Caractérisation des îlots de chaleur de saison chaude dans les territoires de l'Eurométropole de Metz (France) et du Grand Casablanca (Maroc) : observation, perception, vulnérabilité

Nassima Hassani

▶ **To cite this version:**

Nassima Hassani. Caractérisation des îlots de chaleur de saison chaude dans les territoires de l'Eurométropole de Metz (France) et du Grand Casablanca (Maroc) : observation, perception, vulnérabilité. Géographie. Université de Lorraine, 2023. Français. NNT : 2023LORR0242 . tel-04469142

HAL Id: tel-04469142
https://hal.univ-lorraine.fr/tel-04469142

Submitted on 20 Feb 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.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE | BIBLIOTHÈQUES UNIVERSITAIRES

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Université de Lorraine
ED Humanités Nouvelles-Fernand Braudel

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE l'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : GEOGRAPHIE

par

Nassima HASSANI

Caractérisation des îlots de chaleur de saison chaude dans les territoires de l'Eurométropole de Metz (France) et du Grand Casablanca (Maroc) : observation, perception, vulnérabilité

Sous la co-direction de

Gilles DROGUE et Said SGHIR

le 30 novembre 2023 à Metz

Membres du jury :

Salem DAHECH, Professeur, Université Paris Cité, UMR PRODIG (Rapporteur)
Vincent DUBREUIL, Professeur, Université de Rennes 2, LETG-Rennes-COSTEL (Rapporteur)
Julia HIDALGO, Directrice de recherches, Université Toulouse 2, LISST (Examinatrice)
Sandra ROME, Maître de Conférences, Université de Grenoble Alpes, IGE (Examinatrice)
Gilles DROGUE, Professeur, Université de Lorraine, LOTERR (Directeur)
Said SGHIR, Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, RDT2E (Co-directeur)
Sébastien LEBAUT, Maître de Conférences, Université de Lorraine, LOTERR (Co-encadrant)
Sébastien DOUCHE, Direction de la Transition Ecologique, Eurométropole de Metz (Invité)

REMERCIEMENTS

Avant d'entrer dans le contenu de ce manuscrit, je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide et leur soutien tout au long de ces années de thèse. La réalisation de cette thèse a été pour moi un défi à bien des égards, et a exigé une motivation et une rigueur de travail dont je ne me croyais pas capable. Sans la contribution de ces personnes, ce travail n'aurait pas pu être mené à bien.

Je tiens avant tout exprimer mes sincères remerciements envers mon directeur de thèse, le Professeur Gilles Drogue, qui m'a fait confiance en me proposant ce projet de thèse. Au cours de ces années, il a toujours fait preuve de disponibilité et de patience pour orienter mon travail, dissiper mes doutes, et surtout, me motiver. Je lui suis profondément reconnaissante pour ses conseils et pour le temps qu'il a consacré à m'orienter sur le plan méthodologique et m'accompagner dans toutes les étapes de la thèse. Ses conseils ont été précieux dans la rédaction de ce manuscrit. Un immense merci !

Je remercie aussi chaleureusement Sébastien Lebaut, mon co-encadrant, qui m'accompagne depuis mon Master. Je le remercie avant tout pour sa confiance et sa bienveillance, lui qui m'a initiée à la recherche, ainsi que pour ses conseils et son regard critique tout au long de la thèse.

Mes remerciements s'étendent également à mon co-directeur marocain, Saïd Sghir, qui a accepté de co-diriger cette recherche. Sans lui, le travail sur le terrain marocain aurait été bien plus difficile.

J'adresse aussi mes remerciements à Vincent Dubreuil et Salem Dahech, qui ont accepté de rapporter cette thèse. De même, je remercie Sandra Rome et Julia Hidalgo d'avoir accepté de l'examiner.

Je suis reconnaissante envers Luc Manceau, dont l'aide a été très importante pour la mise en place du réseau de mesures, ainsi que l'acquisition et le traitement des données aéroportées. Je le remercie pour sa disponibilité et sa patience. Merci pour tous les cafés et pour ton humour qui a rendu les sorties de terrain plus agréables !

Ce travail a aussi profité des remarques pertinentes et des conseils avisés de mon comité de suivi individuel composé de Claire Delus et Grégory Hamez. Je tiens à les remercier d'avoir accepté d'évaluer mon travail et pour m'avoir orienté chaque fois que cela s'est avéré nécessaire.

J'ai une pensée particulière pour Sébastien Douche de l'Eurométropole de Metz, qui m'a apporté une précieuse assistance au début de la thèse dans les démarches menées auprès des mairies des communes de l'EMM en vue d'obtenir les autorisations d'installation du réseau REMTHAM, ainsi que pour nos échanges fructueux depuis le début de la thèse. J'en profite d'ailleurs pour remercier les Maires et leurs techniciens, ainsi qu'Isabelle Brua, directrice de

l’école maternelle Saint-Martin qui a accepté d’accueillir une station météorologique dans son établissement.

Un grand merci à Didier François, Mathias Boquet et Nicolas Dorkel, qui ont été disponibles pour m’assister tout long de la thèse. Je remercie également Julien Bouyer et Rémy Claverie du Cerema pour leurs conseils et leurs encouragements.

Mes remerciements vont aussi à l'école doctorale Humanités Nouvelles – Fernand Braudel, pour son soutien financier et administratif, ce qui m'a permis de concrétiser mon projet de thèse. Ma sympathie s’étend à Aude Meziani pour sa disponibilité et son soutien dans les différentes démarches administratives.

De même, je remercie l’ADEME Grand Est pour le financement de l’opération IATUS qui a permis d’effectuer plusieurs missions de terrain en lien avec les travaux de la thèse.

Merci à toutes les personnes avec lesquelles j’ai mené les enquêtes en France et au Maroc, en particulier Amine Douaoui (!**شكرًا**), ainsi qu’aux acteurs locaux qui ont accepté de participer aux entretiens.

J'ai eu l’honneur d'occuper un poste de vacataire et un poste d’ATER au sein de l'Université de Lorraine. Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont fait confiance et m’ont permis de connaître les joies de l’enseignement. Mes remerciements s'adressent à tout le personnel administratif et pédagogique que j'ai pu côtoyer au cours de ces années.

J’adresse également mes remerciements à tous les stagiaires du laboratoire LOTERR que j’ai eu le plaisir d’encadrer et co-encadrer, en particulier Paruke, pour les moments partagés à la fois sur le plan professionnel et personnel.

Je souhaite également remercier d’une manière générale toute l’équipe du laboratoire LOTERR et de l’Université de Lorraine qui m’a permis de réaliser cette thèse dans d’excellentes conditions ; parmi eux, je peux citer par ordre alphabétique Annelise, Benjamin, Benoît, Bryan, Carole, Dominique, Jérôme, Marie-France, Pauline, Pierric, Régis, Soukaina, Stéphanie. J’ai une pensée pour l’ensemble des doctorants et ex-doctorants Frédérique, Hajar, Kassoum, Nicolas, Niklas et Sabrina.

Enfin, mes pensées les plus chères vont à mon cher mari, Koceila, qui a toujours été à mes côtés tout au long de la thèse. Un grand merci pour tes relectures minutieuses et ton soutien sans faille ! J’espère avoir un jour l’occasion de te soutenir comme tu l’as fait.

Je dédie cette thèse à mes parents grâce à qui j’ai pu venir en France, ainsi qu’à mon frère, à mes sœurs, et à mes beaux-frères, qui m’ont tous toujours soutenue et encouragée.

« Soli Deo Gloria »

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS 3
SOMMAIRE 6
INTRODUCTION GENERALE 1
PARTIE I : PROBLEMATIQUE SCIENTIFIQUE ET CONTEXTE D'ETUDE 9
PARTIE I - INTRODUCTION 10
Chapitre 1 : Climats urbains et îlots de chaleur 11
Chapitre 2 : Vulnérabilités humaines face à la chaleur intense 42
Chapitre 3 : Présentation des terrains d'étude 67
PARTIE I - CONCLUSION 88
PARTIE II : OBSERVATION ET CARTOGRAPHIE DES ILOTS DE CHALEUR 89
PARTIE II - INTRODUCTION 90
Chapitre 4 : Les îlots de chaleur de surface à l'échelle de l'agglomération 91
Chapitre 5 : Détection des températures de surface dans les espaces publics 133
Chapitre 6 : L'îlot de chaleur nocturne à l'échelle de l'agglomération 180
Chapitre 7 : L'îlot de chaleur nocturne à l'échelle du quartier 222
PARTIE II - CONCLUSION 256
PARTIE III : VULNERABILITE DE LA POPULATION ET ADAPTATION DES TERRITOIRES URBAINS AUX RISQUES LIES A LA CHALEUR 258
PARTIE III - INTRODUCTION 259
Chapitre 8 : Spatialisation de la vulnérabilité à la chaleur intense 260
Chapitre 9 : L'expérience sociale de la surchauffe urbaine 271
Chapitre 10 : Enquête par entretien auprès des acteurs locaux 305
PARTIE III - CONCLUSION 321
CONCLUSION GENERALE 322
Bibliographie 330
Annexes 382
Liste des figures 429
Liste des tableaux 439
Table des matières 442
Résumé 451
Abstract 452

A mon frère jumeau Raid, que sa mémoire soit une bénédiction.

INTRODUCTION GENERALE

Le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) du 20 mars 2023 rappelle la nécessité d'agir vite et collectivement pour limiter les effets du changement climatique (IPCC, 2023). De fait, la hausse des températures à l'échelle mondiale a des répercussions touchant à tous les aspects de la vie en société, et pouvant s'avérer dramatiques si aucune mesure n'est prise pour l'atténuer. Les scénarios les plus pessimistes prédisent plusieurs conséquences comme la destruction des milieux naturels et l'effondrement de la biodiversité, la diminution des terres habitables entraînant des migrations massives de populations (phénomène nouveau des réfugiés climatiques), la multiplication des catastrophes naturelles, la raréfaction des ressources en eau douce et la multiplication des sécheresses entraînant des pénuries alimentaires.

Or, avec plus de 55 % de la population mondiale, et des projections portant ce nombre à deux tiers d'ici 2050 (United Nations, 2018), c'est dans les villes que les défis actuels posés par le changement climatique sont les plus pressants (Barber, 2017). En particulier, l'un des problèmes les plus difficiles auxquels les villes doivent faire face est l'augmentation de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur, dont la probabilité d'occurrence est devenue, au cours des deux dernières décennies, entre 10 et 100 fois plus élevées qu'il y a un siècle dans presque toutes les régions du monde (Ellena *et al.*, 2020 ; Eckstein *et al.*, 2021). Or, les vagues de chaleur sont la principale cause de mortalité liée aux conditions météorologiques (Gabriel et Endlicher, 2011 ; Santé public France, 2023) ; d'autant que la littérature épidémiologique souligne que l'expansion démographique augmente la vulnérabilité sociale, ce qui exacerbe les relations température-mortalité (Ellena *et al.*, 2020). Cette hausse des températures est amplifiée par le phénomène de surchauffe urbaine qui se manifeste par l'apparition d'un Ilot de Chaleur Urbain (ICU). Ce terme désigne l'anomalie thermique positive que l'on observe entre le centre d'une agglomération et les zones non urbanisées alentour en raison des caractéristiques spécifiques au milieu urbain. Il devient alors évident que par sa capacité à concentrer les populations, l'activité économique, et les infrastructures de transport et d'énergie, l'urbain alimente les vulnérabilités (Dumas, 2021).

Pour faire face à cette vulnérabilité croissante, les villes doivent être un élément essentiel de la réponse au changement climatique et à ses impacts. De nombreuses villes deviennent d'ailleurs, des acteurs clés dans l'élaboration et la mise en œuvre d'initiatives visant à relever les défis posés par le changement climatique, à travers des mesures d'atténuation et d'adaptation (Carter, 2011 ; Leichenko, 2011).

> *« Alors que le monde continue à s'urbaniser, le développement durable repose de plus en plus sur une gestion intelligente de la croissance urbaine, particulièrement dans les pays en développement où les projections prévoient l'urbanisation la plus rapide d'ici 2050. L'intégration des politiques destinées à améliorer la vie des populations, tant urbaines que rurales, s'avère nécessaire afin de renforcer les liens entre les zones urbaines et rurales et construire leurs interconnexions économiques, sociales et environnementales. La croissance urbaine est intimement liée aux trois piliers du développement durable : l'économique, le social et l'environnemental. Une urbanisation bien pensée, tenant compte des tendances démographiques à court comme à long terme, peut aider à optimiser les bénéfices de l'agglomération tout en minimisant la dégradation de l'environnement et les autres effets négatifs de la hausse de la population urbaine » (ONU, Département des Affaires Économiques et Sociales, 2018 Revision of World Urbanization Prospects).*

Dans ce contexte, il apparaît important d'appréhender comment la gouvernance des villes peut anticiper et faire face aux effets néfastes de la chaleur, en termes de surveillance et de collecte de données, d'identification des principaux facteurs de stress thermique, et de réduction des vulnérabilités. Cette interrogation traverse d'ailleurs de nombreuses collectivités urbaines en France et dans le monde, avec une demande croissante pour l'élaboration d'outils d'aide à la décision et de moyens d'intervention pour lutter contre les effets de la surchauffe urbaine qui puissent être intégrés aux documents d'urbanisme. De plus, s'il est largement reconnu que les villes peuvent jouer un rôle fondamental dans la lutte contre le changement climatique, tant en termes de politiques d'atténuation que d'adaptation, des efforts de recherche supplémentaires sont nécessaires pour comprendre comment les stratégies de développement doivent être différenciées à l'échelle intra-urbaine en fonction des paramètres locaux spécifiques (Ellena *et al.*, 2020).

Or, pour caractériser les vulnérabilités urbaines aux risques thermiques, de nombreux travaux de recherche évaluent les taux de mortalité en relation avec l'évolution des températures. Bien que ce lien fournisse des résultats instructifs, il ne prend pas en compte les conditions spécifiques de stress thermique, ainsi que les caractéristiques locales de la population et de l'environnement physique (Klein Rosenthal *et al.*, 2014). En réalité, la relation température-mortalité ne se produit pas dans un vide territorial. Au contraire, elle est « intégrée » dans le tissu urbain, selon la manière dont les processus sociaux, environnementaux et climatiques interagissent au niveau local. En effet, en y regardant de plus près, il devient évident que les risques pour la santé dus à la chaleur ne sont pas uniformes à l'échelle d'une aire urbaine. Ils sont déterminés par une combinaison complexe de facteurs tels que la répartition spatiale de l'ICU, l'utilisation des sols, les caractéristiques de l'environnement bâti, les infrastructures, les systèmes sociaux, les facteurs géoclimatiques ainsi que les aspects socio-économiques (Tapia *et al.*, 2017 ; Breil *et al.*, 2018).

Par conséquent, l'évaluation des risques sanitaires dus à la chaleur dans un contexte intra-urbain diversifié est nécessaire pour éclairer les interventions au niveau local, et définir les mesures pertinentes sur la base de considérations spécifiques de planification territoriale et de décisions de gouvernance urbaine *ad hoc* (Wolf *et al.*, 2015 ; Hintz *et al.*, 2018). Cela passe nécessairement par le recueil de données à échelle fine permettant de comprendre les causes de l'hétérogénéité climatique intra-urbaine, et d'identifier les espaces particulièrement propices à l'accumulation de chaleur.

C'est pour répondre à cette attente qu'a émergé le projet de cette thèse. Elle se propose d'étudier la manière dont les îlots de chaleur se déploient sur la scène urbaine et interagissent avec les conditions environnementales et la distribution spatiale de la population la plus vulnérable. Le climat urbain étant un système multi-scalaire, une étude multi-échelle est conduite suivant une approche transversale mettant à profit les méthodes des sciences environnementales et des sciences sociales.

