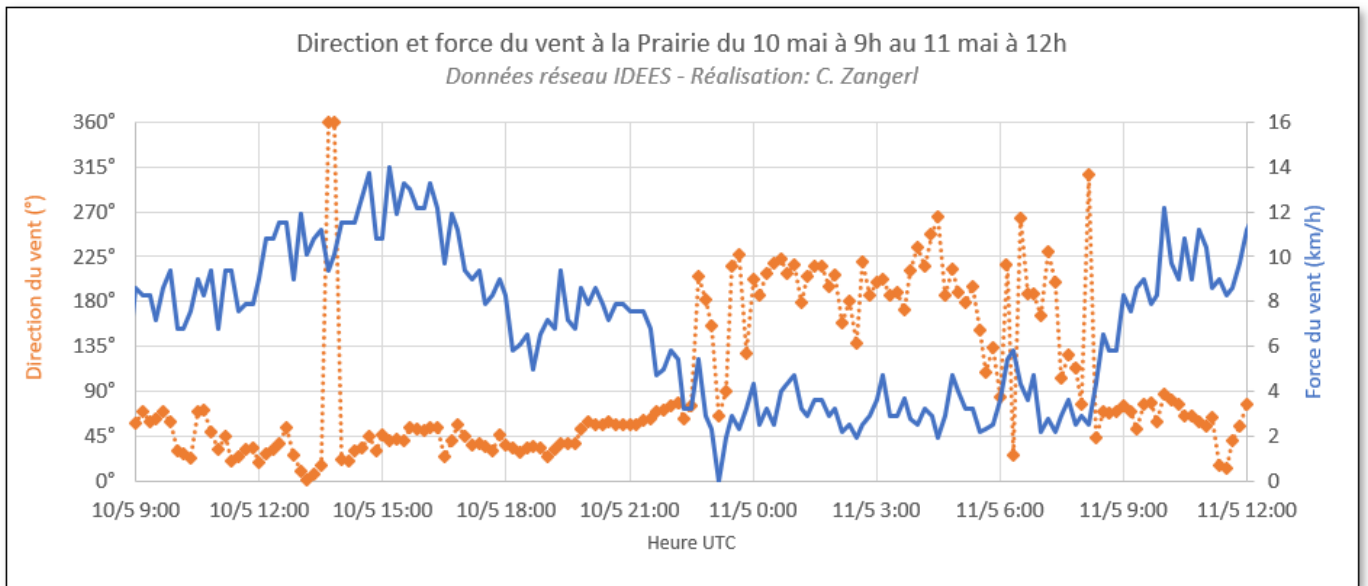


Figure 118: Graphique montrant la direction et la force du vent le 10 et 11 mai 2024 - Réalisation : C. Zangerl

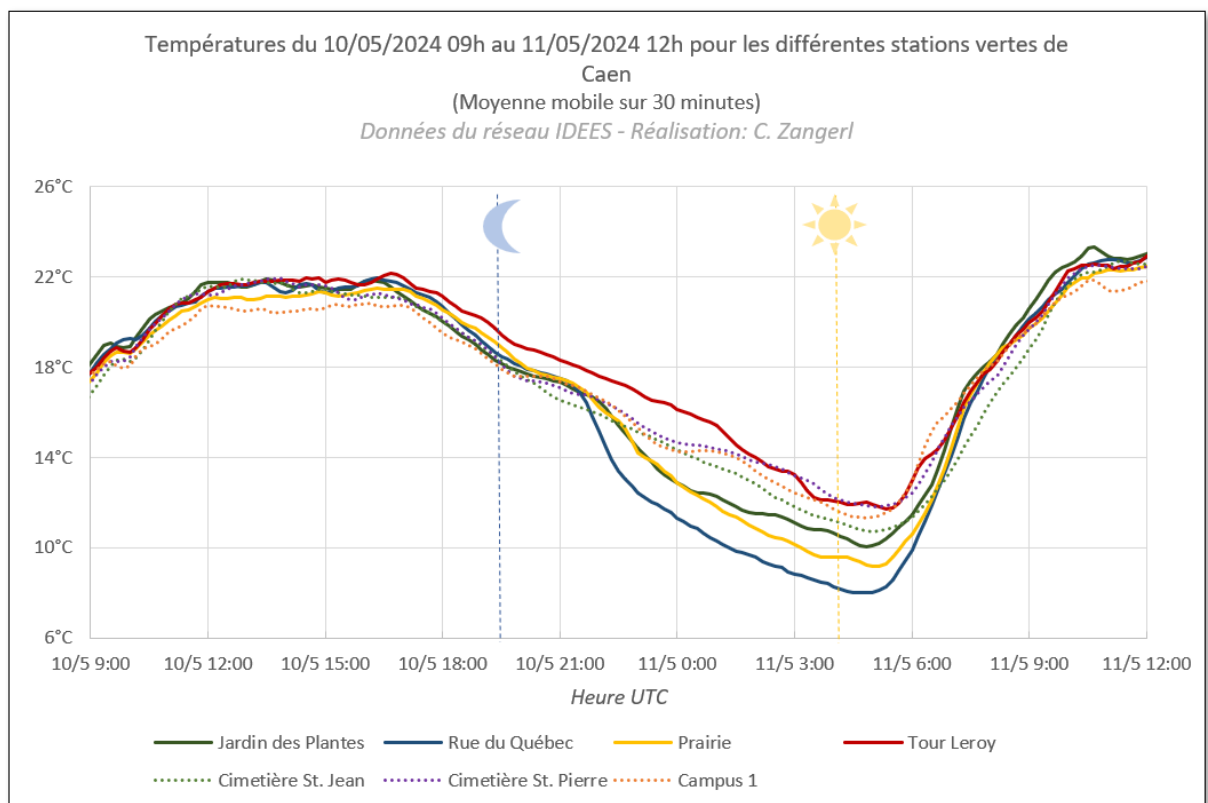


Figure 119: Graphique montrant les températures à la Tour Leroy et aux 6 stations vertes de l'agglomération - Réalisation : C. Zangerl

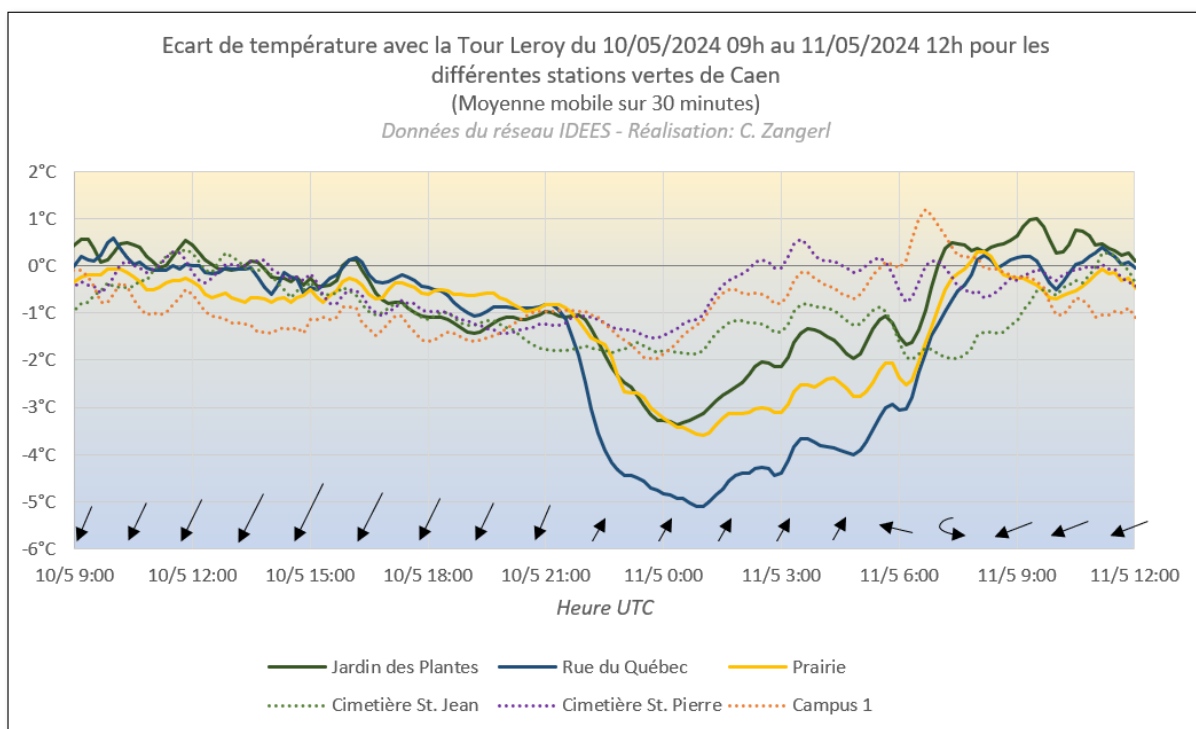


Figure 120: Graphique montrant les écarts de températures entre la Tour Leroy et les 6 stations vertes de l'agglomération caennaise du 10 au 11 mai 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Comme il a pu être montré auparavant par l'analyse des écarts moyens pour chaque station verte, les écarts au centre-ville suivent généralement un rythme de 24h, avec des écarts très faibles en journée et des écarts parfois importants durant la nuit.

Au cours de la journée du 10 mai, les écarts entre le centre-ville et les différentes stations vertes sont globalement très faibles. Le Jardin des Plantes, la rue du Québec et les cimetières dormants affichent par moment des températures très légèrement supérieures à celles de la Tour Leroy. A l'inverse, la Prairie et le Campus 1 restent plus frais.

La topographie en creux au Jardin des Plantes et à la rue du Québec pourrait expliquer cette surchauffe locale en produisant un effet cuvette où l'air chaud s'accumule et stagne. De plus, la végétation haute est plus importante à la rue du Québec qu'à la Prairie, ce qui pourrait limiter le brassage de l'air par le vent. A l'inverse, le Campus 1 et la Prairie sont des espaces verts ouverts et à végétation basse, ce qui favorise la circulation de l'air et pourrait permettre d'éviter une surchauffe locale. De plus, les écarts négatifs plus marqués au Campus 1 (jusqu'à $-1,5^{\circ}\text{C}$) pourraient résulter de l'entrée de la brise de mer dans la ville apportant de l'air frais sur cet espace vert. Finalement, les températures journalières élevées aux cimetières dormants s'expliquent probablement, comme mentionné auparavant, par la présence de végétation arborée dense.

A partir de 17h (UTC), les températures commencent à baisser sensiblement sur l'intégralité des stations. Des écarts importants commencent à se creuser vers 21h30 (UTC) pour atteindre jusqu'à

-5,5°C à la rue Québec (1h00 UTC), - 3,6°C à la Prairie (01h00 UTC) et -3,4 °C au Jardin des Plantes (00h20 UTC). Dans les autres espaces verts, les écarts restent assez faibles (moins de 2°C) voire dépassent les températures à la Tour Leroy en fin de nuit.

Concernant les températures nocturnes, plusieurs points semblent intéressants à noter. Premièrement, comme on a pu l'identifier dans l'analyse des moyennes sur le long terme, les cimetières dormants et le Campus 1 présentent des dynamiques thermiques nocturnes très similaires, avec néanmoins des différences au lever du jour. Alors qu'au cimetière St. Jean, les écarts restent supérieurs à environ 1°C jusque dans la matinée, les écarts au cimetière St. Pierre et au Campus 1 diminuent au cours de la nuit et s'effacent bien avant le lever du jour. Comme durant la journée, la végétation arborée dense bloque le rayonnement et empêche donc des échanges thermiques entre la surface du sol et l'atmosphère à l'origine du refroidissement de l'air. Au Campus 1, ce n'est pas la végétation qui explique les écarts faibles au centre-ville. Il est difficile de donner une explication à cette dynamique nocturne, mais il est possible que l'air plus chaud de l'espace urbain entre sur le campus sous l'effet du vent.

Les trois autres espaces verts de l'agglomération, c'est-à-dire le Jardin des Plantes, la Prairie et la rue du Québec, montrent des dynamiques thermiques marquées par une diminution rapide des températures en première partie de nuit, puis une deuxième phase où les températures diminuent de manière constante mais moins importante (figure 119). L'inertie thermique étant donc bien moins importante dans les espaces verts qu'en ville, les écarts se creusent rapidement entre 21h30 et 00h00 (UTC).

Cette diminution rapide des températures coïncide avec le moment où le vent tourne au Sud-Ouest. Pour le système Prairie-rue du Québec, cela signifie l'entrée d'air frais provenant des vallées de l'Odon et de l'Orne, fraîcheur qui est accentuée par l'effet trou à froid. Il est difficile d'estimer l'importance que prend la formation d'air frais sur place par rapport aux apports de l'extérieur de la ville. Néanmoins, l'exemple du Jardin des Plantes montre que la formation d'air frais in situ peut être assez importante. Au regard de sa position dans la ville et de son confinement par la topographie et la présence des murs, le vent ne devrait pas y jouer un rôle important, ce qui signifie que la diminution des températures est surtout liée à la formation d'air frais sur place.

Un autre exemple, complémentaire à celui du 10 au 11 mai, peut apporter une précision sur cette question de la formation d'air frais sur place à la Prairie.

3.2.2) Exemple du 23 au 24 juin 2024

Ce genre de dynamique thermique, avec un rafraîchissement rapide et des écarts importants au Jardin des Plantes, à la Prairie et à la rue du Québec ainsi que des écarts nocturnes assez faibles pour les trois autres espaces verts, s'observe presque systématiquement lorsque les conditions météorologiques sont favorables. On peut à ce titre également mentionner la nuit du 23 au 24 juin présentée sur le graphique ci-dessous (figure 121).

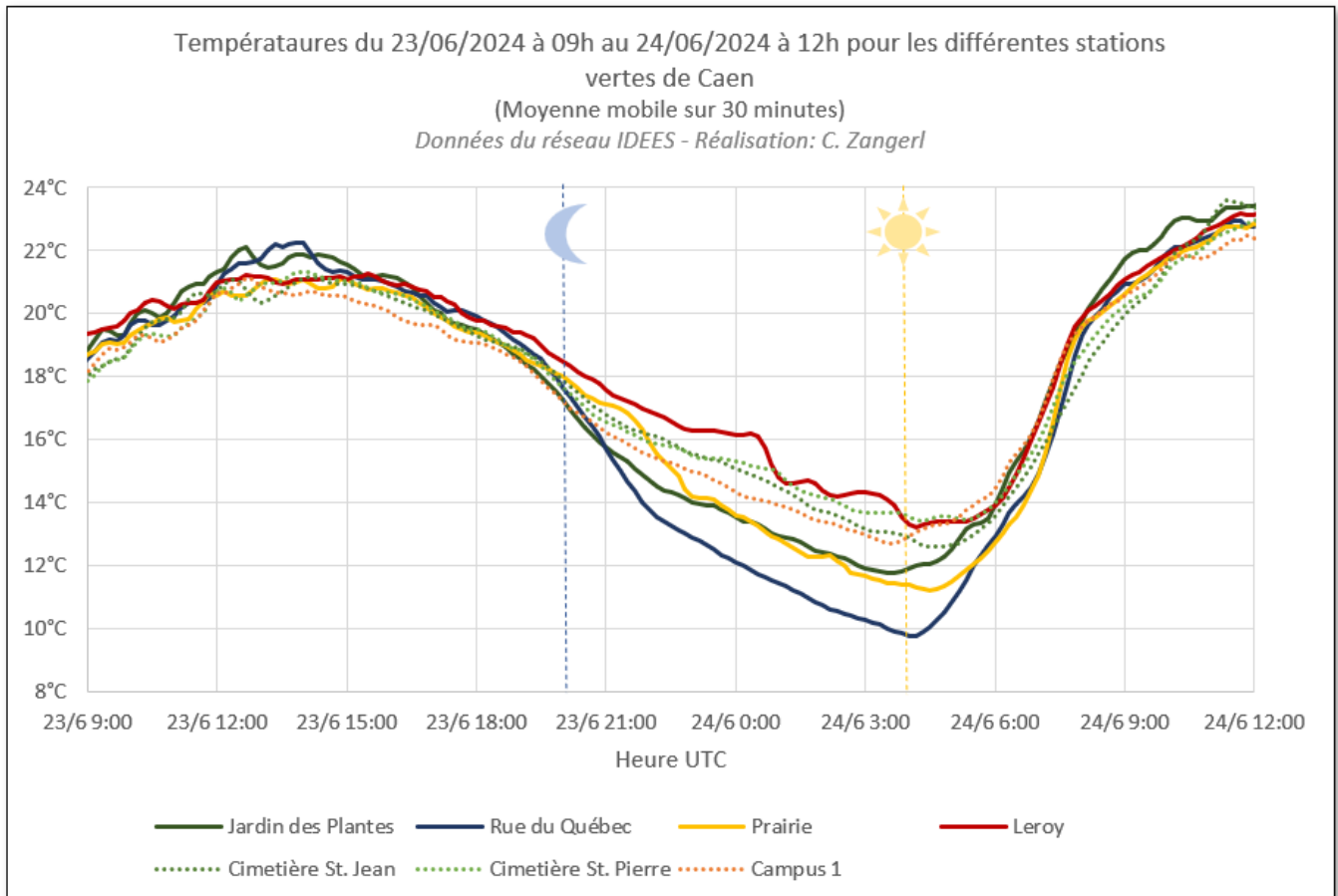


Figure 121: Graphique montrant les températures à la Tour Leroy et aux 6 stations vertes du 23 au 24 juin 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Comme au mois de mai, on observe une légère surchauffe en journée au Jardin des Plantes et à la rue du Québec, des températures légèrement plus fraîches au Campus 1 ainsi que des températures très proches de celles du centre-ville pour les autres espaces verts. Les écarts se creusent à partir de 19h30 UTC au Jardin des Plantes et à la rue du Québec, et environ deux heures plus tard à la Prairie. Ce décalage pose donc la question de la capacité de la Prairie à former de l'air frais sur place et donc de l'influence que les autres espaces aux alentours peuvent avoir sur ses dynamiques thermiques nocturnes.

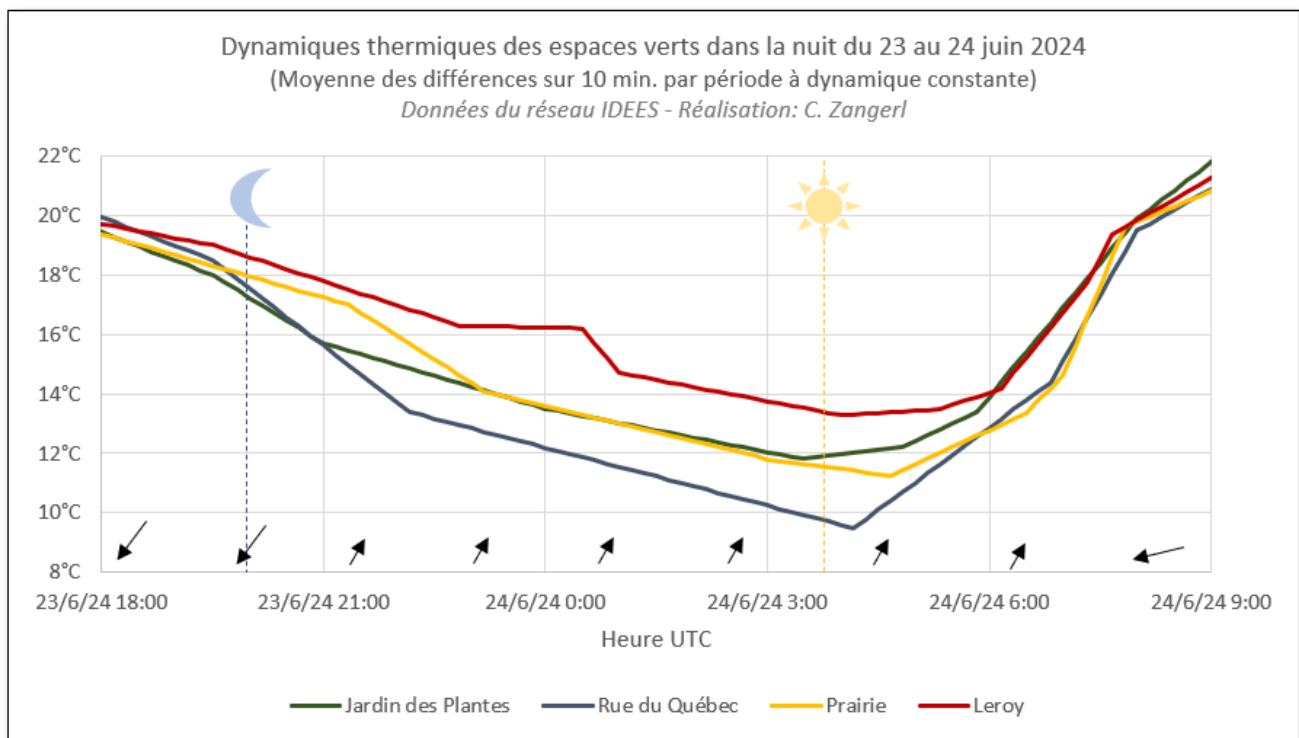


Figure 122: Graphique montrant les dynamiques thermiques du Jardin des Plantes, de la Prairie et de la rue du Québec ainsi que de la Tour Leroy du 23 au 24 juin 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Afin d’observer plus facilement en détail les dynamiques thermiques des différentes stations, il est possible de calculer la pente moyenne des courbes de températures pour chaque période où cette dernière est constante (figure 122).

A la Tour Leroy, mis à part la période entre 22h50 et 1h, le refroidissement semble être assez linéaire jusqu’à 4h (UTC), ce qui correspond au moment du lever de soleil. Les températures augmentent légèrement, puis plus nettement à partir de 6h UTC.

Au Jardin des Plantes et à la rue du Québec, les températures diminuent rapidement dès le coucher du soleil avant d’atteindre une deuxième phase où le rafraîchissement est moins marqué. Cette deuxième phase débute vers 21h au Jardin des Plantes et environ une heure plus tard, c’est-à-dire vers 22h, à la rue du Québec. L’augmentation des températures reprend peu avant le lever du soleil au Jardin des Plantes, alors que la tendance ne s’inverse qu’à 4h UTC à la rue du Québec. Le fait que les températures diminuent plus fortement en première partie de nuit et que le rafraîchissement dure plus longtemps à la rue Québec pourrait être lié à la taille plus conséquente de cet espace vert ainsi qu’à sa position à l’embouchure de la vallée de l’Orne et de l’Odon l’alimentant en air frais.

La Prairie montre une dynamique thermique particulière lors de cette nuit. Dans un premier temps, elle suit celle de la Tour Leroy et montre donc une diminution des températures bien moins marquée qu'aux deux autres espaces verts. Vers 21h30 UTC, le vent tourne au Sud-Ouest, ce qui implique deux choses. Premièrement, l'air chaud de la ville ne déborde plus sur la Prairie et la coupe donc de l'influence que cette dernière peut avoir sur les températures que l'on observe dans l'espace vert. Deuxièmement, cela permet l'entrée de l'air frais provenant de la rue du Québec sur la Prairie. La diminution des températures va alors être plus importante qu'en première partie de nuit, et ce, entre 21h30 et 23h (UTC) où les températures à la Prairie atteignent le niveau du Jardin des Plantes. Ce décalage entre la rue du Québec et la Prairie s'observe également au lever du jour.

En résumé, cet exemple complémentaire à celui du 10 – 11 mai montre plusieurs choses. Premièrement, le Jardin des Plantes et la rue du Québec sont des espaces verts capables de se rafraichir rapidement à la tombée de la nuit. Selon le moment auquel le vent tourne au sud-ouest, on peut observer un décalage du rafraichissement de l'air entre la rue du Québec et la Prairie. Ceci pourrait indiquer que la proximité de la Prairie avec la ville pourrait limiter sa capacité à produire de l'air frais ou du moins décaler le moment où le rafraichissement se produit. La fraîcheur nocturne à la Prairie pourrait alors en partie être liée à l'apport d'air depuis les espaces verts en amont. Néanmoins, l'emplacement précis de la station de la Prairie sur le bord de la route pourrait avoir son importance. Le rafraichissement de l'air pourrait être plus net si la station était placée plus au centre de l'espace vert.

La figure 122 a également pu montrer une dynamique de rafraichissement à deux phases au Jardin des Plantes, à la rue du Québec et à la Prairie. La forme des courbes de température peut en quelque sorte rappeler les hydrogrammes de crues, avec une première phase, la courbe de décrue, qui est liée au volume précipité, et une deuxième phase, représentée par la courbe de tarissement, correspondant au débit de base. La première phase de rafraichissement de l'air pourrait alors être liée au départ de l'air chaud vers l'atmosphère qui dure jusqu'à un certain point d'équilibre qui marque la deuxième phase de rafraichissement plus linéaire. Pour les autres espaces verts et le centre-ville, cette première phase de « décrue » est alors beaucoup moins marquée puisque l'air chaud ne peut s'échapper de la même manière qu'aux trois autres stations. Aux cimetières dormants, la végétation ferait alors « barrage », comme pour un barrage hydraulique qui empêcherait l'eau de couler librement. A la Tour Leroy, l'atmosphère est constamment alimentée par la chaleur restituée par les matériaux, comme si une pluie plus fine continuerait à alimenter le débit d'un cours d'eau sans jamais atteindre le débit de base. Au Campus 1, il pourrait s'agir de l'influence des environs, de la position précise des stations trop proche des bâtiments pour être représentative de l'espace vert ou encore de sa position sur le versant empêchant l'air frais de rester sur place par l'effet de gravité.

3.2.3) Campagne de mesure à la Vallée des Jardins du 18 au 19 juillet 2024

Les données récoltées par les stations météorologiques permanentes du réseau IDEES ont permis une analyse détaillée de 6 espaces verts de l'agglomération caennaise. En complément de ces données, des campagnes de mesures temporaires fixes ont été effectuées. Les occasions d'effectuer ces campagnes ont été assez peu fréquentes, notamment à cause des conditions météorologiques et des disponibilités sur la première moitié de l'année. Il a donc été décidé de se concentrer sur les espaces verts qui ne disposent pas de station météorologique, comme le parc de la Vallée des Jardins. Ce parc se situe à l'est du Jardin des Plantes, dans le vallon présenté à la page 65. Pour rappel, la Vallée des Jardins suit le talweg entre le périphérique nord et la rue des Jardins qui donne au sud sur la place Blot où se situe l'entrée du parc du Jardin des Plantes. La combinaison de la topographie en creux et d'une composition végétale constituée d'une végétation basse dans le fond de vallée rend cet espace vert particulièrement intéressant à étudier.

Une campagne de mesure a donc eu lieu dans la nuit du 18 au 19 juillet 2024. La pression atmosphérique était alors d'environ 1020 hPa. Les températures maximales en journée ont frôlé les 30°C et le ciel a été partiellement voilé par des nuages de haute altitude, de journée comme de nuit. Le vent était globalement assez faible, avec des vitesses comprises entre 2 et 8 km/h pendant la nuit.



Figure 123: Station installée dans l'espace urbain à proximité du parc de la Vallée des Jardins - Photo : G. Carlier

Lors de cette campagne, trois stations météorologiques ont été mises en place à différents endroits de la Vallée des Jardins. Chacune était équipée d'un Logger sous abri Météohelix et placé sur un trépied à une hauteur de 1,50 m. Ces trois stations ont été placées de sorte à représenter trois occupations du sol et trois genres de topographies différentes, c'est-à-dire un espace à végétation rase en fond de vallée (figure 125), un espace boisé sur le versant (figure 124) et un espace urbain en haut de plateau (figure 123). A l'inverse des analyses effectuées jusqu'ici, le fait de placer une station dans l'espace urbain à proximité directe du parc permet l'étude de l'IFU en étant au plus proche de la définition donnée aux îlots de fraîcheur.



Figure 124: Station installée sur le versant sous les arbres - Photo : C. Zangerl



Figure 125: Station installée dans le fond de vallée – Photo : E. Lécureuil



Figure 126: Carte de localisation des stations météo à la Vallée des Jardins pour la campagne de mesure du 18/07/2024 - Réalisation : C. Zangerl

Les données de température et d'humidité de l'air ont été enregistrées à deux moments différents et à un pas de temps de 30 secondes. La première période de mesure a eu lieu entre 21h et 22h30 afin de récolter des informations sur les dynamiques thermiques au moment du coucher du soleil. La deuxième période a eu lieu entre 6h et 7h du matin, cette fois-ci pour analyser la situation au lever du soleil. Les données retenues pour l'analyse débutent une demi-heure après le début de la campagne pour garantir que l'air sous abri ait bien été brassée et soit donc représentative de la réalité du terrain.

Les résultats obtenus grâce à cette campagne de mesure ont révélé des données très intéressantes concernant les dynamiques thermiques dans cet espace vert. L'hypothèse d'un rafraîchissement rapide et intense dans le fond de vallée a pu être confirmée pour la période de mesure.

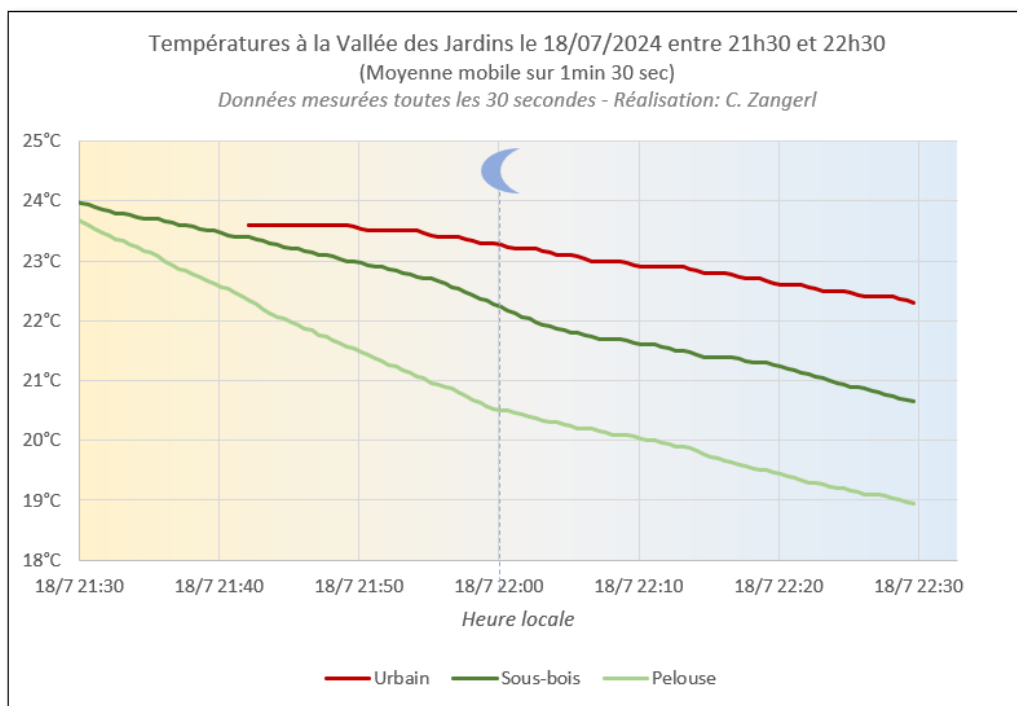


Figure 127: Graphique des températures mesurées aux trois stations de la Vallée des Jardins le 18/07/2024 au coucher du soleil - Réalisation : C. Zangerl

Le graphique des températures mesurées à la Vallée des Jardins au coucher du soleil (figure 127) montre la diminution rapide des températures dans le parc, avec une différence d'environ 1,5°C entre le fond de vallée et le sous-bois situé sur le versant. Cette différence peut s'expliquer par la présence des arbres qui limitent le départ de l'air chaud accumulé en journée ainsi que par la topographie en creux dans le fond de vallée qui favorise l'accumulation de l'air frais à cet endroit.

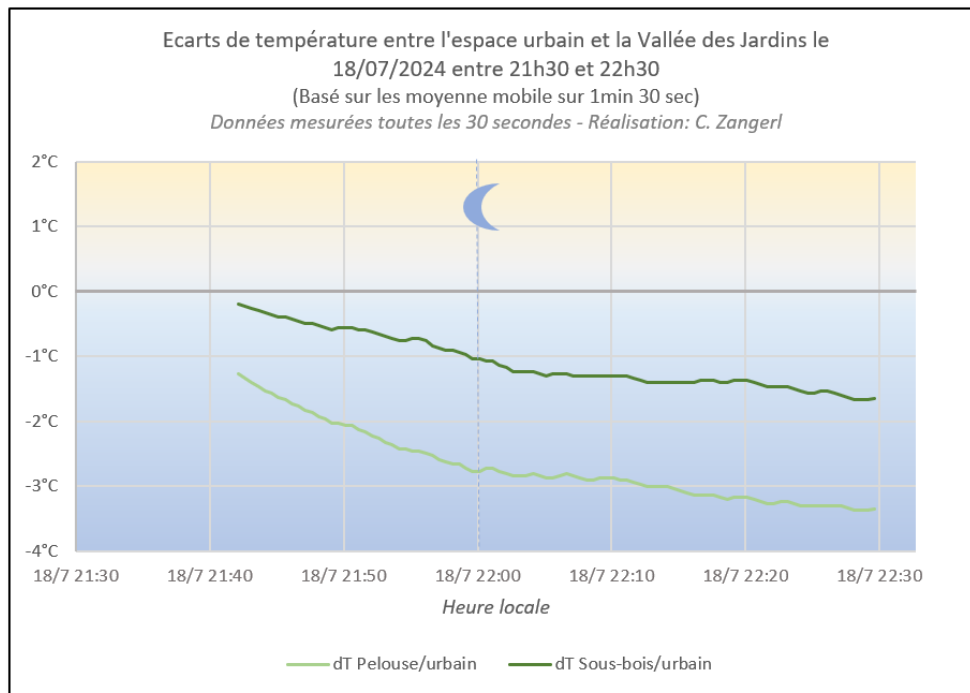


Figure 128: Ecart de température entre les deux stations vertes et la station urbaine à la Vallée des Jardins le 18/07/2024 au coucher du soleil - Réalisation : C. Zangerl

Les écarts entre l'espace urbain et les deux stations de la Vallée des Jardins sont assez importants, surtout pour la station située dans la pelouse en fond de vallée (figure 128). Ils atteignent -3,4°C alors que la distance entre l'espace urbain et la station n'est que de 200m à vol d'oiseau. Cette situation démontre très clairement l'efficacité de cet espace vert à se rafraichir rapidement au coucher du soleil.