L'originalité de ce travail est de mettre en miroir deux contextes urbains contrastés : celui de la métropole régionale de Metz (225 000 d'habitants, 306 km²) située dans le nord-est de la France, au climat tempéré semi-océanique, constituant notre « terrain-pivot » ; et la grande métropole côtière de Casablanca (3,3 millions d'habitants, 786 km²) située au Maroc sur la côte atlantique au climat méditerranéen de façade océanique, constituant notre « terrain-miroir » (**Figure 1**). En croisant ces deux terrains, notre objectif est de mettre en évidence l'universalité des ICU tout en identifiant leurs dynamiques locales en fonction de la mutation urbaine des deux métropoles au cours des dernières décennies, de leurs aspects culturels et architecturaux actuels, ainsi que de leurs contextes climatiques et géographiques.

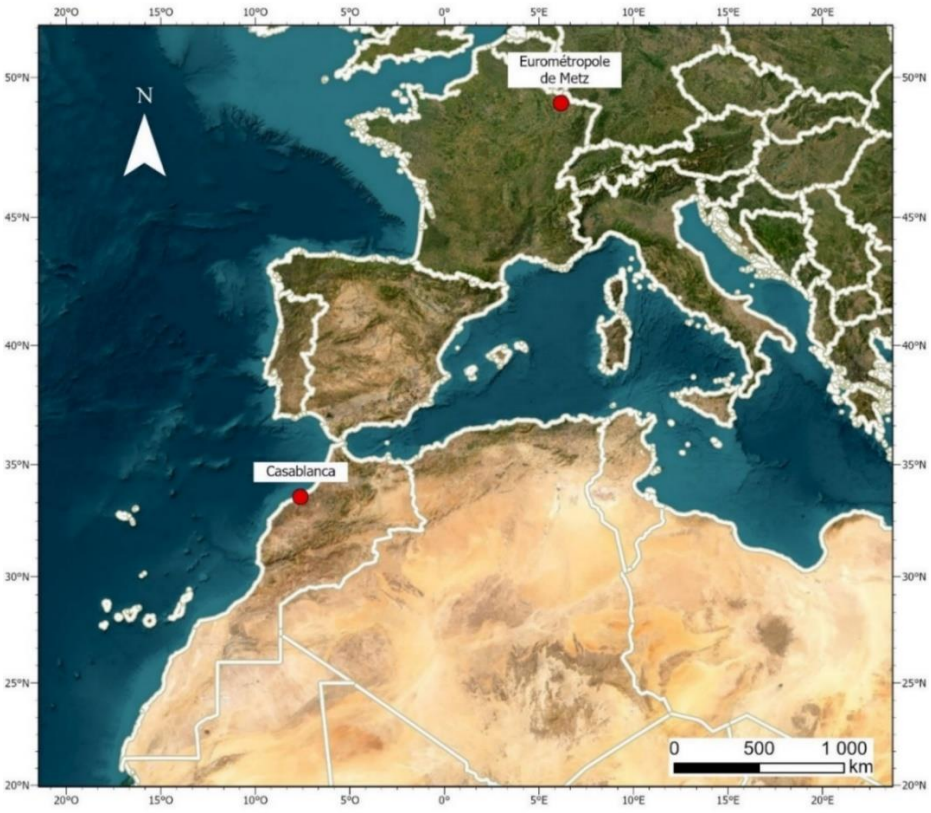


Figure 1 : Carte situant les deux terrains d'étude à l'échelle sub-continentale.

Cependant, le recours à l'approche comparative sur deux villes aussi différentes que Metz et Casablanca peut surprendre de prime abord, voire sembler quelque peu fantaisiste. Pourquoi et comment croiser des ensembles urbains si opposés aussi bien en termes de zones géographiques, de taille, de climat, de dynamique démographique, de culture et de profil socio-économique ? Répondre à cette interrogation implique d'abord de souligner ce qui fait l'intérêt de la démarche comparative en géographie, avant d'expliquer ce qui a justifié spécifiquement le choix de ces deux villes.

Intérêt de l'approche comparative en géographie

La confrontation entre les espaces est au cœur de la démarche du géographe. Elle représente un outil précieux pour analyser et comprendre, sous un jour nouveau, les enjeux spatiaux s'attachant à tout territoire (Salin, 2002). Pierre Gourou dira même que « la comparaison est l'arme du géographe, le meilleur des garde-fous » (Lasserre, 1983). Plusieurs thèses ont d'ailleurs eu recours à une approche comparative depuis le début des années 2000, et ont montré sa pertinence (Salin, 2002 ; Choplin, 2006 ; Bouhali, 2016 ; Alonso, 2021). En effet, dans le cadre d'une mise en perspective, « l'observation d'autres lieux facilite un regard différent sur le lieu étudié » (Gervais-Lambony Philippe, 2003). Passer d'un terrain à l'autre peut alors conduire à des résultats fructueux grâce à l'étonnement et à la prise de distance lorsque l'on change de terrain, et cela permet parfois de mieux comprendre un aspect d'une ville après l'avoir observé dans une autre. Ainsi, confronter les approches avec lesquelles la problématique de la gestion des risques liés aux fortes chaleurs est traitée présente un intérêt certain, dans le sens où les expériences et les connaissances d'un territoire pourront nourrir la réflexion sur le sujet et participer à l'amélioration de l'autre.

Cependant, il s'agit moins de comparer, autrement dit, de faire un travail d'analogie qui viserait à faire émerger des ressemblances et des divergences, que de s'interroger sur une catégorie, elle-même divisible en « une série de composants conceptuels de plus en plus subtils, lesquels renvoient à autant de questions sur le terme initial » (Detienne, 2002 cité par Bouhali, 2016). C'est donc le thème conducteur de la recherche qui permet la comparaison et la mise en perspective de deux territoires. Dans notre cas, la comparaison entre l'Eurométropole de Metz (EMM) et le Grand Casablanca (GC) devient pertinente lorsque l'on s'intéresse, non pas aux villes en elles-mêmes, mais à la problématique de la surchauffe urbaine et à la manière dont elle est appréhendée. En définitive, il ne s'agit pas tant de comparer deux villes *a priori* incomparables que de comparer un même phénomène qui s'inscrit dans plusieurs villes. Une fois ces éléments identifiés, il est possible de mettre en miroir les deux contextes urbains (Bouhali, 2016).

Dans cette optique, choisir deux villes « similaires » nous apparaît moins pertinent que de choisir deux ensembles urbains opposés sur une multitude d'aspects. « Comparer au plus loin» est souvent encore plus frappant et davantage producteur de réflexions que « comparer au plus proche » (Detienne, 2002). C'est ce qui, selon nous, donne à la démarche comparative toute sa valeur ajoutée, car grâce à cette démarche, les résultats obtenus sur un terrain d'étude verront

leur robustesse renforcée. De surcroît, nous avions à cœur d'appliquer la diversité des méthodes de détection et d'observation des îlots de chaleur utilisées dans cette thèse à un autre territoire urbain géo-climatiquement différencié. Le contraste marqué entre nos deux terrains d'étude permettra d'autant mieux de tester la réplicabilité de ces méthodes.

Ainsi, le positionnement adopté ici n'est certes pas nouveau, mais il n'a été que peu exploité en géographie. Cependant, au-delà de cette constatation, il convient de préciser que la démarche comparative ne représente qu'un outil au service d'une mise à distance et d'une réflexion sur des espaces différents (Salin, 2002), et non pas le cœur de la thèse qui reste l'analyse géo-climatique. En tant qu'outil méthodologique, la démarche comparative présente des atouts indéniables, mais aussi certains écueils qu'il convient de comprendre et de pointer. Si l'objectif d'une étude comparative est de passer au-delà de la diversité des terrains, des analogies et des oppositions qu'elle soulève pour construire une analyse globale des enjeux liés à la lutte contre la surchauffe urbaine, ne sommes-nous pas confrontés au problème d'une généralisation excessive des situations qui réduirait les particularismes locaux et la diversité des enjeux rencontrés (Salin, 2002) ? Parallèlement, la comparaison de terrains fort différents pose également le problème de l'accès aux données qui ne sont pas toujours disponibles d'un terrain à l'autre et, si elles existent, ne sont pas nécessairement de nature équivalente.

Choix des deux villes étudiées

Le choix de nos deux terrains d'étude découle de plusieurs constats. D'une part, les deux agglomérations de Metz et de Casablanca ont été, à ce jour, très peu étudiées sur le plan microclimatique. L'état de l'art montre que la connaissance de la surchauffe urbaine dans ces deux métropoles est à un stade encore embryonnaire, alors même que des plans d'adaptation au changement climatique y sont en cours de déclinaison. La Ville de Metz publie son premier Plan Climat intitulé « Ambition Climat 2030 » en 2019. Ce Plan, qui couvre la période 2019-2030, identifie huit domaines d'intervention dont celui de l'aménagement du territoire, où la Ville de Metz affiche l'ambition d'engager l'adaptation aux risques liés au dérèglement climatique en ciblant en particulier les îlots de chaleur. Pour sa part, l'agenda politique de la Métropole sur les enjeux Climat-Air-Energie débute en 2015, année du 1er PCAET. Parmi les différents thèmes structurant le plan d'action, figure un enjeu intitulé « Planification écologique de l'aménagement » dont l'ambition est de limiter l'impact de la surchauffe urbaine sur le cadre de vie et le bien-être des habitants.

C'est d'ailleurs à la faveur de ce contexte réglementaire régional, qu'est né le projet d'une collaboration entre l'EMM et l'Université de Lorraine (Centre de recherche en géographie LOTERR), concrétisé par une convention de partenariat conclue en mars 2019. Cela a immédiatement été considéré comme une opportunité : au moment d'exercer ses nouvelles compétences, la métropole aurait, grâce aux résultats de la thèse, la possibilité d'intégrer concrètement les enjeux de l'adaptation au changement climatique dans ses politiques publiques, et de mener ses nouveaux projets d'une façon plus intégrée, en prenant réellement en compte la problématique de la surchauffe urbaine (Drogue *et al.*, 2023).

Un tel cadre de collaboration n'a pas pu être mis en place avec la gouvernance de Casablanca. Cependant, des partenariats de longue date existent entre le LOTERR et plusieurs universités marocaines. Une démarche de coopération a été engagée sur le sujet de la climatologie urbaine, avec pour objectifs d'encourager l'échange de bonnes pratiques et le développement volontariste de mobilités croisées entre étudiants, doctorants et enseignants-chercheurs.

L'objectif ultime de la thèse est alors d'associer étroitement l'approche scientifique et les intérêts/acteurs du territoire dans le but de co-construire des outils d'aide à la décision et des mesures d'accompagnement au changement de comportement lors des épisodes de forte chaleur et de lutte contre l'inconfort thermique d'été.

Organisation de la thèse

Cette thèse s'organise en trois parties complémentaires conçues pour constituer un corpus aussi complet que possible, en tenant compte des informations et des données liées à chaque lieu d'étude (**Figure 2**).

La première partie porte sur notre problématique de recherche. Pour cela, l'accent sera mis sur les différentes typologies d'îlots de chaleur en examinant leur dynamique spatio-temporelle et leurs déterminants physiques (chapitre 1), avant d'explorer la dimension sensible du climat urbain en présentant un aperçu des connaissances actuelles concernant la vulnérabilité et les risques sanitaires liés à la chaleur en milieu urbain. Il s'agira alors de définir un cadre de recherche en vue d'une analyse multifacette de la vulnérabilité à la chaleur intense (chapitre 2). Enfin, nous présenterons les différents aspects qui caractérisent nos territoires, que ce soit sur le plan de la dynamique démographique ou de celui des caractéristiques physiques et climatiques (chapitre 3).

La deuxième partie porte sur le diagnostic climatologique des îlots de chaleur de surface et de l'îlot de chaleur nocturne dans les deux terrains que nous croisons dans le cadre de cette thèse. Les données expérimentales récoltées y sont valorisées par une approche géostatistique pour déceler les liens entre occupation du sol et les îlots de chaleur avec pour finalité de spatialiser les températures de surfaces (chapitre 4) et de modéliser la température de l'air acquise par l'intermédiaire d'un réseau de mesures fixe à l'échelle de l'agglomération (chapitre 6). Une analyse à une échelle spatiale plus fine sera également conduite à l'aide de la télédétection par drone (chapitre 5) et des mesures mobiles dans le but d'analyser le comportement thermique des différentes zones climatiques constituant l'espace urbain (chapitre 7).

La troisième partie porte sur l'évaluation du ressenti thermique et de la vulnérabilité aux risques liés à la chaleur. Sur la base du cadre conceptuel défini en première partie, un indice de vulnérabilité sera établi, puis spatialisé à l'échelle de l'agglomération (chapitre 8). Ce travail sera ensuite complété par une enquête de terrain auprès de la population (chapitre 9) et des acteurs publics (chapitre 10) avec pour objectifs :

- D'évaluer le ressenti thermique des habitants et d'identifier les populations vulnérables.
- D'identifier les comportements et les stratégies d'adaptation individuelles.
- De vérifier l'appropriation des risques liés à la chaleur intense par les aménageurs que ce soit en termes de politique de sensibilisation et de prévention des risques ou de mesures d'adaptation et d'atténuation de la surchauffe urbaine.

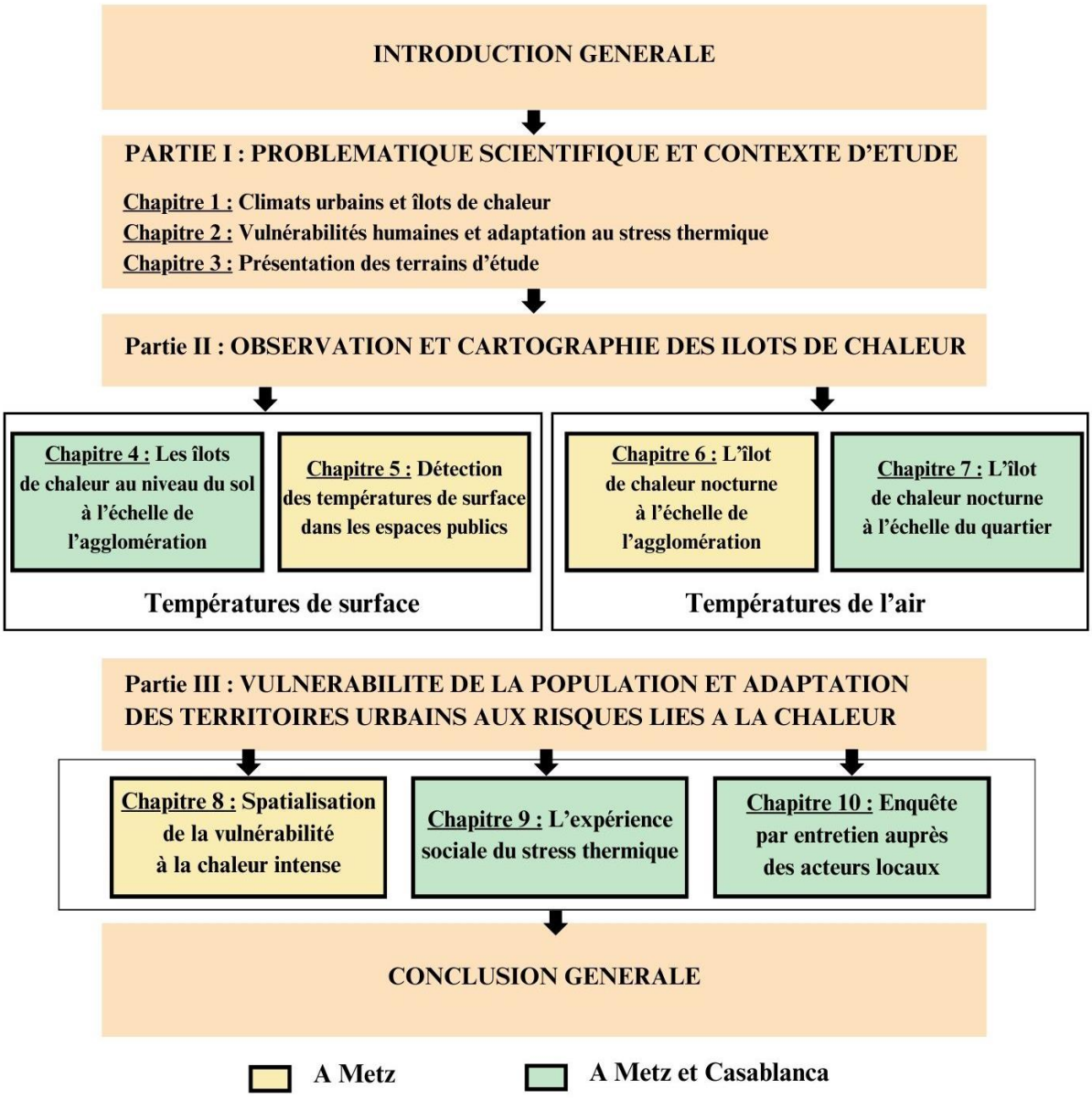


Figure 2 : Synopsis des recherches menées sur le territoire-pivot (Eurométropole de Metz) et le territoire-miroir (Grand Casablanca) dans le cadre de cette thèse

PARTIE I : PROBLEMATIQUE SCIENTIFIQUE ET CONTEXTE D'ETUDE

PARTIE I - INTRODUCTION

Depuis une trentaine d'années, de nombreux travaux de recherche en climatologie urbaine ont été menés et la littérature scientifique a été très prolifique avec la publication de nombreux ouvrages, articles, actes de colloque, documents de travail ou rapports professionnels. A titre d'exemple, une recherche rapide sur le moteur de recherche *Google Scholar* avec les termes « îlot de chaleur urbain » affiche 13 800 résultats, dont 79 % de travaux produits depuis 2003, et les termes « *urban heat island* » donnent 1 050 000 résultats. Une partie de ces contributions explore, analyse et éclaircit les différents mécanismes complexes gouvernant les interactions entre les zones urbaines et l'atmosphère, tandis qu'une autre partie interroge l'efficacité des différentes stratégies destinées à améliorer le confort thermique en milieu urbain à l'aune du réchauffement climatique.