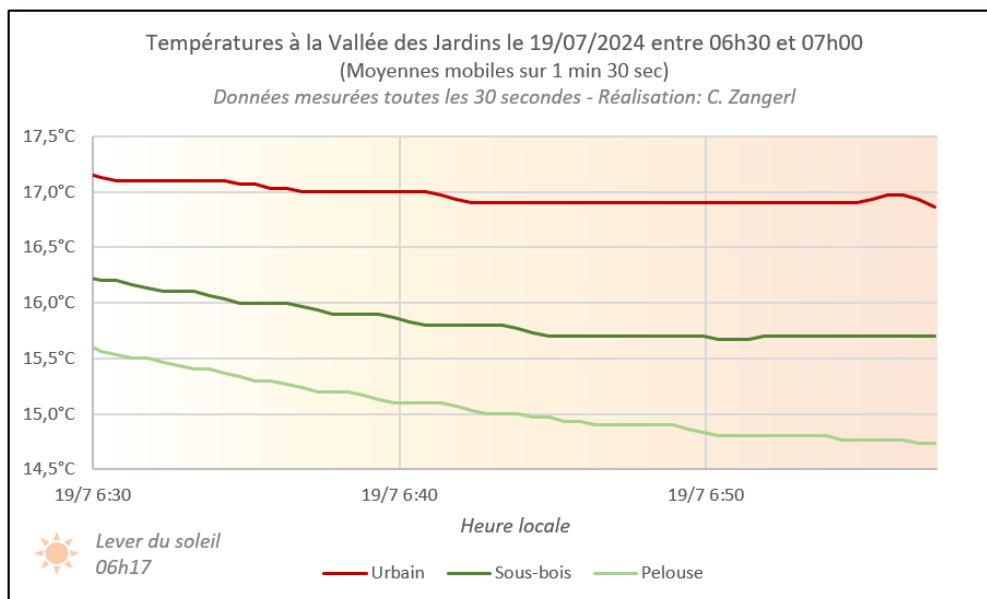


Figure 129: Graphique des températures mesurées à la Vallée des Jardins au matin du 19 juillet 2024 Réalisation : C. Zangerl

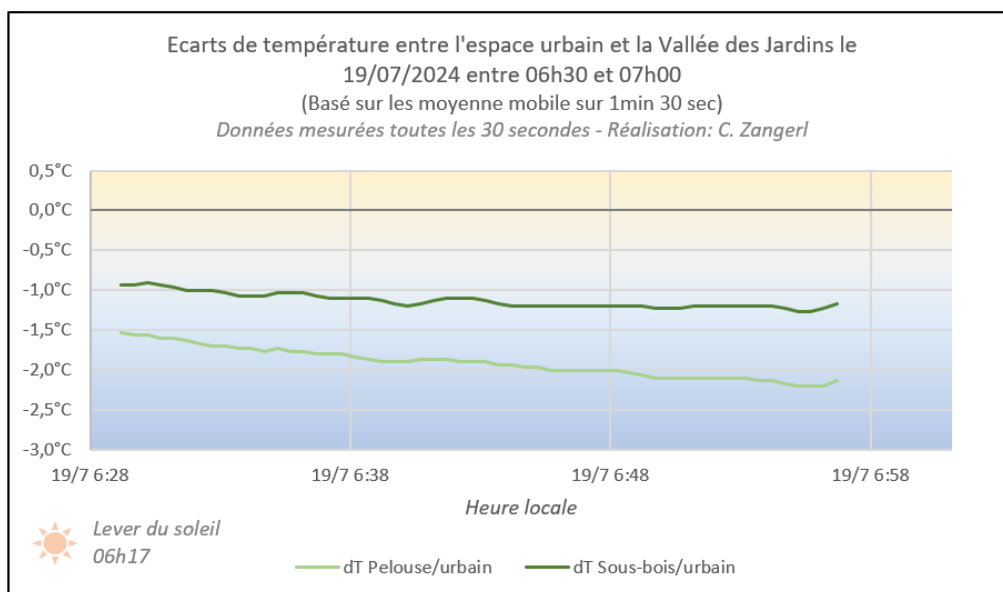


Figure 130: Graphique des écarts entre les deux stations vertes et la station urbaine de la Vallée des Jardins au matin du 19/07/2024 - Réalisation : C. Zangerl

Les températures mesurées le matin montrent que la Vallée des Jardins est restée plus fraîche que l'espace urbain tout au long de la nuit. Alors que la station urbaine a affiché environ 17°C, la température dans le fond de vallée était d'environ 14,7°C et présentait donc un écart d'environ -2,3°C (figure 130). Sur la figure 129, la température semble encore diminuer entre 6h30 et 6h45. Les stations n'ayant été mises en place qu'à 6h10, il est possible que cela soit lié à l'acclimatation des stations météorologiques aux températures réelles sur place. Il est donc plus prudent de considérer comme exactes uniquement les données à partir de 6h50, ce qui ne laisse que 10 minutes de données à exploiter. Aucune dynamique ne peut donc être observée sur un pas de temps si court et il aurait donc été nécessaire de continuer l'enregistrement pendant encore au moins 45 minutes, ce qui n'a malheureusement pas été possible.

Néanmoins, ces données montrent clairement l'existence d'un îlot de fraîcheur comme il a été défini en entrée du chapitre, c'est-à-dire un espace vert plus frais que ses environs.

Analyse des photos thermiques

En complément des mesures de température et d'humidité de l'air, des photographies thermiques ont été prises au début et à la fin des périodes d'enregistrement dans le parc et dans l'espace urbain. L'objectif de la prise de photo est d'analyser non seulement le refroidissement de l'air, mais également le refroidissement des surfaces sur la période de la campagne.

L'appareil utilisé pour la prise de photo est le modèle C2 de la marque FLIR. Cet appareil présente l'avantage de prendre deux photos à chaque prise, dont une normale et une thermique, permettant de facilement situer la photographie thermique dans l'espace. Néanmoins, elle n'enregistre pas les valeurs de température par pixel, ce qui oblige à estimer la température réelle à partir de l'échelle située à droite de chaque photo.



Figure 131: Appareil photo thermique utilisé lors de la campagne de mesure à la Vallée des Jardins

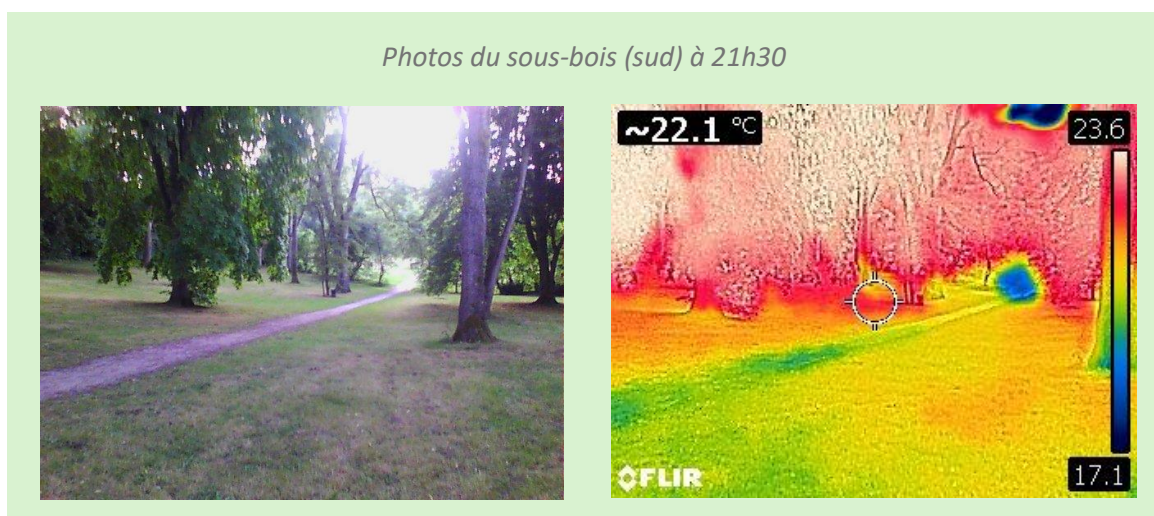


Figure 132: Photos prises dans le sous-bois (sud du parc) à 21h30

Les deux photos ci-dessus (figure 132) ont été prises dans le sous-bois dans le sud du parc à 21h30. L'échelle des températures de surface s'étend de 23,6 à 17,1°C, avec les températures les plus élevées enregistrées au niveau du feuillage des arbres. Ces températures sont alors proches de la température de l'air mesurée à la station située sous les arbres (environ 24°C). La pelouse affiche des températures aux alentours de 20°C, mais semble légèrement plus élevée directement sous les arbres. Cette différence de température entre le sol situé sous le houppier et le reste de la pelouse se voit très clairement sur la figure 133 ci-dessous.

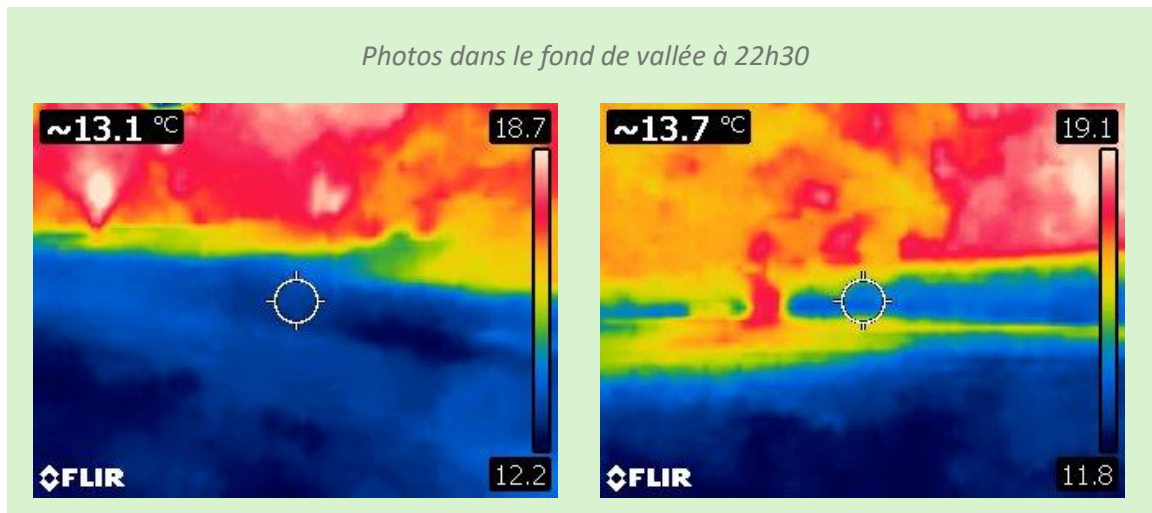


Figure 133: Photos prises dans le fond de vallée en direction du nord (gauche) et de l'ouest (droite)

Ces deux photos ont été prises à la fin de la période de mesure, vers 22h30, depuis le fond de vallée en direction du nord et en direction de la station du sous-bois (ouest). Alors que sous l'arbre, la température de surface atteint environ 15°C, le reste du sol affiche une température plus basse située aux alentours de 12°C. Il semble également que plus on se rapproche du fond de vallée, plus la température de surface est faible. La température du feuillage des arbres situés à l'arrière-plan s'élève à environ 19°C.

Finalement, les quatre photos ci-dessus (figure 134) ont été prises au lever du jour, vers 6h30 du matin. Durant la nuit, les températures de surface ont continué à baisser dans le parc. La température du sol est passée de 12°C à environ 10°C au niveau de la pelouse sur les versants et est même descendue jusqu'à 6,3°C dans le fond de vallée. La différence entre le fond de vallée et les versants est clairement visible, ce qui montre bien l'accumulation d'air frais dans la dépression topographique. Dès que l'on s'approche des arbres, les températures de surface sont plus élevées avec des valeurs aux alentours de 12°C, ce qui pourrait s'expliquer par l'influence de la présence des arbres sur le rayonnement terrestre. On peut donc en déduire que le refroidissement de la surface peut être entravé très localement par la présence d'un seul arbre.

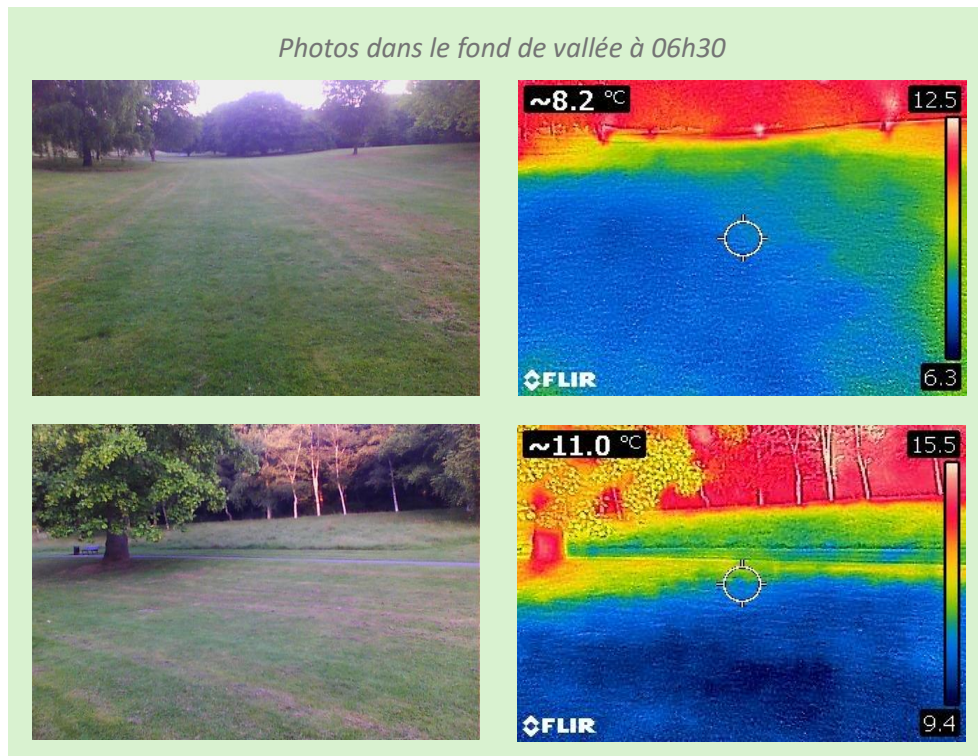


Figure 134: Photos prises dans le fond de vallée à la Vallée des Jardins à 06h30 en direction du nord (haut) et de l'ouest (bas)

Dans l'espace urbain, les températures de surface étaient généralement bien plus élevées que dans le parc de la Vallée des Jardins. A 21h30, les surfaces les plus sombres comme l'enrobé sur le trottoir ou encore le muret (figure 135) ont alors dépassé les 30°C. La végétation, au contraire, affiche des températures de surface aux alentours des 19°C. Entre 21h30 et 22h30, la température des surfaces minérales a globalement assez peu diminué (figure 136), à l'exception des surfaces sur la figure 137. Il pourrait s'agir de l'effet de l'air frais provenant de l'espace vert des Coteaux des Sablons (figure 126) visible à l'arrière-plan qui pourrait être capable d'accélérer la diminution des températures de surface à cet endroit.

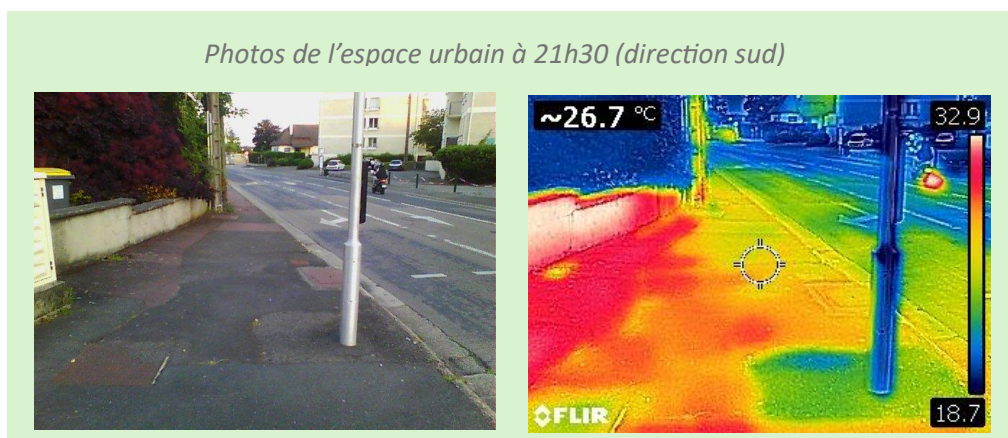


Figure 135: Photos de l'espace urbain à proximité de la Vallée des Jardins en direction du sud à 21h30



Figure 136: Photos de l'espace urbain à proximité de la Vallée des Jardins en direction du sud à 22h30



Figure 137: Photos de l'espace urbain à proximité de la Vallée des Jardins en direction de l'est à 21h30 (haut) et 22h30 (bas)

Les photos prises vers 06h20 du matin montrent la baisse des températures de surface pour l'espace urbain (figure 136). Au cours de la nuit, les surfaces minérales ont perdu environ 10°C et ont atteint des températures d'environ 18°C à 19°C. Néanmoins, ces températures de surface restent largement supérieures à celles mesurées dans l'espace vert. Ce refroidissement montre bien toute la chaleur qui a été restituée par les matériaux pendant la nuit.

Il est difficile de connaître exactement l'influence des températures de surface sur les températures de l'air. Bien qu'il y ait nécessairement un lien entre les deux, l'ampleur de cette influence est un sujet où les chercheurs ne sont pas forcément d'accord. Il serait donc intéressant d'effectuer des campagnes de mesures en mesurant la température à différentes hauteurs.

Photos de l'espace urbain à 06h20 (direction sud et est)



Figure 138: Photos de l'espace urbain à proximité de la Vallée des Jardins en direction du sud (haut) et de l'est (bas) à 06h20

Comparaison des résultats de la Vallée des Jardins avec les données du réseau IDEES

L'analyse en détail de la situation lors de la nuit du 18 au 19 juillet 2024 pour les trois stations mises en place à la Vallée des Jardins a confirmé l'hypothèse que cet espace constitue un réel point de fraîcheur local avec des écarts importants entre le parc et ses environs. En comparant ces données aux autres stations fixes de l'agglomération, la fraîcheur présente à la Vallée des Jardins devient d'autant plus impressionnante.

Le graphique ci-dessous (figure 139) montre l'évolution des températures pour les trois stations de la Vallée des Jardins ainsi que pour les 3 espaces verts identifiés auparavant comme des espaces frais par rapport au centre-ville. Les températures mesurées dans l'espace urbain à proximité de la Vallée des Jardins s'avèrent bien plus faibles qu'à la Tour Leroy. Cette situation peut être due au fait que le quartier de la Vallée des Jardins se trouve plus en altitude que le cœur de la ville, ce qui limite l'accumulation de l'air et donc l'effet cuvette. De plus, la station a été installée non loin du Coteaux des Sablons (figure 126), un autre espace vert marqué par de la végétation basse. Ce dernier pourrait éventuellement diffuser son air sur les environs, notamment jusqu'à l'endroit où la station a été posée.

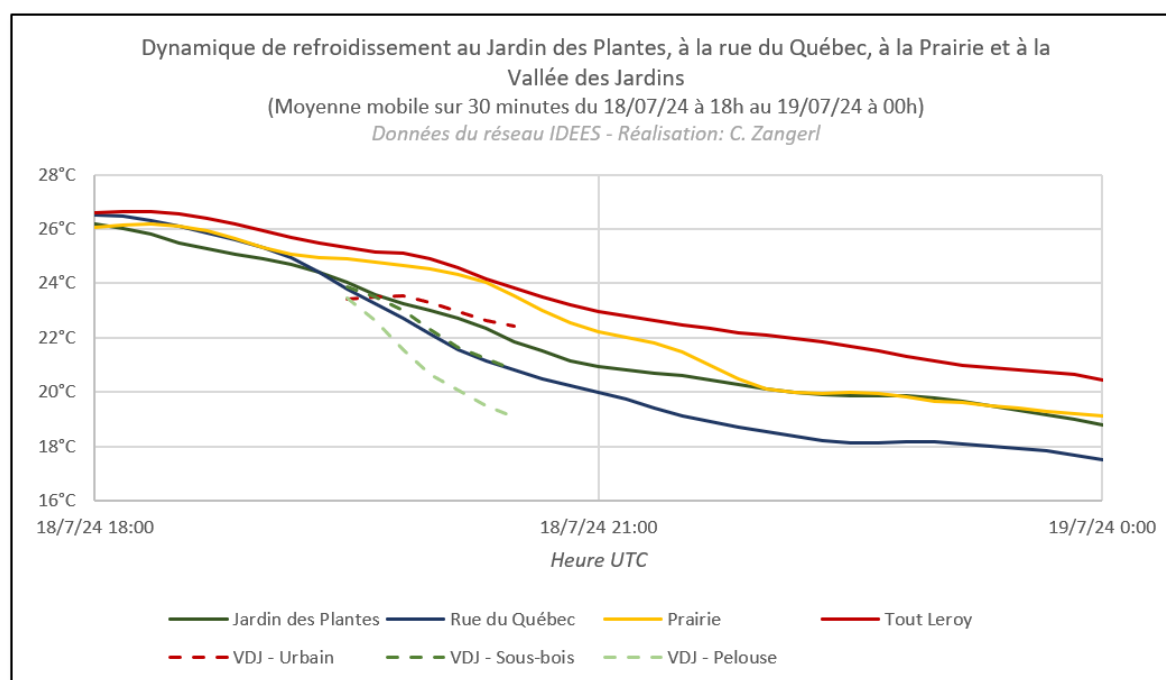


Figure 139: Graphique des températures au coucher du soleil à la Vallée des Jardins, à la Tour Leroy et aux trois IFU de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl

Pour de futures campagnes de mesure, il pourrait donc être intéressant de positionner plusieurs stations dans l'espace urbain à une distance de plus en plus grande des Coteaux du Sablons afin d'en apprendre plus sur la possible communication entre cet espace vert et ses environs. Au regard de la position topographique de la Vallée des Jardins, il est peu probable que la fraîcheur du parc se diffuse à l'est ou à l'ouest de ce dernier.

De plus, les températures à la Vallée des Jardins ont été aussi basses voire plus basses encore qu'à la rue du Québec, espace qui a été identifié comme particulièrement frais par rapport au centre-ville. La diminution des températures aux alentours du coucher de soleil y est particulièrement marquée pour le fond de vallée et montre des écarts importants entre la Vallée des Jardins et la Tour Leroy.

Afin d'avoir une vision plus détaillée de cette situation, les trois prochaines illustrations (figures 140 à 142) montrent les températures à la Vallée des Jardins et aux autres espaces verts de l'agglomération ainsi que l'écart observé par rapport à la Tour Leroy à 21h50, 22h30 et 06h50 du matin.

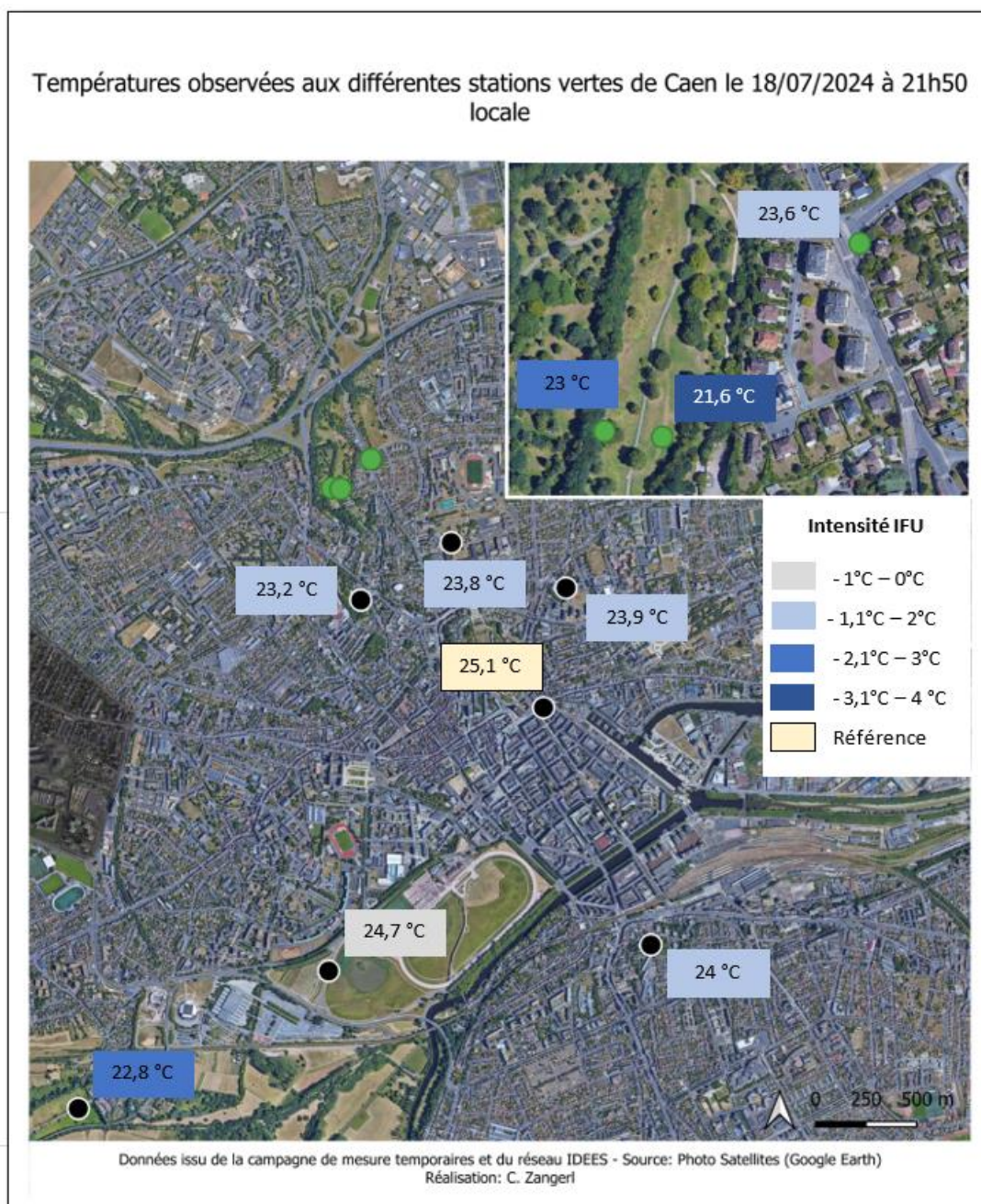


Figure 140: Carte des températures aux différentes stations de l'agglomération caennaise et des écarts avec la Tour Leroy le 18/07/2024 à 21h30 locale – Réalisation : C. Zangerl

A 21h50 (figure 140), les écarts sont déjà assez marqués par endroit. La température à la Tour Leroy s'élève alors à 25,1°C. Alors que les températures à Prairie sont encore très proches du centre-ville, les écarts ont commencé à se creuser à la rue du Québec (22,8°C). Le fond de vallée à la Vallée des Jardins s'avère bien plus frais encore, avec une différence de -3,5°C par rapport à la Tour Leroy. Au Jardin des Plantes, la température est très proche de celle relevée à ce moment-là dans le sous-bois à la Vallée des Jardins. Quant aux cimetières dormants et au campus, les écarts au centre-ville sont compris entre -1,1°C et -1,3°C et ne constituent donc pas des endroits particulièrement frais.

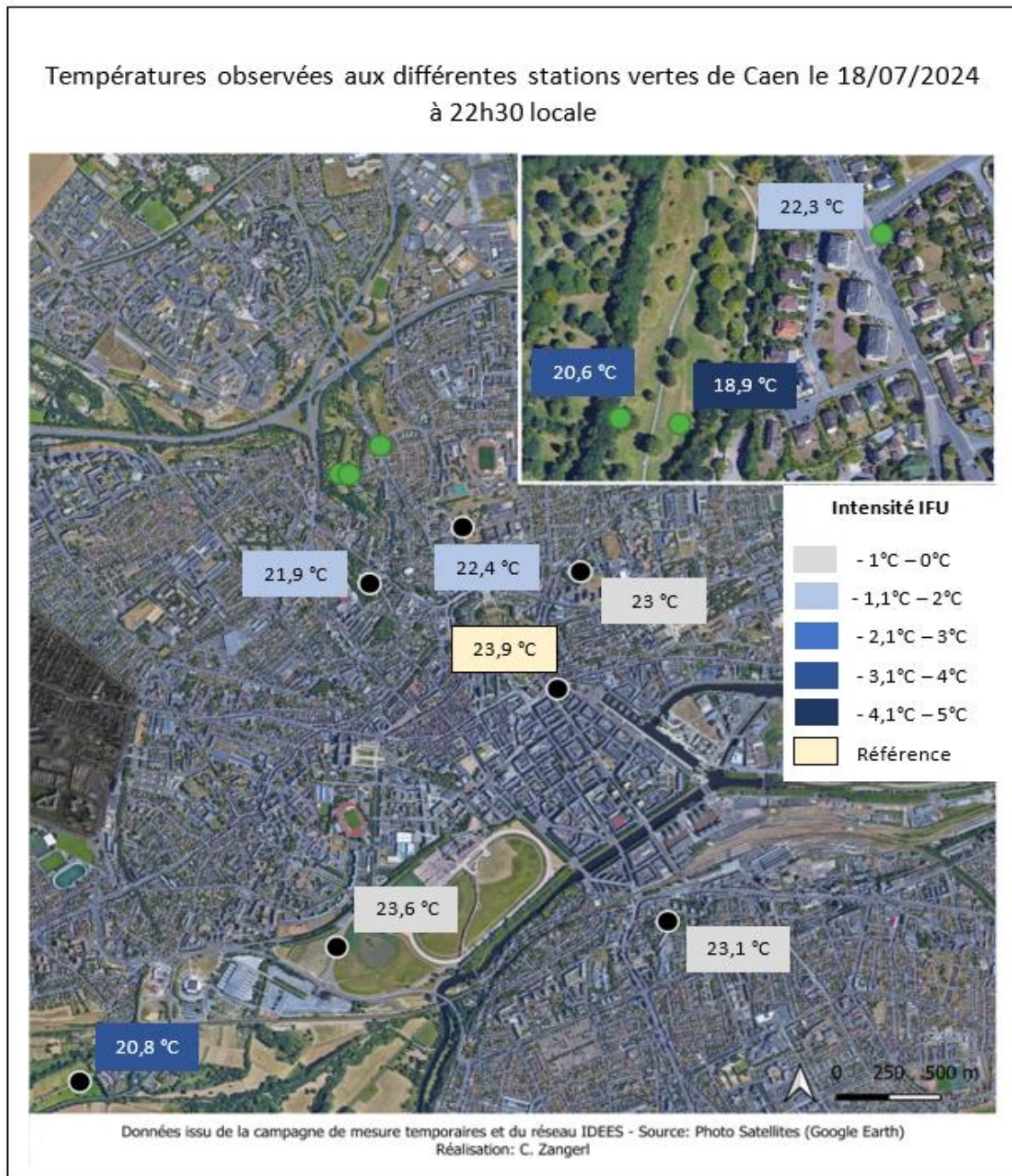


Figure 141: Carte des températures aux différentes stations de l'agglomération caennaise et des écarts avec la Tour Leroy le 18/07/2024 à 22h30 locale – Réalisation : C. Zangerl

La figure 141 montre la situation 40 minutes plus tard. Les écarts se sont alors creusés davantage. Alors que la rue du Québec affiche 20,8°C et une différence de -3,1°C par rapport au centre-ville, les températures à la Vallée des Jardins sont descendues à 18,9°C dans le fond de vallée, ce qui correspond à un écart de -5°C. Le sous-bois à la Vallée des Jardins s'est rafraîchi davantage que le Jardin des Plantes avec 20,6°C contre 21,9°C. Ce rafraîchissement plus rapide est également bien visible sur le graphique présenté auparavant (figure 139). La Prairie ne montre toujours pas de rafraîchissement important. Comme on peut le voir sur la figure 139, il faudra attendre encore quelques heures avant que le vent du Sud-Ouest apporte la fraîcheur depuis la rue du Québec.

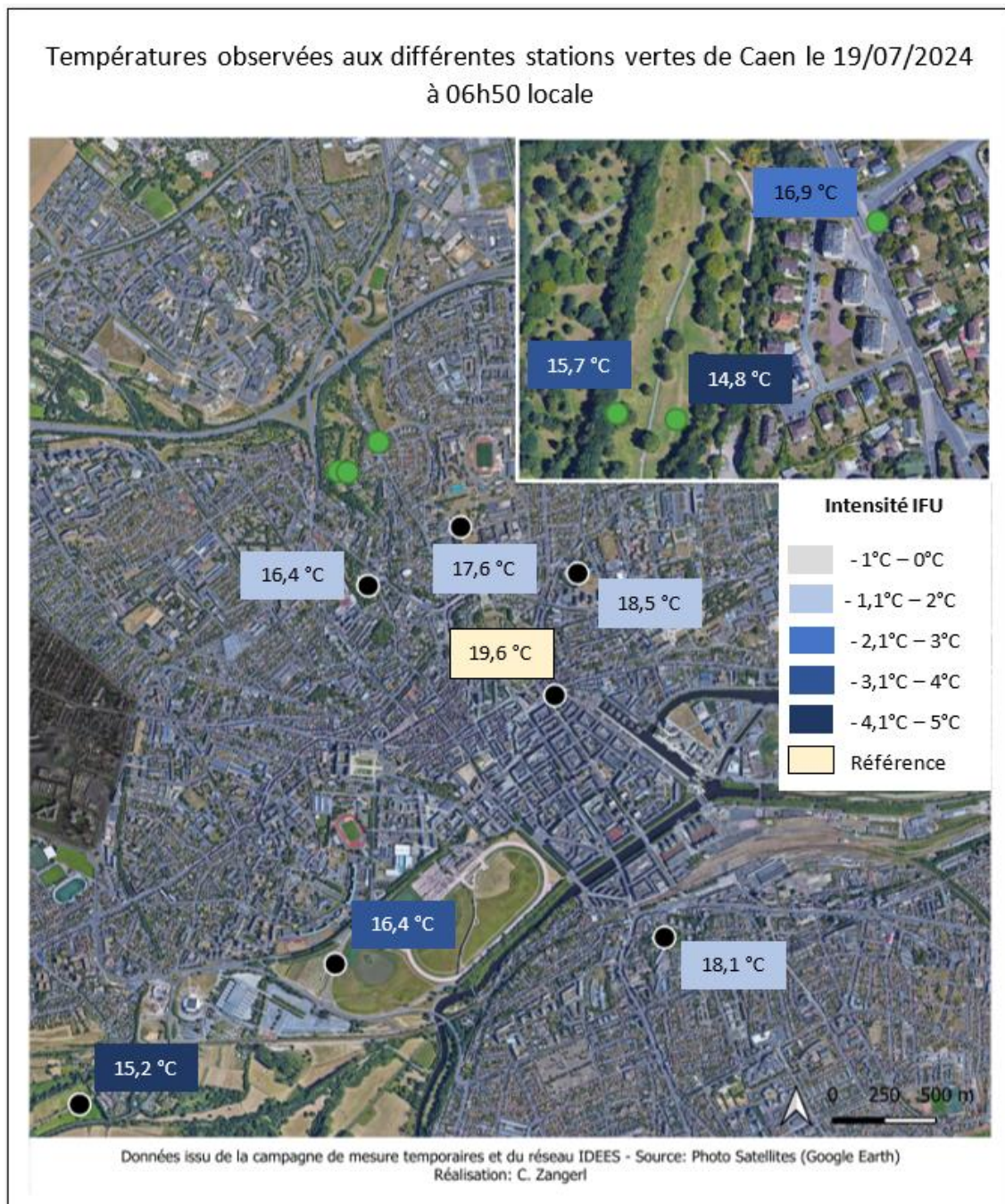


Figure 142: Carte des températures aux différentes stations de l'agglomération caennaise et des écarts avec la Tour Leroy le 18/07/2024 à 22h30 locale – Réalisation : C. Zangerl

A 06h50 du matin, les températures à la rue du Québec et à la Vallée des Jardins sont presque identiques, ce qui pourrait indiquer que l'ampleur du rafraîchissement est la même pour les deux espaces, mais que la différence entre les deux phases (cf. décrue et tarissement) est plus marquée à la Vallée des Jardins. Autrement dit, la diminution des températures est plus marquée au coucher du soleil à la Vallée des Jardins, mais cette diminution est moins forte sur le reste de la nuit. Les écarts entre le centre-ville et ces deux espaces verts sont alors assez conséquents (-4,4°C à la rue du Québec ; -4,8°C à la Vallée des Jardins). La fraîcheur a fini par arriver sur la Prairie vers 22h UTC (00h00 locale) et elle affiche à partir de ce moment-là les mêmes températures qu'au Jardin des Plantes. La fraîcheur observée dans l'espace urbain à proximité de la Vallée des Jardins, notamment en comparaison avec les températures au Campus 1, renforce l'hypothèse que l'espace vert des Coteaux des Sablons pourrait effectivement exercer une influence sur les températures observées à cet endroit.