Dans cette première partie, après une brève présentation des notions propres au microclimat urbain, nous poursuivrons par un tour d'horizon des connaissances relatives aux différentes formes d'îlots de chaleur, aux mécanismes physiques à leur origine, à leur dynamique temporelle **(chapitre 1)**, avant de nous arrêter sur les principaux enjeux en termes de vulnérabilité et de risques sanitaires liés à la chaleur **(chapitre 2).** Enfin, nous présenterons les différents aspects qui caractérisent nos terrains d'étude que ce soit sur le plan de la dynamique démographique où de leurs caractéristiques physiques et climatiques **(chapitre 3).**

Chapitre 1 : Climats urbains et îlots de chaleur

Les processus climatiques sont le résultat de transferts d'énergie et de chaleur entre les basses couches de l'atmosphère et la surface terrestre. Cette dernière est constituée par un « *patchwork* » de surfaces végétales, minérales et synthétiques, irriguées ou non ayant des propriétés radiatives, thermiques, aérodynamiques et hydriques parfois très différentes (Arnfield, 2003 ; Leconte, 2014). Cela donne lieu à des variations dans la quantité et la répartition de l'énergie radiative reçue par ces surfaces. La formation d'un microclimat local est dès lors liée en premier lieu à l'existence de disparités dans la quantité d'énergie reçue par les surfaces terrestres et dans la façon dont elles répartissent cette énergie entre le sol et l'atmosphère. C'est ce même processus qui a cours en ville et qui est à l'origine du phénomène de surchauffe urbaine.

Ce chapitre propose les clés de compréhension du phénomène de surchauffe urbaine. Nous introduisons le chapitre par quelques éléments théoriques définissant le microclimat urbain, en évoquant ses spécificités, les échelles et d'étude et le bilan radiatif en ville, avant de nous intéresser plus spécifiquement aux îlots de chaleur. Nous proposerons un aperçu de leurs différentes formes, de leur dynamique temporelle et saisonnière, ainsi que de leurs causes et les principaux facteurs influençant leur amplitude.

1.1. Les effets de la ville sur le climat **12**
1.2. Les types d'îlots de chaleur **18**
1.3. Les causes des îlots de chaleur **23**
1.4. Les facteurs de variabilité **36**
Synthèse **41**

1.1. Les effets de la ville sur le climat

L'étude de la problématique de la surchauffe urbaine s'inscrit dans le champ plus large de la climatologie urbaine qui s'intéresse aux effets de la ville sur le climat (et vice-versa), avec comme préoccupation principale, la compréhension du bilan d'énergie, c'est-à-dire les transferts de chaleur se produisant entre la surface urbaine et l'atmosphère terrestre.

1.1.1. Émergence et développement de la climatologie urbaine

La ville et son climat font l'objet de travaux relevant de différentes disciplines de recherche allant de la physique à la géographie en passant par la sociologie et l'architecture. Au Moyen Âge, la ville s'est créée avant tout dans un objectif de protection, de survie dans des contextes politiques et économiques incertains. Cet objectif a conduit les villes à s'entourer de larges murailles et de fossés qui, outre le fait que l'ensemble des activités économiques étaient concentrées dans la ville intra-muros, ont favorisé la mise en place d'un climat local plus humide, souvent couplé à de l'insalubrité (Colombert *et al.*, 2012). À défaut de pouvoir assainir les villes, la population s'est avant tout adaptée par l'éloignement. Ainsi, les espaces les moins pollués étaient investis par les classes dominantes, tandis que les zones les plus insalubres étaient investies par les couches sociales les plus modestes.

Plus tard, Louis Cotte décrira en 1774, dans son *Traité de Météorologie*, les écarts de température constatés et ressentis à Paris. Il écrivit au sujet de l'inconfort ressenti à Paris lors de vagues de chaleur, et formula des interrogations sur les écarts de température associés aux dimensions des rues et sur l'adaptation de certaines villes telles que la ville du Caire (Egypte) dont il mentionne les ruelles étroites (Colombert *et al.*, 2012 ; Foissard, 2015). Mais ce n'est que depuis le XIX^{ème} siècle, que l'on assiste à une réelle prise de conscience écologique et environnementale (Bournez, 2018). On commence alors à parler spécifiquement d'un « microclimat urbain » dont les conditions météorologiques sont différentes de celles rencontrées dans la campagne alentour. Le constat est là : les villes, en plus d'être influencées par le climat, ont elles-mêmes une influence sur ce dernier.

Cette prise de conscience coïncide avec la Révolution Industrielle qui a entraîné l'expansion et la densification des villes, engendrant de nombreuses conséquences sanitaires. Les théories hygiénistes, très influentes à cette époque, préconisent de diminuer la densité urbaine afin de « faire circuler l'air » (Léon *et al.*, 1972). Un assainissement va donc s'opérer (création d'égouts et de canalisations pour évacuer les eaux usées, pavage des rues, renouvellement du crépi des murs, comblement des fossés, drainage en sous-sol des eaux de surface et canalisation des cours d'eau), auquel s'ajoute une volonté d'aérer les espaces urbains (alignement des rues, élargissement et percée de nouvelles rues, etc.).

Néanmoins, la climatologie urbaine en tant que discipline scientifique, ne prend véritablement son essor qu'à partir des années 1920 avec l'arrivée des mesures instrumentales. Plusieurs ouvrages « fondateurs » sont alors publiés notamment en 1927 (Geiger, 1927 ; Schmist, 1929). Leurs préoccupations principales touchent à la pollution atmosphérique, mais aussi et surtout, à la problématique de la surchauffe urbaine. C'est donc une évolution de la

science et l'apparition puis le perfectionnement des moyens d'observation modernes qui ont permis d'éclaircir les mécanismes physiques à l'origine du microclimat urbain.

1.1.2. Le climat urbain

Outre l'énergie d'origine solaire, c'est avant tout la diversité des propriétés physiques et morphologiques rencontrées dans les multiples environnements de la surface terrestre qui influence les différentes variables climatiques telles que la température de l'air, le taux d'humidité ou encore le profil de vent. À grande échelle, ces disparités énergétiques peuvent être à l'origine du développement d'un climat local différent du climat général environnant (Erell *et al.*, 2010 ; Leconte, 2014).

C'est ce même processus qui a lieu en milieu urbain : l'environnement des villes, résultat de l'artificialisation de surfaces naturelles, présente un profil morphologique propre et un taux important de surfaces minérales. Cela a un impact certain sur le bilan d'énergie local et sur plusieurs variables climatiques en comparaison avec les environnements ruraux alentour. Le degré d'altération de ces variables au niveau local dépend largement des structures et des types d'aménagement urbain rencontrés qui vont, par la complexité de leurs propriétés et de leurs arrangements, plus ou moins perturber les interactions surface/atmosphère. À cela, s'ajoute le fait que dans un environnement urbain, l'énergie ne provient pas uniquement du rayonnement solaire, mais aussi des activités anthropiques. Le déséquilibre énergétique ainsi provoqué favorise la mise en place d'une ambiance atmosphérique (signature thermique et chimique) propre au milieu urbain. Le climat urbain peut dès lors être considéré comme la plus ancienne manifestation d'un changement climatique d'origine anthropique (Egli, 1951 ; Redon, 2017).

Les échanges énergétiques qui nous intéressent se produisent dans la partie inférieure de la troposphère, partie basse de l'atmosphère en contact avec l'épiderme terrestre. Or, pour mieux appréhender la complexité de ces interactions, il est important de prêter une attention particulière aux échelles d'études. Effectivement, la couche limite atmosphérique urbaine peut se concevoir comme l'imbrication de sous-systèmes délimités par la configuration verticale des vents et des transferts de masse et d'énergie et de l'expansion horizontale de la ville. Chaque ensemble de rues et de bâtiments forme ainsi un microclimat qui ne sera, *a priori*, pas identique à celui formé par d'autres ensembles. Ces sous-systèmes nécessitent de recourir à des approches différentes répondant aux échelles spatio-temporelles décrivant les phénomènes qui leur sont propres (Bouyer, 2009).

1.1.2.1. Les échelles d'étude du climat urbain

De la complexité d'un bâtiment à celle d'une rue ou d'un quartier, la ville est constituée d'autant d'entités qui obligent à l'étudier dans une « descente » d'échelles. En effet, ce qui se passe à l'échelle du bâtiment est différent de ce qui se passe à l'échelle de la rue ou du quartier. Aussi, avant d'aborder les différents phénomènes physiques caractérisant le climat urbain, il est nécessaire de distinguer différentes échelles horizontales et verticales (Sakhy, 2016). Horizontalement, comme verticalement, trois échelles peuvent être distinguées (**Tableau 1**) :

Tableau 1 : Échelles spatiales d'étude du climat d'après (Yoshino, 1975).

Echelles	Horizontales (en mètres)	Verticales (en mètres)
Méso-climat	10^3 à $2*10^5$	10^1 à 10^3
Climat local	10^2 à 10^4	10^{-1} à 10^3
Micro-climat	10^{-2} à 10^2	10^{-2} à 10^1

a) La méso-échelle

La méso-échelle porte sur des étendues allant jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres carrés. Elle couvre généralement l'intégralité de la tâche urbaine (**Figure 3a**) (Dupont, 2001). A cette échelle, les observations, les études ou les modèles de prévision s'intéressent aux phénomènes de taille caractéristique comprise entre 10^3 et $2*10^5$ m engendrés par l'interaction entre la circulation générale et les états de surface. Les hétérogénéités aérodynamiques de surface correspondent principalement au relief et aux éléments de rugosité du sol (bâtiments et végétation haute) ; les hétérogénéités thermiques et hydriques sont généralement liées aux grands modes d'occupation du sol et aux variations spatiales des conditions météorologiques comme les précipitations ou l'ombrage des surfaces induits par les nuages (Dupont, 2001 cité par Bouyer, 2009).

Sur le plan vertical, la méso-échelle est associée à la couche limite atmosphérique (CLA). Cette couche de 1 à 2 km d'épaisseur, représente schématiquement la deuxième couche dans l'atmosphère des villes. Il s'agit de la zone abritant les échanges entre les conditions climatiques régionales et les flux issus de la couche de canopée urbaine, avec des transferts de chaleur par convection entre la surface et l'atmosphère (Bouyer, 2009 ; Perreault, 2015). Son extension verticale va de la surface à quelques centaines de mètres d'altitude et dépend directement de tous les paramètres météorologiques (vent, température, humidité, insolation), mais aussi de la topographie et du type d'environnement (Menut, 1997). Sa forme n'est pas constante et s'étire dans la direction du vent (Oke, 1982). Lorsque la couche limite atmosphérique est celle de l'agglomération, elle porte le nom de couche limite urbaine (CLU).

b) L'échelle locale

L'échelle locale correspond à des ensembles intra-urbains de plusieurs dizaines de kilomètres carrés en moyenne tels que les quartiers ou les friches industrielles (**Figure 3b**). Cette échelle est celle pour laquelle sont conçues les stations météorologiques dans le but d'étudier des phénomènes climatiques dont la taille caractéristique est comprise entre 10^2 à $5*10^4$ m, avec en particulier, les brises thermiques et les vents synoptiques qui peuvent subir l'influence de la rugosité urbaine et les écarts de température et d'humidité (Leconte, 2014).

L'échelle locale correspond verticalement à celle de la sous-couche de rugosité urbaine d'une épaisseur de 1,5 à 4 fois les éléments de rugosité. C'est dans cette couche, marquée par une importante turbulence, que se regroupe l'ensemble des activités humaines.

c) L'échelle micro

L'échelle micro est l'échelle climatique la plus fine, correspondant à des espaces restreints (inférieurs à 1 km²) de quelques bâtiments, d'un parc urbain ou à une rue (**Figure 3c**). Cette échelle permet l'étude et la compréhension de la turbulence et des échanges radiatifs à échelle fine, car à faible distance, des différences de température de quelques degrés peuvent être observées du fait des ombres portées, des propriétés des matériaux, etc., et le flux d'air est également perturbé par le moindre objet. Les analyses à cette échelle ont généralement pour objectif d'évaluer dans les rues considérées, le confort des piétons, la qualité de l'air, etc., mais aussi de comprendre les processus physiques se produisant à l'intérieur de la canopée afin de les intégrer dans des modèles de plus large échelle (Bouyer, 2009).

La micro-échelle est associée verticalement à la couche de la canopée urbaine qui correspond à la hauteur moyenne des bâtiments.

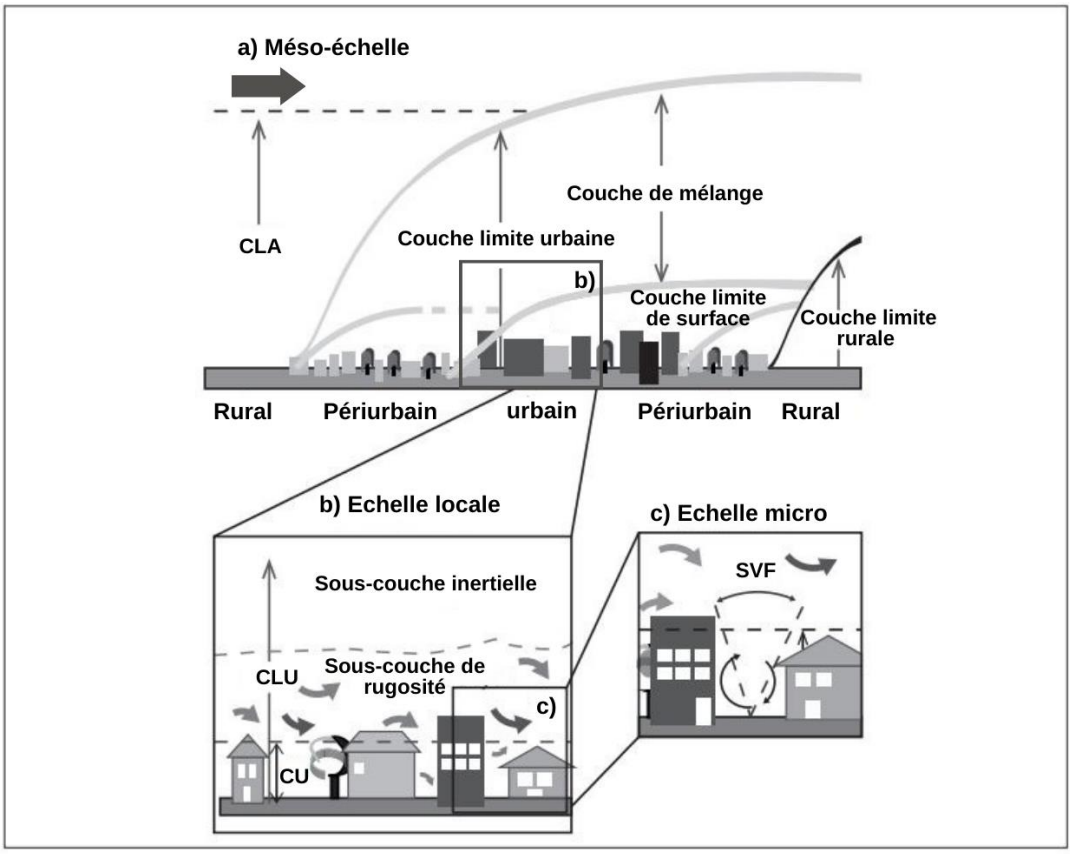


Figure 3 : Imbrication des échelles climatiques, de la couche limite urbaine et des sous-couches constituantes (adapté de Rotach *et al.*, 2005).