Conclusion et discussion des résultats de la campagne à la Vallée des Jardins

Cette campagne de mesure a confirmé l'hypothèse d'un rafraîchissement important dans la Vallée des Jardins. Les écarts entre le fond de vallée et l'espace urbain peuvent être assez importants, avec notamment une différence de -3,4°C par rapport à l'espace urbain à proximité et une différence de -5°C avec la Tour Leroy (22h30 locale). Ces écarts importants sont le résultat d'une topographie et d'une composition végétale favorable à la formation d'air frais au coucher du soleil et durant la nuit.

Le fait que la Vallée des Jardins semble être aussi efficace, voire plus efficace encore que la rue du Québec, va à l'encontre de l'hypothèse du rôle de la taille de l'espace vert dans sa capacité à produire de l'air frais. Ceci montre que l'existence et l'intensité de l'IFU est une combinaison de plusieurs facteurs qui sont plus ou moins importants. Dans cet exemple, ce qui semble être bien plus déterminant que la taille est avant tout la topographie et la composition végétale de l'espace vert.

La topographie, bien qu'elle soit un atout pour la formation d'air frais, peut également entraver la circulation de l'air dans cet espace de l'amont vers l'aval. En effet, le talweg de la vallée est marqué par plusieurs dépressions qui pourraient mener à la formation d'un lac d'air froid et donc empêcher cet air frais de s'écouler et de se diffuser (cf. figures 47 et 48 à la page 66-67). En plus de la topographie, le sous-bois situé dans le sud du parc pourrait également empêcher l'air frais de pénétrer dans l'espace urbain par la rue des Jardins. Ainsi, on peut supposer que la Vallée des Jardins ne communique que très peu avec ses environs. Davantage de campagnes de mesure, notamment dans la rue des Jardiniers, ou encore des tests au fumigène pourrait renseigner davantage sur l'écoulement de l'air dans cet espace.

Bien que l'on ait pu observer un îlot de fraîcheur nocturne, les espaces verts sont beaucoup mis en avant comme point de fraîcheur afin d'échapper à la chaleur intense en journée. Les stations météorologiques du réseau IDEES ont montré que les espaces verts ne sont a priori pas particulièrement plus frais que l'espace urbain en journée. On peut alors se demander s'il en est de même pour la Vallée des Jardins. Lors d'une campagne test ayant eu lieu le 17 juillet 2024, les températures à 18h30 à la Vallée des Jardins dans le fond de vallée (20,9°C) étaient légèrement inférieures à celles observées dans l'espace urbain adjacent (21,5°) et à la Tour Leroy (21,7°C). Au regard de ces chiffres et des données des autres stations, on peut donc penser que l'écart en journée est assez faible en général. D'autres campagnes de mesure, voire l'installation d'une station fixe, donneraient plus de détail sur la situation diurne et la dynamique thermique de cet espace en général.

Il existe des biais qui doivent être pris en compte dans l'analyse de cette campagne de mesure. Premièrement, comme il a été mentionné plus tôt, il est possible que la station installée dans l'espace urbain à proximité de la Vallée des Jardins profite de l'air frais provenant des Coteaux des Sablons, ce qui pourrait diminuer la température par rapport à un autre espace urbain, situé par exemple à l'ouest du parc. Mais en même temps, cela constitue une preuve de la capacité des espaces verts ouverts à diffuser leur fraîcheur sur les espaces urbains à proximité. Lors des prochaines campagnes de mesure, d'autres endroits doivent être testés afin de trouver un emplacement plus représentatif de l'espace urbain.

De plus, les températures à la Vallée des Jardins ont été mesurées à une hauteur de 1,50m alors que les stations fixes sont installées à 3m de la surface du sol. Il est donc possible que l'influence des températures des surfaces soit plus importante pour les stations à la Vallée des Jardins. Selon la hauteur de la couche d'air frais au sol, les températures mesurées peuvent varier d'un espace vert à l'autre. La différence entre la Vallée des Jardins et la rue du Québec au coucher du soleil pourrait alors éventuellement s'expliquer en partie par le fait que la première station se situait déjà dans la couche d'air froide alors que cette dernière n'a pas encore atteint la station à la rue du Québec.

3.2.4) Campagne de mesure à la Colline aux Oiseaux et à la forêt d'Ifs le 29 juillet 2024

Suite à une demande d'autorisation auprès de M. Aurélien Régné, directeur des espaces verts de la ville de Caen, deux stations météorologiques ont été installées au parc de la Colline aux Oiseaux pendant la nuit du 29 au 30 juillet 2024. L'objectif de cette campagne de mesure était de répondre aux interrogations concernant la formation d'air frais dans ce parc et le rôle de la topographie sur cette dernière.

Le matériel utilisé était le même que pour la Vallée des Jardins. Une des deux stations a été installée en haut de la colline, l'autre a été placée en contre-bas à l'est de la colline, à proximité de l'étang (figure 143).



Figure 143: Emplacement des stations météo lors de la campagne de mesure du 29 au 30 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Les conditions météorologiques lors de la journée du 29 juillet et de la nuit qui a suivi ont été assez favorables, avec des températures maximales aux alentours des 32°C et un ciel très dégagé en journée. La vitesse moyenne du vent à la Prairie en journée était d'environ 15 km/h (E) et d'environ 6 km/h (O/SO) la nuit. A part quelques légers passages de nuages de haute altitude, la nuit a été claire.

Les stations ont enregistré les données à un intervalle de 5 minutes entre 18h30 et 08h30 du lendemain matin. Au regard de la durée de la campagne de mesure, il a été décidé d'augmenter l'intervalle de mesure par rapport à celui de la vallée des Jardins. L'avantage de cette campagne par rapport à la précédente est qu'elle permet d'observer la dynamique thermique de cet espace vert sur une nuit complète. Le parc de Colline aux Oiseaux étant fermé au public durant la nuit, il n'est pas nécessaire de surveiller les stations en permanence, ce qui facilite la mise en place de ce genre de campagne. Par précaution, elles ont néanmoins été attachées avec un antivol à vélo.

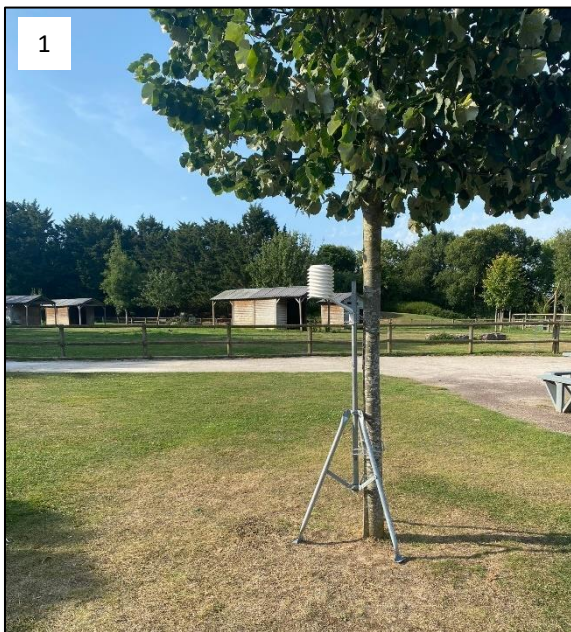


Figure 144: Station météo installée en haut de la colline -
Photo : G. Carlier



Figure 145: Station météo installée en contre-bas de la colline -
Photo : C. Zangerl

Les résultats de cette campagne de mesure ont été assez étonnants (figure 146). Ils montrent que les températures enregistrées à la Colline aux Oiseaux ont été légèrement supérieures à celles de la Tour Leroy sur presque l'intégralité de la période de mesure, que ce soit en haut de la colline ou en contre-bas. Il est assez difficile de trouver une explication fiable à cette situation, surtout en n'ayant qu'une seule nuit de données. Il est fort probable que la topographie exerce une influence sur les températures. Etant située sur le plateau au nord de la ville, la Colline aux Oiseaux ne profite probablement pas de l'effet de la topographie de la vallée de l'Orne comme la rue du Québec ou encore la Prairie située en fond de vallée.

De plus, il est possible que la position en hauteur favorise le brassage de l'air et empêche alors la formation d'air frais sur place. D'autres campagnes de mesure sont alors nécessaires pour mieux comprendre le fonctionnement thermique de la Colline aux Oiseaux.

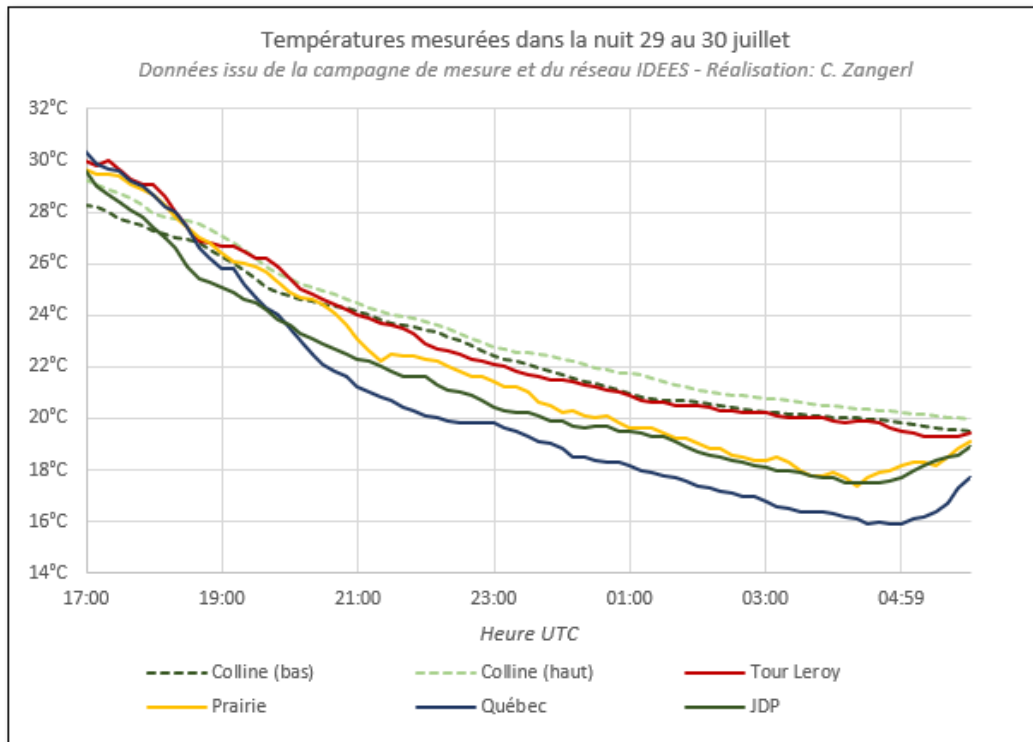


Figure 146: Températures à la Colline aux Oiseaux, à la Tour Leroy et aux 3 IFU de l'agglomération dans la nuit du 29 au 30 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Néanmoins, à l'inverse des autres stations vertes, les températures en fin de journée semblent être moins élevées à la Colline aux Oiseaux qu'aux autres stations figurant sur le graphique. Il a alors été décidé de retourner à la Colline aux Oiseaux le 1^{er} août entre 14h30 et 15h45 afin d'observer une éventuelle fraîcheur en journée. Une station météo a alors été installée en haut de la colline, au même endroit que lors de la nuit du 29 au 30 juillet, et a enregistré les données à un intervalle de 30 secondes.

Sur la figure 147, on peut voir que les différences de températures entre les espaces verts de l'agglomération et le centre-ville lors de la journée du 1^{er} août sont infimes. Le haut de la colline ne se distingue donc pas des autres espaces de la ville en ce qui concerne les températures journalières. Néanmoins, ayant ressenti une certaine fraîcheur sous les arbres en descendant de la colline, un deuxième lieu a fait l'objet d'un enregistrement sur 10 minutes, entre 15h35 et 15h45 (point gris sur la figure 147). Ce dernier s'est révélé être plus frais de presque 2°C par rapport au haut de la colline et de 1,5°C par rapport au centre-ville.

Cela questionne donc à nouveau le rôle des arbres dans les espaces verts. Le point étant situé sur le versant et étant assez bien ventilé, il est possible que les arbres aient un réel effet rafraichissant à cet endroit-là. Il serait donc intéressant de reproduire des campagnes de mesure à plusieurs endroits dans ce parc pour mieux comprendre le rôle de la végétation et de la topographie à la Colline aux Oiseaux, notamment en journée.

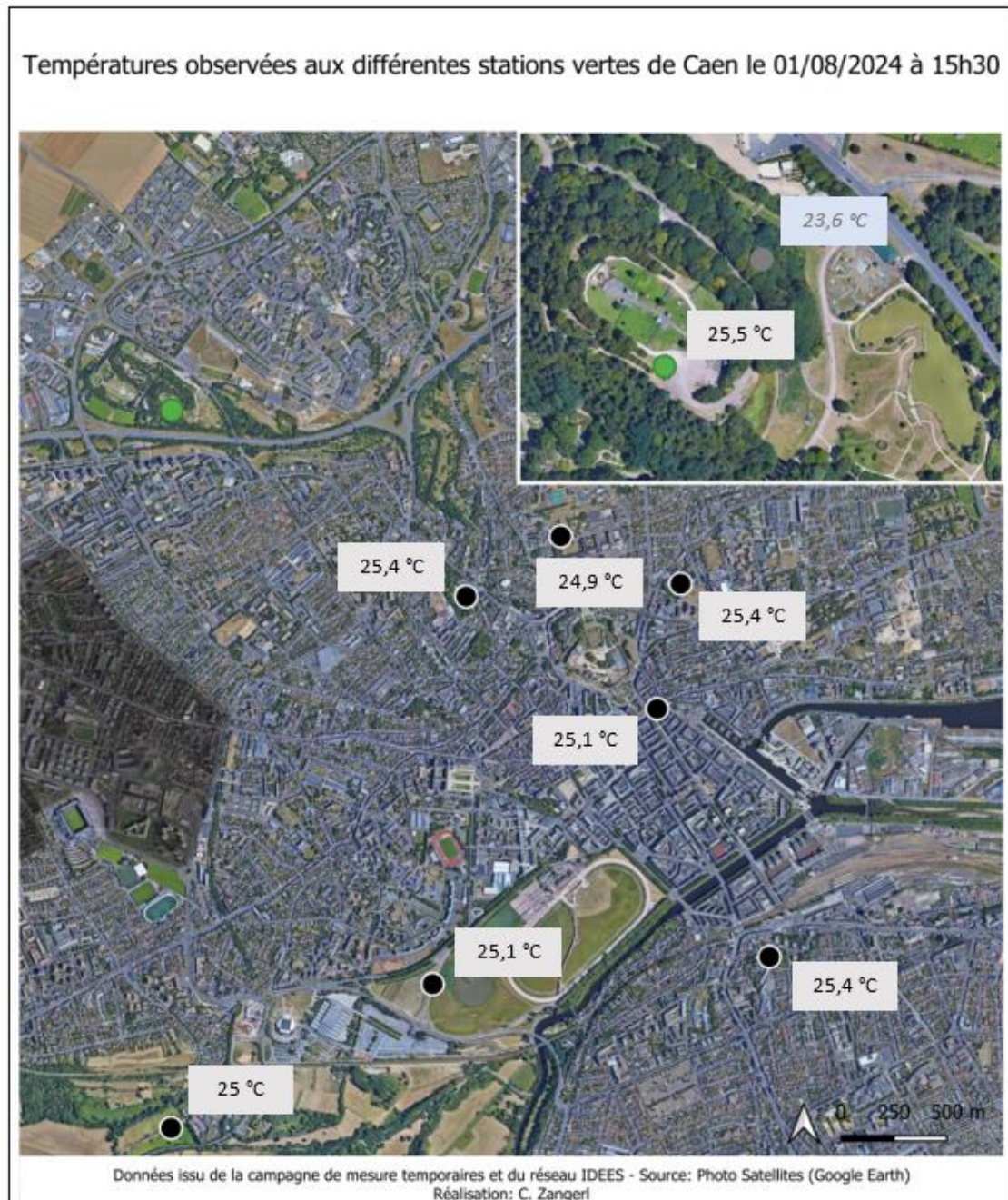


Figure 147: Carte des températures dans l'agglomération caennaise le 1er août 2024 à 15h30 - Réalisation : C. Zangerl

Au soir du 29 juillet 2024, deux autres stations ont été installées à la forêt d'Ifs, dans le sud de l'agglomération caennaise. Comme mentionné plus haut (page 74), l'intérêt des mesures à la forêt d'Ifs résulte des interrogations sur la capacité des espaces boisés d'une grande superficie à rester frais lors d'épisodes de chaleur et de voir si leur dynamique thermique diffère des petits espaces boisés comme les cimetières dormants. En sachant que la forêt d'Ifs se situe sur le plateau sud et que la topographie est assez plane, cette dernière ne devrait pas avoir d'influence sur les températures.



Figure 148: Carte de l'emplacement des stations météo lors de la campagne de mesure du 29 juillet à la forêt d'Ifs - Réalisation : C. Zangerl

Cette campagne a été effectuée entre 21h10 et 22h avec des enregistrements à un intervalle de 30s. La première station a été placée au cœur de la forêt (figure 149), la deuxième à l'extérieur afin de mesurer les températures dans l'espace urbain à proximité du parc (figure 150).



Figure 150: Photo de la station située dans la forêt d'Ifs -
Photo : C. Zangerl



Figure 149: Photo de la station située dans l'espace urbain
- Photo : G. Carlier

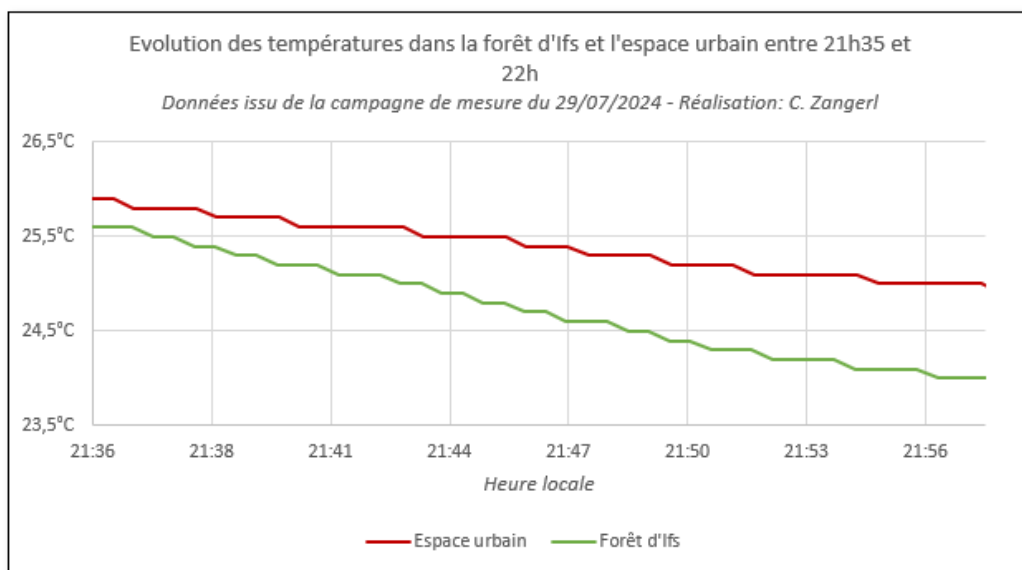


Figure 151: Graphique des températures mesurées lors de la campagne à la forêt d'Ifs le soir du 29 juillet 2024
Réalisation : C. Zangerl

Sur le graphique ci-dessus, on peut voir qu'il fait plus frais dans la forêt d'Ifs que dans l'espace urbain à proximité, avec une différence d'environ 1°C à 22h (figure 151). Les écarts entre les deux points se creusent entre 21h30 et 22h, ce qui indique également qu'a priori, la forêt se rafraichit plus rapidement que l'espace urbain.

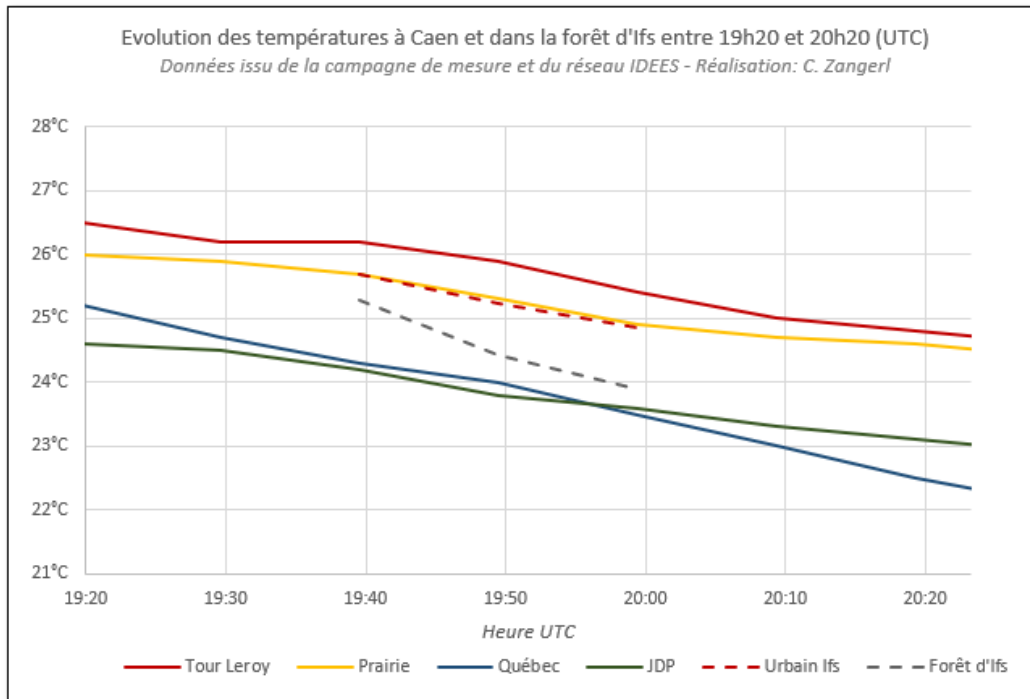


Figure 152: Graphique des températures mesurées lors de la campagne à la forêt d'Iffs le soir du 29 juillet 2024 à l'échelle de l'agglomération - Réalisation : C. Zangerl

En comparant les températures d'Iffs avec celles des autres stations vertes de Caen, on peut voir que les températures mesurées dans la forêt se situent entre celles de la Prairie et du Jardin des Plantes, avec néanmoins une diminution des températures plus rapide que pour les autres espaces verts. A la fin de la période de mesure, vers 20h UTC, la forêt d'Iffs affiche des températures proches de celles du Jardin des Plantes et donc inférieures à celles des deux cimetières dormants (figure 153). Ceci indique que la taille de l'espace vert densément boisé pourrait effectivement exercer une influence sur les dynamiques thermiques.

L'espace urbain à Iffs est légèrement plus frais que la Tour Leroy et se situe au même niveau que la Prairie. La différence entre l'espace urbain résidentiel et l'espace urbain très minéral a déjà été repérée lors de la campagne à la Vallée des Jardins. Dans ce cas précis, on a pu supposer que l'espace vert des Coteaux des Sablons a pu influencer la température mesurée dans le quartier résidentiel adjacent. La station de référence pour l'espace urbain à Iffs étant située à proximité de la forêt, on ne peut pas exclure que ce parc diffuse sa fraîcheur sur les environs. Comme à la Vallée des Jardins, il sera intéressant à l'avenir de procéder à des campagnes de mesures le long d'un transect afin d'identifier si et jusqu'à quelle distance l'air provenant de la forêt d'Iffs peut pénétrer dans l'espace urbain.

En comparant les données enregistrées à Iffs avec celles des autres stations vertes du réseau IDEES, on remarque que les écarts ont été généralement assez faibles à 22h locale (20h UTC) et ne se sont creusés qu'au fur et à mesure de la nuit pour atteindre leur maximum qu'au lever du jour.

Concernant la forêt d'Ifs, on peut tout de même relever deux points intéressants. Premièrement, la température y est inférieure à celle des cimetières dormants de presque 1°C. Cette différence de température est le reflet soit d'un air plus frais à Ifs sur l'intégralité de la journée, résultant alors d'un microclimat diurne à l'intérieur de la forêt, soit d'un rafraîchissement plus rapide que dans les petits espaces boisés intra-urbains à la tombée de la nuit. En sachant qu'une végétation dense a plutôt tendance à freiner le rafraîchissement, la première théorie semble alors plus probable.

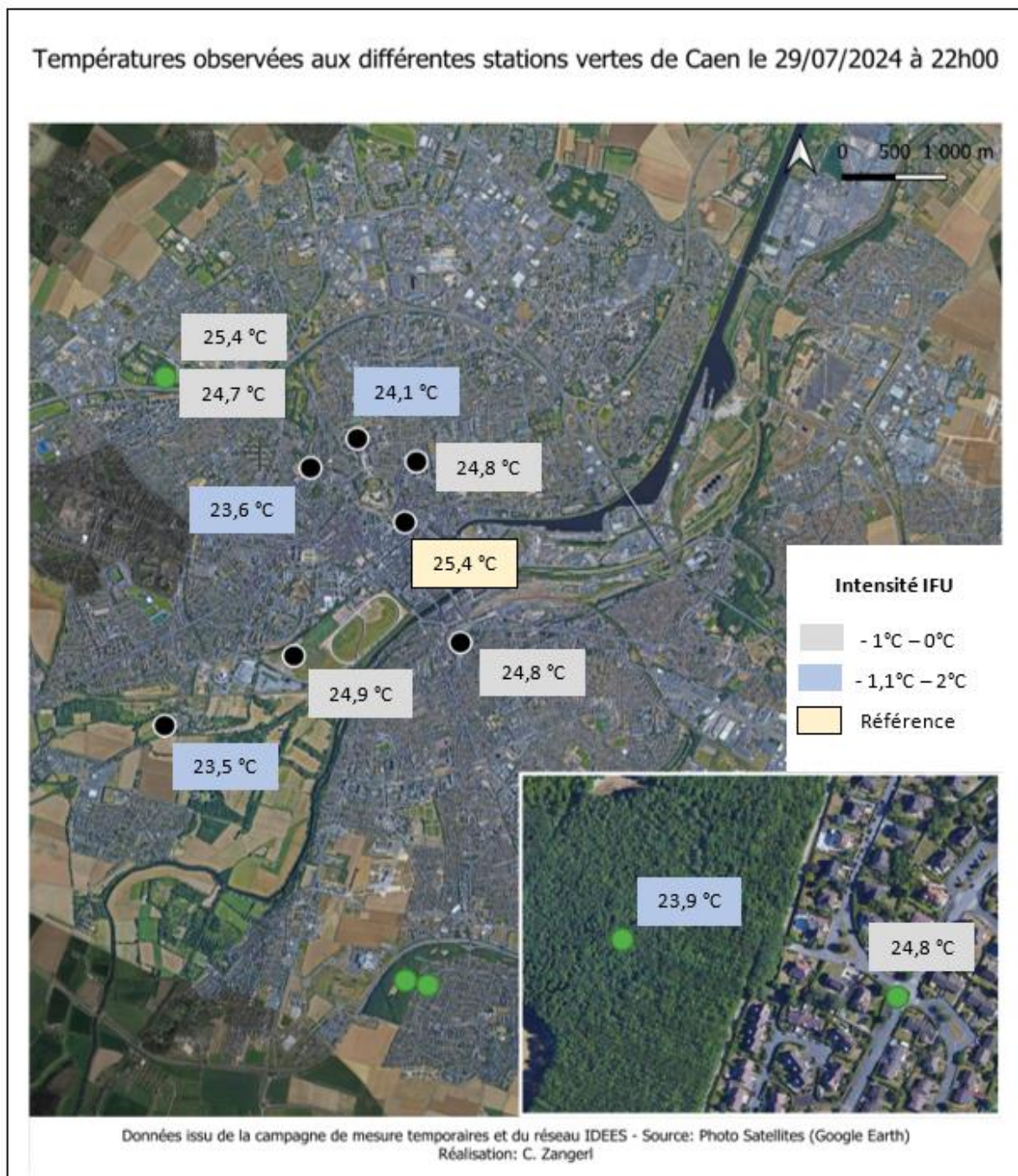


Figure 153: Carte des températures obeservées à l'échelle de l'agglomération le 29/07/2024 à 22h00 locale - Réalisation : C. Zangerl

Deuxièmement, la température dans la forêt d'Ifs est proche de celle de la rue du Québec et du Jardin des Plantes. En multipliant les campagnes de mesure, notamment en enregistrant des séries de données sur toute une nuit, il serait intéressant de comparer les dynamiques thermiques de la forêt d'Ifs avec celles des autres espaces verts de la ville, notamment de la rue du Québec, afin de voir à quel point un grand espace boisé est capable de produire de la fraîcheur comparée aux espaces verts ouverts sur le ciel.

Conclusion et discussion des résultats de la campagne à la Colline aux Oiseaux et à la forêt d'Ifs

Le comportement thermique de la Colline aux Oiseaux lors de la campagne du 29 au 30 juillet a été assez étonnant. Bien que la composition végétale des deux points choisis soit plutôt marquée par une végétation basse, cette dernière ne semble pas contribuer au rafraîchissement de l'air durant la nuit. Cette situation renforce alors le rôle probable de la topographie dans la formation d'air frais. Puisque cet espace vert se situe en hauteur, il est possiblement plus soumis au vent et donc au brassage de l'air et n'est pas propice à la stagnation de l'air frais sur place.

En journée, les mesures effectuées le 1er août ont montré que la Colline aux Oiseaux peut constituer à la fois un espace chaud et un espace frais selon l'endroit où l'on se trouve dans le parc. Alors qu'en haut de la Colline, les températures à 15h30 ont dépassé celles à la Tour Leroy, elles sont bien plus fraîches sous les arbres avec une différence d'1,5°C par rapport au centre-ville. Ces résultats remettent alors en avant l'importance des arbres qui, jusque-là, du moins dans les autres espaces verts de la ville, n'ont pas montré d'efficacité particulière pour fournir de la fraîcheur.

A l'avenir, cet espace vert sera particulièrement intéressant à instrumenter et donc à étudier de plus près avec un plus grand nombre de stations, notamment au niveau de la roseraie qui présente une topographie en creux et une végétation basse.

Ces résultats doivent néanmoins être interprétés avec précaution. Afin de sécuriser les stations à l'aide d'un antivol à vélo, il a été nécessaire de les placer au pied d'un arbre ou d'un buisson. L'arbre est certes de petite taille, mais la proximité avec la végétation a peut-être pu modifier très localement les températures par rapport aux espaces plus éloignés de cette dernière. De plus, comme pour la campagne à la Vallée des Jardins, les stations enregistraient la température à une hauteur d'1,50m du sol, induisant également un biais par rapport aux données enregistrées aux stations fixes placées à une hauteur de 3m. Cela est également vrai pour la campagne réalisée le 29 juillet au soir à la forêt d'Ifs.

Le cas de la forêt d'Ifs a montré que cet espace boisé d'une grande superficie présente probablement une dynamique thermique différente de celle des petits espaces boisés intra-urbains comme les cimetières dormants, avec une fraîcheur plus marquée au coucher de soleil à la forêt d'Ifs. De plus, la différence de température entre la forêt et l'espace urbain à proximité montre la possible existence d'un îlot de fraîcheur dans cet espace vert, qui pourrait même se montrer efficace en journée s'il s'avère qu'il existe effectivement une sorte de microclimat lié à la taille conséquente du parc. La durée assez courte de la campagne de mesure ne permet pas de faire de conclusion fiable sur la dynamique thermique au cours de la nuit. Pour une analyse plus fine et correcte de cet espace vert, il sera donc nécessaire de multiplier les campagnes de mesure sur un temps plus long.

3.2.5) Campagne de mesure au parc du Biez à Mondeville le 1^{er} août 2024

Le parc du Biez à Mondeville est un espace vert boisé d'une superficie importante, traversé par le cours d'eau du même nom et situé au pied du plateau de Colombelles. Il se situe donc dans le fond de la vallée de l'Orne et présente une topographie assez plane (figures 55 et 56 à la page 73).

Une campagne de mesure y a eu lieu le soir du 1er août entre 21h10 et 22h20. Comme pour les autres campagnes de mesure, les logger ont enregistré les données à un intervalle de 30s et ont été placés à 3 endroits différents. La première station ayant comme objectif de représenter l'espace urbain a été placée sur le plateau de Colombelles. Les deux autres ont été installées dans le parc, dont une au niveau des jardins familiaux et ouvriers constituant alors un espace ouvert sur ciel et une autre dans la partie boisée à proximité du cours d'eau.

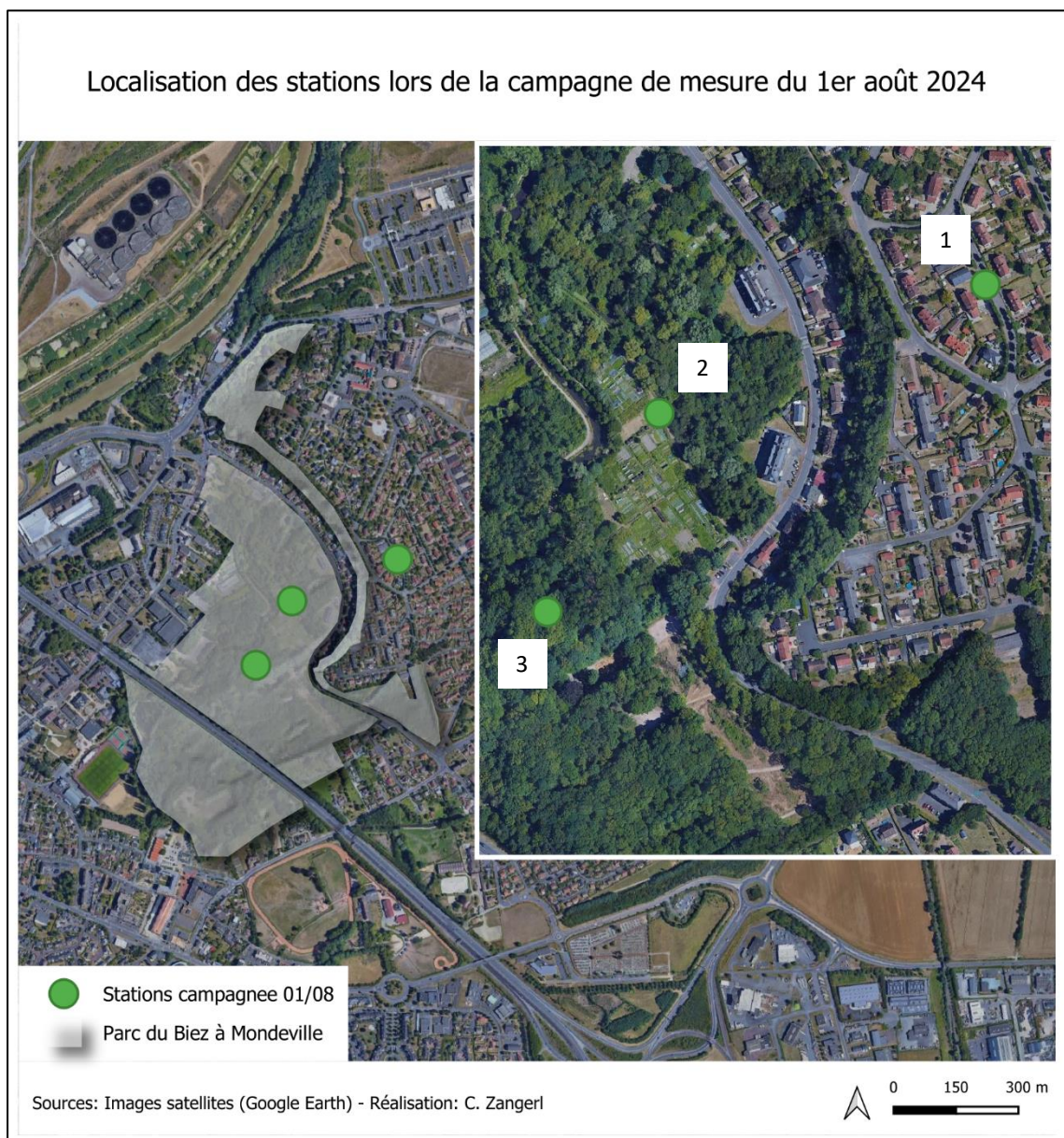


Figure 154: Carte de l'emplacement des stations météo lors de la campagne de mesure du 1er août 2024 au parc du Biez à Mondeville - Réalisation : C. Zangerl



Figure 157: Station située dans l'espace urbain - Photo : G. Carlier



Figure 156: Photo de la station située aux jardins familiaux - Photo : M. Bonnet



Figure 155: Photo de la station située dans la forêt - Photo : C. Zangerl

Les données entre 21h40 et 22h15 (figure 158), montrent des dynamiques de rafraîchissement différentes pour les 3 stations. En effet, comme on peut l'attendre, l'espace urbain présente les températures les plus élevées et s'y élèvent à 20,7°C à la fin de la campagne. A l'inverse, la température descend rapidement aux jardins familiaux et atteint 19,2°C à 22h15, ce qui correspond à un écart d'environ 1,5°C entre l'espace urbain et l'espace vert ouvert. La station située dans la forêt montre un rafraîchissement bien moins marqué et des écarts avec l'espace urbain qui semblent diminuer au cours de la campagne de mesure. Il est donc possible que la forêt du parc du Biez, comme la forêt d'Iffs, soit plus fraîche en journée, mais se refroidisse assez lentement à la tombée de la nuit comparée aux espaces verts ouverts comme les jardins familiaux.

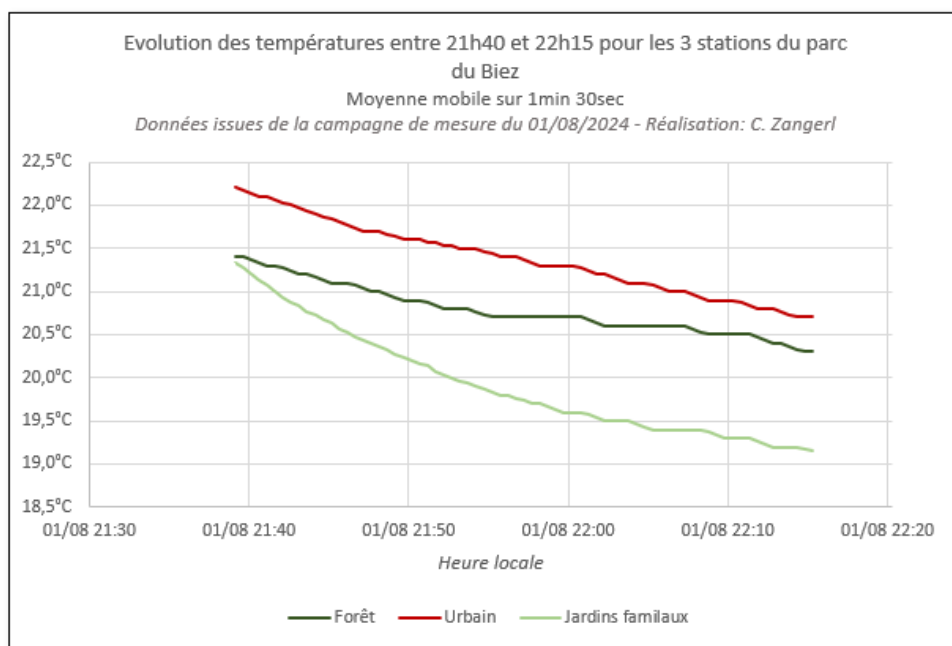


Figure 158: Graphique des températures lors de la campagne au parc du Biez à Mondeville - Réalisation : C. Zangerl

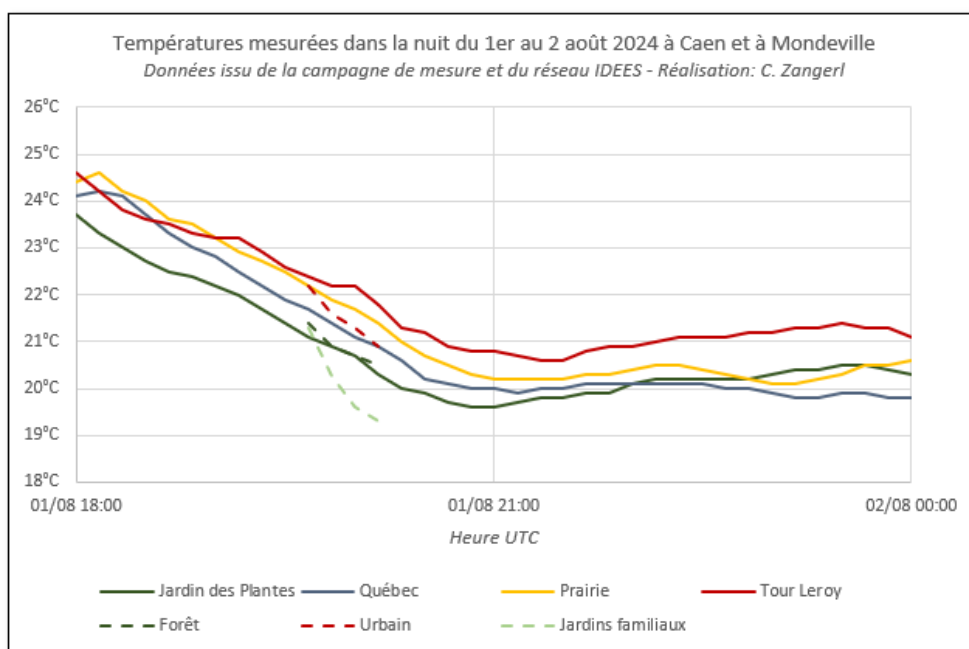


Figure 159: Graphique des températures à l'échelle de l'agglomération dans la nuit du 1er au 2 août 2024 - Réalisation : C. Zangerl

Quand on compare les résultats de la campagne de mesure aux températures mesurées par les stations du réseau IDEES à la Prairie, à la rue du Québec, au Jardin des Plantes ainsi qu'à la Tour Leroy, plusieurs points semblent intéressants à évoquer (figure 159). Premièrement, la station urbaine à proximité du parc présente des températures inférieures à celles de la Tour Leroy, ce qui a également été le cas pour les campagnes de mesure menées sur d'autres sites. La température de départ est moins élevée et le rafraîchissement y semble plus rapide, ce qui s'explique probablement par une part de surface imperméable moins importante dans les quartiers résidentiels sur le plateau de Colombelles qu'à la Tour Leroy. La station urbaine ayant été installée sur le plateau et donc en hauteur par rapport à la forêt, il est peu probable que la fraîcheur relative de l'espace urbain s'explique par l'arrivée d'air frais depuis le parc. Pour les prochaines campagnes de mesure au parc du Biez, il serait intéressant de placer une station urbaine à l'ouest du parc dans la commune de Mondeville. Située dans le fond de vallée et présentant plus de surfaces imperméables, il est possible que les températures soient différentes de celles en haut du plateau.

Deuxièmement, les températures observées dans la partie boisée du parc du Biez semblent suivre la dynamique du Jardin des Plantes, avec un écart de température à 22h de -1,5°C par rapport à la Tour Leroy, mais un écart assez faible par rapport à l'espace urbain adjacent (-0,6°C). Pendant la première partie de la nuit du 1^{er} au 2 août, le Jardin des Plantes présente d'ailleurs des températures moins élevées qu'à la rue du Québec qui est pourtant généralement l'espace vert le plus frais de l'agglomération. Le rafraîchissement semble également s'arrêter entre 21h et 00h UTC, ce qui pourrait s'expliquer par la formation de nuages pendant la nuit bloquant le rayonnement terrestre.

Les écarts observés aux jardins ouvriers situés dans le parc sont quant à eux plus importants et atteignent $-1,7^{\circ}\text{C}$ par rapport à l'espace urbain à proximité et $-2,6^{\circ}\text{C}$ par rapport à la Tour Leroy. L'évolution des températures sur ce site montre un rafraîchissement très rapide comparé aux autres stations, ce qui peut s'expliquer, comme dans d'autres cas présentés auparavant, par une végétation assez basse et une topographie légèrement en creux, mais pourrait également être accentuée par la présence de l'eau dans le fossé qui longe le chemin sur lequel a été installée la station. Ce rafraîchissement bien plus important que dans les autres espaces verts doit néanmoins être nuancé puisque la différence de hauteur à laquelle on mesure les températures n'est pas la même pour les jardins familiaux et les stations du réseau IDEES.

Comme pour les autres stations, il serait intéressant d'étudier l'évolution des températures sur une nuit complète grâce à une station fixe installée à même hauteur que le reste du réseau, rendant les données alors plus comparables qu'avec une campagne de mesure temporaire. Néanmoins, les dynamiques observées au parc du Biez rendent cet espace intéressant à étudier de plus près dans le cadre des recherches autour des îlots de fraîcheur.

Sur la carte montrant les températures de toutes les stations vertes fixes du réseau IDEES à l'échelle de l'agglomération à 22h (figure 160), on peut voir que la station située dans la forêt du parc du Biez est, tout comme l'a été la forêt d'Ifs, plus fraîche d'environ 1°C que les cimetières dormants. La température y est alors la même qu'au Jardin des Plantes et légèrement inférieure à celle de la rue du Québec ou encore du Campus. Ce constat permet alors de renforcer l'hypothèse d'une dynamique thermique différente entre un espace boisé de petite taille et une forêt d'une superficie plus conséquente. Pour confirmer cette hypothèse, il sera nécessaire de procéder à d'autres campagnes de mesure et de mesurer la température à la même hauteur dans tous les espaces verts.

La station des jardins familiaux du parc du Biez est celle qui enregistre les températures les plus basses de l'agglomération, mais il faut rester prudent face à l'interprétation de ces résultats pour les mêmes raisons qu'évoquées juste avant.

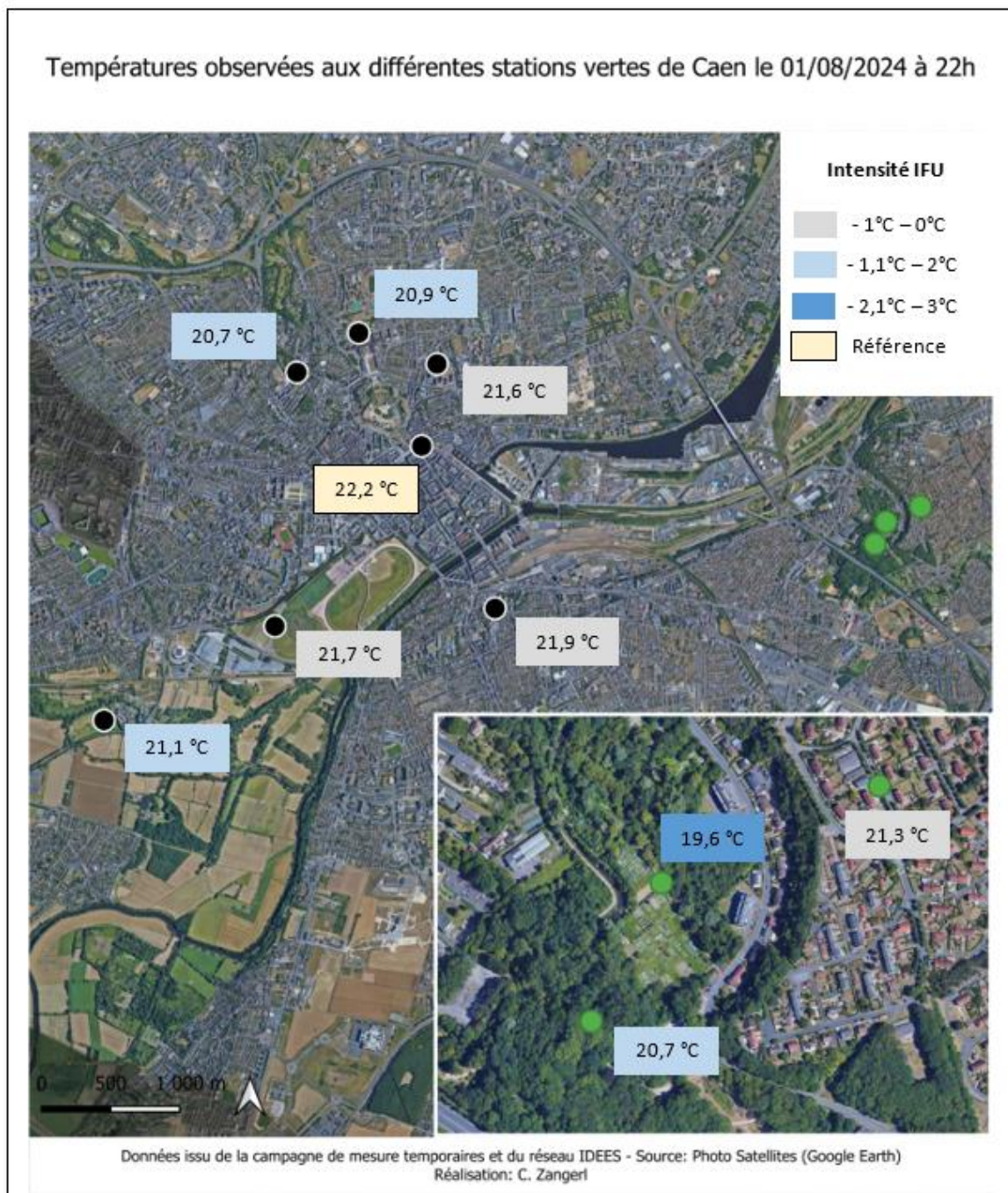


Figure 160: Carte des températures à l'échelle de l'agglomération le 1er août 2024 à 22h locale - Réalisation : C. Zangerl

Conclusion et discussion

L'exemple du parc du Biez a montré encore une fois la capacité des espaces verts ouverts sur le ciel et situés dans une dépression topographique à se rafraichir rapidement à la tombée de la nuit. Les données enregistrées à la station située aux jardins familiaux ont révélé une dynamique de rafraichissement rapide et une température de 19,6°C à 22h, ce qui correspond à un écart de - 2,6°C avec la Tour Leroy alors que les autres stations vertes ne dépassent pas un écart de -1,5°C.

Les températures relevées dans l'espace boisé du parc du Biez ont permis de faire les mêmes constats qu'à la forêt d'Ifs. En effet, la température dans la forêt est inférieure d'environ 1°C par rapport à l'espace urbain à proximité et les dynamiques thermiques se rapprochent de ce que l'on peut observer au Jardin des Plantes. Ainsi, les données récoltées par les différentes campagnes de mesure tendent à confirmer l'hypothèse selon laquelle les espaces boisés d'une superficie plus importante présentent des fonctionnements différents des espaces boisés de petite taille. D'autres campagnes de mesures sont néanmoins nécessaires pour récolter plus d'éléments.

Concernant les écarts entre les stations du parc du Biez et l'espace urbain à proximité, il est important de noter que la topographie pourrait jouer un rôle important sur les températures observées. Alors que la station urbaine a été placée dans l'espace urbain sur le plateau, le parc du Biez se situe au pied de l'escarpement qui sépare en partie Colombelles de la commune de Mondeville. Il est donc possible que les différences de températures ne résultent pas uniquement de la différence d'occupation du sol, mais également de la différence entre le plateau et le fond de vallée.

3.3) Conclusion générale sur les îlots de fraîcheur

Les données récoltées par les stations météo fixes ainsi que les différentes campagnes de mesures permettent de tirer un certain nombre de conclusions sur les îlots de fraîcheur de l'agglomération caennaise.

Premièrement, certains espaces verts ont montré des différences très faibles avec le centre-ville, représenté par la station de la Tour Leroy. Il s'agit en premier lieu des deux cimetières dormants de St. Jean, situé sur la rive droite de l'Orne, et de St. Pierre, situé au nord du centre-ville et à l'est de l'Université de Caen. En journée, les températures sont globalement très proches de la Tour Leroy et les écarts ne semblent pas se creuser particulièrement la nuit, même lorsque les conditions météorologiques sont favorables à la mise en place des ICU et des IFU. Ces écarts ne dépassent alors que très rarement les -2°C , ce qui ne permet pas d'affirmer qu'il s'agisse ici d'îlots de fraîcheur, de jour comme de nuit. Néanmoins, cela montre l'importance dans l'aménagement urbain de prendre en compte l'observation des températures dans ce genre d'espace lorsque l'on souhaite créer des petits espaces boisés à l'intérieur de la ville dans l'optique d'apporter de la fraîcheur en ville. En effet, bien que les arbres permettent de créer de l'ombrage, une végétation arborée trop dense provoque le blocage de l'air au sol et empêche alors la formation d'air frais, notamment durant la nuit.

Il semblerait que la superficie des parcs boisés joue un rôle dans la dynamique thermique observée dans ces espaces. Comme l'ont montré les campagnes de mesures mises en place à la forêt d'Ifs et au parc du Biez à Mondeville, un espace boisé d'une grande superficie pourrait, à l'inverse des cimetières dormants, être capable de procurer de la fraîcheur pendant la nuit voire pendant la journée. Néanmoins, d'autres campagnes de mesures sur des périodes plus longues, par exemple sur un cycle complet de 24h, permettraient d'en savoir davantage sur le fonctionnement thermique de ces espaces.

En plus du type de végétation qui est dominant dans un espace vert, sa position dans la ville et face aux vents ainsi que la topographie des lieux semblent avoir un effet important sur l'existence ou non d'un îlot de fraîcheur.

Au Jardin des Plantes, qui combine des espaces verts en partie ouverts sur le ciel et une topographie en creux, les températures mesurées y sont souvent bien en dessous de celles du centre-ville, avec des écarts négatifs pouvant atteindre plus de 4°C sur une grande partie de la nuit. Le Jardin des Plantes est néanmoins assez confiné, avec une végétation arborée et des murs d'une certaine hauteur qui empêchent probablement cet espace vert de communiquer avec l'espace urbain à proximité. De plus, bien qu'il s'agisse d'un réel point de fraîcheur nocturne, on observe régulièrement une légère surchauffe par rapport à la Tour Leroy. Ainsi, l'aménagement végétal et urbain du Jardin des

Plantes en combinaison avec une topographie en creux mène à une sorte de microclimat marqué en journée par un effet cuvette où s'accumule l'air chaud et la nuit par un effet trou à froid très localisé.

Un autre espace vert très efficace pour la formation d'air frais et qui peut donc être qualifié d'îlot de fraîcheur est le parc de la Vallée des Jardins. Cet espace vert qui suit le talweg du vallon rejoignant le Jardin des Plantes a montré des différences de températures encore plus importantes avec le centre-ville que le Jardin des Plantes ainsi qu'un refroidissement de l'air particulièrement rapide à la tombée de la nuit. Les écarts maximaux observés lors de la campagne de mesure s'élèvent à $-3,4^{\circ}\text{C}$ par rapport à l'espace urbain adjacent et à -5°C par rapport à la Tour Leroy (22h30 locale). De plus, les photos thermiques prises sur les différents sites de mesure ont montré des différences de températures de surface intéressantes. La pelouse située dans le fond de vallée montre alors un rafraîchissement très important. L'influence de la présence de feuillage au-dessus de la pelouse sur les températures de surface a également pu être démontrée. Cela pose la question de la proportion de l'influence de la température de surface sur les températures de l'air. Davantage de campagnes de mesure restent néanmoins nécessaires, notamment pour savoir à quel point cet air frais circule à l'intérieur du parc et à quel point il pénètre dans l'espace urbain situé dans la continuité du vallon.

L'étude de certains espaces verts caennais a mené à davantage d'interrogations concernant leur fonctionnement thermique. Le Campus 1 de l'Université de Caen, par exemple, possède des caractéristiques végétales (végétation basse et ouverte sur le ciel) qui devraient a priori être favorables à la formation d'air frais et donc à la mise en place d'un îlot de fraîcheur. Les données récoltées par la station météo du réseau IDEES ont néanmoins montré que les écarts nocturnes ne sont pas particulièrement élevés, mais que les températures peuvent y être moins élevées que dans les autres espaces verts en journée. Cette fraîcheur journalière pourrait s'expliquer par la brise de mer qui apporte de la fraîcheur depuis le nord et qui pénètre jusqu'au Campus 1. En tournant au sud-ouest à la tombée de la nuit, l'air frais pourrait laisser place à l'air amené depuis la ville, empêchant alors le creusement des écarts dans cet espace. Néanmoins, la position de la station météo n'étant pas optimale (proximité des bâtiments), il serait nécessaire de procéder à davantage de mesures ou de déplacer la station afin de mieux comprendre les dynamiques thermiques du Campus 1. La topographie en pente pourrait effectivement être intéressante pour la circulation de l'air frais par effet de gravité et ainsi constituer un couloir d'air frais vers la ville.

La campagne à la Colline aux Oiseaux a également apporté des données assez inattendues puisque les températures nocturnes y sont sensiblement les mêmes qu'au centre-ville. Il semble difficile de trouver une explication à cette situation, si ce n'est que l'influence de la topographie des lieux sur les températures. Alors que les espaces verts efficaces en termes de formation d'air frais sont

situés dans des dépressions topographiques ou dans le fond de vallée de l'Orne, la Colline aux Oiseaux se situe sur le plateau nord et surplombe en partie les environs. Les températures relevées en journées permettent néanmoins de penser qu'on pourrait y observer localement des températures bien inférieures à celles du centre-ville, lui conférant alors un rôle important comme point de fraîcheur en journée.

Au-delà d'un rôle de point de fraîcheur dans la ville, l'ensemble que constituent la Prairie et les grands espaces verts en amont se sont montrés particulièrement intéressants dans l'étude de la formation et de la circulation de l'air depuis la campagne vers la ville. Les écarts de températures des stations de la Prairie et de la rue Québec par rapport au centre-ville sont généralement assez importants et dépassent facilement les -3°C à -4°C de différence et peuvent atteindre jusqu'à -6°C à la rue du Québec lorsque les conditions sont optimales. Il est difficile d'estimer la part d'air frais qui est formée sur place et la part d'air frais qui est apportée depuis l'amont. La Prairie semble être facilement influencée par les différents espaces qui l'entourent. Selon la direction du vent, sa température va alors être proche du centre-ville lorsque le vent souffle du nord, mais va profiter de l'air frais arrivant depuis la rue du Québec dès que le vent tourne au sud-ouest. La Prairie semble alors plus être un espace tampon où l'air se diffuse d'un milieu à un autre et moins un espace producteur d'air frais, comme cela semble être le cas à la rue du Québec. Dans un projet d'agrandissement du réseau de stations fixes, il serait alors intéressant d'installer des stations plus en amont dans la vallée de l'Orne et de l'Odon, afin de mieux comprendre l'ensemble du fonctionnement de ce couloir de circulation de l'air.

3.4) Discussion des résultats, de la méthode appliquée et ouverture sur la suite de la recherche

Comme mentionné pour chaque campagne de mesure, les résultats présentés ici ainsi que les conclusions apportées sont discutables. Les différentes hypothèses émises doivent être complétées par d'autres campagnes de mesures temporaires et sur des temps plus longs que ceux des campagnes effectuées dans le cadre de ce mémoire. La mise en place de ces campagnes de mesure se heurte souvent au nombre de personnes nécessaires pour leur réalisation et à la disponibilité de ces dernières.

3.4.1) Difficultés rencontrées lors des campagnes de mesure temporaires

Comme expliqué en entrée de ce chapitre, il a été décidé d'effectuer principalement des campagnes de mesures temporaires fixes, c'est-à-dire l'installation de stations de mesures à un endroit précis sur une certaine durée. Les stations météorologiques étant fixées sur des trépieds, il est donc nécessaire qu'une personne les surveille en permanence afin d'éviter toute dégradation et tout vol de matériel. Au cours des différentes campagnes, le maximum de personnes réunies pour une campagne de mesure était alors de trois, ne permettant d'installer que 3 stations météorologiques à la fois. De plus, l'heure et la durée d'enregistrement demandent une certaine disponibilité et une motivation des participants à rester tard le soir ou à se lever très tôt le matin, ce qui ne participe pas à trouver beaucoup de personnes volontaires pour ce genre de campagnes. A ce titre, j'aimerais profiter encore une fois pour remercier Estéban, Martin et Guillaume pour leur aide particulièrement précieuse et qui m'ont ainsi permis de mener à bien les différentes campagnes de mesure.

Afin de permettre la mise en place de campagnes de mesure sur une plus longue durée, il serait nécessaire de trouver une solution, à l'image des stations fixes placées sur du mobilier urbain et à une hauteur de 3m, pour ne pas avoir à surveiller constamment les stations, ce qui permettrait d'être bien plus flexible sur le nombre de personnes nécessaires pour leur mise en place.

Les campagnes de mesures menées dans le cadre de ce mémoire ont été effectuées à la tombée de la nuit pour plusieurs raisons. Premièrement, des contraintes personnelles n'ont pas permis, à l'exception de la campagne à la Colline aux Oiseaux, de procéder à des campagnes de mesures en journée. De plus, en sachant que les écarts sont généralement faibles en journée, il a été décidé de se concentrer sur la fin de la journée et la nuit. En choisissant le moment du coucher de soleil, il était possible d'étudier la dynamique de refroidissement de chaque espace, ce qui peut permettre d'en déduire sa capacité à se refroidir durant la nuit. N'ayant eu à disposition qu'une personne par station, il a été préféré pour des questions de sécurité d'arrêter la campagne de mesure lorsque la nuit était tombée. En étant plus nombreux, il aurait été possible de continuer la campagne de mesure sur une plus longue période pendant la nuit, ce qui aurait permis d'en savoir davantage sur les différentes phases de refroidissement des espaces verts.

3.4.2) Campagnes de mesures complémentaires à celles effectuées dans le cadre de ce mémoire

En plus de l'étude de la différence des températures entre l'espace vert en question et ses environs, d'autres campagnes peuvent avoir comme objectif d'étudier plus en profondeur la diffusion de l'air frais depuis l'espace vert vers l'espace urbain. On pourrait alors imaginer la mise en place d'un transect qui mesure la température à un intervalle régulier en s'éloignant du parc en prenant en compte la direction du vent et/ou la topographie. Par exemple, on pourrait envisager une campagne de mesure partant de la Prairie et suivant l'axe de l'Orne, ou encore l'axe de l'avenue Albert Sorel qui pourraient constituer des axes de circulation de l'air frais vers la ville. Un autre exemple mentionné auparavant serait de suivre le talweg de la Vallée des Jardins le long de la rue des Jardins voire jusqu'au niveau de la place de la Mare afin de voir si l'air frais produit à la Vallée des Jardins ou au Jardin des Plantes arrive à circuler et à pénétrer jusque dans le centre-ville. Lorsque l'on manque de personnes disponibles pour les campagnes de mesures, il serait également possible d'envisager des campagnes de mesures mobiles, que ce soit à pied ou à vélo. Néanmoins, il reste toujours le problème de l'évolution des températures sur les différents points sur la période de la campagne. C'est pourquoi, à mon avis, il serait mieux de privilégier les campagnes de mesure fixes.

Dans l'optique d'étudier la circulation de l'air, il serait également imaginable de procéder à des mesures au fumigène. Cette technique est souvent utilisée pour identifier l'étanchéité des bâtiments (figure 161) ou des réseaux comme les réseaux d'assainissement dans les villes, mais pourrait également s'adapter pour identifier la circulation de l'air dans les différents espaces verts. Cela nécessite néanmoins un type de temps très calme pour éviter que le vent synoptique vienne effacer ces courants d'air frais très légers. La mise en place de ce genre d'expérimentation permettrait par exemple de savoir si la topographie de la Vallée des Jardins, marquée par une succession de dépressions, entrave ou non la circulation de l'air.



Figure 161: Test à la fumée effectué lors de travaux de vérification avant le désamiantage d'un bâtiment - Source : (DI Environnement, 2024)

Il reste également la question de l'influence de la hauteur de la station de mesure sur les températures mesurées, et donc, par extension, de l'influence de la température de surface sur la température de l'air. Afin de répondre à cette question, on pourrait envisager de mettre en place des campagnes qui mesureraient la température de l'air à plusieurs hauteurs, par exemple à 10cm, 50 cm, 1,50m et 3m. Il serait alors nécessaire de fixer plusieurs loggers sous-abris le long d'un mat et de mesurer la température à plusieurs endroits présentant des types d'occupation du sol différents. Cela permettrait non seulement de connaître l'influence des températures de surface sur les températures de l'air, mais également la différence de températures entre 1,50m et 3m. Ainsi, les données enregistrées lors des campagnes de mesure temporaires pourraient être validées ou faire l'objet de corrections si l'on observe un gradient régulier.

3.4.3) Installations de stations météo fixes dans le cadre de l'agrandissement du réseau IDEES



Figure 162: Carte montrant les emplacements proposés pour l'installation de nouvelles stations fixes dans le cadre de l'étude des îlots de fraîcheurs - Réalisation : C. Zangerl

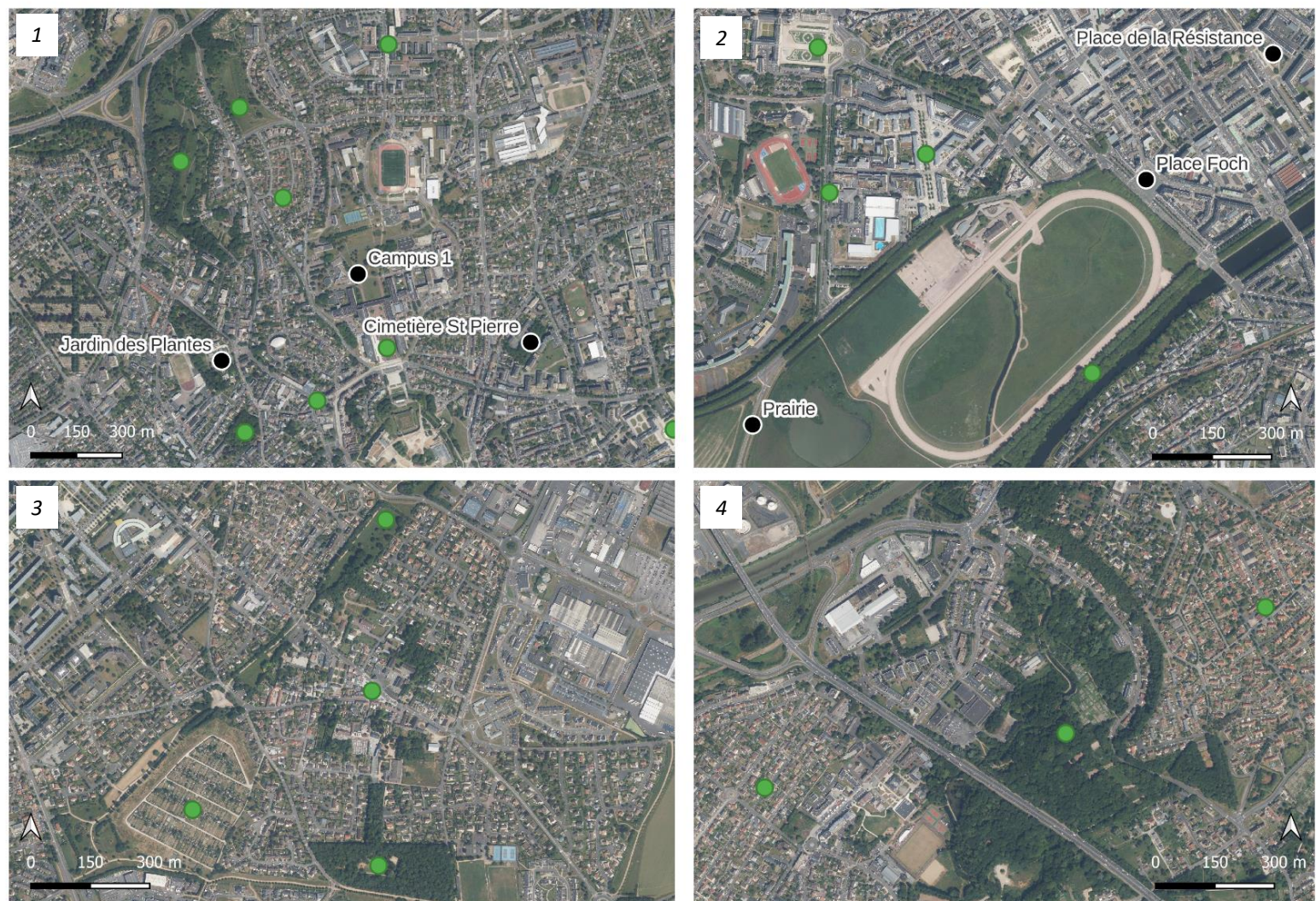
L'agrandissement du réseau IDEES par une vingtaine de stations permettra de procéder à des analyses bien plus détaillées des espaces verts et du climat urbain caennais en général. Plusieurs sites pourraient alors être envisagés pour être équipés d'une station météorologique permanente.

En premier lieu, on peut mentionner l'ensemble de la Vallée des Jardins, comprenant de l'amont vers l'aval la Colline aux Oiseaux, les Jardins du souvenir, le parc de la Vallée des Jardins et le Jardin des Plantes jusqu'à la Place de la Mare (figures 162 et 163 (1)). Concrètement, il s'agirait d'en installer une dans les différents espaces verts du vallon, mais également dans deux espaces minéraux. La première serait située dans le quartier résidentiel entre le parc de la Vallée des Jardins et le Campus 1 et aurait comme objectif de représenter les températures « urbaines » à proximité du parc ainsi que de donner plus de détail sur une possible influence du Coteaux des Sablons sur le quartier. L'autre station urbaine pourrait être installée à la Place de la Mare. Ceci permettrait d'en savoir plus sur la possible diffusion de l'air frais et sa circulation le long des pentes vers le centre-ville.

Le Campus 1 mériterait également d'être instrumenté davantage. On pourrait alors imaginer l'installation de deux stations supplémentaires dans l'axe nord-sud, dont une au nord du Campus 1 dans le quartier du Calvaire St. Pierre et une autre à la limite sud, entre le bâtiment A et le bâtiment B (figure 163 (1)). La station dans l'espace urbain permettrait alors d'étudier si le vent du nord apporte également de la fraîcheur dans les espaces plus minéralisés et pourrait également constituer, avec la station située entre la Vallée des Jardins et le campus, une station de référence urbaine proche de l'espace vert. L'autre station pourrait fournir des informations sur la circulation de l'air du campus vers la ville. Finalement, on pourrait également envisager de déplacer la station météorologique existante pour la placer plus au centre de l'espace et diminuer ainsi l'influence potentielle de la proximité des bâtiments sur les températures.