1.1.2.2. Transferts d'énergie et bilan radiatif

Le bilan radiatif exprime le lien entre les différents apports et pertes d'énergie radiative (**Figure 4**). Il varie au cours du cycle diurne puisque le rayonnement solaire constitue la principale source d'énergie des surfaces extérieures (Bouyer, 2009), et dépend des caractéristiques propres de la surface urbaine ainsi que des gradients de température et

d'humidité entre la surface et l'atmosphère. Il est exprimé par l'équation suivante pour une surface urbaine :

$$Q_* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_s \qquad (1)$$

avec :

Q_*: flux de rayonnement net,
Q_F : flux de chaleur anthropique,
Q_H: flux de chaleur sensible,
Q_E: flux de chaleur latente,
ΔQ_s: flux de chaleur stocké par le sol et les bâtiments.

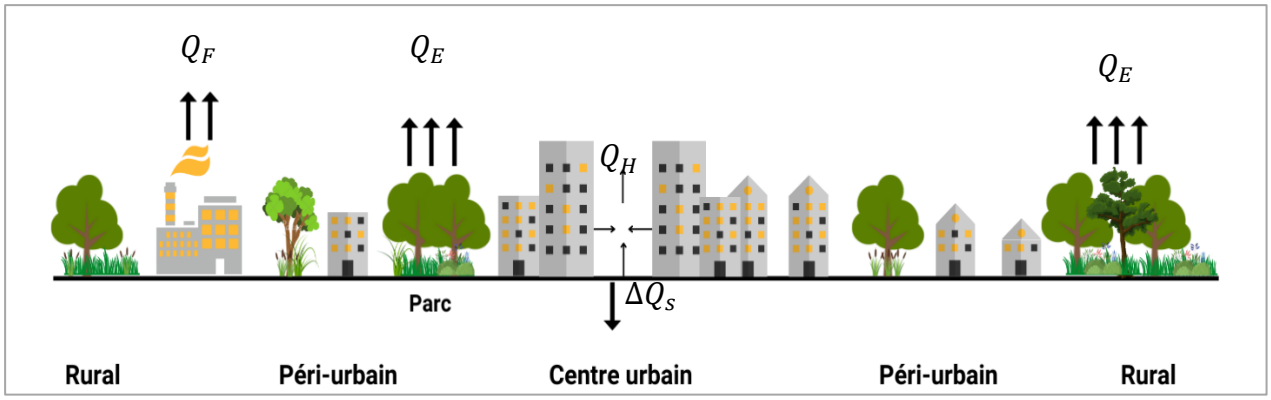


Figure 4 : Bilan d'énergie en milieu urbain (W.m^{-2}) (adapté de Ringenbach, 2004).

a) Le rayonnement net (Q_*)

Le flux de rayonnement net (Q_*) correspond aux rayonnements sur l'ensemble du spectre électromagnétique. On distingue deux types de rayonnement : le rayonnement global (direct) qui correspond aux flux à courtes longueurs d'ondes (visible et proche infrarouge (0,15-3,0 µm)) d'une part, et le rayonnement infrarouge (diffus) correspondant aux flux à grandes longueurs d'ondes (infrarouge (3,0 µm - 100 µm)) (Oke, 1987 ; Leconte, 2014 ; Foissard, 2015). Mathématiquement, le rayonnement net se résout comme une équation de bilan :

$$Q_* = K_\downarrow - K_\uparrow + L_\downarrow - L_\uparrow \qquad (2)$$

avec,

$K_\downarrow - K_\uparrow$: bilan de rayonnement global (visible et proche infrarouge),
$L_\downarrow - L_\uparrow$: bilan de rayonnement infrarouge (moyen infrarouge et infrarouge thermique),
$K_\downarrow$: flux radiatif descendant à courte longueur d'onde correspondant au rayonnement directement émis par le soleil (direct) et au rayonnement réémis par la diffusion atmosphérique (diffus) au niveau de la surface terrestre,
$K_\uparrow$: flux radiatif ascendant ou remontant à courte longueur d'onde correspondant au rayonnement réfléchi par la surface terrestre (en relation avec l'albédo),
$L_\downarrow$: flux radiatif descendant à grande longueur d'onde,
$L_\uparrow$: flux radiatif remontant à grande longueur d'onde.

b) Le flux de chaleur anthropique (Q_F)

Le flux de chaleur anthropique (Q_F) renvoie aux émissions de chaleur d'origine artificielle issues des activités humaines (industries, transports, habitat, etc.). Ce flux s'intensifie à mesure que la densité du bâti et de la population augmente, et varie en fonction du type d'énergie utilisée, ainsi que de la situation économique et industrielle de la ville considérée (***cf.* 1.3.4.1**).

c) Le flux de chaleur dans le sol et les bâtiments (ΔQ_s)

L'énergie stockée (ΔQ_s) correspond à la chaleur retenue par les revêtements urbains et qui est restituée via les échanges radiatifs. En journée, l'énergie stockée est plus faible en milieu rural (5 à 15 % du Q_*) qu'en milieu urbain (20 à 30 % du Q_*) car les propriétés thermiques et radiatives des éléments constituant ces environnements sont nettement contrastés. A cela s'ajoute le fait qu'en milieu urbain, la carence en végétation ralentit le processus de l'évapotranspiration qui permet de rafraîchir l'air. Par ailleurs, la quantité de chaleur stockée dépend aussi de la morphologie des rues (présence ou non de canyons urbains) ainsi que de la nature et de la couleur (niveau d'albédo) des revêtements en ville. Enfin, la présence des parois verticales (façades des bâtiments) augmente l'aire de réception du rayonnement solaire et contribue au piégeage et à l'absorption de la chaleur. Après le coucher de soleil, la restitution de l'énergie stockée est le principal flux de chaleur en ville, ce qui est à l'origine de la formation de l'îlot de chaleur urbain (ICU).

d) Le flux de chaleur latente (Q_E)

Le flux de chaleur latente (Q_E) correspond à l'énergie utilisée pour l'évapotranspiration de l'eau (flux de vapeur d'eau) par le couvert végétal. Très souvent, la chaleur latente est plus importante en milieu rural qu'en milieu urbain, du fait de la présence d'un couvert végétal beaucoup plus important (***cf.* 1.3.1**). La végétation peut dissiper 70 à 80 % de (Q_H) par évapotranspiration de l'eau, ce qui signifie sa conversion en chaleur latente, responsable du rafraîchissement de l'air ambiant. Conséquence de l'effet de refroidissement par évapotranspiration, une zone végétalisée humide est considérablement plus fraîche que les surfaces imperméabilisées plus sèches. Aussi, la répartition des flux de chaleur latente dans l'atmosphère est liée à la quantité d'eau disponible (Ringenbach, 2004 ; Foissard, 2015). L'énergie non utilisée pour évaporer l'eau dans l'atmosphère est soit stockée (ΔQ_s) par les revêtements avant d'être restituée dans la nuit, soit réchauffe les basses couches de l'atmosphère sous forme de chaleur sensible (Q_H).

e) Le flux de chaleur sensible (Q_H)

Le flux de chaleur sensible (Q_H) correspond au transport de chaleur qui s'établit entre la surface terrestre et l'atmosphère du fait du brassage turbulent de l'air au sein de la couche limite de surface. Il correspond à la chaleur mesurée par les stations météorologiques. Ce flux est plus important au-dessus des zones urbaines qu'au-dessus des zones rurales et il constitue le principal puits d'énergie à la surface. L'une de ses caractéristiques importantes en milieu urbain

est qu'il est principalement marqué en journée et atteint ses valeurs maximales dans l'après-midi. En outre, il a tendance à rester positif en soirée, et même parfois toute la nuit (Oke *et al.*, 1999 ; Ringenbach, 2004), ce qui favorise la mise en place du gradient thermique ville-campagne correspondant à l'ICU.

Le Q_H est largement variable (de 20 à 75 % de rayonnement net) puisque qu'il dépend des gradients de température et des caractéristiques de la masse d'air, alors que pour sa part, le Q_E peut être quasiment nul dans les centres-villes après une période sèche (Ringenbach, 2004). Il est à noter que les flux d'énergie peuvent connaître des variations au sein d'une même ville du fait des caractéristiques propres à chaque quartier et à leur influence sur la répartition de l'énergie (Schmid *et al.*, 1991).

1.2. Les types d'îlots de chaleur

L'îlot de chaleur est très souvent réduit au seul cadre urbain. Or, le phénomène de surchauffe localisée n'est pas étranger aux espaces ruraux. La mise à nu des sols après les récoltes peut effectivement générer des surchauffes locales et créer un îlot de chaleur. Il peut être également rencontré sur des aéroports, ou des centres commerciaux, présentant notamment de grands espaces artificialisés tels que des parkings. Il peut aussi s'agir de bâtiments avec de larges toits métalliques ou de zones concentrant des matériaux à faible pouvoir réfléchissant. Enfin, il arrive qu'un îlot de chaleur, formé dans un espace minéralisé, soit porté par le vent sur un espace ne l'ayant pas généré, comme un village à proximité d'une grande ville (Perrin, 2020).

Les îlots de chaleur ne sont donc pas spécifiquement urbains. Il s'agit d'un phénomène se manifestant sous plusieurs formes, chacune possédant son échelle spatiale et temporelle (Oke, 1987 ; Stewart, 2011a), son mécanisme physique (Oke, 1976) et qui sont appréhendées par des méthodes d'observation différentes (Leconte, 2014). Ainsi, cette section a pour objectif de présenter en premier lieu les trois types d'îlots de chaleur généralement retenus dans la littérature et les méthodes d'investigation propres à chacun ; les phénomènes physiques à l'origine de la formation de ce phénomène seront détaillés par la suite.

1.2.1. Les îlots de chaleur de surface

1.2.1.1. Définition

La notion d'îlot de chaleur urbain de surface (ICUs ou *Surface Urban Heat Island* (SUHI) en anglais) fait référence à la différence de température des surfaces entre le milieu urbain et sa périphérie rurale. Notons d'emblée que ce concept est ambigu, car en journée, l'été, lorsque les conditions sont chaudes et radiatives, cet îlot de chaleur n'est ni uniforme ni continu dans les aires urbanisées : il correspond en réalité à un archipel d'espaces plus chauds que leur environnement. A l'inverse, les espaces présentant des températures basses par rapport à leur environnement constituent des îlots de fraîcheur urbains de surface (IFUs ou *Surface Urban Cool Island* en anglais). Ces îlots de chaleur ou de fraîcheur de surface peuvent s'observer tantôt de jour, tantôt de nuit.

1.2.1.2. Méthodes d'observation

L'ICUs est généralement caractérisé en températures de surface (Ts ou LST en anglais). Les mesures s'effectuent le plus souvent à l'aide de la télédétection spatiale à partir des images satellitaires. Les satellites fournissent en effet un moyen efficace de calculer et de surveiller les Ts allant de l'échelle locale à l'échelle planétaire, car ils disposent de capteurs mesurant les rayons infrarouges émis et réfléchis par les surfaces, ce qui rend possible de détecter les surfaces d'accumulation de chaleur au sein d'une aire urbaine. De nombreux chercheurs ont donc dérivé les Ts en utilisant les bandes thermiques basées sur divers systèmes embarqués sur des satellites tels que *Landsat*, le radiomètre spectral pour imagerie de résolution moyenne (*MODIS*) (Wan, 2006 ; Zhou *et al.*, 2018), le radiomètre avancé à très haute résolution (*AVHRR*) (Liu *et al.*, 2019), la suite de radiomètres pour imageurs dans l'infrarouge et le visible ou encore, le radiomètre à réflectance (*ASTER*) (Wang et Liang, 2009). Ces systèmes proposent une résolution spatiale allant de 30 m à 1 km et une résolution temporelle allant du jour à la semaine ou au mois.

Toutefois, une résolution spatiale supérieure à 50 m ne sera pas assez précise pour observer les ICUs à l'échelle locale (Kim et Brown, 2021). De même, les rayons infrarouges thermiques ne peuvent pas être observés dans des conditions de ciel nuageux, car cela produirait des pixels de valeur aberrante dans les Ts dérivées des images affectées par la couverture nuageuse. Il est également nécessaire de disposer d'un échantillon représentatif de l'ensemble des surfaces de la zone urbaine (Oke, 2006). Seule la prise en compte de toutes ces surfaces permet d'obtenir une température de surface représentative du centre urbain (Voogt et Oke, 1997).

A ces contraintes physiques, il faut ajouter le fait que l'utilisation de la télédétection présente certaines contraintes méthodologiques et peut parfois entraîner de fausses interprétations. En effet, ce type d'imagerie porte sur les surfaces horizontales, à savoir le sol et les toits des bâtiments. Aussi, les surfaces verticales qui constituent les murs ne sont pas comprises dans les images, bien qu'elles reçoivent également le rayonnement solaire. De plus, lorsque les capteurs passent au-dessus de zones végétalisées, ils ne captent que la réponse radiative de la canopée, tout ce qui se trouve en dessous est méconnu (Voogt et Oke, 1997 ; 2003). Il est donc difficile d'estimer la température au niveau du sol de ces espaces, à moins de recourir à un système de mesure aéroportée par laser tel que la technologie *LiDAR*, capable de mesurer les positions métriques et verticales en vue d'acquérir des données en 3D (Awrangjeb *et al.*, 2013).

Les mesures peuvent être aussi menées manuellement ou à l'aide d'un véhicule ou d'un dispositif aéroporté équipé d'un thermomètre ou d'un capteur infrarouge orienté vers le bas permettant de mesurer le flux radiatif infrarouge (Perreault, 2015). Néanmoins, ce type de mesure présente l'inconvénient de ne couvrir qu'un périmètre restreint. Dès lors qu'on s'intéresse à un périmètre plus large tel que celui d'une tâche urbaine, son application devient alors fastidieuse et coûteuse. Ces méthodes de mesure devraient donc, dans l'idéal, servir d'auxiliaire sur des espaces ciblés, en vue de compléter la télédétection satellitaire.

1.2.2. L'îlot de chaleur nocturne

1.2.2.1. Définition

Historiquement, l'ICU de la canopée urbaine a été le premier type d'îlot de chaleur urbain identifié. Il concerne la température de l'air (Ta) telle que mesurée dans la couche de canopée urbaine (**Figure 5**).