Comme mentionné auparavant, la diffusion de l'air depuis la Prairie vers les espaces urbains adjacents serait intéressante à étudier de plus près. Dans cet objectif, l'installation de stations météo sur les axes Prairie-Hôtel de Ville et Prairie-Espace Gardin, qui sont tous les deux orientés nord-sud mais qui ne présentent pas les mêmes caractéristiques d'occupation du sol, pourrait fournir des données non seulement sur la diffusion de l'air, mais également sur l'îlot de chaleur potentiellement présent dans ces espaces (figure 163 (2)). De plus, l'installation d'une station sur la promenade qui longe l'Orne permettrait de vérifier si les températures y sont différentes de celles observées à la station de la Prairie déjà en place, notamment grâce à l'effet d'ombrage et à la présence de l'eau. A une échelle plus large, l'étude du système des vallées de l'Orne et de l'Odon demanderait l'installation de stations météo fixes en amont de la rue du Québec.

Propositions d'emplacements des nouvelles stations météo dans le cadre de l'agrandissement du réseau IDEES



C. Zangerl, M1 GAED Environnement, UFR SEGGAT, Unicaen - Source: Réseau IDEES, Photographies aériennes (IGN)

- Nouvelles stations
- Stations existantes (juillet 2024)

Figure 163: Détail des emplacements des nouvelles stations météo fixes pour l'étude des IFU - Réalisation : C. Zangerl

Dans la continuité de l'axe de l'Orne, il serait également intéressant d'instrumenter la partie de la vallée située entre le centre-ville et la mer. Cet axe présente un certain intérêt pour plusieurs raisons. Premièrement, la Presqu'île de Caen se situant à l'aval du centre-ville est un espace particulièrement convoité par les urbanistes et a fait l'objet dans le passé de différents projets de construction comme la bibliothèque Alexis de Tocqueville ou encore le nouveau tribunal judiciaire. Sur la partie la plus proche du centre-ville, la part de surfaces imperméables est très élevée. Il serait donc intéressant de voir si la proximité de l'eau peut contrer l'effet d'accumulation de la chaleur par les surfaces minérales. De plus, le canal de Caen la Mer pourrait faire office de couloir de circulation de l'air depuis la mer vers l'agglomération caennaise lorsque le vent provient du nord, comme cela est souvent le cas en journée grâce à la brise de mer.

Trois autres ensembles d'espace vert, situés plus loin du centre-ville, mériteraient d'être étudiés de plus près. Il s'agit de la forêt d'Iffs et du parc du Biez (figure 163 (4)), qui par les campagnes de mesures ont montré des dynamiques thermiques intéressantes à étudier, et d'un ensemble d'espaces verts situés à Cormelles-le-Royal (figure 163 (3)). Plus précisément, il s'agit du bois de Cormelles-le-Royal, des Jardins ouvriers et de la coulée verte qui traverse le quartier résidentiel. Ces trois espaces verts sont reliés par des chemins aménagés et végétalisés. Chacun de ces espaces possède des caractéristiques intéressantes à étudier. Comme la forêt d'Iffs et le parc du Biez, le bois représente un espace vert densément boisé mais d'une superficie importante, ce qui pourrait lui permettre de présenter un microclimat plus frais qu'en ville. De plus, sa forme est marquée par une percée dans l'espace urbain au nord du parc, ce qui pourrait s'avérer particulièrement intéressant dans le cadre de l'étude de la diffusion de l'air. Les jardins ouvriers représentent des espaces verts ouverts d'une taille conséquente, ce qui pourrait permettre un refroidissement de l'air rapide au coucher du soleil. De plus, la topographie légèrement en pente pourrait faire circuler l'air frais depuis les jardins ouvriers vers le nord-ouest et ainsi le faire entrer dans la coulée verte. Cette dernière est située dans un petit vallon qui traverse le quartier résidentiel du Sud-Ouest vers le Nord-Est. En présentant une topographie légèrement en creux et un type de végétation comprenant de la végétation arborée et de la végétation basse ouverte sur le ciel, on peut émettre l'hypothèse d'un possible îlot de fraîcheur à cet endroit. Pour vérifier cette hypothèse, il est nécessaire d'installer une station dans l'espace urbain adjacent.

L'installation de ces stations météo fixes permettrait d'améliorer grandement les connaissances sur les dynamiques thermiques des espaces verts et donc sur l'existence et l'intensité des îlots de fraîcheur dans l'agglomération caennaise. Au regard de l'échelle fine à laquelle sont étudiées les IFU, l'observation en continue des données demanderait un grand nombre de stations météo à disposition. Ainsi, les campagnes de mesures temporaires restent une bonne alternative pour l'étude des espaces verts.

3.4.4) Etude des trames « transparentes » sous forme de bassin versant

En sachant que l'air est un fluide tout comme l'eau, on peut également imaginer d'adapter certaines méthodes utilisées en hydrologie pour étudier la circulation de l'air dans la ville. Dans la partie sur l'analyse des températures dans la nuit du 23 au 24 juin 2024, le parallèle entre la courbe de tarissement des cours d'eau et la dynamique de refroidissement de l'air a déjà été évoqué. De la même manière, tout comme les cours d'eau, il serait également intéressant d'étudier la circulation de l'air à l'aide des différents bassins versants topographiques.

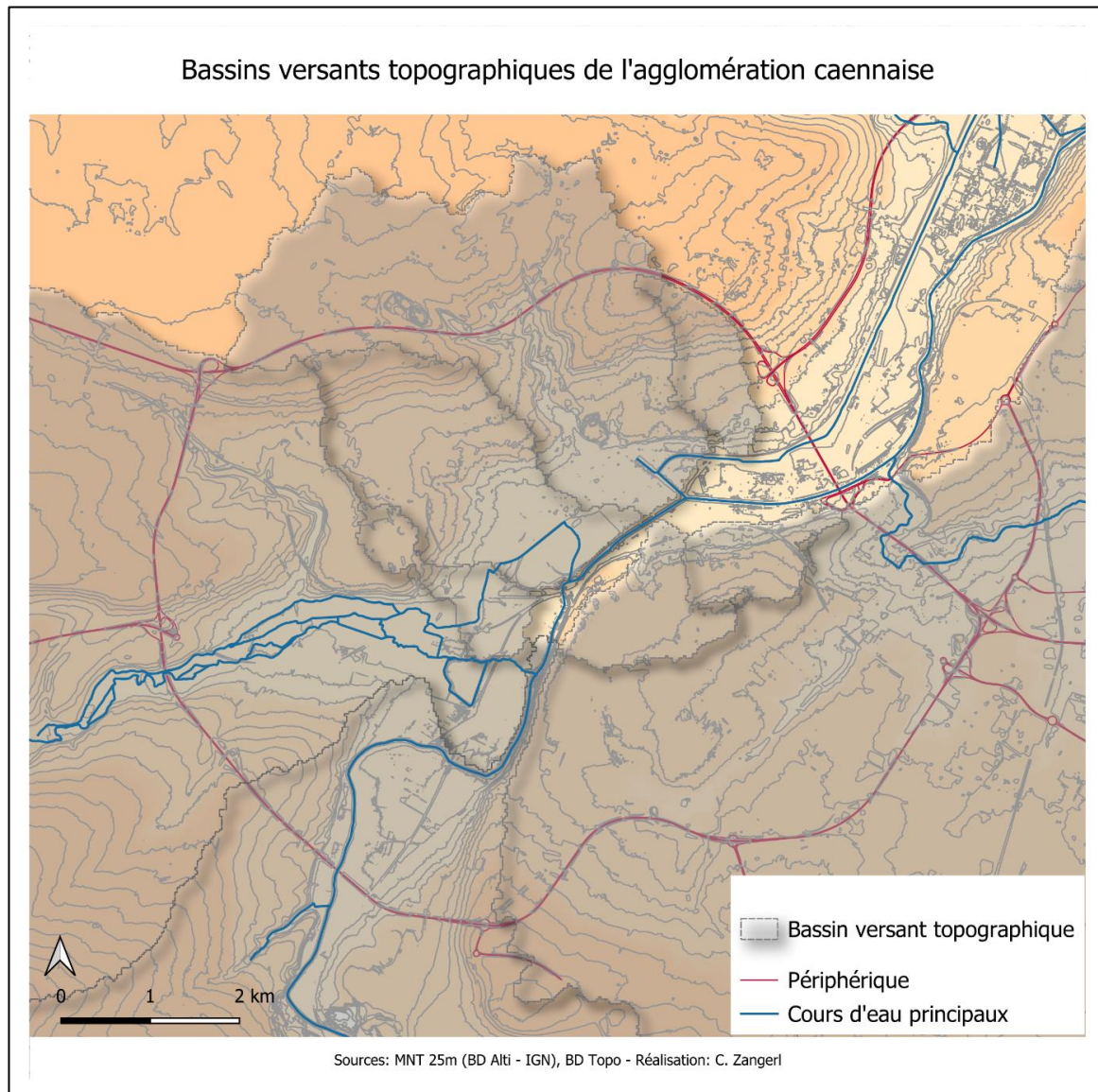


Figure 164: Carte présentant les grands bassins versants de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl

La carte présentée ci-dessus (figure 164) montre les grands bassins-versants de l'agglomération caennaise identifiés à partir du MNT 25m. On y retrouve entre autres les ensembles évoqués en entrée, comme la vallée de l'Odon, la vallée de l'Orne ou encore l'ensemble constitué par la Vallée des Jardins,

les Jardins du souvenir et la Colline aux Oiseaux, mais également sur le plateau sud le bassin versant du quartier de Vaucelles, de la rue d'Auge ou encore le bassin versant de la Gronde et du Biez qui englobe une grande partie du plateau sud et dont l'exutoire se situe à l'aval du parc du Biez.

L'analyse par bassin versant permet alors d'identifier des zones de départ, de circulation et d'accumulation d'air frais et peut ensuite être prise en compte lors de projets d'aménagement urbain. On pourrait alors envisager la création de zones de fraîcheur depuis lesquelles l'air frais peut s'écouler vers la ville ou encore un travail sur la trame verte permettant de faciliter la circulation de l'air, voire de créer des couloirs d'écoulements. En plus d'un travail sur la trame verte qui concerne principalement la question de la circulation de la biodiversité, on prendrait alors également en compte la trame transparente de l'air et optimiserait ainsi les services écosystémiques rendus par la nature.

L'identification de ces zones de formation d'air peut également se faire en complément des mesures empiriques par de la modélisation numérique. En Allemagne, un grand nombre de villes ont procédé à des analyses de leur climat urbain (Stadtklimaanalyse), comprenant une analyse du climat actuellement observé dans la ville ainsi que des prévisions sur le climat urbain à l'horizon 2050. Elles servent notamment à l'aide à la décision aux acteurs locaux pour les politiques d'aménagement urbain. Ces analyses concernent entre autres des modélisations de flux d'air frais et étudient donc le rôle des différents espaces verts à partir des modélisations effectuées grâce au logiciel KLAM 21 développé par le service météorologique allemand. Ce modèle permet de calculer entre autres la hauteur de la couche d'air froid, le volume d'air froid ou encore les couloirs d'écoulement (Ratheiser, 2022).

La carte présentée ci-dessous (figure 165) a été réalisée en 2008 grâce à ce modèle dans le cadre de la création de l'atlas climatique de la région de Stuttgart en Allemagne. Elle présente les directions d'écoulement de l'air frais, les couloirs de circulation ainsi que l'épaisseur de la couche d'air froid 4h après le début de leur formation. Les bassins versants topographiques pourraient alors être complétés par les résultats obtenus grâce à ce genre de modélisation. A Caen, on pourrait alors imaginer l'adaptation du modèle LASCAR, développé par des chercheurs du laboratoire IDEES et utilisé pour simuler le ruissellement de l'eau sur les parcelles agricoles, aux écoulements d'air en contexte urbain.

La combinaison des méthodes empiriques et de la modélisation numérique permettrait d'avoir une approche encore plus ciblée et détaillée de l'étude des zones de fraîcheur et des flux d'air dans l'agglomération caennaise.

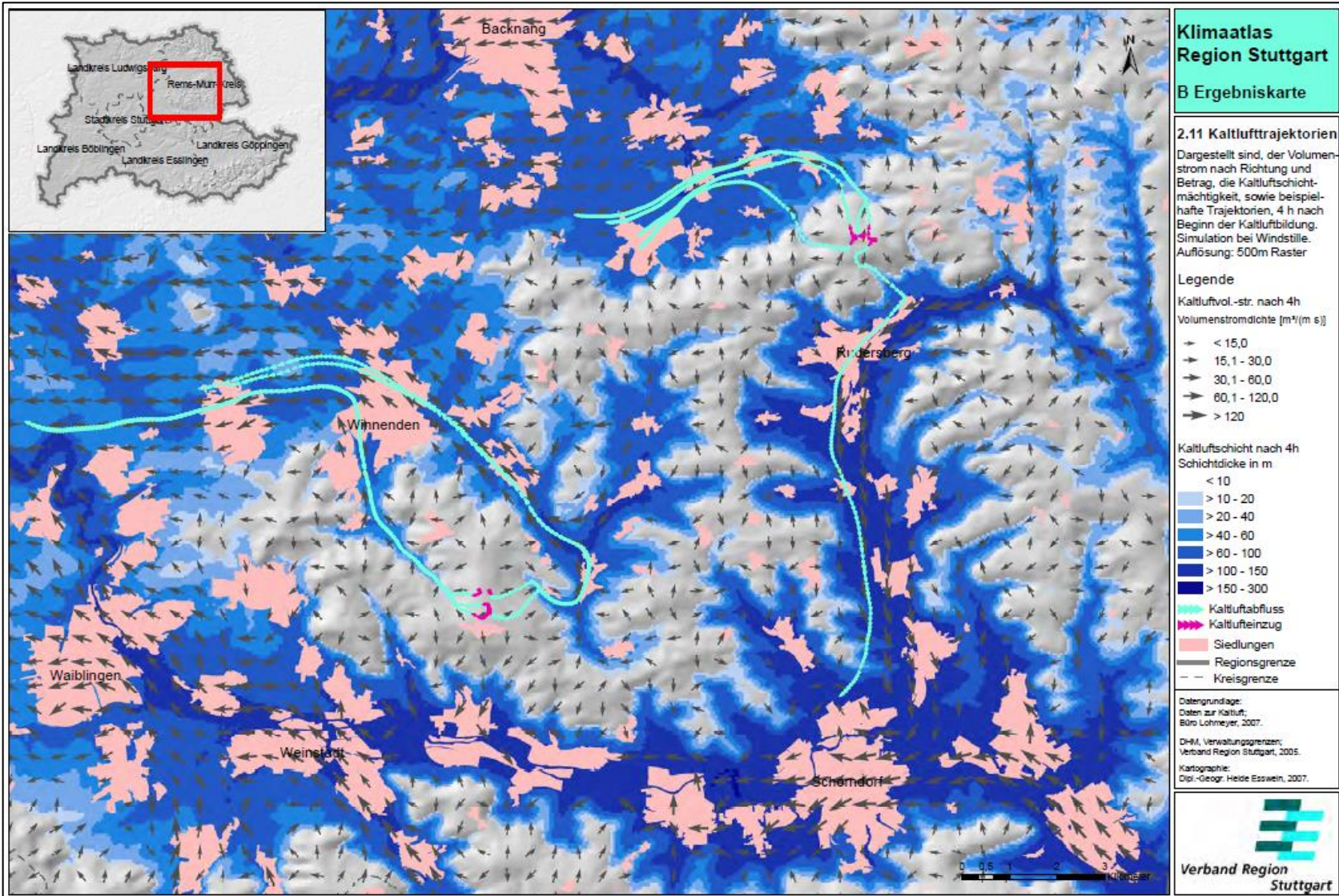


Figure 165: Carte de l'atlas climatique de la région de Stuttgart présentant les trajectoires de l'air froid (flèches), l'épaisseur de la couche d'air frais 4h après le début de leur formation (aplats bleus) et les espaces urbanisés (aplats roses) – Source : (Baumüller, Reuter, Hoffmann, & Hesswein, 2008)

L'objectif de toutes ces études concernant le climat urbain, que ce soit sur les îlots de chaleur ou les îlots de fraîcheur urbains, n'est pas seulement de comprendre les différents phénomènes, mais doit également servir comme base de décision aux acteurs locaux. L'adaptation des villes aux conséquences du changement climatique devenant de plus en plus urgente, il existe un grand nombre d'initiatives qui visent à végétaliser l'espace urbain. Ces initiatives proviennent de tout type d'acteur, que ce soient des particuliers, des associations, des entreprises ou encore différentes collectivités territoriales. Le chapitre suivant présentera un certain nombre de ces initiatives en France et dans le monde avant de se concentrer sur les projets d'aménagement en cours dans l'agglomération caennaise.

Partie V – La végétalisation des villes : un moyen efficace pour lutter contre la chaleur en ville

Végétaliser la ville est devenu un enjeu de plus en plus identifié dans les villes les dernières années. Les métropoles françaises comme Paris, Lyon et Marseille sont engagées depuis de nombreuses années pour introduire ou réintroduire la nature en ville. Leur intérêt résulte non seulement de la volonté de lutter contre la surchauffe urbaine, mais surtout des nombreux services écosystémiques comme une meilleure gestion de l'eau, la séquestration de carbone ou encore l'amélioration du bien-être des habitants qui sont fournis par les solutions fondées sur la nature. Ces projets d'aménagements verts ne se limitent plus aux très grandes villes, mais sont mis en place dans des agglomérations partout en France, comme à Lille, à Orléans, à Rennes ou encore à Caen.

Ce dernier chapitre a comme objectif de présenter quelques-uns de ces projets d'aménagement et ainsi de montrer une partie du champ des possibles dans la lutte contre les îlots de chaleurs urbains et pour la fraîcheur en ville. Dans un premier temps, il sera question des différentes manières d'intégrer la nature en ville en présentant des exemples de projets d'aménagement et des mesures mises en place, que ce soit la végétalisation des toits et des façades, la plantation d'arbres, la création d'espaces verts ou encore l'intégration d'objectifs de verdissement dans les documents locaux de planification stratégique. La deuxième partie de ce chapitre se concentrera sur les initiatives qui visent à végétaliser l'espace urbain dans l'agglomération caennaise et d'en discuter les possibles effets sur le climat urbain.

1) Les projets de végétalisation de l'espace urbain en France et à l'international

L'effet positif de la végétation par l'ombrage et l'évapotranspiration sur les températures en ville est aujourd'hui une chose admise par la communauté scientifique et les acteurs de l'aménagement urbain, bien que l'efficacité concrète des différents projets soit parfois difficile à chiffrer. Plusieurs projets présentés dans cette partie intègrent des partenariats avec des universités ou des institutions publiques comme Météo France afin d'intégrer ces derniers dans la construction et le suivi scientifique du projet. D'autres partenaires, comme des associations ou des collectifs d'habitants, peuvent également être appelés à participer dans le processus d'élaboration du projet. La végétalisation de l'espace urbain s'intègre donc dans une démarche de développement durable, non seulement par la mise en place de solutions fondées sur la nature, mais également dans sa démarche intégrant toutes les parties prenantes. Après en avoir présenté certains, ce chapitre évoquera également la nécessité d'intégrer les questions autour de la végétation en ville dans les documents d'urbanisme.

1.1) Les façades et toits végétalisés

Les façades et toits végétalisés présentent avant tout un intérêt pour la gestion de la température intérieure des bâtiments ainsi que pour l'amélioration de la qualité esthétique de l'espace urbain. Leur efficacité sur les températures extérieures en ville n'a pas encore fait l'objet de beaucoup d'études, mais selon la manière dont ces derniers sont mis en place, on peut supposer qu'ils peuvent agir sur les températures à l'échelle d'une rue (Musy, 2014), notamment en réduisant la température des surfaces verticales et en diminuant la multiple réflexion du rayonnement solaire dans les canyons urbains. Un certain nombre de villes proposent alors des subventions pour la mise en place des façades et des toits végétalisés.

A Lille, le dispositif Verdissons nos murs existe depuis 2003 et a été créé par la Ville de Lille dans le but de promouvoir la végétalisation des façades dans le domaine public et privé (Raymond, 2020). Parmi les 6 raisons de végétaliser les façades évoquées par la municipalité, on retrouve, en plus de l'amélioration de la biodiversité en ville et de la qualité de l'air, également l'argument de la lutte contre les îlots de chaleur urbains. Un guide pratique, contenant entre autres des conseils sur le choix des espèces, leur plantation et l'entretien des façades végétalisées, permet aux habitants de se renseigner sur ce service proposé par la collectivité. La création d'une fosse de plantation au pied des murs peut être prise en charge gratuitement par la ville (Ville de Lille, 2024).



Figure 166: Photos de deux exemples de façades végétales à Lille - Source : (Ville de Lille, 2024)

La ville de Hambourg en Allemagne a mis en place un dispositif similaire, mais en subventionnant les toits végétalisés en plus des façades. Jusqu'en 2028, la ville de Hambourg met à disposition 3 millions d'euros pour financer la création de toits végétalisés sur tout type de bâtiments, auxquels s'ajoutent les financements des façades végétales subventionnées entre 2020 et 2024 et pouvant aller jusqu'à 100.000 € par projet selon son ampleur (Stadt Hamburg, 2024).

Les toits végétalisés sont subventionnés à partir d'une superficie de 20 m² et pour une inclinaison jusqu'à 30°. La ville finance des projets de végétalisation intensifs et extensifs. La végétalisation intensive permet d'implanter, grâce aux substrats épais, tout type de plante, alors que la végétalisation extensive ne comprend que la plantation de végétation basse comme de la pelouse. En plus de la subvention accordée par la ville, les propriétaires des bâtiments ayant fait l'objet d'un projet de végétalisation des toits bénéficient d'une réduction de 50% sur les frais de gestion des eaux pluviales (Stadt Hamburg, 2024). Il en est de même pour les projets de végétalisation des façades. Les subventions sont accordées pour tout projet de végétalisation, qu'il soit basé uniquement sur des plantes grimpantes ou sur la mise en place de substrat vertical le long des murs.

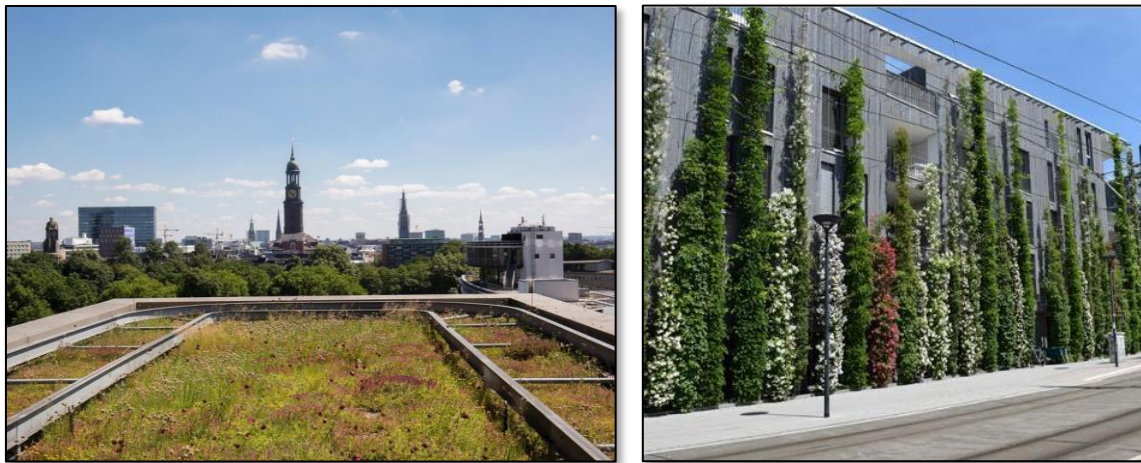


Figure 167: Exemples d'un toit végétalisé (gauche) et d'une façade végétalisée (droite) à Hambourg - Source : (Stadt Hamburg, 2024)

1.2) Les arbres urbains

Comme mentionné dans la partie II de ce mémoire, l'arbre apparaît comme un couteau suisse de l'aménagement durable de l'espace urbain et se trouve donc au centre d'un grand nombre de projets à travers le monde entier.

En France, on peut mentionner l'exemple de la ville d'**Orléans**. Cette ville d'environ 110.000 habitants et donc comparable à Caen, s'engage depuis de nombreuses années pour la végétalisation de son espace urbain en mettant l'accent sur son patrimoine arboré. Dans le cadre de son programme de lutte contre le changement climatique, plusieurs mesures peuvent alors être mises en avant.

La ville a signé en 2011 la Charte Orléanaise de l'Arbre Urbain qui a comme objectif de protéger, de développer et de valoriser l'arbre en ville, et donc plus largement d'améliorer le cadre de vie des habitants, de protéger la biodiversité urbaine, de désimperméabiliser les sols et d'adapter la ville aux conséquences du changement climatique. Depuis 2003, la ville d'Orléans tient un inventaire de ces arbres urbains actualisé régulièrement et permettant de suivre l'évolution du patrimoine arboré dans

la ville. Dès que possible, les différents espaces urbains font l'objet de plantations d'arbres dans l'objectif de créer des îlots de fraîcheur. Chaque année, environ 500 arbres sont plantés avec une attention particulière portée sur le choix et la diversification des espèces afin d'assurer leur résilience et leur adaptation au climat futur (Raymond, 2020). Orléans Métropole compte aujourd'hui 25.000 arbres urbains, sans compter les arbres forestiers.



Figure 168: Arbres d'alignements plantés dans le cadre de la Charte Orléanaise de l'Arbre Urbain – Source : (Hery, 2015)

De plus, la ville d'Orléans se désigne comme une « ville jardin » puisqu'elle possède un grand nombre d'espaces verts publics. Selon Orléans Métropole, on y trouve 330 hectares de forêt ainsi que 18 parcs et jardins publics (Destination Orléans, s.d.).

Finalement, on peut également mentionner les efforts faits pour la végétalisation de l'espace urbain et l'amélioration de la biodiversité dans le cadre de la planification stratégique de l'aménagement du territoire. Dans son Plan Local d'Urbanisme (PLU), la municipalité intègre des mesures qui visent à protéger ses espaces verts et la trame verte, fondamentale pour la biodiversité urbaine, notamment par l'élaboration d'un coefficient de biotope (Raymond, 2020). De plus, dans le cadre de l'élaboration du PLU, les arbres du domaine public et privé ont été évalués, ce qui a mené au classement et donc à la protection durable de 112 arbres et groupements d'arbres urbains (Hery, 2015).

Beaucoup d'autres villes en France ont fait de l'arbre urbain une priorité dans la végétalisation de l'espace urbain. A **Paris**, par exemple, l'Atelier parisien d'urbanisme (APUR) a mené des études sur les arbres d'alignements et leur impact sur les températures et donc les îlots de chaleur urbains. L'intégration des arbres dans les projets d'aménagement urbain à Paris daterait du 16^e siècle. En 2023, la ville de Paris compterait plus de 110.000 arbres d'alignement répartis sur environ 700 km de voies publiques.

LES ARBRES D'ALIGNEMENT À PARIS EN 2022

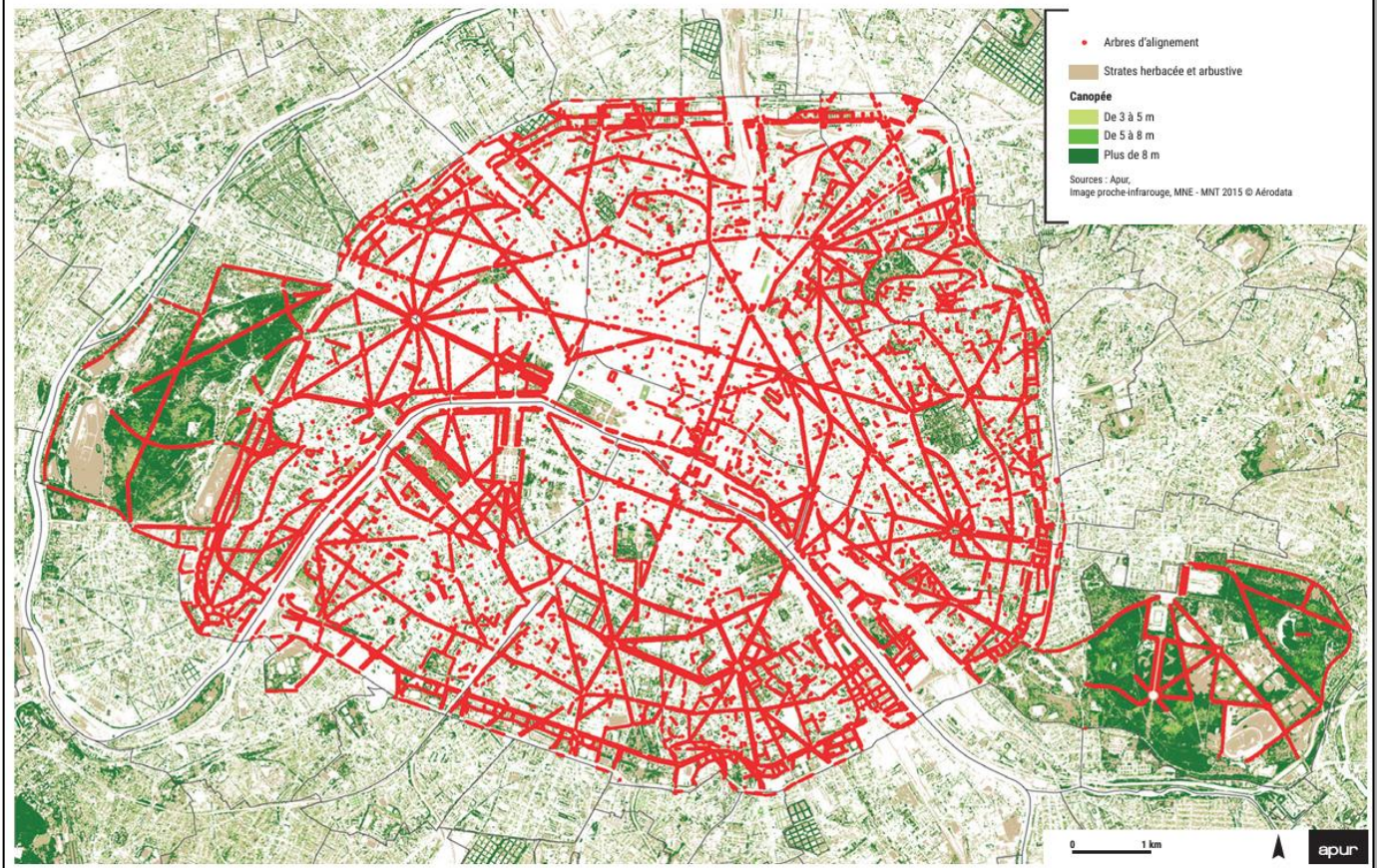


Figure 169: Carte des arbres d'alignements à Paris et de la hauteur de la canopée dans les espaces verts publics - Source : (Atelier parisien d'urbanisme, 2022)

Les recherches menées par l'APUR ont conclu que les paramètres clés dans l'efficacité du rafraîchissement de l'air par les arbres d'alignement sont le choix des essences et la densité de plantation. Deux rues dans le 18^e arrondissement de Paris, la rue Leibniz et le boulevard Ney, ont fait l'objet d'une étude sur les températures ressenties dans ces espaces situés à environ 100m de distance l'un de l'autre. Les résultats ont montré que les températures ressenties au boulevard Ney étaient bien plus élevées (50 – 55°C) que celles dans la rue Leibniz (33 - 38°C) à cause de la densité d'arbre et donc de l'ombrage trop faible dans le boulevard (Raymond, 2020).



Figure 170: Image satellite du boulevard Ney (Paris) - Source : Google Earth



Figure 171: Image satellite de la rue Leibniz (Paris) - Source : Google Earth

Alors que les études sur les parcs urbains semblent être peu fréquentes en France, l'étude du rôle de l'arbre sur le microclimat urbain est un sujet de recherche plus prolifique. En plus des études menées à Paris par l'APUR, on peut mentionner les recherches de l'équipe autour de S. Herpin de l'Institut Agro Rennes Angers (Herpin, et al., 2022). Ces derniers ont mis en place un dispositif expérimental composé d'une rue canyon reproduite à l'échelle 1/5 et instrumentée avec des capteurs de température, d'humidité de l'air, de vent et de rayonnement sur 3 zones différentes. 2 zones étaient dotées d'une végétation arborée avec deux niveaux de stress hydrique différents et une autre zone était non-végétalisée. Les résultats de cette étude ont montré une réduction d'environ 2°C de la température de l'air en journée dans la zone végétalisée par rapport à la zone non-végétalisée ainsi qu'un UTCI (indice de confort thermique souvent utilisé pour représenter la température ressentie) réduit de plus de 5°C dans la zone végétalisée.

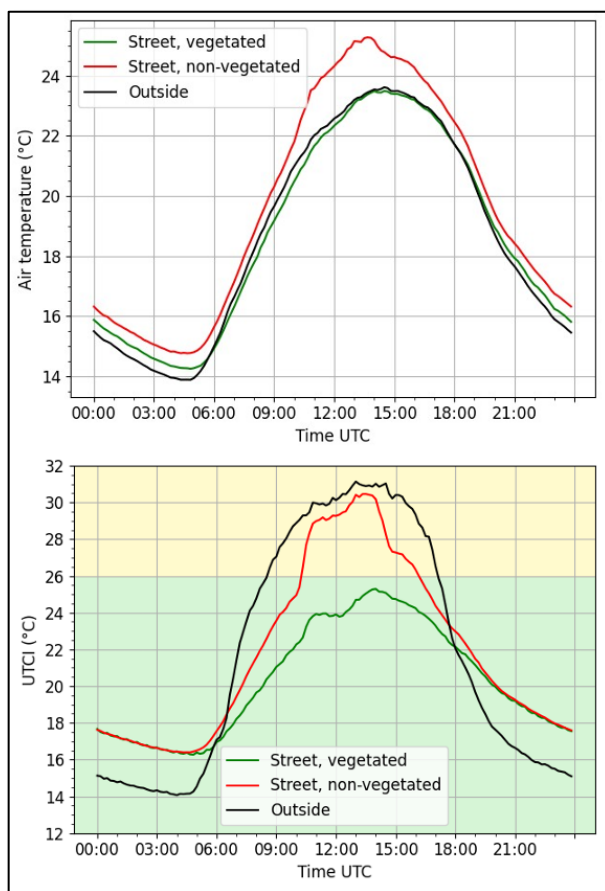


Figure 172: Graphique présentant le microclimat journalier moyen à partir de la température de l'air et de l'UTCI
Source : (Herpin, et al., 2022)



Figure 173: Photo du dispositif expérimental mis en place dans le cadre de l'étude sur l'influence de l'arbre sur le microclimat urbain
Source : (Herpin, et al., 2022)

En plus des données empiriques, il est possible de modéliser l'influence de l'arbre urbain sur son environnement proche. En 2016, l'ADEME a élaboré un outil permettant la simulation des effets de la plantation d'arbres sur différents indicateurs. Cet outil permet donc aux acteurs locaux de faire de la prospection et de choisir judicieusement les essences utilisées dans leurs projets de verdissement de

l'espace urbain. En ce sens, une base de données en libre accès, appelée la BDD Choix des essences, recense les différentes caractéristiques des essences d'arbres en termes de capacité de stockage de carbone, d'impact sur le microclimat urbain, sur la biodiversité et sur la qualité de l'air ainsi que leur résilience et leur potentiel allergisant (ADEME, 2022).

Bien d'autres villes ont identifié le potentiel des arbres pour rendre l'espace urbain plus résilient face aux conséquences du changement climatique. A ce titre, on peut mentionner la ville de Rennes, de Strasbourg ou de Lyon en France, mais également des villes comme Milan ou Montréal pour ne nommer que quelques-unes. D'autres villes ont opté pour des projets de verdissement plus larges dont l'objectif n'est pas seulement de diminuer la surchauffe par la présence d'arbres d'alignement, mais de créer de réels îlots de fraîcheur urbains capables de constituer des points frais pour les habitants.

1.3) La création de parcs urbains

La création d'îlots de fraîcheur peut prendre différentes formes, comme la végétalisation d'espaces urbains très minéraux, la transformation d'anciennes friches industrielles en espaces verts, la réhabilitation d'espaces verts laissés à l'abandon ou encore l'intégration de la végétation dans les nouveaux projets d'aménagement urbain.

Un exemple pour la végétalisation d'espaces minéraux est le **projet OASIS à Paris**, qui vise à transformer les cours d'écoles en réels îlots de fraîcheur par des travaux de végétalisation ainsi que l'ouverture de ces nouveaux espaces verts à un public plus large. En plus de la création d'IFU, la végétalisation de la cour est élaborée en co-conception avec les élèves et les adultes de l'établissement scolaire en question. Ainsi, la dimension participative et sociale et l'adaptation du projet aux besoins de ses usagers sont au cœur de la démarche. Ces cours d'écoles végétalisées s'intègrent également dans d'autres projets de la Ville de Paris, comme celui de la Ville du quart d'heure, qui vise à faire des écoles le centre de gravité des quartiers en rendant les cours accessibles en dehors des périodes scolaires, notamment en cas de fortes chaleurs.

Les cours OASIS ont également comme objectif de contribuer à la recherche sur les divers effets de la végétalisation de l'espace urbain, notamment en termes d'amélioration du microclimat, de la gestion des eaux pluviales, mais également leur impact sur le lien social et le bien-être des enfants et de la population en général. Ces recherches sont intégrées dans le cadre du projet européen COOLSCHOOLS mené à Barcelone, Bruxelles, Rotterdam et Paris et est orienté sur la recherche autour de la capacité des solutions fondées sur la nature à répondre aux défis d'adaptation aux conséquences

du changement climatique. Aujourd’hui, plus de 130 cours d’écoles et de collèges parisiens ont fait l’objet d’une végétalisation dans le cadre du projet OASIS (Ville de Paris, 2023).

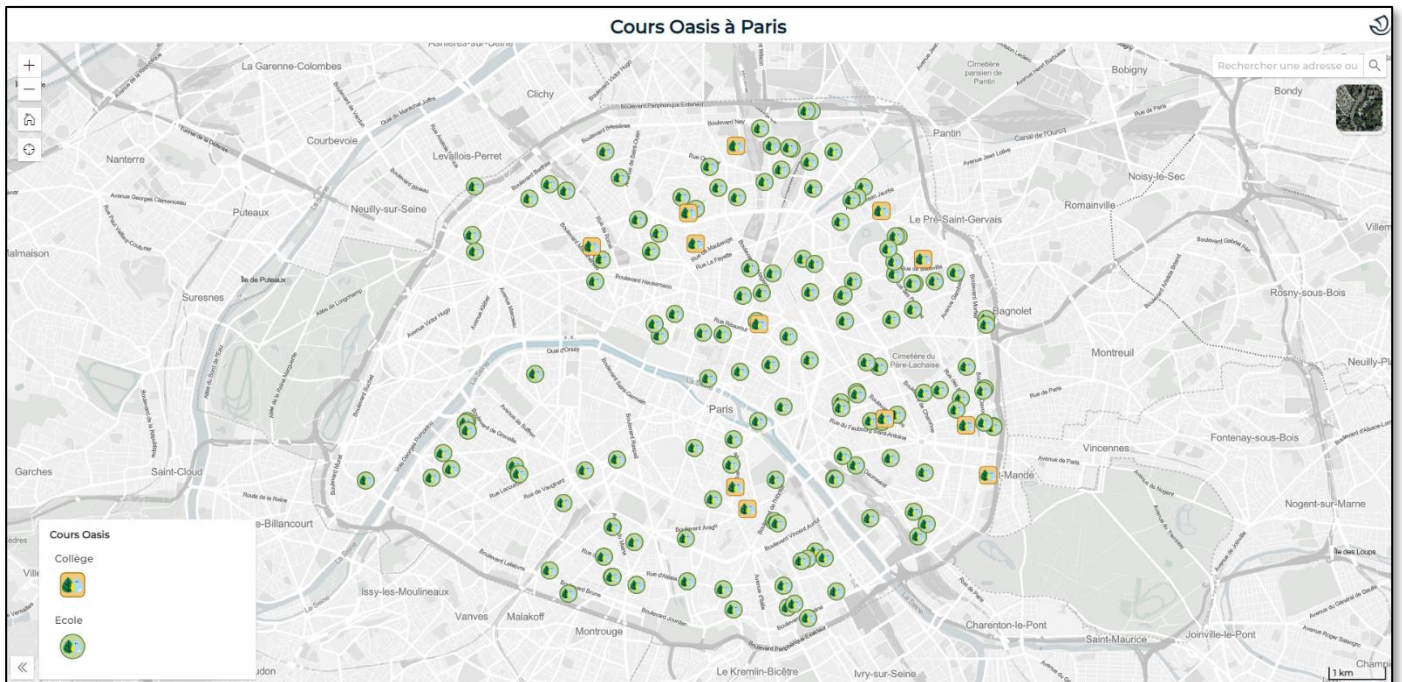


Figure 176: Carte interactive des cours Oasis à Paris - Source : (Ville de Paris, 2023)



Figure 174: Cour Oasis de l'école Maryse Hilsz dans le 20e arrondissement de Paris – Source : (Ville de Paris, 2023)



Figure 175: Jardin potager de l'école Jeanne d'Arc dans le 13e arrondissement de Paris - Source : (Ville de Paris, 2023)

Un autre projet transformant l’espace minéral en espace vert est celui de la **Lisière d’une Tierce Forêt** mis en place à **Aubervilliers** au nord de Paris. Dans l’objectif de lutter contre l’effet d’îlot de chaleur, ce projet consiste en la création d’un îlot de fraîcheur grâce à l’implantation d’une forêt urbaine sur le parking d’un foyer pour jeunes travailleurs. Cette mesure, initiée par l’association Altérala en 2016, est mise en œuvre par le cabinet d’architecture et d’urbanisme Fieldwork. Après une analyse poussée des conditions sur place (microclimat, qualité du sol), menée en partenariat avec le laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain de l’Université Paris Diderot, la plantation d’arbres et la désimperméabilisation des sols ont permis la création d’une micro-forêt urbaine. Les données

récoltées en amont du projet seront utilisées pour identifier les effets de cette mesure de végétalisation sur l'espace urbain. Depuis juin 2018, deux stations Météo-France ont été installées dans la forêt. Selon les chiffres présentés par l'ADEME, cette mesure aurait mené à la réduction des températures de surface de l'ordre de 3°C à 10°C ainsi que du stress thermique (entre -1°C et 3°C) (Raymond, 2020).



Figure 177: Photo du parking des jeunes travailleurs à Aubervilliers après le projet
Source : (Raymond, 2020)



Figure 178: Photo du parking des jeunes travailleurs à Aubervilliers avant le projet
Source : (Raymond, 2020)

Les friches industrielles peuvent également présenter des espaces propices à la réintégration de la nature en ville, d'autant plus au regard des politiques publiques autour de la zéro artificialisation nette. Néanmoins, ce genre de projet demande généralement des investissements importants à cause de la dépollution du sol qui s'avère souvent nécessaire. La métropole de **Marseille**, par son établissement public d'aménagement **Euroméditerranée**, s'est donné comme objectif la création d'un parc urbain de 14 ha sur un ancien site ferroviaire de la SNCF. Ce projet émane de la nécessité de la métropole méditerranéenne de créer une zone d'expansion des crues pour le cours d'eau des Ayalades, mais s'intègre dans une démarche plus large de l'adaptation de la ville aux conséquences du changement climatique par le biais des solutions fondées sur la nature. De plus, un partenariat avec Météo-France et l'Université d'Aix-en-Provence a été mis en place afin d'accompagner la mise en place du projet et d'étudier les possibles bénéfices du parc sur la gestion de l'eau, la qualité environnementale, l'impact sur la biodiversité ou encore le microclimat, notamment par le biais de modélisations numériques.

Concrètement, le **Parc des Ayalades**, qualifié en tant que Projet d'Intérêt National, devrait être livré en 2026 sur la Zone d'Aménagement Concertée (ZAC) créée à cet effet. Il comprendra la création d'une zone d'expansion des crues ainsi que d'une coulée verte et d'un parc de 4 ha (parc Bougainville) (Raymond, 2020).



Figure 179: Projet du Parc des Ayalades à Marseille le long du cours d'eau du même nom - Source : (Raymond, 2020)

Il existe plusieurs exemples de réhabilitation des friches industrielles en espace vert, comme à Sevran en région parisienne, où l'ancienne friche Kodak a été transformée en parc paysager d'une superficie de plus de 9 ha, ou encore à Rennes, où les prairies St. Martin constituent aujourd'hui un espace de fraîcheur au cœur de la ville.

La ville de **Rennes** est engagée depuis de nombreuses années dans une politique de valorisation de la végétation urbaine. Ainsi, l'ancienne zone industrielle du Tublet et ses environs constitués de prairies humides et de jardins familiaux ont progressivement été transformés en Parc Urbain Naturel de 30 ha, connu aujourd'hui sous le nom des **prairies St. Martin**. Ce site, situé en plein cœur de l'agglomération rennaise, a fait l'objet d'un grand nombre de remaniements au cours de son existence. La ville de Rennes a alors progressivement racheté les différentes parties de la zone entre 2003 et 2006 dans l'objectif d'améliorer le champ d'expansion des crues de l'Ille. Des études approfondies sur la qualité de l'eau ont montré une pollution significative des parcelles en métaux lourds, ayant mené à la fermeture progressive des 8 ha dédiés aux jardins familiaux. En 2011, la municipalité décide de mettre en place un projet de Parc Naturel Urbain ayant comme objectif



Figure 180: Prairies St. Martin à Rennes - Source : (Rennes Métropole, s.d.)

l'amélioration de la gestion de l'eau, la mise en valeur des espaces naturels et le développement des usages récréatifs. Depuis juin 2019, le parc des prairies St. Martin offre aux Rennais un espace vert d'une grande superficie au cœur de la ville, capable de constituer un réel point frais lors des fortes chaleurs (Raymond, 2020). En effet, selon les chiffres avancés par la collectivité, la différence de température entre le centre-

ville de Rennes et les prairies St. Martin serait de l'ordre de 2°C de moyenne (Rennes Métropole, s.d.).



Figure 181: Plan des prairies St. Martin à Rennes - Source : (Office de Tourisme Rennes, s.d.)

Les différents projets présentés jusqu'ici ne constituent qu'une infime partie des projets d'aménagement qui optent pour la végétalisation de l'espace urbain à l'échelle de la France. Bien d'autres agglomérations comme Nantes, Lyon, Antibes, Rouen et Caen par exemple ont mis en place des projets similaires. L'intérêt de privilégier les solutions fondées sur la nature à la place des solutions grises réside dans la multifonctionnalité de la végétation et donc les services écosystémiques rendus, comme la régulation de la température, l'amélioration de la gestion de l'eau et de la biodiversité, mais également les bienfaits sur le bien-être de la population.

La transdisciplinarité, par l'intégration d'universitaires et d'institutions publiques dans le processus d'élaboration des projets de végétalisation, semble comme une nécessité pour garantir le suivi scientifique du projet à chaque étape de réalisation. La collaboration entre la collectivité et le monde scientifique sur le long terme peut s'avérer fructueuse, comme le montre l'exemple de la ville de Stuttgart en Allemagne qui depuis plus de 80 ans possède un service de climatologie urbaine où des climatologues mènent des recherches sur la qualité de l'air, les îlots de chaleur et le rôle de la végétation dans le rafraîchissement urbain.

1.4) Le service municipal de climatologie urbaine – l'exemple de la ville de Stuttgart

La ville de **Stuttgart** dispose d'un **service municipal de climatologie urbaine** depuis 1938. Les documents de planification de la reconstruction à la suite de la Seconde Guerre mondiale contenaient alors déjà une partie entière consacrée à l'influence de la ville sur le climat local et la possibilité de créer des couloirs d'air frais. Dès 1992, le service climatologique de la ville de Stuttgart publie son

premier **atlas climatique** qui constitue alors une base de référence pour l'élaboration de l'équivalent allemand du Plan Local d'Urbanisme (*Flächennutzungsplan*) publié en 2005. Puis, en 2008, sera publiée une nouvelle version de l'atlas climatique présentant en détail le climat urbain de la ville. Il contient entre autres des cartes thématiques sur les températures de surface ainsi que sur les lieux de production, la quantité et la circulation d'air frais (Landeshauptstadt Stuttgart, 2024). L'une de ces cartes a déjà été présentée en conclusion de la partie IV.

Grâce aux données récoltées par le projet MAPUCE, la ville de Toulouse a pu élaborer en 2020 un atlas climatique pour le périmètre de sa métropole. Cet ouvrage présente alors des données comme les zones de climat local (LCZ), les types de temps, le stress thermique ou encore la température de l'air (Agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse, 2020). Il est donc porté avant tout sur la chaleur en ville, mais n'évoque pas de chiffres ou de cartes sur la formation et la circulation de l'air frais, comme cela est le cas pour l'atlas de Stuttgart. De plus, l'atlas climatique de Stuttgart a été adapté en carte interactive consultable en ligne, ce qui rend l'accès aux résultats des études particulièrement facile.

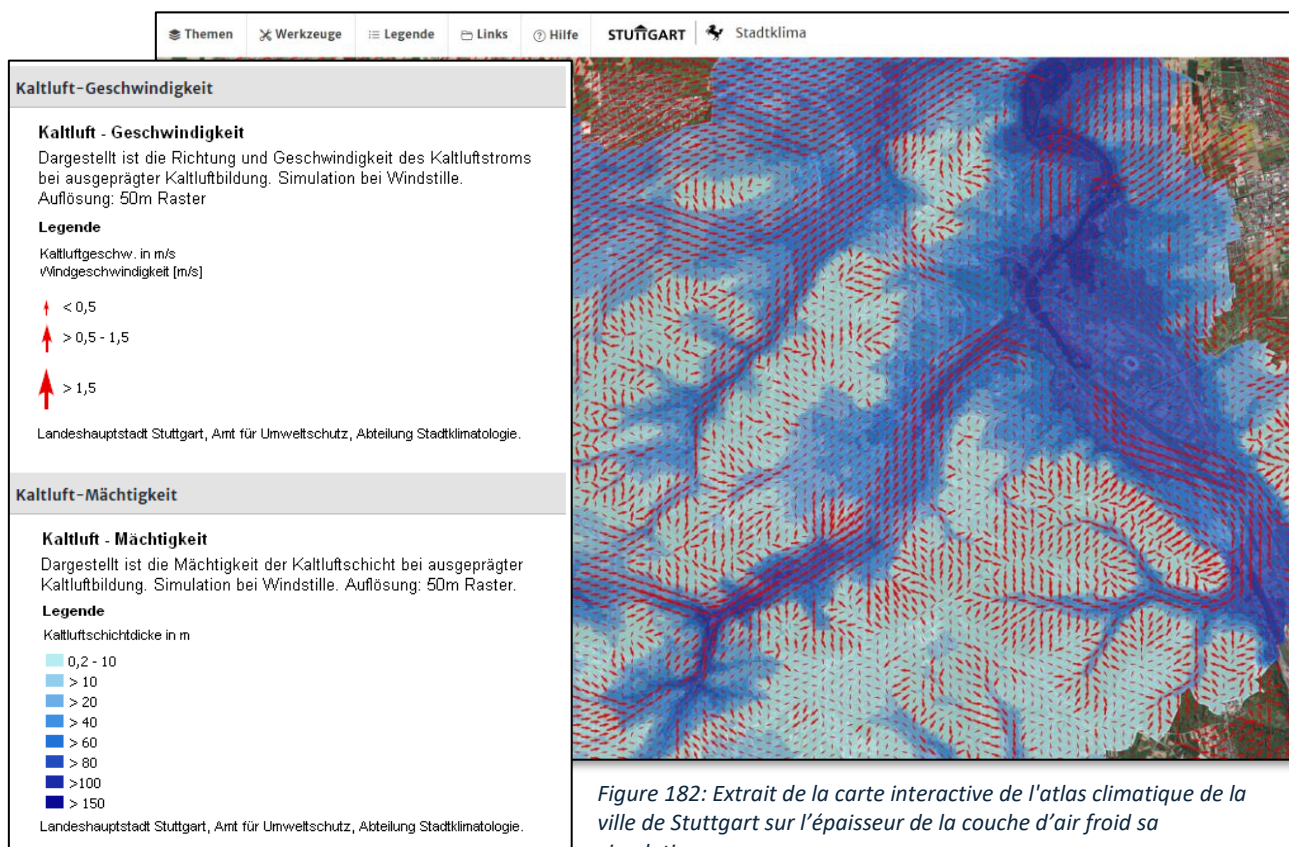


Figure 182: Extrait de la carte interactive de l'atlas climatique de la ville de Stuttgart sur l'épaisseur de la couche d'air froid sa circulation

Source : maps.stuttgart.de/stadtklima

Les différents travaux menés au cours des dernières décennies à Stuttgart ont permis d'identifier le rôle des espaces verts dans la lutte contre les îlots de chaleur et pour le rafraîchissement urbain. En plus de proposer un grand nombre d'espaces verts et d'opter pour la plantation d'arbres en milieu urbain, les versants boisés qui entourent la ville sont particulièrement protégés par la mise en place de règles strictes en ce qui concerne les projets de construction dans ces espaces. En effet, ces forêts constituent des points de départ pour l'écoulement d'air frais depuis les espaces verts vers le centre-ville et sont donc protégées d'une artificialisation des sols trop importante.



Figure 183: Photo prise depuis la tour de télévision de Stuttgart montrant la "ceinture boisée" de la ville - Source : C. Zangerl

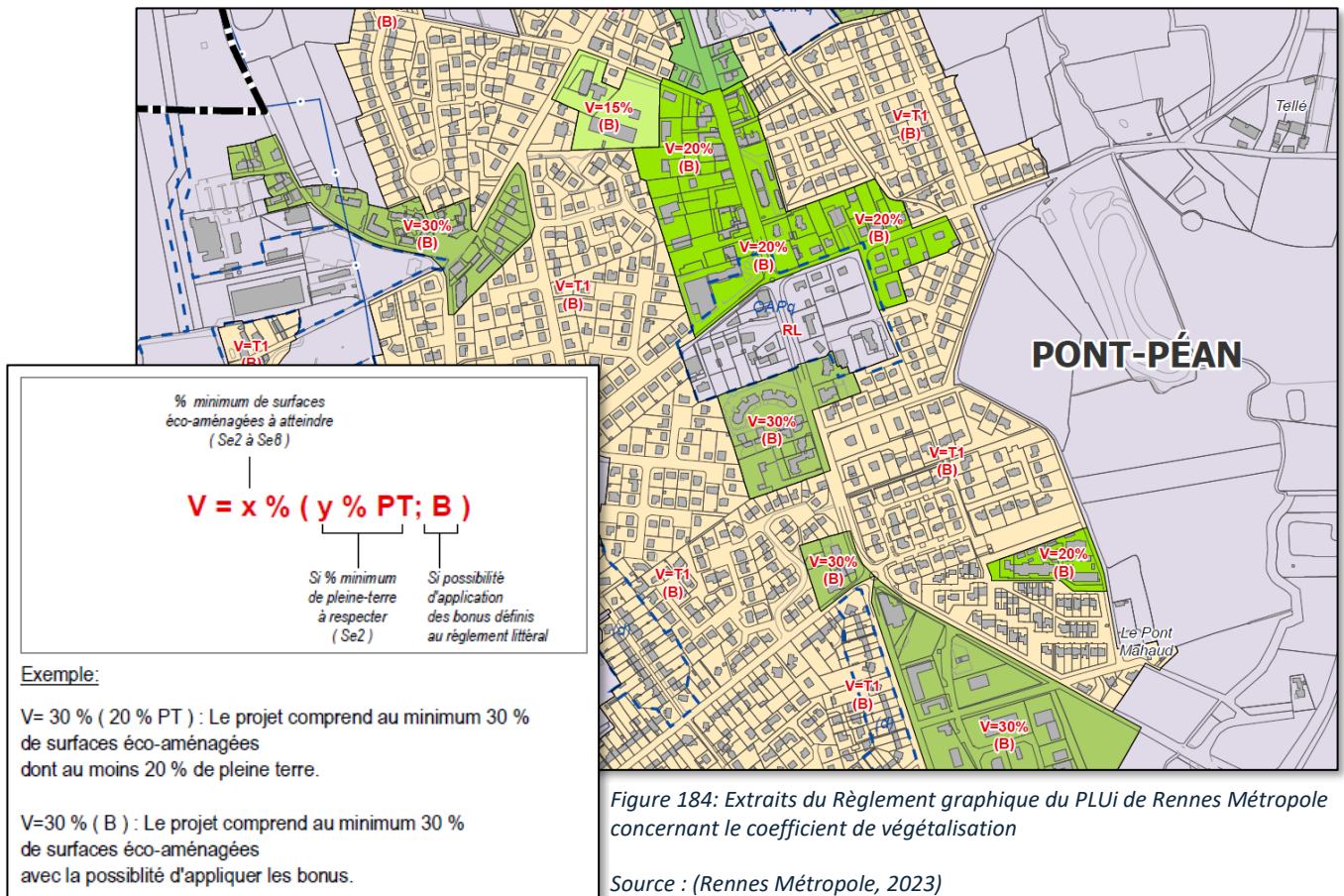
L'exemple de la ville de Stuttgart montre bien que lorsque les scientifiques sont intégrés dans les processus d'aménagement du territoire, et ce, non seulement dans une logique de projet, mais dans l'objectif de fournir des connaissances sur le climat urbain dans son ensemble, les différentes mesures peuvent être mises en place plus efficacement et permettre de faire les bons choix aux bons endroits et aux bons moments. Les projets français évoqués auparavant montrent néanmoins une volonté de la part des acteurs locaux d'intégrer le monde scientifique dans l'élaboration des projets d'aménagement durable du territoire.

Ces différentes mesures sont généralement intégrées dans des stratégies territoriales plus larges qui émanent de la volonté des villes de prendre des mesures pour l'adaptation au changement climatique par les solutions fondées sur la nature. Ces stratégies peuvent alors se traduire concrètement par la définition d'objectifs dans les documents de planification stratégique, voire par l'intégration de coefficients contraignants dans les règlements d'urbanisme locaux comme les Plans Locaux d'Urbanisme.

1.5) Les espaces verts dans la planification stratégique

Outre la végétalisation de l'espace urbain et la création d'espaces verts, il existe d'autres moyens pour protéger et gérer la végétation urbaine en général. Il peut s'agir de la création de conseils locaux, de la définition de plans d'action stratégiques pour la végétalisation de l'espace urbain ou encore de la protection des espaces verts via les différents documents d'urbanismes comme le PLU, comme cela a déjà été évoqué pour la ville d'Orléans.

La ville de **Rennes** est également engagée dans ce genre de démarche, notamment par la création du Conseil métropolitain de la biodiversité et de l'eau en 2022. L'objectif de ce conseil est de co-construire une stratégie territoriale visant à préserver et à développer la biodiversité à l'échelle de son territoire. Il regroupe un grand nombre d'acteurs locaux de différents horizons, comme des associations, des institutions publiques ou encore des universitaires, garantissant une démarche transdisciplinaire et participative (Rennes Métropole, 2022).



La loi ALUR publiée en 2014 préconisait l'intégration d'un coefficient de biotope dans les Plans Locaux d'Urbanisme afin de mieux maîtriser l'imperméabilisation des sols, notamment dans l'objectif de lutter contre les ICU. Dans le cadre de l'élaboration de son **Plan Local d'Urbanisme intercommunal (PLUi)** en 2015, la métropole de Rennes a décidé de mettre l'accent sur le développement de ses trames

vertes et bleues par la mise en place d'un **coefficient de végétalisation**. Il se définit comme la part de surfaces végétales par rapport à la surface totale de la parcelle (Raymond, 2020). Le PLUi fixe alors des seuils minimums de coefficient de végétalisation à respecter dans certaines zones pour tout type de projet d'aménagement. Certains terrains peuvent bénéficier d'une bonification lorsqu'une alternative en faveur de la biodiversité est proposée. Par exemple, pour chaque arbre conservé sur un terrain, le projet peut bénéficier d'une bonification de 2% sur le coefficient de végétation à appliquer. De plus, il existe un simulateur de projet développé par la métropole permettant de connaître le coefficient de végétation à respecter (Rennes Métropole, 2019).

A l'échelle nationale, il n'existe pas de document contraignant les villes à végétaliser les espaces publics. La **loi Climat et Résilience de 2021** a avant tout mis l'accent sur la lutte contre l'artificialisation des sols en imposant aux collectivités l'atteinte de l'objectif de **zéro artificialisation nette d'ici 2050** (ZAN). La consommation d'espaces naturels peut néanmoins être compensée par la renaturation d'espaces artificiels à superficie égale, d'où l'origine du terme. La ZAN peut alors être un levier intéressant pour redonner de la place à la nature en ville, notamment sur des anciennes friches ou d'autres types de sites abandonnés. D'un autre côté, la mise en place de la ZAN limitera à terme la place disponible pour de nouveaux projets d'aménagement, impliquant probablement la densification de l'espace urbain. En plus d'accentuer l'effet d'îlots de chaleur, cette densification mettra les espaces verts « en concurrence » avec les nouvelles constructions. Il reste donc à voir quelle importance sera accordée à la nature en ville face au manque de place. Néanmoins, le décret du 23 décembre 2022 portant sur l'article L. 152-5-1 du Code de l'urbanisme et apporté par la loi Climat et Résilience de 2021 permet de faciliter la mise en place des dispositifs de végétalisation des façades et des toitures. Ainsi, les règles de hauteur et d'aspect extérieur définies dans les PLU et les PLUi ne s'appliquent pas dans le cadre d'une végétalisation d'un bâtiment (Cerema, 2023). Cette mesure pourrait alors concilier la densification et la végétalisation de l'espace urbain.

Bien qu'il n'existe pas de document contraignant, l'Etat a mis en place plusieurs programmes pour accompagner les collectivités territoriales dans leur démarche de végétalisation de l'espace urbain. Premièrement, on peut mentionner le fonds d'accélération de la transition écologique dans les territoires, également appelé le **Fonds Vert**. L'objectif de ce programme est entre autres de contribuer au financement de projets de renaturation des villes et des villages. Ce fond s'adresse aux collectivités territoriales, aux établissements publics locaux, aux établissements publics de l'Etat et aux bailleurs sociaux (Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires, 2024).

2) Les projets d'aménagement à Caen

Selon l'Observatoire des villes vertes, une organisation fondée en 2014 par l'Union Nationale des Entreprises du Paysage et le réseau Hortis dont l'objectif est de développer les réflexions autour de la végétalisation des villes françaises, la ville de Caen se place dans le top 10 des villes les plus vertes en France. Parmi ces dernières, on retrouve Angers, Rennes et Strasbourg en tête de liste, la ville de Caen prenant la 7e place du classement devant Reims, Amiens et Paris (Observatoire des villes vertes, 2023).

L'agglomération caennaise, comme mentionné auparavant, possède effectivement un grand nombre d'espaces verts, mais a également mis en place des projets d'aménagements qui visent à rendre la ville plus verte. Un certain nombre d'entre eux seront présentés dans cette partie.

2.1) Le château de Guillaume le Conquérant

Le réaménagement de l'enceinte du château de Guillaume le Conquérant, situé au cœur de la ville de Caen, est un projet phare de la municipalité. Dans l'objectif de restaurer et de remettre en valeur ce site majeur, un Schéma Directeur de conservation et d'aménagement a été rédigé pour la période de 2017 à 2037. En plus des aménagements paysager mis en place autour des remparts, l'enceinte du château a vocation de devenir un nouveau poumon vert du centre-ville.

Ce projet prévoit entre autres la végétalisation de 75% des surfaces de l'intérieur du château, ce qui correspond à environ 3 ha d'espaces verts aménagés comprenant de la végétation basse et de la végétation arborée. De plus, la circulation des voitures y sera interdite, laissant la place à des allées permettant aux visiteurs d'accéder aux différents musées présents sur ce site. Les pelouses seront irriguées à l'aide d'un système de récupération des eaux pluviales.

Les coûts de ce projet, qui prévoit également la construction d'un nouvel espace d'accueil de 700 m², sont estimés à hauteur de 21 millions €. Le réaménagement du château est co-financé par la Ville, la Direction régionale des affaires culturelles de Normandie, le conseil régional, le conseil départemental ainsi que par l'Union européenne via le Fonds européen de développement régional. La fin des travaux est annoncée pour l'année 2025 (Ville de Caen, 2024).

En créant un nouvel espace vert d'une superficie non négligeable au centre-ville, il est possible que le projet de réaménagement du château permette la mise en place d'un îlot de fraîcheur. Situé en hauteur par rapport au centre-ville mais étant entouré de remparts, il est possible que ce dernier ne communique pas réellement avec les environs. De plus, les données du réseau IDEES ont montré que les différences de températures en journée entre les espaces verts et les espaces minéraux ne sont que très faibles. Il est donc possible qu'il en soit de même pour l'enceinte du château.

Néanmoins, il serait intéressant d'y installer une station météorologique pérenne lorsque les travaux seront achevés. On pourrait également envisager des campagnes de mesure à échelle plus fine qui viseraient à mesurer s'il existe des différences de température de l'air entre les espaces situés sous les arbres d'alignement, les espaces recouverts uniquement de pelouse et les espaces aux revêtements imperméables. Ces mesures pourraient être faites à différentes hauteurs du sol, pour voir s'il existe un gradient vertical. Finalement, il serait également envisageable de procéder à des estimations de température ressentie, comme cela peut être fait grâce à l'indice UTCI prenant en compte plusieurs paramètres comme la température, l'humidité de l'air, le rayonnement et le vent. Ainsi, on pourrait en apprendre plus sur le climat vécu dans un espace vécu.



Figure 185: Projet de végétalisation de l'enceinte du château de Caen - Source : (Ville de Caen, 2024)

2.2) La Place Foch

La place Foch a déjà été évoquée dans ce mémoire par rapport à l'influence que l'espace vert de la Prairie peut avoir sur les températures de l'air mesurées dans cet espace. Selon la direction du vent, cette place profite de l'entrée d'air frais depuis la Prairie et qui pourrait potentiellement pénétrer plus loin dans l'espace urbain par cet axe.

Alors que jusque-là, la place Foch était très minérale et dédiée à la circulation des voitures, des travaux y ont été entamés en mars 2024. Ce projet est le fruit d'une phase de concertation menée auprès des riverains entre 2022 et 2023 et prévoit le réaménagement et la végétalisation de cette place, tout en conservant sa vocation patrimoniale.

En plus de l'utilisation de revêtements perméables facilitant l'infiltration des eaux pluviales, ce projet prévoit la plantation d'une trame arborée, la végétalisation d'une partie des surfaces avec de la pelouse et l'intégration d'une végétation arbustive. Ainsi, trois strates végétatives seront présentes à la place Foch. La circulation des voitures sera également adaptée, avec une part plus importante accordée aux mobilités douces comme la marche ou le vélo. La réouverture de la place au public après les travaux est prévue pour 2025 (Ville de Caen, 2024).



Figure 186: Projet de végétalisation de la place Foch - Source : (Ville de Caen, 2024)

Comme on peut le voir sur l'illustration ci-dessus, la végétalisation de la place Foch se présentera comme un prolongement de l'espace vert de la Pairie vers le centre-ville, plus précisément vers le quartier St. Jean. En ce sens, il sera intéressant de voir si la végétalisation de cette place influencera la capacité de l'air frais à pénétrer dans l'espace urbain. Il sera donc nécessaire de procéder à davantage de campagnes de mesure sur des transects dans les rues situées dans le prolongement de cet axe.

2.3) La rue de la Délivrande

La rue de la Délivrande constitue un axe de circulation important reliant le périphérique Nord avec le centre-ville de Caen. Lors d'une réunion publique en 2023, la ville de Caen a présenté son projet de réaménagement de cet axe qui devrait débuter en 2025.

Après le confinement en mars 2020, des pistes cyclables provisoires ont été aménagées dans la rue de la Délivrande. L'objectif de ce projet est alors de requalifier cet axe de circulation en donnant davantage de place à la mobilité douce par la création de pistes cyclables en partie séparées de la voie automobile et en l'augmentant la sécurité des piétons en sécurisant les traversées piétonnes et en limitant la vitesse des voitures. La plantation d'arbres et la végétalisation de certaines surfaces fait également partie du projet afin de diminuer les nuisances sonores et d'augmenter la qualité paysagère le long de cet axe de circulation (Ville de Caen, 2023).

Bien que la végétalisation ne soit probablement pas assez importante pour changer fondamentalement la dynamique thermique de cet espace, les arbres pourront procurer de l'ombre à une partie des surfaces minérales et surtout aux usagers de cette rue. En changeant l'aménagement d'un espace, on peut effectivement influencer la manière dont il est pratiqué.



Figure 187: Projet de réaménagement de la rue de la Délivrande - Source : (Ville de Caen, 2023)

2.4) Le projet tramway

Depuis 2019, l'agglomération caennaise dispose d'un nouveau tramway dont la mise en place a demandé des travaux importants sur les axes concernés. Dans le cadre de ce projet, 50% des plateformes du tram ont fait l'objet d'une végétalisation par l'installation d'une pelouse, ce qui correspond à 55.000 m² équivalents à environ 5 terrains de football (Lecornu-Baert, 2019).

L'extension du réseau de tram dont la mise en service est prévue pour 2028 desservira des quartiers de l'ancien Caen à l'ouest du centre-ville, en partie très minéralisés, comme dans les alentours de la rue Caponnière par exemple. Les travaux du nouveau tramway seront alors également une occasion pour végétaliser une partie de ces espaces, notamment par l'installation de pelouse sur les plateformes, mais aussi par la plantation d'arbres d'alignement lorsque les conditions sur place le permettent (Caen la Mer, s.d.).

Comme pour la rue de la Délivrande, la végétalisation de l'espace telle qu'elle est prévue dans le cadre du projet Tramway 2028 ne changera pas foncièrement le climat urbain, mais pourrait néanmoins permettre de limiter légèrement la surchauffe urbaine en diminuant la part de surfaces minérales à forte inertie thermique et donc limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain.



Figure 188: Projet Tramway 2028 - proposition d'aménagement végétalisé devant l'hôtel de ville - Source : (Caen la Mer, s.d.)

2.5) Les mini-forêts urbaines

En dehors des initiatives prises par la commune de Caen ou la communauté urbaine de Caen la Mer, certains établissements d'enseignement caennais se sont engagés dans la plantation d'une mini-forêt.

Ces mini-forêts, comme toute mesure de végétalisation, offrent plusieurs services écosystémiques à la communauté, comme l'amélioration de la biodiversité et le captage de carbone, mais également la modification du régime thermique d'une surface, ce qui permet donc de lutter contre les îlots de chaleur urbains voire de créer un îlot de fraîcheur très localisé. A Caen, l'association MiniBigForest Normandie, créée en mai 2022, a participé à la plantation de deux mini-forêts, dont une sur le Campus 1 de l'Université de Caen et une autre dans la cour du collège Villey-Desmeserets située sur la rive droite.