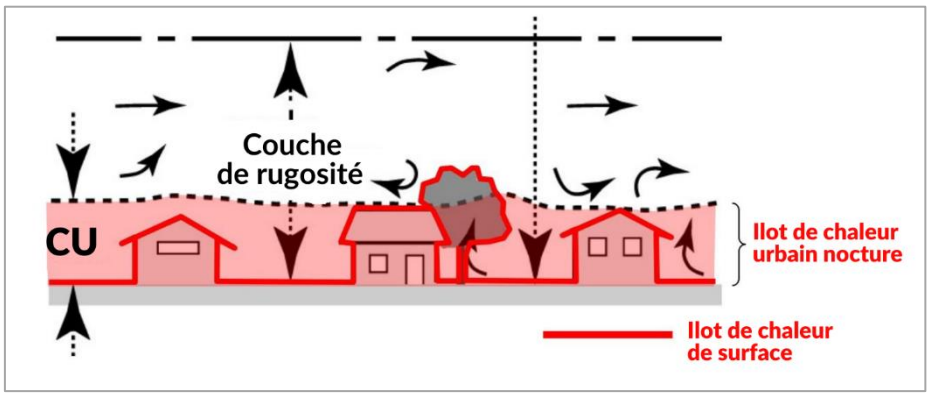


Figure 5 : Visualisation de la couche de canopée urbaine (adapté de Voogt, 2007).

L'ICU correspond au gradient thermique observé la nuit, soit à l'écart de température relatif entre le centre-ville et la périphérie périurbaine ou rurale (ΔT_{u-r}) (**Figure 6**). Son apparition est la conséquence des spécificités du milieu urbain qui ont pour effet général de modifier le climat local et d'affecter le confort thermique des citadins. Alors que les Ta_{max} diurnes sont assez proches dans les deux environnements, le minimum nocturne sera beaucoup plus bas en zone rurale. C'est pourquoi nous parlerons plutôt d'« îlot de chaleur nocturne », car il s'agit essentiellement d'un phénomène nocturne apparaissant en raison du fait que les espaces urbanisés ne parviennent pas à se refroidir aussi rapidement que les espaces ruraux en début de soirée et durant la nuit.

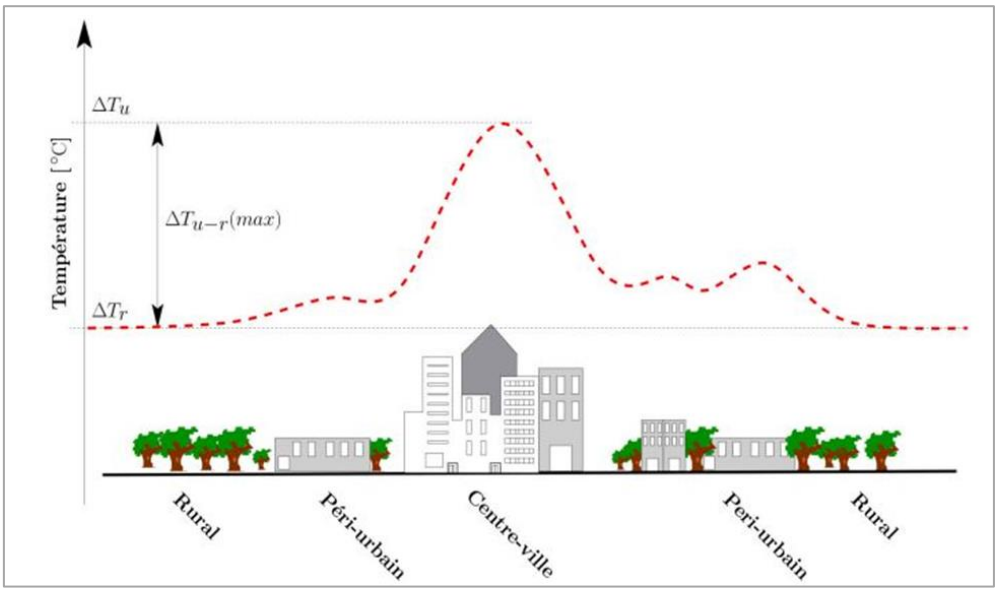


Figure 6 : Profil horizontal schématisé d'un ICU nocturne (www.cerema.fr).

1.2.2.2. Méthodes de mesure

La mesure des Ta en milieu urbain s'effectue généralement en plaçant des capteurs de température au sein de la couche limite de canopée urbaine pour enregistrer les variables climatiques. Les données ainsi recueillies peuvent renseigner sur le cycle journalier de l'ICU, mais également sur les évolutions hebdomadaires, saisonnières et pluriannuelles. Cette observation dite « *in situ* » peut être conduite selon plusieurs approches différentes (Gartland, 2008 ; Leconte, 2014) :

– La première approche consiste à examiner l'historique des données climatiques recueillies par une ou plusieurs stations afin d'étudier l'évolution temporelle des Ta sur plusieurs mois ou plusieurs années. Cette démarche permet notamment d'interroger la relation entre l'évolution de l'amplitude de l'ICU et le développement de l'urbanisation.

– Une autre approche vise à comparer deux stations, l'une disposée en milieu urbain, l'autre en milieu rural. La station urbaine est alors placée de façon à être représentative de l'environnement urbain en termes de morphologie et d'occupation du sol, des matériaux urbains présents et de la chaleur anthropique émise. La station rurale quant à elle, sera représentative du milieu rural environnant.

– L'observation peut aussi s'appuyer sur une pluralité de capteurs météorologiques répartis dans l'agglomération afin d'obtenir une information spatiale concernant les Ta. Par interpolation spatiale entre les différentes stations, il est possible de tracer des isothermes et d'obtenir une carte de température de l'agglomération.

– Une autre méthode d'observation consiste à mener de mesures itinérantes le long de transects urbains déterminés à pied ou en utilisant un moyen de transport individuel (vélo ou véhicule à moteur).

Ces différentes approches présentent toutefois des limites : les données recueillies ne couvrent généralement que quelques localisations de l'aire urbaine. Elles ne pourront donc pas renseigner de manière détaillée sur la distribution spatiale des Ta dans l'ensemble de la ville. Il est alors important de multiplier les points d'observation en vue de renforcer la robustesse des mesures.

1.2.3. L'îlot de chaleur urbain de la couche limite

Les déplacements de masses d'air à l'approche et au sein de la zone urbaine aboutissent à la formation d'une couche atmosphérique instable, qui fonctionne « en circuit fermé ». C'est la « couche limite urbaine » (**Figure 7a**), qui prend la forme d'un dôme bloquant les masses chaudes au-dessus de la ville (**Figure 7b**). Du fait de ces processus, le phénomène d'ICU peut alors s'observer non seulement au niveau du plancher urbain, mais aussi dans les masses d'air atmosphériques au-dessus de la ville.

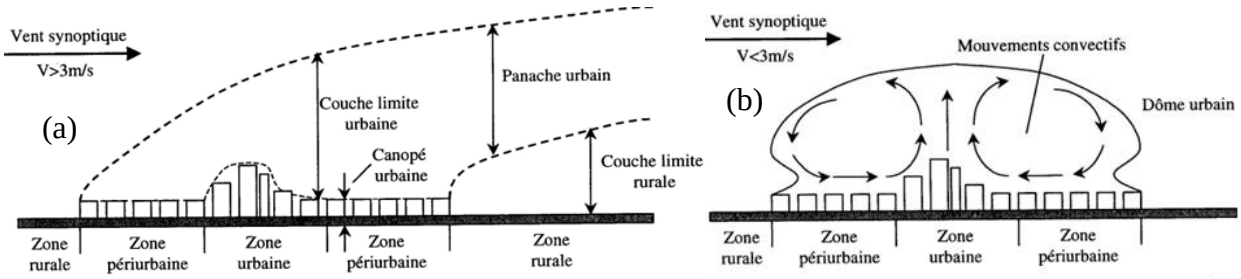


Figure 7 : Structure verticale de l'atmosphère urbaine pour des vents supérieurs (a) et inférieurs (b) à 3m/s (d'après Mestayer et Anquetin, 1995)

De manière générale, l'écart de température atmosphérique ville/campagne est plus marqué près du sol et s'atténue graduellement lorsqu'on monte en altitude (Perreault, 2015). L'influence de la ville s'annule entre 100 et 500 mètres pour disparaître complètement à près d'un kilomètre au-dessus de la zone urbaine (Escourrou, 1991 ; Pigeon, 2007).

En ce qui concerne les méthodes de mesure, les climatologues ont d'abord fait appel à des sondes aériennes (ballons captifs) lancées simultanément en zone urbaine et en zone rurale, ou à des tours instrumentées de grande hauteur (Pigeon, 2007). L'une des premières campagnes de mesure de grande échelle impliquant l'étude de la CLA, celle de l'*Urban Air Pollution Dynamic Research Network* à New York (Etats-Unis) dans les années 1960, a pour sa part complété les données fournies par les ballons captifs avec des mesures de température effectuées par hélicoptère (Davidson, 1967 ; Bornstein, 1968). Plus tard, certains chercheurs ont tenté de s'appuyer sur l'outil informatique : les premières simulations 2D de la CLA ont été réalisées avec des modèles à méso-échelle et ont pu capturer les larges circulations thermiques générées par l'ICU (Davidson, 1967 cité par Barlow, 2014). Mais c'est l'augmentation continue de la puissance des ordinateurs au cours des années 1980 qui a fourni aux climatologues des instruments plus performants et souvent plus abordables, ainsi que la capacité à traiter et à analyser les données plus rapidement (Martilli, 2007). Aujourd'hui, l'ICU de la couche limite est aussi observé grâce à la télédétection à l'aide des technologies SODAR[1], LiDAR[2] et des profileurs UHF et VHF[3].

[1] Le SODAR (*Sonic Detection And Ranging*) est un système utilisant les ondes sonores pour mesurer les champs anémométriques et l'état de turbulence de l'atmosphère.
[2] Le LiDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) est un système de télédétection par laser permettant de localiser les aérosols et les gouttelettes d'eau en suspension.
[3] UHF : *Ultra High Frequency*, VHF : *Very High Frequency*.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous limiterons à l'étude des îlots de chaleur de surface et de l'îlot de chaleur nocturne, l'étude de l'ICU de la couche limite exigeant des moyens d'investigation dépassant notre recherche (**Figure 8**).

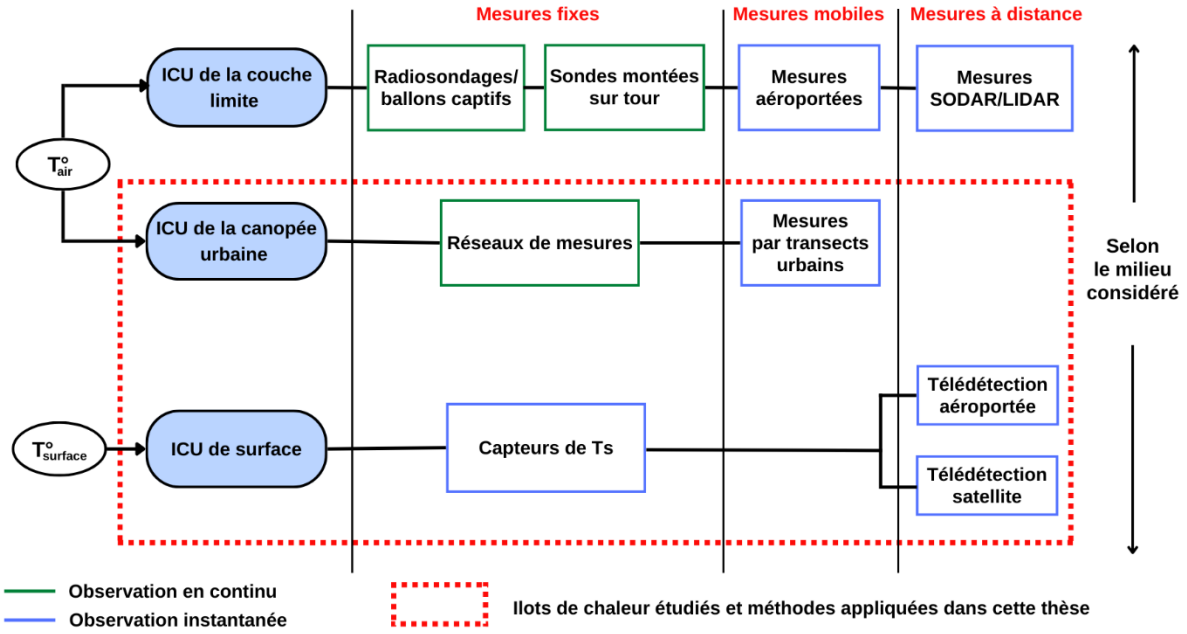


Figure 8 : Méthodes de mesure et de détection des différents types d'îlots de chaleur urbains et périmètre de recherche de la thèse.

1.3. Les causes des îlots de chaleur

La recherche sur les îlots de chaleur s'est d'abord concentrée sur leurs effets sur l'environnement urbain, décrivant leur impact sur le confort thermique et sur la qualité de l'air. Aujourd'hui, de plus en plus d'études s'intéressent aux processus physiques à l'origine du phénomène. Une revue de la littérature scientifique montre qu'une quantité considérable de travaux de recherche a déjà été consacrée à la compréhension des interactions entre les caractéristiques du tissu urbain sur les températures de l'air et de surface. En particulier, l'accent a été mis sur les caractéristiques bidimensionnelles (2D) d'une ville telles que les types d'occupation du sol et le pourcentage de zones imperméables. En revanche, relativement peu d'études ont exploré les effets climatiques des caractéristiques tridimensionnelles (3D) telles que la hauteur ou le volume des bâtiments (Oke, 1981 ; Unger, 2004 ; Berger *et al.*, 2017 ; Tian *et al.*, 2019). Ce n'est que récemment que les chercheurs ont commencé à prendre en considération des indicateurs liés à la géométrie urbaine lors de la modélisation des températures, car les données urbaines 3D fournies par les SIG ont connu un développement leur permettant désormais de mieux intégrer les informations de la hauteur et l'espacement des bâtiments (Park *et al.*, 2017). On s'est alors rendu compte que les mécanismes à l'origine des ICU sont multiples, souvent inhérents au milieu urbain. Ils sont liés principalement à la morphologie du milieu urbain, à la nature des surfaces, mais aussi à l'empreinte des activités anthropiques.

1.3.1. Carence en couvert végétal en ville

La densification progressive des villes et l'extension de l'emprise du bâti et de la voirie aboutissent inévitablement à la perte progressive du couvert végétal, forestier et hydrique en zone urbaine et périurbaine. En retour, la diminution de la végétation en ville a pour conséquence d'affaiblir les processus naturels rafraîchissants, ce qui modifie le bilan d'énergie local et participe à la mise en place d'une ambiance générale plus chaude. L'effet régulateur de la végétation en ville a par exemple été mis en évidence dans les mesures effectuées par Taha (1997) qui relève une diminution de 2,5 °C au sein d'un parc urbain de Montréal. Il touche à plusieurs paramètres du climat urbain tels que l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement terrestre. Néanmoins, l'importance du couvert végétal réside avant tout dans son action sur le cycle de l'eau, et dans l'effet d'ombrage apporté aux sols et aux bâtiments.

1.3.1.1. Evapotranspiration

La réduction du couvert naturel en milieu urbain aboutit à une forte diminution du flux de chaleur latente (Q_E) du fait de l'affaiblissement de l'évapotranspiration. Introduite par Thornthwaite (1948), cette notion désigne le processus biophysique par lequel l'eau à l'état liquide présente dans le sol et dans les plantes est renvoyée dans l'atmosphère sous forme gazeuse. Cela recouvre donc deux phénomènes complémentaires, à savoir l'évaporation de l'eau dans l'atmosphère et la transpiration des végétaux :

- En premier lieu, on parle d'évaporation lorsque l'eau évaporée n'est pas issue des plantes elles-mêmes, mais de la pluie et des eaux de surface. L'évaporation nécessite une chaleur importante puisque pour qu'un litre d'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux, environ 2 500 joules sont nécessaires (Colombert, 2008). Il y aura donc autant de chaleur en moins dans l'atmosphère. Or, l'imperméabilisation du sol urbain, accompagnée par l'évacuation immédiate des eaux de pluie par les systèmes d'évacuation, diminuent l'évaporation du fait de l'élimination des eaux de surface. Alors qu'en milieu rural, 50 % des eaux de pluie sont absorbées par le sol, le taux d'infiltration de l'eau en milieu urbain est de seulement 15 %. La majeure partie de l'eau est alors ruisselée vers les cours d'eau (Cyr *et al.*, 1998). Certains dispositifs comme les bassins, fontaines et jets d'eau peuvent toutefois compenser en partie la perte des eaux de surface et exercer pouvoir rafraîchissant sur l'air environnant.

- La transpiration se produit lorsque le soleil chauffe l'humidité à l'intérieur de la plante, produisant de la vapeur d'eau qui s'échappe par de petites ouvertures à la surface de la plante appelées « stomates ». Le rejet de vapeur crée alors une dépression dans les vaisseaux de la plante, ce qui provoque une aspiration du liquide vers le haut (**Figure 9**). Grâce à la régulation de l'ouverture des stomates, les arbres peuvent s'adapter à la chaleur : si l'air est sec, les stomates s'ouvriront davantage. Ainsi, pour une journée chaude, un chêne adulte peut perdre

jusqu'à 100 l d'eau via ses 150 000 feuilles (Perrin, 2020). Comme la vapeur d'eau qui s'échappe a absorbé la chaleur, le résultat net de la transpiration est un refroidissement de la plante et de son environnement, tout en générant de l'humidité. C'est le fait que cette énergie soit prélevée dans l'environnement qui participe à son refroidissement (De Munck, 2013). Ainsi, dans de bonnes conditions d'irrigation, un arbre peut être assimilé à un « climatiseur naturel » : l'évaporation d'un litre d'eau permet ainsi de refroidir de 2 °C, 1 000 m^3 d'air (Perrin, 2020).

Par effet cumulatif, un groupe d'arbres ou une zone locale très végétalisée, permet la réduction de la température de l'air urbain de plusieurs degrés l'été (Santamouris, 2005) et peut favoriser les dispositifs de ventilation naturelle en été (Bozonnet *et al.*, 2006). Néanmoins, l'efficacité de cet effet rafraîchissant n'est pas homogène partout et dépend de plusieurs variables telles que les conditions atmosphériques, la zone climatique, et la configuration topographique. Il varie également en fonction des types de plantes et des essences végétales (De Frenne *et al.*, 2013 ; Rahman *et al.*, 2017).

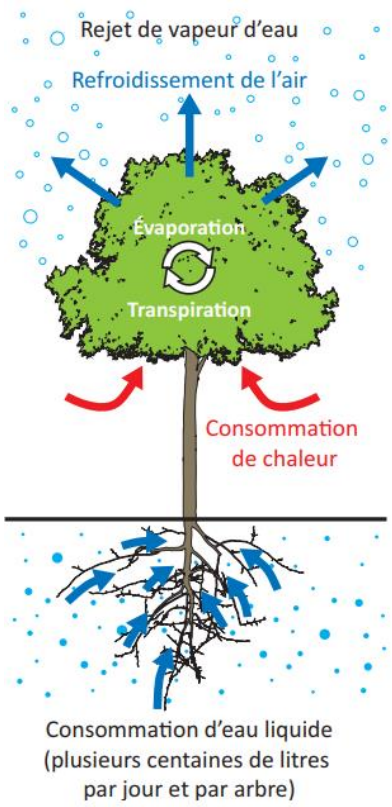


Figure 9 : Processus d'évapotranspiration (APUR, 2012)

1.3.1.2. Effet d'ombrage

L'autre paramètre intervenant dans l'effet rafraîchissant de la végétation est l'effet d'ombrage dû aux arbres et aux plantes à grand développement. Les surfaces à l'ombre sont plus fraîches que celles directement exposées au soleil car les arbres contribuent à maintenir des températures modérées en période estivale en filtrant une partie du rayonnement solaire direct (**Figure 10**). Les revêtements minéraux des sols et des façades ayant absorbé moins d'énergie en journée, auront moins de chaleur à libérer la nuit. L'effet d'ombrage apporte ainsi un confort important aux usagers des espaces urbains (Bouyer, 2009).

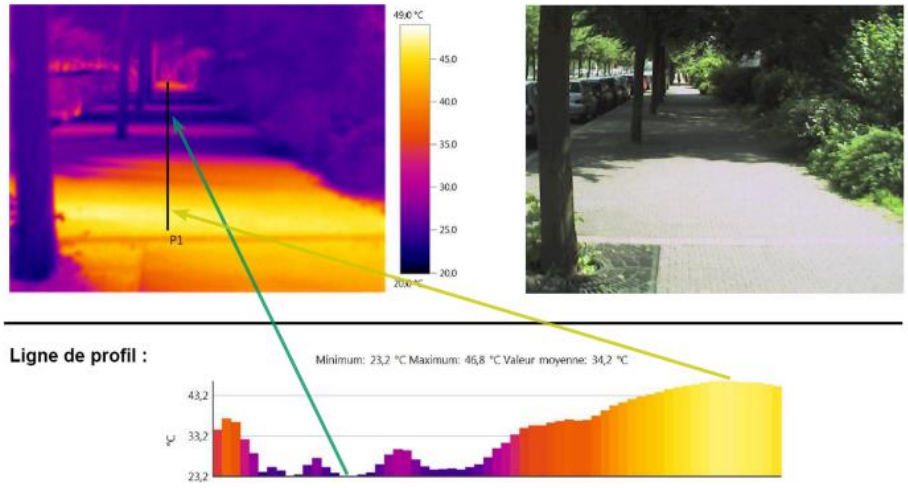


Figure 10 : Différence de température entre les surfaces exposées au soleil et celles à l'ombre au niveau de l'avenue du Président Hoover à Lille (arbre-en-ville.fr).

Une seule couche de feuilles absorbe généralement 80 % du rayonnement visible entrant, en réfléchit 10 % et en transmet 10 % au sol. Pour ce qui est du rayonnement l'infrarouge, environ 20 % est absorbé, 50 % est réfléchi et 30 % est transmis au sol (Kotzen, 2003). Plus de couches de feuilles auront d'autant plus d'effet. A l'échelle de l'aire urbaine, l'étude de Park *et al.* (2021) suggère qu'une augmentation de 1 % du volume de la canopée des arbres entraîne une baisse des Ts entre 1,1 et 2,1 %. A une échelle plus petite, l'étude de Kotzen (2003) fait état d'une réduction moyenne de la température de la zone ombragée allant 10 à 21 °C. Notons que l'effet d'ombrage est un paramètre intervenant davantage en zone résidentielle et périurbaine pavillonnaire que dans les centres-villes et les zones d'habitat populaire denses (Park et Guldmann, 2020). Par ailleurs, la capacité d'ombrage varie en fonction tout autant du cycle des saisons que des essences d'arbres, avec des différences importantes en termes de densité foliaire, de hauteur et de volumétrie de leur canopée (Shahidan *et al.*, 2010 ; Liu *et al.*, 2018).

1.3.2. Augmentation du stockage de la chaleur dans les surfaces

L'artificialisation des sols a un impact direct sur le bilan radiatif du fait du comportement thermique des matériaux composant les revêtements urbains. Ces matériaux ont en effet tendance à absorber le rayonnement solaire et à libérer de la chaleur vers l'atmosphère par des processus de convection et de conduction (Santamouris *et al.*, 2011). Cette caractéristique est liée à différents paramètres touchant à leurs propriétés radiatives et thermiques. Il s'agit en particulier, de l'albédo et de l'émissivité thermique.

En premier lieu, l'albédo est un indicateur optique décrivant la réflectance moyenne des surfaces, c'est-à-dire le rapport du flux d'énergie solaire réfléchie au flux d'énergie solaire incidente. Il est mesuré sur une échelle de 0 à 1 et dépend de la couleur des surfaces : une surface avec un albédo relativement élevé (>0,75) est de couleur claire et réfléchit la plus grande partie du rayonnement solaire qu'elle reçoit. Au contraire, une surface à faible albédo (<0,25) est généralement de couleur foncée et absorbe la majeure partie du rayonnement solaire reçu (**Figure 11**). Le rapport énergie réfléchie/énergie reçue permet de déterminer la chaleur absorbée par les matériaux et donc son influence sur la température.

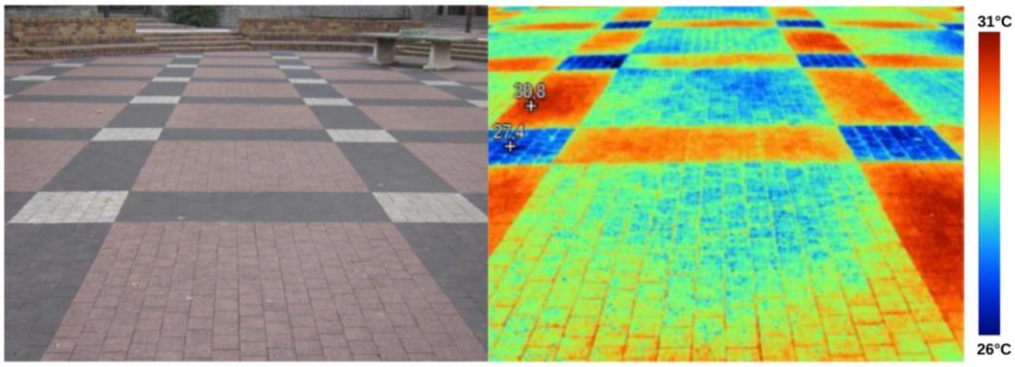


Figure 11 : Clichés pris sur revêtement de sol à la ZAC de la Grange-aux-belles à Paris (Apur, 2012).

L'albédo varie fortement d'une surface à une autre : de manière générale, la ville présente des valeurs d'albédo plus faibles que la campagne, ce qui contribue à l'augmentation des températures des matériaux urbains (Prado et Ferreira, 2005 ; Parlow, 2011). Cantat (1989) par exemple, a relevé que l'albédo à Paris est d'environ 16 % inférieur à celui des zones rurales

environnantes. Cela s'explique par le fait qu'une grande partie de la zone urbaine est recouverte de matériaux tels que l'asphalte, le béton et le bitume qui, en raison de leur faible albédo (entre 0,05 et 0,45), absorbent des niveaux élevés de rayonnement solaire (Li *et al.*, 2014 ; Lopez-Cabeza *et al.*, 2022). L'albédo varie également d'une partie du monde à une autre : pour les villes européennes et américaines, l'albédo est compris entre 0,15 et 0,30, alors que dans les villes d'Afrique du nord, l'albédo est généralement compris entre 0,45 et 0,60 (Bouyer, 2009).

De nombreuses études se sont intéressées ces dernières années à l'utilisation de matériaux à albédo élevé comme stratégie pour atténuer l'amplitude des ICU. L'étude de Carnielo et Zinzi, (2013) à Rome (Italie) montre qu'une simple modification de la couleur de l'asphalte, sans modifier aucune autre propriété du matériau, peut, à elle seule, réduire à la fois la température de surface (entre 8 et 20 °C) et la température de l'air (jusqu'à 5,5 °C). Cela a été confirmé par l'étude de Morini *et al.* (2016) à Terni (Italie), qui a constaté que l'augmentation de l'albédo entraîne une diminution de la température urbaine jusqu'à 2,5 °C en journée.

L'émissivité est la propriété d'un matériau à diffuser l'énergie qu'il accumule. Cette valeur caractérise notamment la capacité des matériaux à rayonner la nuit et donc à se refroidir en libérant de l'énergie sous forme de rayonnements à grande longueur d'onde ($L\uparrow$). L'énergie qui n'est pas diffusée contribue au réchauffement des surfaces. Le coefficient d'émissivité d'un matériau est fonction de son état de surface et s'exprime par une valeur comprise entre 0 et 1. Un corps noir aurait une valeur d'émissivité de 1, et tout autre objet aurait une émissivité inférieure à 1. Or, la plupart des matériaux formant les revêtements urbains présentent un facteur d'émissivité pour le rayonnement à ondes longues généralement plus faible que les surfaces rurales (**Figure 12**), ce qui explique, au moins en partie, la formation des ICU (Yap, 1975 ; Ringenbach, 2004).

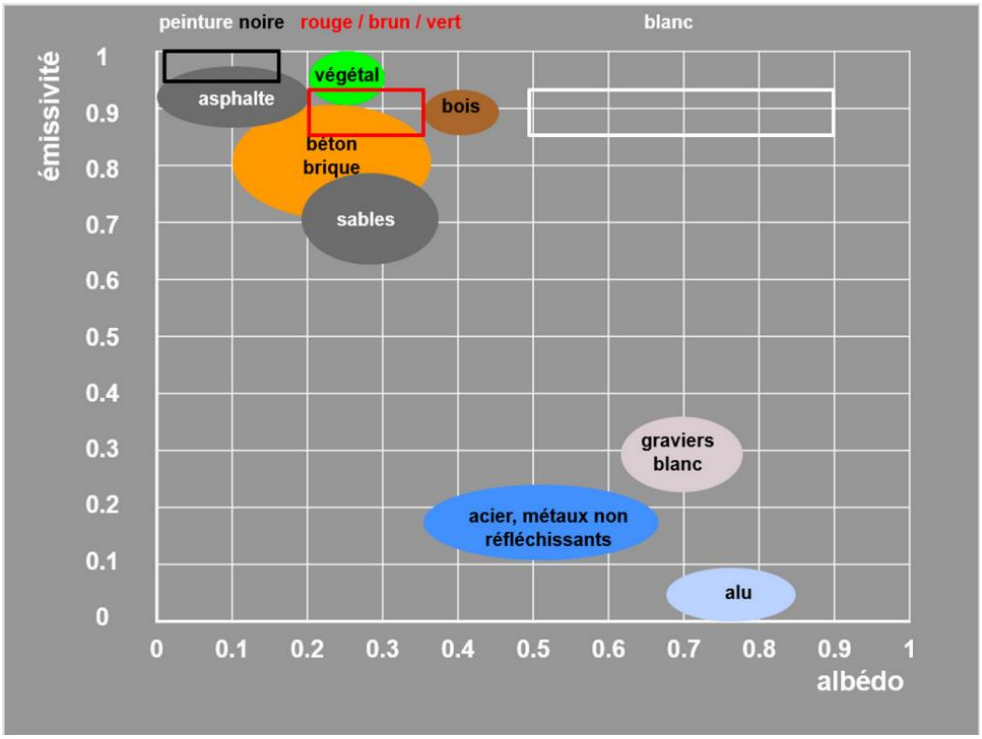


Figure 12 : Relation entre albédo et émissivité de certains matériaux (Perrin, 2020)**.**

Au total, albédo et émissivité sont deux paramètres radiatifs importants dans l'étude de l'influence des matériaux de construction sur le climat urbain : plus l'albédo et l'émissivité d'un matériau sont faibles, plus celui-ci risque d'emmagasiner de la chaleur en journée et de la diffuser dans l'atmosphère la nuit (**Figure 13**) (Doulos *et al.*, 2004).