La mini-forêt du Campus 1 a été plantée sous l'initiative des doctorants de l'unité mixte de recherche M2C. Grâce à l'aide d'une quarantaine de bénévoles, ce projet a pu être mis en place en février 2024. Cette mini-forêt est constituée de strates végétales variées, intégrant des arbres et des arbustes d'essence locale. Une station météorologique intégrée au réseau IDEES sera installée dans la mini-forêt et permettra de mesurer les effets de cette dernière sur les différents paramètres climatiques. Sur le long terme, l'Université de Caen souhaite multiplier le nombre de mini-forêts sur les différents campus de l'agglomération (Université de Caen Normandie, 2024).

Sur l'autre rive de l'Orne, au collège Villey-Desmeserets, plus de 700 arbres ont été plantés dans l'enceinte de l'établissement scolaire. Une classe de 5^e, rebaptisée la classe forêt, a été désignée pour assurer la survie de la mini-forêt jusqu'à ce qu'elle soit autonome. En plus de constituer un îlot de fraîcheur dans une cour jusque-là très minéralisée, l'objectif de cette mesure est également de sensibiliser les élèves à l'environnement (Verger, 2023).



Figure 189: Plantation de la mini-forêt au Campus 1
- Source : (Université de Caen Normandie, 2024)



Figure 190: Plantation de la mini-forêt dans la cour du collège Villey-Desmeserets - Source : (Verger, 2023)

D'autres projets de plantation de mini-forêt sont prévus par l'association MiniBigForest, notamment dans la cour du lycée Jean Rostand à Caen ou encore devant l'école primaire Jean Goueslard à Fleury-sur-Orne.

Au regard des données récoltées par les stations météo situées dans les cimetières dormants de St. Jean et St. Pierre, on peut se demander si la plantation d'une mini-forêt peut réellement permettre la mise en place d'un îlot de fraîcheur. Néanmoins, les observations faites à la Colline aux Oiseaux indiquent qu'il est possible qu'une végétation arborée dense mais bien ventilée, ce qui n'est pas le cas aux cimetières dormants, puisse représenter un espace frais. L'installation de la station météo dans la mini-forêt du Campus 1 permettra d'étudier cette hypothèse lorsque cette dernière aura poussé.

3) Conclusion

Les différents projets présentés dans ce chapitre montrent bien qu'il existe un très grand nombre de possibilités d'intégrer ou de réintégrer la nature en ville. Que ce soit par la végétalisation des façades et des toitures, par la plantation d'arbres, par la création ou la réhabilitation de parcs urbains ou même par l'intégration de la nature dans les projets d'actualisation du réseau de voirie, la nature peut prendre place partout.

Dans l'objectif d'optimiser le plus possible les mesures de végétalisation et donc de maximiser les services écosystémiques apportés par les solutions fondées sur la nature, la mise en place de projets d'aménagement doit prendre en compte des données scientifiques. De plus, dans une démarche de développement durable qui se doit d'intégrer toutes les parties prenantes dans les différentes étapes d'un projet, la dimension participative et transdisciplinaire des projets d'aménagement urbain durable est fondamentale. Les collaborations entre les services d'urbanismes, les universitaires, les associations et les habitants s'observent de plus en plus fréquemment, comme on a pu le voir grâce aux différents exemples apportés dans cette partie.

La ville de Caen ne fait pas exception aux autres villes françaises ayant engagé des stratégies de végétalisation de l'espace urbain. Néanmoins, les défis qu'apporte le XXI^e siècle ne permettent pas de se reposer sur ses acquis. En 2022, la région Normandie a voté sa Stratégie régionale pour la biodiversité, prévoyant notamment la mise en place d'un plan d'action trame verte et bleue dans 100% des EPCI d'ici 2030. De plus, elle prévoit la création de 40 projets d'adaptation des territoires au changement climatique basés sur les solutions fondées sur la nature, mais également l'augmentation de 30% par rapport aux chiffres de 2024 des surfaces urbaines végétalisées d'ici 2030 (DREAL Normandie, 2023).

Ces objectifs ambitieux témoignent d'une volonté forte de la région, sous l'initiative de la Stratégie nationale biodiversité 2030, d'accélérer la transition écologique et plus précisément l'adaptation des territoires aux enjeux posés par les conséquences du changement climatique. De nombreux défis se présentent alors aujourd'hui à Caen, tout comme dans les autres villes françaises, nécessitant la mise en place d'actions efficaces afin de préparer au mieux le terrain pour les futures générations. Les recherches autour des ICU et des IFU ne sont d'ailleurs pas réservées aux grandes agglomérations, mais seront également de plus en plus présentes dans les petites et moyennes villes, comme le montre l'exemple du mémoire mené cette année par Lucas Perier sur l'îlot de chaleur urbain à Bayeux.

Conclusion générale

L'objectif premier de ce mémoire était d'étudier le fonctionnement thermique de différents espaces verts de l'agglomération caennaise afin de déterminer l'existence d'îlots de fraîcheur urbains capables de constituer des espaces frais intra-urbains et ainsi de lutter contre les îlots de chaleur urbains et la surchauffe urbaine en général.

Les données enregistrées par le réseau IDEES qui comprend une vingtaine de stations météorologiques réparties sur l'ensemble de la ville ont en effet montré l'existence d'un îlot de chaleur à Caen pouvant dépasser les 6°C de différence entre le centre-ville et la Prairie (référence campagne). Selon les conditions de surface, c'est-à-dire selon le type d'occupation du sol, la densité urbaine et la topographie, l'ICU présente des intensités différentes. Plus l'espace urbain est dense, minéral et confiné, plus les écarts de températures semblent importants, comme le montre l'exemple de la station météo située dans la cour intérieure d'un îlot de bâtiments dans le quartier St. Jean.

Les différentes études présentées dans le chapitre 2 et les projets de végétalisation de l'espace urbain évoqués dans la dernière partie de ce mémoire ont montré que les solutions fondées sur la nature peuvent participer à lutter contre la chaleur en ville tout en proposant un grand nombre de services écosystémiques. En plus de contribuer à une meilleure gestion des eaux pluviales, à l'amélioration de la biodiversité, au captage de carbone ou encore au bien-être des habitants, la végétation peut, en procurant de l'ombre et par le processus d'évapotranspiration, contribuer à diminuer localement les températures de surface et les températures de l'air.

La ville de Caen, classée en 7^e position des villes les plus vertes de France, possède plusieurs espaces verts qui ont fait l'objet d'une analyse détaillée. Six d'entre eux sont équipés d'une station permanente intégrée au réseau IDEES : le Jardin des Plantes, le Campus 1, les deux cimetières dormants de St. Jean et de St. Pierre ainsi que la Prairie et la rue du Québec.

L'étude des valeurs moyennes des mois de janvier et de juillet 2024 basée sur des écarts de températures entre le centre-ville (Tour Leroy) et celles des espaces verts a permis de mettre en évidence la variation temporelle des IFU.

Premièrement, tout comme pour les ICU, on observe généralement des écarts moyens plus importants en été qu'en hiver, certainement dus aux types de temps favorables qui sont plus fréquents en période estivale. De plus, les écarts négatifs en journée sont globalement très faibles, voire positifs, avec des températures parfois supérieures à celles mesurées au centre-ville, notamment au Jardin des Plantes. A la tombée de la nuit, les écarts se creusent progressivement pour atteindre des valeurs

pouvant dépasser les -4°C et -5°C dans les espaces verts les plus propices à la formation d'air frais. Les IFU sont donc, tout comme les ICU, des phénomènes nocturnes plus fréquents et plus marqués en été.

Grâce à l'analyse à une échelle temporelle plus fine, c'est-à-dire sur un cycle de 24h où les conditions météorologiques ont été favorables à la mise en place des IFU, on a pu observer des détails intéressants concernant les dynamiques thermiques des différents espaces verts.

Alors que les deux cimetières dormants, par leur végétation arborée très dense et leur confinement, ne semblent pas montrer d'écarts importants avec le centre-ville, le Jardin des Plantes, la Prairie et la rue du Québec ont la capacité de se rafraîchir rapidement au coucher du soleil et ainsi de creuser les écarts au cours de la nuit (cf. exemples du 10 au 11 mai et du 23 au 24 juin 2024). Cette situation s'explique par l'effet conjoint de la topographie en creux, favorisant l'accumulation d'air frais et donc la mise en place d'un trou à froid, et d'une composition végétale marquée par l'absence d'une végétation arborée dense capable d'empêcher les échanges thermiques entre le sol et l'atmosphère. L'importance de ces deux paramètres a également pu être démontrée par la campagne de mesure menée à la Vallée des Jardins, qui a montré des températures particulièrement faibles dans le fond de vallée par rapport au centre-ville (écarts jusqu'à -5°C).

Bien que la composition végétale du Campus 1, qui est marquée par de la végétation basse, pourrait laisser penser qu'on y observerait une baisse des températures importante, les écarts nocturnes ne sont pas particulièrement élevés et suivent globalement la dynamique des cimetières dormants. En journée, le vent provenant du nord semble néanmoins être capable de faire pénétrer l'air frais apporté depuis la mer sur le Campus 1, ce qui permet d'y observer des températures généralement inférieures à celle des autres espaces verts et de la Tour Leroy.

Le vent est d'ailleurs un paramètre clé dans l'étude du climat d'une ville puisqu'il peut engendrer le déplacement des masses d'air d'un espace vers un autre. La Prairie en est un exemple, puisqu'elle semble subir l'influence des espaces qui l'entourent. Lorsque le vent provient du nord, la chaleur de la ville déborde sur l'espace vert et on y observe donc des températures proches de la Tour Leroy. Dès que le vent tourne au sud-ouest, l'influence de la ville sur la Prairie est coupée et permet l'entrée d'air frais depuis la rue du Québec. On observe alors un décalage entre ces deux espaces verts qui est donc lié à la direction du vent. L'axe de la vallée de l'Orne peut alors constituer un couloir de circulation d'air important pour apporter de la fraîcheur en ville, comme le montre l'exemple de la place Foch.

En plus de la Vallée des Jardins, les campagnes de mesure temporaires menées à la Colline aux Oiseaux, à la forêt d'Ifs et dans le parc du Biez à Mondeville en juillet et en août 2024 ont permis de récolter des données dans les espaces verts qui ne possèdent pas de station météo permanente.

L'étude de la forêt d'Ifs et du parc du Biez avait comme objectif de déterminer si la taille de l'espace vert densément boisé peut influencer la dynamique thermique, notamment en comparaison avec les deux cimetières dormants. En effet, il semblerait que la fraîcheur au moment du coucher de soleil y soit plus marquée, mais davantage de mesures sont nécessaires pour confirmer cette tendance et étudier la dynamique thermique des forêts sur un cycle de 24h.

La position topographique de la Colline aux Oiseaux, située en haut du plateau nord, pourrait entraver la mise en place d'un îlot de fraîcheur nocturne. Néanmoins, les mesures effectuées en journée semblent indiquer la possibilité d'un IFU diurne, notamment dans les espaces couverts par les arbres.

Finalement, les données obtenues grâce aux campagnes de mesure temporaires indiquent la possibilité d'une diffusion de l'air frais depuis les espaces verts vers les environs. Davantage de campagnes de mesure sont cependant nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

En résumé, on peut donc retenir que la rue du Québec, la Prairie, le Jardin des Plantes et la Vallée des Jardins peuvent être qualifiés de réels îlots de fraîcheur. Le fait que ces 4 espaces verts soient situés dans une dépression topographique montre bien l'importance de prendre en compte ce paramètre dans l'étude des IFU. De plus, une végétation arborée trop dense, comme aux cimetières dormants, peut provoquer un blocage de l'air et donc empêcher les échanges radiatifs entre la surface terrestre et l'atmosphère.

Les résultats et les conclusions proposés dans ce mémoire montrent que l'étude des IFU et du climat urbain à Caen en général est loin d'être terminée. Les perspectives de recherches, que ce soit sur l'étude des dynamiques thermiques, de la diffusion de l'air, du rôle des températures de surface ou de l'impact des différentes mesures de végétalisation de l'espace urbain, sont infinies.

Les différents projets d'aménagement mis en place à Caen et la Stratégie régionale pour la biodiversité montrent bien l'engagement pris par les différentes collectivités territoriales pour l'intégration de la végétation en ville dans le cadre de leur adaptation aux conséquences du changement climatique. On peut donc espérer que cette volonté amènera également des collaborations entre le monde de l'urbanisme et le monde scientifique par la mise en place de projets communs et de financements permettant l'élargissement des études en cours.

La subvention de l'agrandissement du réseau IDEES par la communauté urbaine de Caen la Mer est une première étape importante pour permettre la poursuite des études à Caen. J'espère alors pouvoir suivre l'évolution de ce projet d'étude de près et continuer à contribuer à la recherche dans ce domaine.

Table des figures

Figure 1: Exemple d'un îlot de chaleur urbain dans l'agglomération parisienne - (Agence Parisienne du Climat, 2024)	5
Figure 2: Schéma d'un dôme urbain et d'un panache urbain - (Oke, Mills, Christen, & Voogt, 2017)	10
Figure 3: Schéma représentant les différentes couches et sous-couches de la couche limite urbaine (CLU) - Réalisation : C. Zangerl	11
Figure 4: Tableau récapitulatif des différentes couches et sous-couches de la couche limite urbaine (CLU) - Réalisation : C. Zangerl	12
Figure 5: Schéma du bilan énergétique à la surface du sol – (Guyot, 1999)	14
Figure 6: Schéma représentant le bilan radiatif en milieu naturel et en milieu urbain - (Sturman & Quenol, 2024)	15
Figure 7: Représentation des valeurs de l'albédo des différentes surfaces en milieu urbain - (collectivitesviables.org, 2013)	16
Figure 8: Représentation de l'indice du sky view factor à l'aide de photos "fisheye" et d'une schématisation en noir et blanc - (Middel, Lukasczyk, Maciejewski, Demuzere, & Roth, 2018)	18
Figure 9: Schéma représentant l'effet brise-vent d'un obstacle - (Guyot, 1999)	19
Figure 10: Schéma synthétisant les principaux mécanismes à l'origine de la modification du bilan énergétique en ville - (Agence Parisienne du Climat, 2024)	19
Figure 11: Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain à Paris à l'aide d'isolignes de température - (Cantat, 2004)	20
Figure 12: Photo du centre-ville de Caen (rue Saint Pierre), fortement minéralisé - Source: Google Earth	21
Figure 13: Photo de la station météo installée dans l'îlot de bâtiment permettant d'affirmer une surchauffe à l'intérieur de la cour - Source : O. Cantat	21
Figure 14: Photo d'un quartier résidentiel à Caen (rue Maurice Souriau) - Source: Google Earth	21
Figure 15: Représentation synthétique de la classification LCZ selon Stewart et Oke (2012) - Source : (Migliari, Briche, Despax, Chesne, & Baverel, 2024)	22
Figure 16: Vue aérienne d'un îlot de bâtiment en centre-ville de Caen (Tour Leroy) - Source : Google Earth	22
Figure 17: Schéma représentant les mécanismes de brise de mer et de terre - (Guyot, 1999)	23
Figure 18: Graphique représentant la force et la direction du vent entre le 10 et le 11 mai 2024 - Réalisation : C. Zangerl	24
Figure 19: Présentation des variables météorologiques et de leur discrétisation pour la classification des types de temps - (Cantat, 2015)	25
Figure 20: Exemple d'un îlot de chaleur observé dans la nuit du 18 au 19 juillet 2022 à Caen - Source : O. Cantat	27
Figure 21: Graphique présentant les différences de températures entre le centre-ville de Caen et la Prairie à pas de temps de 10 minutes entre le 10 avril 2022 et le 1er juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl, inspiré des travaux de O. Cantat	28
Figure 22: Infographie sur le risque d'occurrence d'une canicule semblable à celle de 2003. – Source : (Météo France, 2023)	31
Figure 23: Expérimentation d'arrosage de la chaussée à Lyon (juillet 2012) - Source : (Métropole de Lyon, 2012)	36
Figure 24: Rôle de l'arbre dans l'interception et la réflexion des rayons solaires et explication du mécanisme d'évapotranspiration – Source : (Office Nationale des Forêts, 2022)	37
Figure 25: Bosco verticale à Milan - Source : (Centre-ville en mouvement, 2016)	39
Figure 26: Façade végétale à Hambourg - Source : (Stadt Hamburg, 2024)	39
Figure 27: Infographie présentant les services écosystémiques rendu par l'arbre - Source : (Cerema, 2019)	41
Figure 28: Carte des îlots de fraîcheur à Paris - Source : (Ville de Paris, 2020)	43

Figure 29: (a) Zone tampon élaborée par l'étude ; (b) Illustration de la variation des températures de surface selon la distance ; (c) Efficacité de refroidissement selon le modèle - Source : (Wang, et al., 2022).....	45
Figure 30: Zone d'étude au centre de Londres de le cadre des recherches de Doick et all. (2014) - Source : (Doick, Peace, & Hutchings, 2014)	47
Figure 31: Carte de localisation de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl.....	51
Figure 32: Carte topographique de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl.....	52
Figure 33: Coupe topographique de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl	53
Figure 34: Bloc diagramme de l'agglomération caennaise montrant la topographie, les bâtiments (noirs) et les principales voies de communications (rouge) - Réalisation : C. Zangerl	53
Figure 35: Carte d'occupation du sol de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl	55
Figure 36: Planche photographique des 5 grands types d'occupation du sol de l'agglomération caennaise - Source : Google Earth.....	56
Figure 37: Carte des principaux espaces verts de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl.....	57
Figure 38: Carte présentant l'espace vert de la Prairie - Réalisation : C. Zangerl.....	59
Figure 39: Coupes topographiques de la Prairie - Réalisation : C. Zangerl	59
Figure 40: Carte présentant l'ENS des Marais de l'Orne et de la Noë - Réalisation : C. Zangerl.....	61
Figure 41: Coupe topographique de l'ENS des Marais de l'Orne et de la Noë - Réalisation : C. Zangerl.....	61
Figure 42: Coupes topographiques de l'ENS de la Vallée de l'Odon - Réalisation : C. Zangerl	62
Figure 43: Carte présentant l'ENS de la Vallée de l'Odon - Réalisation : C. Zangerl	63
Figure 44: Coupes topographiques du Jardin des Plantes - Réalisation : C. Zangerl	64
Figure 45: Carte présentant le Jardin des Plantes - Réalisation : C. Zangerl.....	65
Figure 46: Carte présentant le Jardin des Plantes - Réalisation : C. Zangerl.....	65
Figure 47: Carte présentant la topographie et la végétation à la Vallée des Jardins - Réalisation : C. Zangerl	66
Figure 48: Coupes topographiques de la Vallée des Jardins - Réalisation : C. Zangerl	67
Figure 49: Carte présentant la topographie et la végétation à la Colline aux Oiseaux et aux Jardins du souvenir	68
Figure 50: Coupe topographique à la Colline aux Oiseaux et aux Jardins du souvenir – Réalisation : C. Zangerl .	68
Figure 51: Carte présentant le Campus 1 de l'Université de Caen - Réalisation : C. Zangerl.....	69
Figure 52: Coupe topographique du Campus 1 - Réalisation : C. Zangerl	70
Figure 53: Carte présentant les cimetières St. Pierre et St. Jean - Réalisation : C. Zangerl	71
Figure 54: Coupe topographique du cimetière St. Jean - Réalisation : C. Zangerl.....	71
Figure 55: Carte présentant la topographie et la végétation du parc du Biez - Réalisation : C. Zangerl	73
Figure 56: Coupe topographique du parc du Biez - Réalisation : C. Zangerl.....	73
Figure 57: Carte présentant la forêt d'Ifs - Réalisation : C. Zangerl	74
Figure 58: Tableau récapitulatif des principaux espaces verts de l'agglomération caennaise	76
Figure 59: Diagramme ombrothermique pour Caen (Carpiquet) selon la normale de 1991 à 2020 - Données : Météociel; Réalisation : C. Zangerl	77
Figure 60: Tableau représentant les normales de température et de précipitations à Caen (Carpiquet) pour la période de 1991 à 2020 - Données : Météociel; Réalisation : C. Zangerl.....	78
Figure 61: Projections du climat normand à l'horizon moyen et lointain selon les scénarios optimistes et pessimistes du GIEC - Source : (GIEC Normand, 2023).....	79
Figure 62: Graphique représentant la part des types de temps favorables à défavorables aux ICU selon les saisons à Caen basé sur la période de 2001 à 2023 - Réalisation : O. Cantat	79
Figure 63: Photo d'une station météorologique avec abri MétéoHelix – Source : (Barani, 2024)	83
Figure 64: Fonctionnement d'un abri MétéoHelix - Source : (Barani, 2024).....	83
Figure 65: Tableau récapitulatif des stations météorologiques du réseau IDEES et leurs principales caractéristiques	84
Figure 66: Carte de localisation des stations météorologiques du réseau IDEES.....	86
Figure 67: Plage photographique des stations météo des espaces minéraux du centre-ville de Caen - Source : C. Zangerl; O. Cantat.....	87

Figure 68: Planche photographique des espaces verts confinés de l'agglomération caennaise - Source : C. Zangerl	88
Figure 69: Planche photographique des grands espaces verts ouverts de l'agglomération caennaise - Source : C. Zangerl, Google Earth.....	89
Figure 70: Photo d'une station météo montée sur un vélo pour les campagnes de mesures itinérantes - Source : L. Perier	91
Figure 71: Station météo montée sur un trépied utilisé pour les campagnes de mesures temporaires itinérantes ou fixes – Source : C. Zangerl.....	91
Figure 72: Graphique présentant les différences de températures entre le centre-ville de Caen et la Prairie à pas de temps de 10 minutes entre le 10 avril 2022 et le 1er juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl, inspiré des travaux de O. Cantat	94
Figure 73: Graphique montrant l'écart de température moyen entre la Prairie et le centre-ville en juillet 2022 - Réalisation : C. Zangerl	94
Figure 74: Graphique représentant l'écart de température moyen entre la Prairie et le centre-ville en janvier 2023 – Réalisation : C. Zangerl	94
Figure 75: Graphique représentant les écarts de températures moyens entre la Prairie et le centre-ville pour la période du 11 avril 2022 au 23 juin 2024 – Réalisation : O. Cantat	95
Figure 76: Températures observées dans le nord-ouest de la France dans l'après-midi du 18 juillet 2022 - Source : Météociel	96
Figure 77: Géopotential à 500hPa et pression atmosphérique au niveau de la mer (hPa) le lundi 18 juillet à midi - Source : Météociel	96
Figure 78: Graphique montrant la vitesse moyenne et maximale du vent à la Prairie entre le 18 juillet 2022 à midi et le 19 juillet 2022 à midi (Heure UTC) - Réalisation : C. Zangerl.....	97
Figure 79: Graphique représentant les températures à la Place Bouchard et à la Prairie ainsi que les écarts du 18 au 19 juillet 2022 – Réalisation : C. Zangerl ; inspiré des travaux de O. Cantat.....	97
Figure 80: Carte montrant les températures aux différentes stations du réseau IDEES et les écarts à la Prairie le 19 juillet 2022 à 2h UTC - Réalisation : C. Zangerl	98
Figure 81: Graphique présentant la diffusion de l'air frais depuis la Prairie vers la Place Foch dans la nuit du 21 au 22 juillet 2022 - Source : O. Cantat.....	99
Figure 82: Géopotential à 500 hPa et pression atmosphérique au niveau de la mer (hPa) au matin du 21 avril 2024 - Source : Météociel	101
Figure 83: Nébulosité dans le nord-ouest de la France le 21 avril 2024 à 5h - Source : Météociel.....	101
Figure 84: Graphique présentant la direction et la force du vent du 20 au 21 avril 2024 - Réalisation : C. Zangerl	102
Figure 85: Graphique montrant l'ICU observée lors de la nuit du 20 au 21 avril 2024 - Réalisation : C. Zangerl	102
Figure 86: Graphique représentant les températures observées à la Prairie et aux 5 stations du centre-ville du 20 au 21 avril 2024 - Réalisation : C. Zangerl	103
Figure 87: Carte indiquant les températures et les écarts à la Prairie à 2h UTC le 21 avril 2024	105
Figure 88: Carte indiquant les températures et les écarts à la Prairie à 4h UTC le 21 avril 2024	105
Figure 89: Carte indiquant les températures, les écarts à la Prairie et l'évolution de la température entre 4h et 4h50 UTC le 21 avril 2024 - Réalisation : C. Zangerl	107
Figure 90: Carte indiquant les températures, les écarts à la Prairie et l'évolution de la température entre 4h50 et 5h30 UTC le 21 avril 2024 - Réalisation : C. Zangerl	107
Figure 91: Carte indiquant les températures et les écarts à la Prairie à 06h UTC le 21 avril 2024.....	108
Figure 92: Graphique présentant les différences de température entre le Jardin des Plantes et la Tour Leroy du 1er janvier 2024 au 14 juillet 2024 – Réalisation : C. Zangerl	111
Figure 93: Tableau statistique du Jardin des Plantes - Réalisation : C. Zangerl	111
Figure 94: Graphique montrant l'écart de température maximal et minimal par jour entre le Jardin des Plantes et la Tour Leroy du 1er janvier au 14 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl	112

Figure 95: Graphique montrant l'écart moyen par heure pour le mois de janvier et de juin 2024 au Jardin des Plantes - Réalisation : C. Zangerl	113
Figure 96: Graphique présentant les différences de température entre le cimetière St. Jean et la Tour Leroy du 1er janvier 2024 au 14 juillet 2024 – Réalisation : C. Zangerl	114
Figure 97: Tableau statistique du cimetière St. Jean - Réalisation : C. Zangerl.....	114
Figure 98: Graphique montrant l'écart de température maximal et minimal par jour entre le cimetière St. Jean et la Tour Leroy du 1er janvier au 14 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl	114
Figure 99: Graphique montrant l'écart moyen par heure pour le mois de janvier et de juin 2024 au cimetière St. Jean- Réalisation : C. Zangerl.....	115
Figure 100: Graphique présentant les différences de température entre le cimetière St. Pierre et la Tour Leroy du 1er janvier 2024 au 14 juillet 2024 – Réalisation : C. Zangerl	116
Figure 101: Tableau statistique du cimetière St. Pierre - Réalisation : C. Zangerl	116
Figure 102: Graphique montrant l'écart de température maximal et minimal par jour entre le cimetière St. Jean, le Jardin des Plantes et la Tour Leroy du 1er janvier au 14 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl	117
Figure 103: Graphique montrant l'écart moyen par heure pour le mois de janvier et de juin 2024 au cimetière St. Jean et au Jardin des Plantes - Réalisation : C. Zangerl	117
Figure 104: Graphique présentant les différences de température entre le campus 1 et la Tour Leroy du 1er janvier 2024 au 14 juillet 2024 – Réalisation : C. Zangerl.....	119
Figure 105: Tableau statistique du Campus 1 - Réalisation : C. Zangerl	119
Figure 106: Graphique montrant l'écart de température maximal et minimal par jour entre le Campus 1, le cimetière St. Jean et la Tour Leroy du 1er janvier au 14 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl	120
Figure 107: Graphique montrant l'écart moyen par heure pour le mois de janvier et de juin 2024 au Campus et au cimetière St. Jean - Réalisation : C. Zangerl.....	121
Figure 108: Graphique présentant les différences de température entre la Prairie et la Tour Leroy du 1er janvier 2024 au 14 juillet 2024 – Réalisation : C. Zangerl.....	122
Figure 109: Tableau statistique de la Prairie - Réalisation : C. Zangerl	122
Figure 110: Graphique montrant l'écart de température maximal et minimal par jour entre la Prairie et la Tour Leroy du 1er janvier au 14 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl	123
Figure 111: Graphique montrant l'écart moyen par heure pour le mois de janvier et de juin 2024 à la Prairie - Réalisation : C. Zangerl	124
Figure 112: Graphique présentant les différences de température entre la rue du Québec et la Tour Leroy du 1er janvier 2024 au 14 juillet 2024 – Réalisation : C. Zangerl.....	125
Figure 113: Tableau statistique de la rue du Québec - Réalisation : C. Zangerl.....	125
Figure 114: Graphique montrant l'écart de température maximal et minimal par jour entre la rue du Québec et la Tour Leroy du 1er janvier au 14 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl.....	125
Figure 115: Graphique montrant l'écart moyen par heure pour le mois de janvier et de juin 2024 à la Prairie - Réalisation : C. Zangerl	126
Figure 116; Nébulosité sur le nord-ouest de la France le vendredi 10 mai 2024 à 22h locale - Source : Météociel	130
Figure 117: Géopotential à 500 hPa et pression atmosphérique au niveau del amer (hPa) - Source : Météociel	130
Figure 118: Graphique montrant la direction et la force du vent le 10 et 11 mai 2024 - Réalisation : C. Zangerl	131
Figure 119: Graphique montrant les températures à la Tour Leroy et aux 6 stations vertes de l'agglomération - Réalisation : C. Zangerl	131
Figure 120: Graphique montrant les écarts de températures entre la Tour Leroy et les 6 stations vertes de l'agglomération caennaise du 10 au 11 mai 2024 - Réalisation : C. Zangerl	132
Figure 121: Graphique montrant les températures à la Tour Leroy et aux 6 stations vertes du 23 au 24 juin 2024 - Réalisation : C. Zangerl	134

Figure 122: Graphique montrant les dynamiques thermiques du Jardin des Plantes, de la Prairie et de la rue du Québec ainsi que de la Tour Leroy du 23 au 24 juin 2024 - Réalisation : C. Zangerl	135
Figure 123: Station installée dans l'espace urbain à proximité du parc de la Vallée des Jardins - Photo : G. Carlier	137
Figure 124: Station installée sur le versant sous les arbres - Photo : C. Zangerl	138
Figure 125: Station installée dans le fond de vallée – Photo : E. Lécureuil	138
Figure 126: Carte de localisation des stations météo à la Vallée des Jardins pour la campagne de mesure du 18/07/2024 - Réalisation : C. Zangerl.....	138
Figure 127: Graphique des températures mesurées aux trois stations de la Vallée des Jardins le 18/07/2024 au coucher du soleil - Réalisation : C. Zangerl.....	139
Figure 128: Ecarts de température entre les deux stations vertes et la station urbaine à la Vallée des Jardins le 18/07/2024 au coucher du soleil - Réalisation : C. Zangerl.....	140
Figure 129: Graphique des températures mesurées à la Vallée des Jardins au matin du 19 juillet 2024	140
Figure 130: Graphique des écarts entre les deux stations vertes et la station urbaine de la Vallée des Jardins au matin du 19/07/2024 - Réalisation : C. Zangerl.....	141
Figure 131: Appareil photo thermique utilisé lors de la campagne de mesure à la Vallée des Jardins	142
Figure 132: Photos prises dans le sous-bois (sud du parc) à 21h30	142
Figure 133: Photos prises dans le fond de vallée en direction du nord (gauche) et de l'ouest (droite)	143
Figure 134: Photos prises dans le fond de vallée à la Vallée des Jardins à 06h30 en direction du nord (haut) et de l'ouest (bas)	144
Figure 135: Photos de l'espace urbain à proximité de la Vallée des Jardins en direction du sud à 21h30.....	144
Figure 136: Photos de l'espace urbain à proximité de la Vallée des Jardins en direction du sud à 22h30.....	145
Figure 137: Photos de l'espace urbain à proximité de la Vallée des Jardins en direction de l'est à 21h30 (haut) et 22h30 (bas)	145
Figure 138: Photos de l'espace urbain à proximité de la Vallée des Jardins en direction du sud (haut) et de l'est (bas) à 06h20.....	146
Figure 139: Graphique des températures au coucher du soleil à la Vallée des Jardins, à la Tour Leroy et aux trois IFU de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl.....	147
Figure 140: Carte des températures aux différentes stations de l'agglomération caennaise et des écarts avec la Tour Leroy le 18/07/2024 à 21h30 locale – Réalisation : C. Zangerl	148
Figure 141: Carte des températures aux différentes stations de l'agglomération caennaise et des écarts avec la Tour Leroy le 18/07/2024 à 22h30 locale – Réalisation : C. Zangerl	149
Figure 142: Carte des températures aux différentes stations de l'agglomération caennaise et des écarts avec la Tour Leroy le 18/07/2024 à 22h30 locale – Réalisation : C. Zangerl	150
Figure 143: Emplacement des stations météo lors de la campagne de mesure du 29 au 30 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl	153
Figure 144: Station météo installée en haut de la colline - Photo : G. Carlier.....	154
Figure 145: Station météo installée en contre-bas de la colline - Photo : C. Zangerl	154
Figure 146: Températures à la Colline aux Oiseaux, à la Tour Leroy et aux 3 IFU de l'agglomération dans la nuit du 29 au 30 juillet 2024 - Réalisation : C. Zangerl	155
Figure 147: Carte des températures dans l'agglomération caennaise le 1er août 2024 à 15h30 - Réalisation : C. Zangerl	156
Figure 148: Carte de l'emplacement des stations météo lors de la campagne de mesure du 29 juillet à la forêt d'Ifs - Réalisation : C. Zangerl	157
Figure 149: Photo de la station située dans l'espace urbain - Photo : G. Carlier	158
Figure 150: Photo de la station située dans la forêt d'Ifs - Photo : C. Zangerl	158
Figure 151: Graphique des températures mesurées lors de la campagne à la forêt d'Ifs le soir du 29 juillet 2024 Réalisation : C. Zangerl	158

Figure 152: Graphique des températures mesurées lors de la campagne à la forêt d'Ifs le soir du 29 juillet 2024 à l'échelle de l'agglomération - Réalisation : C. Zangerl	159
Figure 153: Carte des températures observées à l'échelle de l'agglomération le 29/07/2024 à 22h00 locale - Réalisation : C. Zangerl	160
Figure 154: Carte de l'emplacement des stations météo lors de la campagne de mesure du 1er août 2024 au parc du Biez à Mondeville - Réalisation : C. Zangerl.....	163
Figure 155: Photo de la station située dans la forêt - Photo : C. Zangerl	164
Figure 156: Photo de la station située aux jardins familiaux - Photo : M. Bonnet	164
Figure 157: Station située dans l'espace urbain - Photo : G. Carlier	164
Figure 158: Graphique des températures lors de la campagne au parc du Biez à Mondeville - Réalisation : C. Zangerl	164
Figure 159: Graphique des températures à l'échelle de l'agglomération dans la nuit du 1er au 2 août 2024 - Réalisation : C. Zangerl	165
Figure 160: Carte des températures à l'échelle de l'agglomération le 1er août 2024 à 22h locale - Réalisation : C. Zangerl	167
Figure 161: Test à la fumée effectué lors de travaux de vérification avant le désamiantage d'un bâtiment - Source : (DI Environnement, 2024)	173
Figure 162: Carte montrant les emplacements proposés pour l'installation de nouvelles stations fixes dans le cadre de l'étude des îlots de fraîcheurs - Réalisation : C. Zangerl.....	174
Figure 163: Détail des emplacements des nouvelles stations météo fixes pour l'étude des IFU - Réalisation : C. Zangerl	176
Figure 164: Carte présentant les grands bassins versants de l'agglomération caennaise - Réalisation : C. Zangerl	178
Figure 165: Carte de l'atlas climatique de la région de Stuttgart présentant les trajectoires de l'air froid (flèches), l'épaisseur de la couche d'air frais 4h après le début de leur formation (aplats bleus) et les espaces urbanisés (aplats roses) – Source : (Baumüller, Reuter, Hoffmann, & Hesswein, 2008).....	180
Figure 166: Photos de deux exemples de façades végétales à Lille - Source : (Ville de Lille, 2024)	183
Figure 167: Exemples d'un toit végétalisé (gauche) et d'une façade végétalisée (droite) à Hambourg - Source : (Stadt Hamburg, 2024).....	184
Figure 168: Arbres d'alignements plantés dans le cadre de la Charte Orléanaise de l'Arbre Urbain – Source : (Hery, 2015).....	185
Figure 169: Carte des arbres d'alignements à Paris et de la hauteur de la canopée dans les espaces verts publics - Source : (Atelier parisien d'urbanisme, 2022).....	186
Figure 170: Image satellite du boulevard Ney (Paris) - Source : Google Earth.....	186
Figure 171: Image satellite de la rue Leibniz (Paris) - Source : Google Earth	186
Figure 172: Graphique présentant le microclimat journalier moyen à partir de la température de l'air et de l'UTCI Source : (Herpin, et al., 2022)	187
Figure 173: Photo du dispositif expérimental mis en place dans le cadre de l'étude sur l'influence de l'arbre sur le microclimat urbain Source : (Herpin, et al., 2022)	187
Figure 174: Cour Oasis de l'école Maryse Hilsz dans le 20e arrondissement de Paris – Source : (Ville de Paris, 2023)	189
Figure 175: Jardin potager de l'école Jeanne d'Arc dans le 13e arrondissement de Paris - Source : (Ville de Paris, 2023)	189
Figure 176: Carte interactive des cours Oasis à Paris - Source : (Ville de Paris, 2023)	189
Figure 177: Photo du parking des jeunes travailleurs à Aubervilliers après le projet Source : (Raymond, 2020).....	190
Figure 178: Photo du parking des jeunes travailleurs à Aubervilliers avant le projet Source : (Raymond, 2020).....	190
Figure 179: Projet du Parc des Ayalades à Marseille le long du cours d'eau du même nom - Source : (Raymond, 2020)	191
Figure 180: Prairies St. Martin à Rennes - Source : (Rennes Métropole, s.d.).....	191