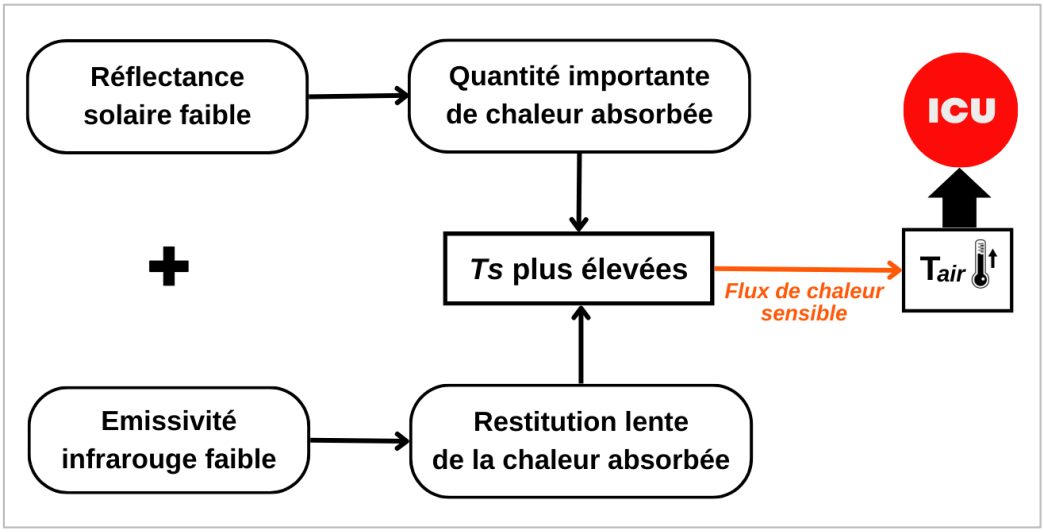


Figure 13 : Effets de la réflectance solaire et de l'émissivité thermique sur l'ICU.

1.3.3. Formes et géométrie urbaine

La ville est, par nature, un regroupement d'habitations et d'activités humaines. En conséquence, l'environnement urbain présentera un aspect tridimensionnel complexe très différent de celui du milieu rural où les habitations sont très dispersées. Cet aspect rugueux de la ville entraîne une perturbation de la dynamique des masses d'air et aboutit à une augmentation du flux radiatif net (Q_*), avec l'apparition de différentes ambiances thermiques. Deux aspects caractérisent essentiellement la géométrie urbaine : sa rugosité et l'existence de canyons urbains.

1.3.3.1. La rugosité urbaine

L'une des caractéristiques les plus remarquables du milieu urbain est son aspect rugueux, qui renvoie à la capacité des bâtiments et autres éléments à s'opposer à l'écoulement des flux d'air en modifiant le profil vertical du vent (**Figure 14**) (Leconte, 2014). La dynamique des masses d'air, à l'approche de la ville, va être plus ou moins perturbée en fonction de la forme urbaine. En effet, la circulation de l'air dans et au-dessus de la ville, diffère de celle du milieu rural environnant du fait des frottements avec les surfaces au sol. Ainsi, plus la rugosité est

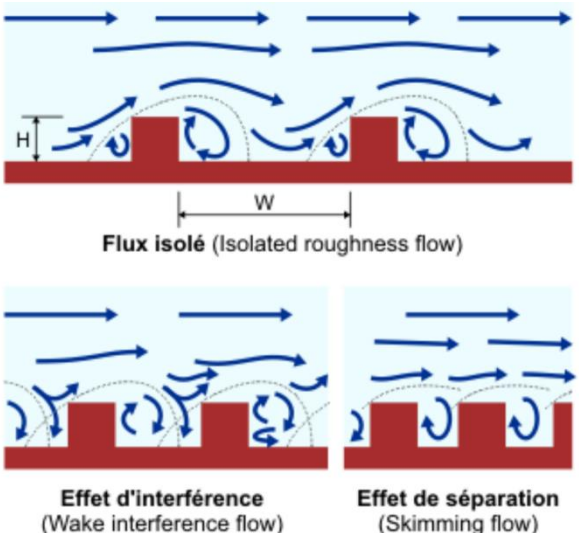


Figure 14 : Effet de la rugosité urbaine sur l'écoulement des flux d'air (energieplus-lesite.be).

importante, plus le frottement de l'air sur le sol est fort, ce qui ralentit la masse d'air, empêchant alors le rafraîchissement de la ville par l'évacuation de la chaleur. Les études ont d'ailleurs mis en évidence une vitesse de vent en milieu urbain plus faible de 50 à 60 % par rapport aux espaces dégagés (Gartland, 2008 ; Bouyer, 2009).

Cette perturbation de la circulation du vent induit une convection moins efficace par le fait d'entraver le transfert de chaleur à l'aide des brises thermiques qui s'écoulent des zones fraîches (campagne) vers les zones chaudes (ville). Le processus physique de rafraîchissement étant compromis, l'air chaud ambiant n'est plus renouvelé par l'arrivée de nouvelles masses d'air. Les flux thermiques vont alors remonter par convection et stagner dans les couches plus élevées de la canopée urbaine, faisant ainsi augmenter la température de l'air ambiant (**Figure 15**). Ce phénomène favorise alors la formation d'un ICU et son amplification puisqu'il y a davantage de stockage thermique dans les matériaux urbains.

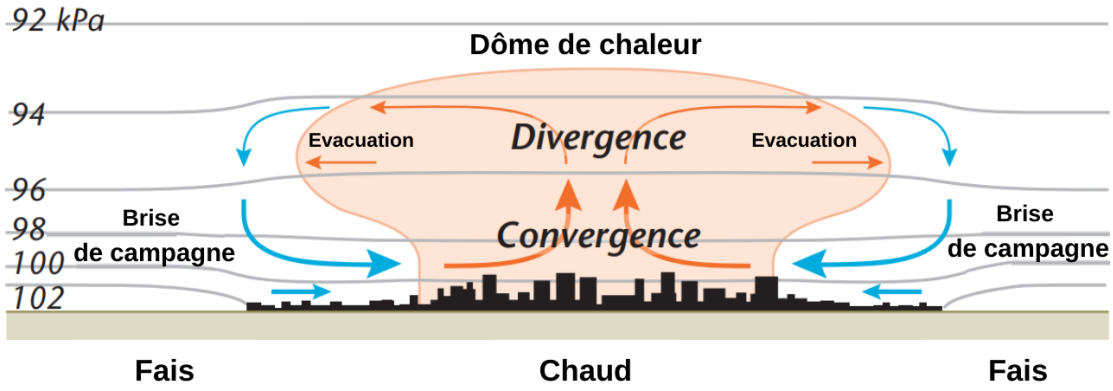


Figure 15 : Phénomène de brise thermique en contexte urbain (adapté de Oke *et al.*, 2017).

En revanche, au-delà d'une zone appelée « zone de mélange », le profil de l'écoulement des flux d'air redevient similaire à celui d'un site homogène. Des relations empiriques établissent le profil de vitesse en fonction de la rugosité du site, souvent sous forme logarithmique (Nicholson, 1975 cité par Bozonnet *et al.*, 2006). Ce profil dépend de plusieurs paramètres qui ont pour effet d'accentuer ou de réduire la rugosité du milieu urbain. Il s'agit de l'orientation des rues en fonction des vents dominants, mais aussi du volume et de la hauteur du bâti : deux espaces urbains présentant la même densité en surface et la même organisation, mais l'un avec une hauteur constante de bâti, tandis que l'autre connaissant de fortes variations, ce dernier sera considéré comme plus rugueux et perturbera d'avantage les flux convectifs en rendant plus difficile une dispersion de la chaleur par le vent (Park *et al.*, 2017).

La rugosité aérodynamique est par ailleurs accentuée dans les zones à forte densité de bâti. Effectivement, l'évacuation de la chaleur en ville par les flux sensibles varie grandement selon les types de tissus urbains : une zone pavillonnaire présentera une rugosité beaucoup plus faible qu'un centre-ville dense concentrant les grands ensembles. Alonso *et al.* (2003) ont par exemple constaté dans leur étude sur la ville de Salamanque (Espagne), que c'est dans les zones les plus denses que les températures mesurées atteignaient leurs valeurs maximales. Néanmoins, le degré de rugosité d'un milieu est un paramètre difficile à mesurer en pratique, et est étudié essentiellement par simulation numérique (Ridha, 2017).

1.3.3.2. Canyon urbain et piégeage radiatif

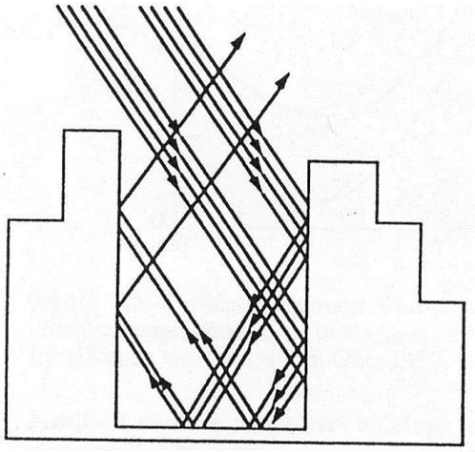


Figure 16 : Illustration du piégeage radiatif d'après Estournel, (1982).

Une autre caractéristique de la ville est l'existence de « canyons urbains ». Introduite par Oke, (1987), cette notion désigne l'espace vide entre deux bâtiments. Dans les rues en forme de canyons, le rayonnement reçu par la surface du sol et des façades est renvoyé et ricoche d'une façade à l'autre. De la chaleur se retrouve alors piégée entre les murs et s'accumule dans des espaces de taille réduite : c'est ce qu'on appelle le « piégeage radiatif ». Cela a une double conséquence puisqu'en plus de l'augmentation des températures de l'air, l'effet « ricochet » favorise le stockage de la chaleur dans les matériaux constituant les revêtements urbains (**Figure 16**). A cela, il faut ajouter le fait que dans les canyons profonds, les variations de vitesse du vent peuvent être importantes, entraînant des différences de température plus marquées au-dessus du canyon qu'au niveau de la rue (Grimmond, 2007).

La littérature mobilise essentiellement deux indicateurs morphométriques dans l'analyse du lien entre la morphologie urbaine et l'ICU :

a) Le facteur de vue du ciel

Le facteur de vue du ciel ou *sky view factor* (SVF) en anglais désigne la proportion de ciel observable à partir du sol (comprise entre 0 et 1). Ce paramètre est une mesure 3D de la morphologie urbaine et fournit une indication de la géométrie de la densité de construction (Chen *et al.*, 2012). Il permet également d'évaluer la facilité avec laquelle se produit le refroidissement nocturne par échange radiatif avec l'atmosphère, car une ouverture limitée vers le ciel entraîne une augmentation du stockage net de chaleur dans les bâtiments et une augmentation de l'ICU (Apur, 2012). Ce paramètre est calculé dans un canyon en suivant l'équation ci-dessous (Erell *et al.*, 2010 ; Leconte, 2014) :

$$SVF = \cos(\beta) \quad (8)$$

Avec,

$$\beta = tan^{-1} = \left(\frac{H}{0{,}5L}\right) \quad (9)$$

Ainsi, un espace ouvert possédant un SVF proche de 1 présentera plus d'échanges directs avec la couche limite urbaine, ce qui lui permettra de se réchauffer plus vite le jour et de se refroidir plus vite la nuit ; alors qu'un espace plus clos, dont le SVF s'approche de 0, aura moins d'échanges directs avec la couche limite urbaine, il aura donc tendance à conserver la chaleur plus longtemps en période nocturne (Colombert, 2008). Effectivement, le rayonnement à ondes courtes dans un terrain ouvert (SVF proche de 1) atteint la surface sans obstacles, tandis que dans un terrain plus complexe (SVF<1), l'effet ricochet entre en jeu (Dirksen *et al.*, 2019). En zone rurale dégagée par exemple, le SVF est au maximum, le refroidissement nocturne est donc

optimal (**Figure 17**). En ville, ce facteur est inférieur à 1 du fait des canyons urbains, le refroidissement est alors moins effectif.

Les chercheurs ont établi qu'une diminution du SVF entraîne une augmentation de l'absorption de chaleur et une diminution de la vitesse du vent, ce qui augmente par conséquent l'intensité de la chaleur urbaine (Grimmond, 2007). L'effet du SVF sur les températures nocturnes a montré des résultats cohérents, à savoir qu'une augmentation du SVF entraîne une diminution des températures. L'étude d'Unger (2004) a examiné la corrélation entre le SVF la moyenne annuelle du Δ_{Ta} à Szeged (Hongrie) sur la base de 35 mesures nocturnes. Une forte corrélation négative est établie avec des valeurs de $\Delta_{Ta\ moyen}$ atteignant 4,4 °C pour des valeurs de SVF allant de 0,66 à 1.

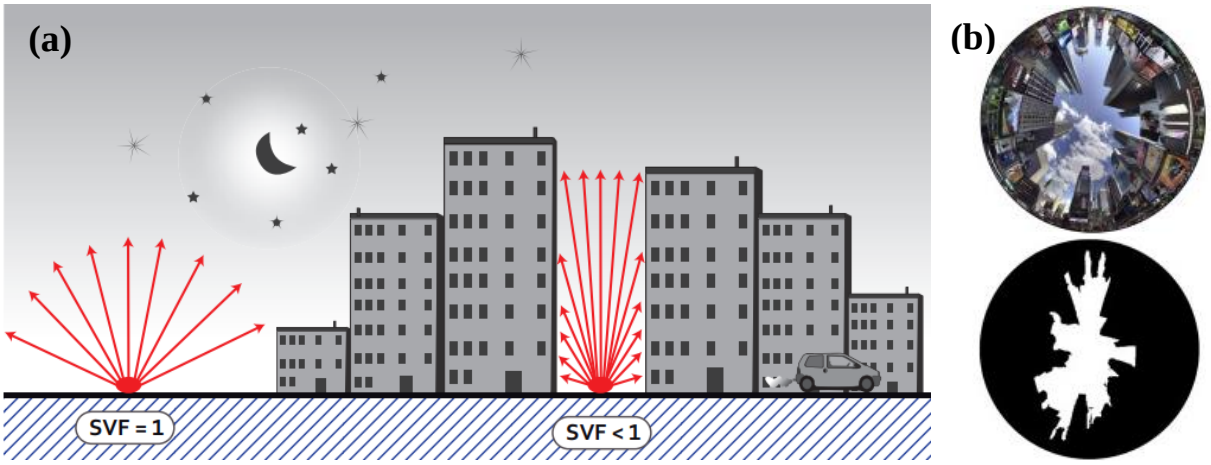


Figure 17 : (a) Illustration du facteur de vue du ciel (APUR, 2012), (b) Vue du ciel de Time Square (SVF=0,37) à New York (Etats-Unis) (Middel *et al.*, 2018).

Bien qu'un SVF plus faible implique logiquement des températures de l'air nocturnes plus élevées, les études sur la relation entre les températures de l'air diurnes et le SVF rapportent des résultats contradictoires (Unger, 2004 ; Park *et al.*, 2017). Ainsi, dans leur étude menée sur la ville de Constantine (Algérie), Bourbia et Boucheriba (2010) relèvent que « le facteur de vue du ciel a une forte influence sur la température de l'air entre 12h00 et 18h00 ». A l'inverse, dans l'étude de Santos *et al.* (2003) sur la ville de Belo Horizonte (Brésil), les auteurs relèvent une corrélation de 55,8 % à 5h00 du matin indiquant une perte de chaleur plus lente dans les sites les plus obstrués, qui devient « quasiment nulle » à 15h00.

Outre les différences de méthodologie touchant aussi bien aux méthodes d'acquisition des valeurs de SVF, qu'à la taille de la zone d'étude, au nombre d'échantillons ou aux périodes d'analyse temporelles et saisonnières, ces résultats divergents s'expliquent essentiellement par le fait qu'en journée, dans certains sites présentant des valeurs de SVF faibles, moins de rayonnement solaire atteint le sol, et l'augmentation des températures de surface et de l'air est plus lente (Yan *et al.*, 2022). Les îlots de fraîcheur urbains (IFU) observés dans certaines villes de climat tempéré sont d'ailleurs dus à ce phénomène (Hart et Sailor, 2009). La nuit en revanche, la chaleur a du mal à se dissiper, ce qui a tendance à amplifier l'ICU (Oke, 1987). Il semble donc que le piégeage radiatif induit par le canyon urbain participe effectivement à la formation de l'ICU, mais que, passée une certaine hauteur, l'effet d'ombrage l'emporte.