Figure 181: Plan des prairies St. Martin à Rennes - Source : (Office de Tourisme Rennes, s.d.)	192
Figure 182: Extrait de la carte interactive de l'atlas climatique de la ville de Stuttgart sur l'épaisseur de la couche d'air froid sa circulation	193
Figure 183: Photo prise depuis la tour de télévision de Stuttgart montrant la "ceinture boisée" de la ville - Source : C. Zangerl.....	194
Figure 184: Extraits du Règlement graphique du PLUi de Rennes Métropole concernant le coefficient de végétalisation	195
Figure 185: Projet de végétalisation de l'enceinte du château de Caen - Source : (Ville de Caen, 2024)	198
Figure 186: Projet de végétalisation de la place Foch - Source : (Ville de Caen, 2024)	199
Figure 187: Projet de réaménagement de la rue de la Délivrande - Source : (Ville de Caen, 2023)	200
Figure 188: Projet Tramway 2028 - proposition d'aménagement végétalisé devant l'hôtel de ville - Source : (Caen la Mer, s.d.)	200
Figure 189: Plantation de la mini-forêt au Campus 1 - Source : (Université de Caen Normandie, 2024)	201
Figure 190: Plantation de la mini-forêt dans la cour du collège Villey-Desmeserets - Source : (Verger, 2023) ...	201

Table des matières

Introduction générale	2
Partie I – L'étude du climat des villes – un sujet récent et complexe.....	5
1) Qu'est-ce que la climatologie urbaine ?.....	5
2) La complexité de l'étude du climat urbain– un phénomène multi-facteurs et multi-échelles.....	9
2.1) Le système terre-atmosphère – une interaction constante	9
2.2) Le bilan énergétique des espaces urbains	13
2.2.1) Activités humaines.....	15
2.2.2) Occupation du sol	16
2.3) La variabilité spatio-temporelle du phénomène d'îlot de chaleur urbain	20
2.3.1) Les différences d'occupation du sol – une variation spatiale à fine échelle	20
2.3.2) La situation géographique d'une ville – l'influence de la topographie et de la proximité de l'eau.....	22
2.3.3) L'importance des types de temps.....	24
2.3.4) La cyclicité des îlots de chaleur urbains.....	26
3) La chaleur en ville – un réel problème de santé publique.....	29
3.1) Les effets des fortes chaleurs sur le corps humain.....	29
3.2) La vulnérabilité thermique accentuée par l'âge, l'état de santé et les inégalités sociales...	30
3.3) La menace du changement climatique.....	31
4) Conclusion de la partie I.....	33
Partie II – Après la chaleur, la quête de la fraîcheur en ville.....	34
1) Quelles approches pour le rafraîchissement urbain ?.....	34
1.1) Les solutions « grises »	35
1.2) Les solutions fondées sur la nature– la végétalisation de l'espace urbain.....	36
2) Les différentes formes de la végétation urbaine.....	38
2.1) La végétalisation des surfaces urbaines	38
2.2) Les arbres.....	40
3) Les parcs urbains – des îlots de fraîcheur à fort potentiel rafraîchissant	42
3.1) L'îlot de fraîcheur urbain – des définitions diverses selon l'objet d'étude	42
3.2) Exemple d'études des parcs urbains dans le cadre des IFU	44
4) Conclusion de la partie II.....	50
Partie III – L'agglomération caennaise – présentation de la zone d'étude	51
1) Caractéristiques démographiques et situation géographique	51
2) Topographie.....	52
3) Occupation du sol	54
4) Espaces verts de l'agglomération caennaise.....	57
4.1) La Prairie	58

4.2) L'ENS des Marais de l'Orne et de la Noë	60
4.3) L'ENS de la vallée de l'Odon	62
4.4) Le Jardin des Plantes	63
4.5) La Vallée des Jardins.....	65
4.6) Les Jardins du souvenir et la Colline aux Oiseaux.....	67
4.7) Le Campus 1 de l'Université de Caen.....	69
4.8) Les cimetières dormants de St. Pierre et St. Jean.....	70
4.9) Le parc du Biez à Mondeville	72
4.10) La forêt d'Ifs.....	74
5) Climat régional	77
6) Conclusion de la partie III.....	80
Partie IV – L'étude du climat caennais – îlots de chaleur et îlots de fraîcheur	81
1) Méthodologie	82
1.1) Le réseau de stations météorologiques du laboratoire IDEES	82
1.2) Méthodes utilisées pour l'analyse des îlots de fraîcheur.....	90
2) Résultats de l'étude des ICU	93
2.1) L'ICU caennais – un phénomène nocturne et estival	93
2.2) Exemple de la canicule de juillet 2022 – un fort ICU en période estivale	96
2.3) Exemple du 20 au 21 avril 2024– un ICU moyen printanier	101
2.4) Conclusion et discussion des résultats concernant les ICU	109
3) Résultats de l'étude des IFU	111
3.1) Analyse générale des différents espaces verts.....	111
3.1.1) Jardin des Plantes.....	111
3.1.2) Le cimetière St. Jean.....	114
3.1.3) Le cimetière St. Pierre	116
3.1.4) Le Campus 1	119
3.1.5) La Prairie.....	122
3.1.6) La rue du Québec	125
3.1.7) Conclusion et discussion des résultats.....	128
3.2) Analyse en détail des dynamiques thermiques à l'aide d'exemples précis.....	130
3.2.1) Exemple du 10 au 11 mai 2024	130
3.2.2) Exemple du 23 au 24 juin 2024	134
3.2.3) Campagne de mesure à la Vallée des Jardins du 18 au 19 juillet 2024.....	137
3.2.4) Campagne de mesure à la Colline aux Oiseaux et à la forêt d'Ifs le 29 juillet 2024	153
3.2.5) Campagne de mesure au parc du Biez à Mondeville le 1 ^{er} août 2024.....	163
3.3) Conclusion générale sur les îlots de fraîcheur.....	169
3.4) Discussion des résultats, de la méthode appliquée et ouverture sur la suite de la recherche	172
3.4.1) Difficultés rencontrées lors des campagnes de mesure temporaires.....	172

3.4.2) Campagnes de mesures complémentaires à celles effectuées dans le cadre de ce mémoire.....	173
3.4.3) Installations de stations météo fixes dans le cadre de l'agrandissement du réseau IDEES	174
3.4.4) Etude des trames « transparente » sous forme de bassin versant.....	178
Partie V – La végétalisation des villes : un moyen efficace pour lutter contre la chaleur en ville....	182
1) Les projets de végétalisation de l'espace urbain en France et à l'international	182
1.1) Les façades et toits végétalisés.....	183
1.2) Les arbres urbains.....	184
1.3) La création de parcs urbains	188
1.4) Le service municipal de climatologie urbaine – l'exemple de la ville de Stuttgart.....	192
1.5) Les espaces verts dans la planification stratégique	195
2) Les projets d'aménagement à Caen	197
2.1) Le château de Guillaume le Conquérant	197
2.2) La Place Foch	198
2.3) La rue de la Délivrande	199
2.4) Le projet tramway.....	200
2.5) Les mini-forêts urbaines	201
3) Conclusion.....	203
Conclusion générale	205
Table des figures.....	209
Bibliographie.....	219

Bibliographie

- ADEME. (2022). *Arboclimat - Choix des essences*. Récupéré sur le site web Data Ademe: <https://data.ademe.fr/datasets/arboclimat-choix-des-essences>
- Agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse. (2020, Septembre). *Atlas climatique Toulouse Métropole*. Récupéré sur le site web de AUA Toulouse: <https://www.aua-toulouse.org/atlas-climatique/>
- Agence Parisienne du Climat. (2024, juillet). *Canicule, dôme de chaleur, îlot de chaleur urbain... Tout comprendre sur les épisodes de chaleur*. Récupéré sur le site web adaptaville: <https://www.adaptaville.fr/lexique-canicule-comprendre-pour-mieux-s-adapter>
- Atelier parisien d'urbanisme. (2022). *Les arbres d'alignement à Paris en 2022*. Récupéré sur le site web de l'APUR: <https://www.apur.org/fr/geo-data/arbres-alignement-paris-2022#:~:text=Les%20%20essences%20d'arbres,de%20Byzance%20et%20le%20poirier>
- Barani. (2024). *MeteoHelix® IoT Pro - LoRaWAN micro-weather station*. Récupéré sur le site web da Barani meteo innovations: <https://barani-design.myshopify.com/products/meteohelix-iot-pro-micro-weather-station-lora>
- Barletta, J. (2023). Grenoble. Ce bâtiment iconique change de couleur : sa température baisse de 30 degrés. *Actu.fr*. Récupéré sur https://actu.fr/auvergne-rhone-alpes/grenoble_38185/grenoble-ce-batiment-iconique-change-de-couleur-sa-temperature-baisse-de-30-degrees_59882254.html
- Bastin, J.-F., Clark, E., Elliott, T., Hart, S., & van den Hoogen, J. (2019). Understanding climate change from a global analysis of city analogues. *Plos One*.
- Baumüller, J., Reuter, U., Hoffmann, U., & Hesswein, H. (2008). *Klimaatlas Region Stuttgart*. Stuttgart: Verband Region Stuttgart.
- Bouketta, S. (2023, Décembre). Urban Cool Island as a sustainable passive cooling strategy of urban spaces under summer conditions in Mediterranean climate. *Sustainable Cities and Society*.
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical. *Landscape and Urban Planning*, pp. 147-155.
- Bugnot, F. (2023, Janvier 16). *Caen enlève le bitume de ses trottoirs (14)*. Récupéré sur Banque des Territoires: <https://www.banquedesterritoires.fr/caen-enleve-le-bitume-de-ses-trottoirs-14>
- Buguet, A., Radomski, M. W., Reis, J., & Spencer, P. S. (2023, Octobre). Heatwaves and human sleep: Stress response versus adaptation. *Journal of the Neurological Sciences*, 454.
- Caen La Mer. (2024). *Votre communauté urbaine en chiffres*. Récupéré sur Caenlamer: <https://caenlamer.fr/chiffres-cles>
- Caen la Mer. (s.d.). *Projet tramway 2028*. Récupéré sur Communauté urbaine de Caen la Mer: <https://caenlamer.fr/projet-tramway-2028>

- Caen La Mer Tourisme. (2024). *Parenthèse bucolique dans les cimetières dormants de Caen*. Récupéré sur Caen La Mer Tourisme: <https://www.caenlamer-tourisme.fr/experiences-a-vivre/parenthese-bucolique-dans-les-cimetieres-dormants-de-caen/>
- Caen La Mer Tourisme. (s. D.). *La Prairie*. Récupéré sur Caen La Mer Tourisme: <https://www.caenlamer-tourisme.fr/patrimoine-naturel/la-prairie/>
- Calvados Tourisme. (2018). *Jardin des Plantes et Jardin Botanique*. Récupéré sur Calvados Tourisme: <https://www.calvados-tourisme.com/offre/jardin-des-plantes-et-jardin-botanique/>
- Calvados Tourisme. (2018). *La vallée de l'Odon*. Récupéré sur Calvados Tourisme: <https://www.calvados-tourisme.com/offre/vallee-de-lodon/>
- Calvados Tourisme. (2018). *Parc de la Colline aux Oiseaux*. Récupéré sur Calvados Tourisme: <https://www.calvados-tourisme.com/offre/parc-de-la-colline-aux-oiseaux/>
- Calvados Tourisme. (2018). *Vallée des Jardins*. Récupéré sur Calvados Tourisme: <https://www.calvados-tourisme.com/offre/vallee-des-jardins/>
- Cantat, O. (2004, Mars 1). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, pp. 75-102.
- Cantat, O. (2015). Étude de climatologie physionomique et appliquée. Proposition méthodologique pour une approche globale et objective des types de temps en France métropolitaine. Paris: Univeristé Denis Diderot Paris 7.
- Cantat, O., & Beauvais, F. (2022). *Les caractéristiques du climat en Normandie*. Récupéré sur Normandie Développement durable: <https://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/les-caracteristiques-du-climat-en-normandie-a3329.html>
- CDC Biodiversité. (s.d.). *Friche Kodak*. Récupéré sur CDC Biodiversité: <https://www.cdc-biodiversite.fr/realisations/friche-kodak/>
- Centre National de Recherche Météorologique. (2018). *Projet MAPUCE*. Récupéré sur UMR CNRM: <https://www.umn-cnrm.fr/ville.climat/spip.php?rubrique120>
- Centre-ville en mouvement. (2016). *Milan et le projet architectural «Bosco Vertical»*. Récupéré sur [centre-ville.org](https://www.centre-ville.org/): <https://www.centre-ville.org/milan-et-le-projet-architectural-bosco-vertical/>
- Cerema. (2019). *Infographie: Les services rendus par les arbres*. Metz.
- Cerema. (2023, Janvier 5). *Le décret du 23 décembre 2022 facilite la végétalisation des façades et toitures*. Récupéré sur Outils de l'aménagement du Cerema: <https://outil2amenagement.cerema.fr/actualites/decret-du-23-decembre-2022-facilite-la-vegetalisation-des-facades-et-toitures>
- Chen, Y., & Wong, N. H. (2006). Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, pp. 105-120.
- collectivitesviables.org. (2013, Octobre 24). *Îlot de chaleur urbain*. Récupéré sur Collectivités viables: <https://collectivitesviables.org/articles/ilots-de-chaleur-urbains/>

- Copernicus Climate Change Service. (2024, Juin). *Copernicus: June 2024 marks 12th month of global temperature reaching 1.5°C above pre-industrial*. Récupéré sur Climate Copernicus: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-june-2024-marks-12th-month-global-temperature-reaching-15degc-above-pre-industrial>
- Cravero, J. (2023). *Étude du rôle de la végétation dans l'atténuation de la surchauffe urbaine*. Paris: École des Ponts ParisTech.
- De Parcevaux, S. (2007). *Bioclimatologie : concepts et applications*. Versailles: Editions Quae.
- Département du Calvados. (s. D.). *Les marais de l'Orne et de la Noë*. Récupéré sur Calvados.fr: <https://www.calvados.fr/sites/calvados/contents/fiches-ens/les-marais-de-l'orne-et-de-la-noe.html>
- Destination Orléans. (s.d.). *Orléans, une métropole verte*. Récupéré sur Tourisme Orléans Métropole: <https://www.tourisme-orleansmetropole.com/visiter-orleans-sinspirer/nature-vegetal/orleans-metropole-verte/>
- DI Environnement. (2024). *Le test fumée sur un chantier de désamiantage*. Récupéré sur di-environnement.fr: <https://di-environnement.fr/zoom-sur-%F0%9F%9A%A7-le-test-fumee-sur-un-chantier-de-desamiantage/>
- Direction des grands parcs et du verdissement. (2012). *Plan d'action canopée 2012-2021*. Montréal.
- Doick, K. J., Peace, A., & Hutchings, T. R. (2014). The role of one large greenspace in mitigating London's nocturnal urban heat island. *Science of the Total Environment*, pp. 662-671.
- DREAL Normandie. (2023). *Stratégie Régionale pour la Biodiversité (SRB) Normandie 2030*. Récupéré sur DREAL Normandie: <https://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/strategie-regionale-pour-la-biodiversite-srb-a3831.html>
- Dubreuil, V., Foissard, X., Nabucet, J., Thomas, A., & Quenol, H. (2020). Fréquence et intensité des îlots de chaleur à Rennes: bilan de 16 années d'observations (2004-2019). *Climatologie*.
- Durand-Dastès, F. (2004, Mars 1). À propos des notions de type de temps et de type de circulation. *Norois*, pp. 29-32.
- Fondation Abbé Pierre. (2024). *Logements bouilloures : le degré zéro de l'action publique*. Paris: Fondation Abbé Pierre.
- GIEC Normand. (2023). *Changement climatique et aléas météorologiques*. Caen: Région Normandie.
- Guyot, G. (1999). *Climatologie de l'environnement. Cours et exercices corrigés*. Paris: Dunod.
- Hendel, M. (2015). *Pavement-Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation: A Study of its Cooling Effects and Water Consumption in Paris*. Paris: Université Paris Diderot Paris 7.
- Herpin, S., Mballo, S., Thierry, J., Lemesle, D., Brialix, L., Rodriguez, F., . . . Bournet, P. (2022). *Bénéfices des arbres d'alignement en confort hydrique sur le microclimat urbain : quel effet des conditions météorologiques ?* Toulouse: Institu Agro Rennes Angers.

- Hery, P. (2015). *Charte Orléanaise de l'arbre urbain. Gestion et protection du patrimoine arboré*. Récupéré sur Capitales Françaises de la Biodiversité: <https://www.capitale-biodiversite.fr/experiences/charte-orleanaise-de-larbre-urbain-gestion-et-protection-du-patrimoine-arbore>
- Howard, L. (1833). *The Climat of London*. Londres: International Association for Urban Climate.
- Hufty, A. (2001). *Introduction à la climatologie: le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine*. Bruxelles: De Boeck université Presses de l'Université Laval.
- IFB Hamburg. (2024). *Hamburger Gründachförderung*. Récupéré sur IFB Hamburg: <https://www.ifbhh.de/foerderprogramm/hamburger-gruendachfoerderung>
- INSEE. (2021, Avril 29). *La France et ses territoires*. Récupéré sur Institut national de la statistique et des études économiques: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5039853?sommaire=5040030#:~:text=Huit%20personnes%20sur%20dix%20r%C3%A9sidents,plus%20de%20100%20000%20habitants>
- INSEE. (2024, 06 27). *Unité urbaine 2020 de Caen*. Récupéré sur INSEE: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=UU2020-14701>
- Kastendeuch, P., Massing, N., Philipps, N., & Najjar, G. (2022). L'îlot de fraîcheur urbain à Strasbourg: mythe ou réalité? . Toulouse, France: Association Internationale de Climatologie.
- Kastendeutsch, P., Najjar, G., Lacarrere, P., & Colin, J. (2010). Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg. *Climatologie*, pp. 21 - 37.
- Landeshauptstadt Stuttgart. (2024). *86 Jahre Stadtklimatologie in Stuttgart*. Récupéré sur Stadtklima Stuttgart: <https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?id=109,0,0,1,0,0>
- Lareau, F., & Baudouin, Y. (2015). Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la chaleur dans l'agglomération de Montréal. *Le Géographe Canadien*, pp. 234-245.
- Lecornu-Baert, N. (2019). Caen. Silence, ça pousse sur le chantier du tram ! *Ouest France*, en ligne.
- Leroy, M., Marie, H., Lapray, K., Musy, M., Rodler, A., & Guernouti, S. (2021, Mai). *Rafraichir les villes. Des solutions variées*. Angers: Ademe.
- Mémorial de Caen. (2023). *Les jardins du souvenir*. Récupéré sur Mémorial de Caen: <https://www.memorial-caen.fr/le-musee/les-jardins-du-souvenir/>
- Météo France. (2022, Janvier 25). *Le régime des brises à la Réunion*. Récupéré sur Météo France: <https://meteofrance.re/fr/climat/le-regime-des-brises-la-reunion#:~:text=La%20brise%20de%20pente&text=L'air%20directement%20en%20contact,%C3%A9coule%20le%20long%20des%20pentes>
- Météo France. (2023, Janvier 24). « Trous à froid » : ces lieux particuliers où il peut faire plus froid qu'ailleurs. Récupéré sur Météo France: <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/trous-froid-ces-lieux-particuliers-ou-il-peut-faire-plus-froid>

- Météo France. (2023, Novembre 30). *2023 sur le podium des années les plus chaudes en France*. Récupéré sur Météo France: <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/2023-sur-le-podium-des-annees-les-plus-chaudes-en-france>
- Météo France. (2023, Juin 7). *Canicule, pic ou vague de chaleur ?* Récupéré sur Météo France: <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/comprendre-la-meteo/canicule-vague-ou-pic-de-chaleur>
- Météo France. (2023, Octobre 15). *El Niño est de retour : quelles conséquences à l'échelle mondiale et en Europe ?* Récupéré sur meteofrance.com: <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/el-nino-est-de-retour-quelles-consequences-echelle-mondiale-et-europe>
- Météo France. (2023, Août 1). *Il y a 20 ans, la canicule 2003*. Récupéré sur Météo France: <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/magazine/meteo-histoire/il-y-20-ans-la-canicule-2003>
- Météo France. (2024, Avril 15). *Chaleur record le weekend de mi-avril*. Récupéré sur Météo France: <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers-0/chaleur-record-le-week-end-de-mi-avril#:~:text=28%2C9%C2%B0C%20%C3%A0,et%2008%2F04%2F2011>
- Métropole de Lyon. (2012). *Ilots de chaleur, la Buire teste le rafraîchissement urbain*. Récupéré sur Plan Climat Air Energie Grand Lyon: <https://plan-climat.grandlyon.com/2012/12/19/ilots-de-chaleur-la-buire-teste-le-rafraichissement-urbain/>
- Middel, A., Lukasczyk, J., Maciejewski, R., Demuzere, M., & Roth, M. (2018, Septembre). Sky View Factor footprints for urban climate modeling. *Urban Climate*, pp. 120-134.
- Migliari, M., Briche, E., Despax, J., Chesne, L., & Baverel, O. (2024, Juin). A cross-analysis matrix comparing multi-site Local Climate Zone trends: Application to identify sustainable built morphologies improving summer daytime urban microclimate. *Sustainable Futures*.
- Mills, G. (2014, Décembre). Urban climatology: History, status and prospects. *Urban Climate*, pp. 479-489.
- Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires. (2024, Janvier). *Le Fonds Vert: Fonds d'accélération de la transition écologique dans les territoires*.
- Musy, M. (2014). *Une ville verte: Les rôles du végétal en ville*. Versailles: Editions Quae.
- Observatoire des forêts françaises. (2022). *Les indices de forêt et de végétation - Un risque pas si naturel qui s'amplifie*. Récupéré sur Observatoire des forêts françaises: <https://foret.ign.fr/themes/les-incendies-de-foret-et-de-vegetation>
- Observatoire des villes vertes. (2023). *Le palmarès 2023*. Récupéré sur Observatoire des Villes: <https://www.observatoirevillesvertes.fr/le-palmares-2023/#:~:text=La%204e%20%C3%A9dition%20du,places%20par%20rapport%20%C3%A0%202020>
- Office de Tourisme Rennes. (s.d.). *Les Prairies Saint-Martin*. Récupéré sur Destinasion Rennes: <https://www.tourisme-rennes.com/sortir/les-prairies-saint-martin/>

- Office Nationale des Forêts. (2022, Février 28). *Le pouvoir des arbres : l'évapotranspiration*. Récupéré sur Office Nationale des Forêts: <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/%2B14a1::le-pouvoir-des-arbres-levapotranspiration.html>
- Oke, T. R. (1978). *Boundary layer climates*. Methuen.
- Oke, T., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Oliveira, S., Andrade, H., & Vaz, T. (2011, Novembre). The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment*, pp. 2186-2194.
- Perrin, G. (2020). *Rafraîchissement urbain et confort d'été: Lutter contre les canicules*. Malakoff: Dunod.
- Plante & Cité. (2014). *VEGDUD - Impact du végétal en ville*. Récupéré sur Plante et Cité: https://www.plante-et-cite.fr/ressource/fiche/85/vegud_impact_du_vegetal_en_ville
- Potcher, O., Cohen, P., & Bitan, A. (2006). Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*, 26 (12), pp. 1695-1711.
- Ratheiser, M. (2022). *Stadtklimaanalyse Innsbruck*. Innsbruck.
- Raymond, M. (2020, Juillet). *Végétaliser : Agir pour le rafraîchissement urbain*. Angers: ADEME.
- Rennes Métropole. (2019). *PLUi : coefficient de végétalisation et simulateur en ligne*. Récupéré sur Nature en Ville: <https://www.nature-en-ville.com/ressources/plui-coefficient-de-vegetalisation-et-simulateur-en-ligne>
- Rennes Métropole. (2022, Mai 25). *La métropole mobilise les acteurs locaux pour la reconquête de la biodiversité*. Récupéré sur Métropole Rennes: <https://metropole.rennes.fr/la-metropole-mobilise-les-acteurs-locaux-pour-la-reconquete-de-la-biodiversite>
- Rennes Métropole. (2023). *Consulter les documents du Plan local d'urbanisme intercommunal (PLUi)*. Récupéré sur Métropole Rennes: <https://metropole.rennes.fr/documents-plan-local-urbanisme-intercommunal-plui>
- Rennes Métropole. (s.d.). *Prairies St. Martin*. Récupéré sur Metropole Rennes: <https://metropole.rennes.fr/prairies-saint-martin>
- Santé publique France. (2004, Juin 1). *La vague de chaleur d'août 2003 : que s'est-il passé ?* Récupéré sur Santé publique France: [https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/climat/fortes-chaleurs-canicule/documents/article/la-vague-de-chaleur-d-aout-2003-que-s-est-il-passe#:~:text=Le%20nombre%20cumul%C3%A9%20des%20d%C3%A9c%C3%A8s,de%20jours%20caniculaires%20%C3%A9tait%](https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/climat/fortes-chaleurs-canicule/documents/article/la-vague-de-chaleur-d-aout-2003-que-s-est-il-passe#:~:text=Le%20nombre%20cumul%C3%A9%20des%20d%C3%A9c%C3%A8s,de%20jours%20caniculaires%20%C3%A9tait%20)
- Santé publique France. (2021, Juin 17). *Canicule adultes vulnérables - Repères pour votre pratique*. Récupéré sur Santé publique France: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de->

sante/climat/fortes-chaieurs-canicule/documents/depliant-flyer/canicule-adultes-vulnerables-reperes-pour-votre-pratique

Santé publique France. (2022). Bulletin de santé publique - Normandie - Ete 2022.

Selmi, W., & Teller, J. (2021). *Bénéfices rendus par les arbres de la ville de Liège*. Récupéré sur <https://orbi.uliege.be/handle/2268/256785>

Service d'information du Gouvernement. (2024). *Planter 1 milliard d'arbres d'ici à 2032*. Récupéré sur Info.Gouv: <https://www.info.gouv.fr/politiques-prioritaires/planifier-et-acceler-la-transition-ecologique/accompagner-le-programme-visant-a-planter-1-milliard-darbres-dici-2032#widget-viz-ind-957>

Sigfox.com. (2024). *BARANI DESIGN Technologies, s.r.o.* Récupéré sur Sigfox partner network: <https://partners.sigfox.com/companies/barani-design-technologies-s.r.o.>

Stadt Hamburg. (2024). *An die Wände - fertig - grün!* Récupéré sur Hamburg.de: <https://www.hamburg.de/politik-und-verwaltung/behoerden/bukea/themen/energie/energielotsen/foerderung-gruener-fassaden-281654>

Stadt Hamburg. (2024). *Auf die Dächer - fertig - grün!* Récupéré sur Hamburg.de: <https://www.hamburg.de/politik-und-verwaltung/behoerden/bukea/themen/hamburgs-gruen/gruendach-und-gruene-fassaden/gruendachfoerderung-281220>

Stadt Hamburg. (2024). *Strategie für Grüne Dächer und Fassaden*. Récupéré sur hamburg.de: <https://www.hamburg.de/politik-und-verwaltung/behoerden/bukea/themen/hamburgs-gruen/gruendach-und-gruene-fassaden>

Stewart, I., & Oke, T. (2012, Décembre). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, pp. 1879-1900.

Sturman, A. P., & Quenol, H. (2024). *Climate change: impacts and adaptation at regional and local scales*. Oxford University Press.

Terrin, J.-J. (2015). *Villes et Changement climatique - Îlots de chaleur urbains*. Marseilles: Editions Paranthèses.

Triollet, L. (2023). *Le projet ANR Cooltrees*. Récupéré sur Cooltrees Hub INRAE: <https://cooltrees.hub.inrae.fr/le-projet-anr-cooltrees>

UICN France. (2018, Mai). *Les Solutions fondées sur la Nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire*. Paris.

Université de Caen Normandie. (2024, Février). *Création d'une mini-forêt sur le Campus 1*. Récupéré sur Unicaen.fr: <https://www.unicaen.fr/creation-dune-mini-foret-sur-le-campus-1/>

Université de Genève. (2016, Mai 23). *LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES*. Récupéré sur ISE UNIGE: <https://ise.unige.ch/isdd/spip.php?article528>

- Upmanis, H., Eliasson, I., & Lindqvist, S. (1998, Mai). The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). *International Journal of Climatology*, pp. 681-700.
- Verger, K. (2023). EN IMAGES. À Caen, une maxi motivation pour la mini-forêt au collège Villey-Desmeserets. *Ouest-France*, en ligne.
- Ville de Caen. (2023). *Rue de la Délivrande*. Récupéré sur Ville de Caen: <https://caen.fr/rue-de-la-delivrande>
- Ville de Caen. (2024). *Conservation et aménagement du château*. Récupéré sur Ville de Caen: <https://caen.fr/conservation-et-amenagement-du-chateau#:~:text=Jardin%20int%C3%A9rieur,seront%20bout%C3%A9s%20hors%20des%20remparts>
- Ville de Caen. (2024). *Place Foch*. Récupéré sur Ville de Caen: <https://caen.fr/place-foch#:~:text=Apr%C3%A8s%20les%20travaux%20sur%20les,que%20d'un%20patrimoine%20valoris%C3%A9>
- Ville de Lille. (2024). *Verdissons nos murs! Guide des bonnes pratiques*. Lille: Ville de Lille.
- Ville de Paris. (2020). *Îlots de fraîcheur - Espaces verts "frais"*. Récupéré sur Opendata Paris: <https://opendata.paris.fr/explore/dataset/ilots-de-fraicheur-espaces-verts-frais/information/>
- Ville de Paris. (2023, août 31). *Les cours oasis*. Récupéré sur Ville de Paris: <https://www.paris.fr/pages/les-cours-oasis-7389>
- Wang, C., Ren, Z., Dong, Y., Zhang, P., Guo, Y., Wang, W., & Bao, G. (2022). Efficient cooling of cities at global scale using urban green space to mitigate urban heat island effects in different climatic regions. *Urban Forestry & Urban Greening*.

Résumé

Au regard des différentes projections sur l'évolution climat, que ce soit à l'échelle mondiale ou à l'échelle régionale, on peut affirmer que la chaleur sera certainement un enjeu de plus en plus important dans les décennies à venir. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) qui se traduit par des températures plus élevées dans les milieux urbains que les campagnes environnantes intensifiera alors le stress thermique des habitants, surtout pendant la nuit, et peut ainsi devenir un réel problème de santé publique.

L'adaptation des villes aux conséquences du changement climatique devient alors une nécessité. En ce sens, les solutions fondées sur la nature proposent un grand nombre de services écosystémiques, dont celui de limiter la surchauffe urbaine par le biais de l'ombrage et de l'évapotranspiration. La nature peut s'intégrer de plusieurs manières, mais les espaces verts comme les parcs urbains semblent être les plus propices à la mise en place d'îlots de fraîcheur urbains (IFU) qui se définissent comme des espaces intra-urbains où les températures sont moins élevées que dans les environs proches.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'existence de ces IFU dans l'agglomération caennaise et la capacité des différents espaces verts à produire et à diffuser de l'air frais en ville. Pour cela, les stations météorologiques du réseau IDEES, mis en place à partir d'avril 2022 par Olivier Cantat, géographe-climatologue au laboratoire IDEES de l'Université de Caen Normandie, ont permis d'étudier les dynamiques thermiques de 6 espaces verts caennais entre janvier et juillet 2024. De plus, des campagnes de mesure temporaires fixes ont été menées dans 4 autres parcs urbains de l'agglomération afin d'observer l'évolution des températures au coucher du soleil.

L'intérêt porté à la nature en ville se traduit concrètement dans l'espace par les différents projets d'aménagements à Caen, mais également par la Stratégie régionale pour la biodiversité qui promeut la végétalisation des espaces urbains. L'étude des îlots de fraîcheur urbain est donc un sujet d'actualité dont les perspectives de recherche sont infinies et qui sera certainement au cœur des problématiques d'aménagement urbain dans les décennies à venir.

Mots clés : *îlot de chaleur urbain, îlot de fraîcheur urbain, climat urbain, espaces verts, nature en ville, solutions fondées sur la nature, Caen, agglomération caennaise, changement climatique, adaptation*

Abstract

Given the various projections on climate evolution, whether on a global or regional scale, it can be stated that heat will undoubtedly become an increasingly important issue in the coming decades. The phenomenon of the urban heat island (UHI), which results in higher temperatures in urban areas compared to the surrounding countryside, will intensify the thermal stress on residents, especially at night, and could so become a real problem for public health.

Adapting cities to the consequences of climate change is therefore a necessity. In this regard, nature-based solutions offer numerous ecosystem services, including the mitigation of urban heat through shading and evapotranspiration. Nature can be integrated in various ways, but green spaces such as urban parks seem to be the most efficient to create urban cool islands (UCI), which are defined as intra-urban areas where temperatures are lower than in the surrounding areas.

The objective of this thesis is to study the existence of these UCIs in the region of Caen and the capacity of various green spaces to produce and distribute cool air in the city. To do so, the weather stations of the IDEES network, established in April 2022 by Olivier Cantat, a geographer-climatologist at the IDEES laboratory of the University of Caen Normandy, were used to study the thermal dynamics of six green spaces in Caen between January and July 2024. Additionally, temporary measurement campaigns were conducted in four other urban parks in Caen and its surroundings to observe the evolution of temperature at sunset.

The interest in urban nature is concretely reflected in the city through various urban development projects in Caen, as well as through the Regional Strategy for Biodiversity, which promotes the greening of urban areas. The study of urban cool islands is therefore a current topic with endless research possibilities, and it will certainly be at the heart of urban planning issues in the coming decades.

Keywords: *Urban heat island, urban cool island, urban climate, green spaces, urban nature, nature-based solutions, Caen, Caen metropolitan area, climate change, adaptation*