L’obstruction des rayonnements solaires par les parois de grande hauteur neutralise l’effet de canyon, particulièrement le matin et le soir lorsque le rayonnement est plus incliné. Par conséquent, à lui seul, le SVF ne suffit pas pour quantifier précisément l’influence de la géométrie urbaine sur les ICU. Il doit être combiné à d’autres paramètres et données morphométriques tels que le rapport d’aspect.

b) Le rapport d’aspect

Le second indicateur utilisé est le rapport d’aspect ou *Aspect Ratio* (AR) qui donne une information morphologique concernant la section du canyon urbain. Cet indicateur décrit la densité des bâtiments en rapportant leur hauteur à la largeur de la rue. Dans le cas d’un canyon symétrique, il se définit de la façon suivante :

$$AR = \frac{H}{L} \qquad (10)$$

avec,
H : hauteur des bâtiments de part et d’autre de la rue,
L : largeur de la rue.

Le rapport d'aspect influence le bilan d’énergie d'un canyon urbain puisque la quantité d’énergie échangée entre les surfaces et l'air ambiant dépend de la température de ces surfaces, qui est elle-même déterminée par son exposition ou non au soleil. Avec une plus grande surface d'exposition dans les canyons peu profonds ($AR \leq 1$), une température de surface plus élevée sera observée et une plus grande énergie radiante sera dissipée dans le canyon. Or, dans les canyons profonds ($AR \geq 2$), la température de surface sera significativement plus faible au fond du canyon en raison de l’augmentation de l’ombre portée (effet d’ombrage) fournie par les bâtiments englobants qui réduit l’irradiance solaire directe et donc l’énergie transmise à l’air par convection (**Figure 18**) (Morakinyo et Lam, 2016).

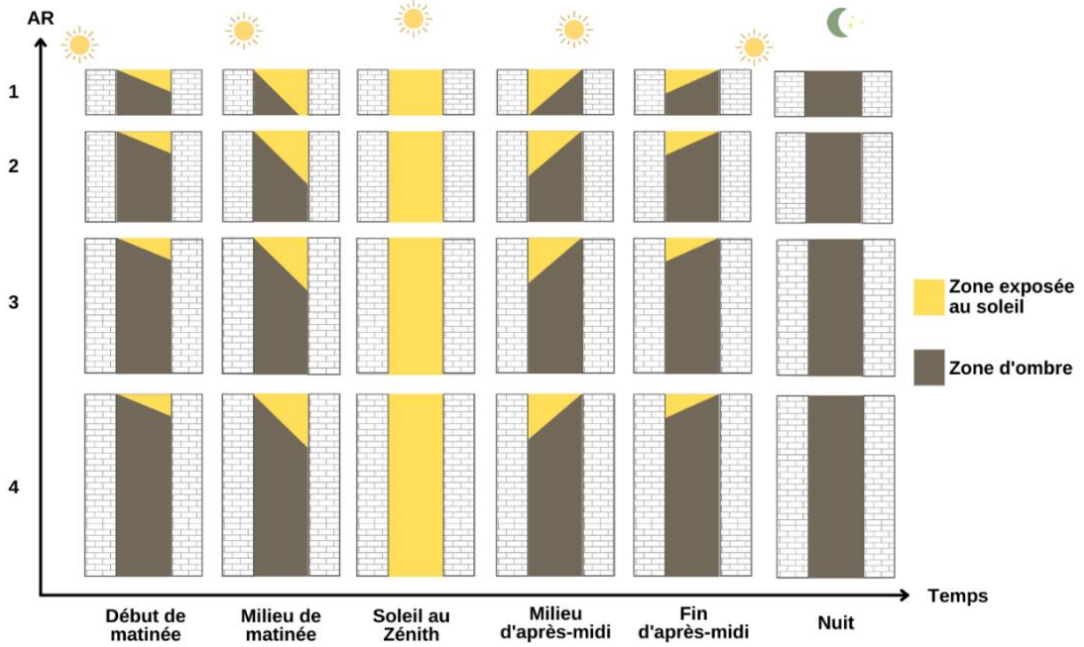


Figure 18 : Evolution de l’exposition aux rayonnements solaires dans un canyon urbain symétrique orienté nord-sud à différents moments de la journée en fonction du rapport d'aspect.

Dans son étude menée dans 31 villes d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Australie, Oke (1988) a constaté une corrélation entre l'intensité maximale de l'ICU et le rapport d'aspect H/L (**Figure 19**), ce qui implique qu'il est possible de réduire l'amplitude des ICU à l'aide de petits changements dans la géométrie du canyon urbain (Colombert, 2008). Cette corrélation s'exprime comme suit :

$$\Delta_{\mathrm{Tu-r(max)}} = 7{,}45 + 3{,}97 \ln(\frac{H}{L}) \quad (11)$$

avec,

$\Delta_{\mathrm{Tu-r(max)}}$: intensité maximale de l'ICU (°C).

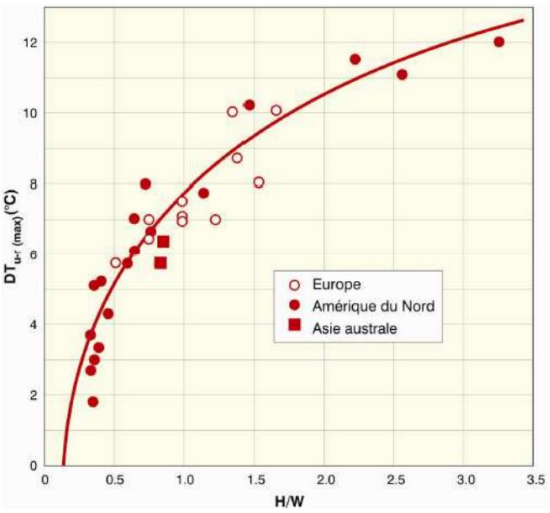


Figure 19 : Relation empirique entre l'AR dans le centre urbain et l'intensité maximale de l'ICU ($\Delta_{\mathrm{Tu-r(max)}}$) (Oke, 1988).

Par ailleurs, l'étude de Chow et Roth (2006) sur la dynamique de l'ICU à Singapour démontre que si la géométrie du canyon est un facteur important dans l'augmentation de l'absorption du rayonnement à ondes courtes, des valeurs trop élevées de rapport d'aspect vont paradoxalement réduire la quantité d'énergie stockée dans les canyons urbains. Ali-Toudert et Mayer (2006, 2007) montrent que la température de l'air dans le canyon diminue lentement avec l'augmentation du rapport d'aspect. L'ombrage dû aux grands immeubles est à l'origine de l'îlot de fraîcheur important observé pendant la majeure partie de la journée, ce qui explique les résultats contradictoires –évoqués dans la section précédente– rencontrés dans la littérature consacrée à l'effet des canyons urbains sur les températures de l'air. L'expérimentation RECLUS menée dans une rue de Strasbourg par Najjar *et al.* (2004) a montré que le rapport d'aspect exerce une influence substantielle sur les processus radiatifs en journée : plus les rues sont profondes et étroites (rapport H/W grand) moins il y a d'énergie radiative disponible (Kastendeuch, 2022). Néanmoins, il n'existe pas à notre connaissance d'étude ayant recherché à partir de quelle valeur d'AR l'effet d'ombrage commence à compenser l'échauffement induit par le piégeage radiatif dû au canyon.

1.3.4. La chaleur liée aux activités anthropiques

En plus des causes liées à la structure même de la ville et de son environnement, la formation des îlots de chaleur résulte aussi en partie de l'empreinte anthropique. Les activités humaines en milieu urbain peuvent en effet affecter le climat de la ville de deux manières : directement par l'émission de chaleur dite anthropique et indirectement par les rejets de polluants dans l'atmosphère.

1.3.4.1. Le flux de chaleur anthropique

Les dégagements de chaleur dite anthropique sont ceux ne dépendant pas d'un processus physique naturel, mais relevant des activités humaines. Les sources de chaleur anthropique sont très diverses : rejets liés aux activités industrielles, trafic routier, chauffage et climatisation, chaleur métabolique produite par les corps humains, etc. Ces rejets sont beaucoup plus importants en milieu urbain du fait de la concentration des activités humaines et des habitations et leur amplitude dépend de plusieurs facteurs tels que le nombre d'habitants, la zone climatique (une ville de climat froid rejettera plus de chaleur anthropique en raison du recours important au chauffage), mais aussi des caractéristiques des bâtiments et du type d'énergie utilisée (Ringenbach, 2004 ; Colombert, 2008). La quantification de ce flux de chaleur est complexe du fait de l'impossibilité de mesurer de façon directe la totalité des rejets anthropiques dans le milieu atmosphérique. Généralement, on considère que le flux de chaleur anthropique total (Q_F) constitue la somme des émissions de chaleur issues des bâtiments, des transports et du métabolisme humain. La majorité des modèles sont basés sur une simple addition de ces trois principales sources (Grimmond, 1992 ; Sailor et Lu, 2004 ; Pigeon, 2007).

La difficulté à les estimer découle également du fait que les rejets anthropiques connaissent d'importantes fluctuation selon des cycles journaliers, hebdomadaires et saisonniers (Sailor et Lu, 2004 ; Lee *et al.*, 2009). De manière générale, ils sont plus importants en période diurne, au moment où la plupart des activités se déroulent. Ils sont également plus élevés en période hivernale qu'en période estivale, du fait du recours accru au chauffage et aux dissipations thermiques des bâtiments. De surcroît, en hiver, la chaleur anthropique (essentiellement due à la consommation de chauffage et d'eau chaude) a une plus grande incidence sur la production de chaleur que les autres facteurs puisque le soleil ne fournit pas assez de chaleur (Erell *et al.*, 2010 ; Leconte, 2014). Le flux de chaleur anthropique tend cependant à augmenter en période estivale du fait de la généralisation de la climatisation (Leconte, 2014).

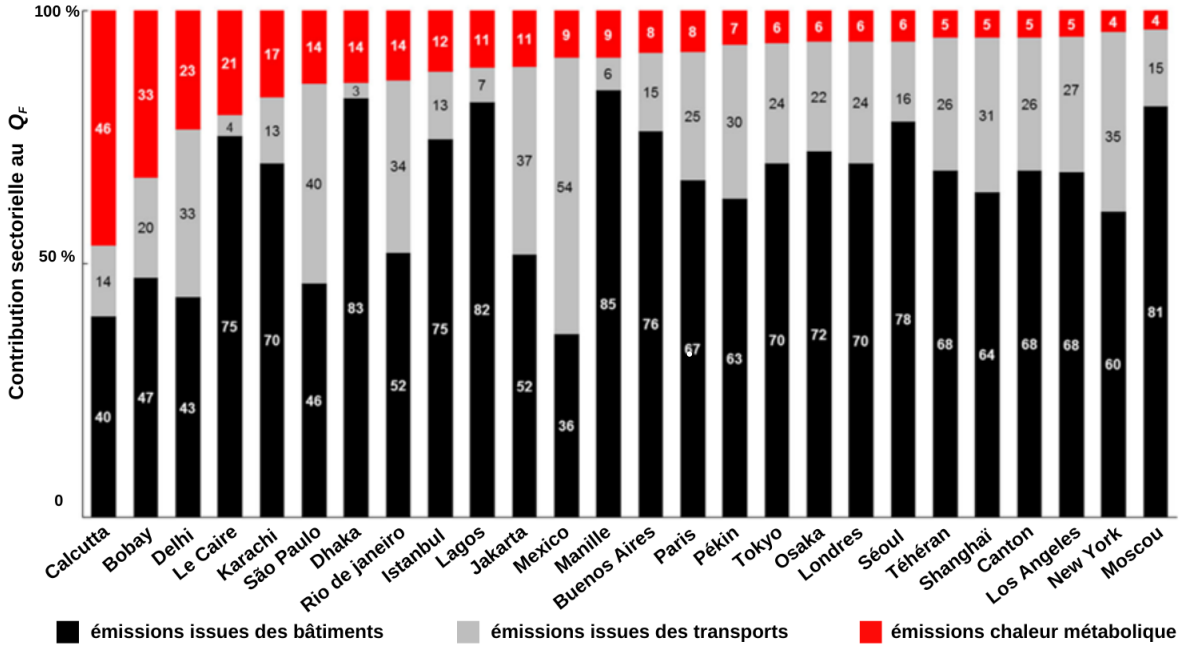


Figure 20 : Contributions sectorielles au dégagement de chaleur anthropique (Q_F) de certaines métropoles en 2011 (adapté de Stewart et Kennedy, 2017).

Cet apport en chaleur ne doit pas être négligé car s'il est estimé entre 5 et 8 % du flux de chaleur total dans la plupart des villes, il peut parfois atteindre des valeurs très élevées notamment en Afrique et dans le sous-continent indien (**Figure 20**) (Stewart et Kennedy, 2015). Les résultats des travaux menés dans différentes villes démontrent que la libération de chaleur anthropique dans l'environnement ambiant exacerbe l'ICU nocturne et augmente les demandes de refroidissement. Plusieurs études ont suggéré que la chaleur anthropique faisait augmenter la température de l'air près de la surface de 1 à 2 °C en été et de 2 à 3 °C en hiver dans des villes comme Tokyo (Japon) (Ichinose *et al.*, 1999), Philadelphie (États-Unis) (Fan et Sailor, 2005) et Yangtze (Chine) (Feng *et al.*, 2012). A Paris, on estime que la part de la chaleur anthropique dans la formation de l'ICU est de l'ordre de 20 % (Apur, 2012).

1.3.4.2. La pollution atmosphérique

Outre le fait d'émettre de la chaleur de manière directe dans l'atmosphère, les activités humaines ont aussi pour conséquence d'émettre des quantités plus ou moins importantes d'aérosols dans l'air, ce qui a pour effet de perturber le régime thermochimique de la CLU. La littérature qualifie ce phénomène d'« îlot de pollution urbain (IPU) » (Crutzen, 2004 ; Li *et al.*, 2018 ; Ulpiani, 2021). Effectivement, ICU et pollution de l'air ne sont pas des phénomènes indépendants l'un de l'autre : là où existent des îlots de chaleur urbains, il est fort probable de retrouver des IPU (Crutzen, 2004). L'étude de Cao *et al.* (2016) sur 39 villes chinoises, a montré que la pollution de l'air entraînait un réchauffement urbain atteignant 0,7 °K la nuit. Les variations spatiales nocturnes sont significativement corrélées au taux de pollution de l'air entre les zones urbaines et la campagne environnante, ce qui implique qu'une brume plus épaisse est précurseur d'un ICU plus intense. Mais cette corrélation disparaît en journée.

Cela s'explique par le fait que la pollution atmosphérique affecte les températures de manière différente le jour et la nuit avec des résultats opposés sur le bilan d'énergie près de la surface (He, 2018). L'effet de refroidissement est lié au blocage du rayonnement entrant à ondes courtes ($K_{\downarrow}$) : pendant la journée, les aérosols renvoient une fraction du rayonnement solaire vers l'espace et réduisent le taux de rayonnement atteignant la surface urbaine (dôme de pollution), ce qui abaisse les températures en ville (Jacobson, 1998 ; Ulpiani, 2021). Par exemple, Estournel *et al.* (1983) ont constaté que la ville de Toulouse recevait 3,5 % de rayonnement solaire de moins et jusqu'à 25 W/m² de rayonnement à ondes longues de plus que les zones rurales pendant les journées sans nuages. Dans le même sens, plusieurs études consacrées à Delhi (Inde), ont relevé la formation d'îlots de fraîcheur diurnes en conditions de vent faible et de ciel clair, contrastant avec un ICU nocturne intense ($\Delta Tu\text{-}r_{max}$ de 4 à 7 °C). Il en a été déduit que l'atténuation du rayonnement solaire entrant par la couche d'aérosols l'emportait sur l'absorption du rayonnement à ondes longues sortant pendant les heures de clarté. Les auteurs ont alors associé le refroidissement de surface à l'assombrissement solaire induit par le « nuage brun d'Asie[4] » sur le sous-continent indien (Ramanathan *et al.*, 2005 ; Singh *et al.*, 2005 ; Jin *et al.*, 2011 ; Pandey *et al.*, 2012). Ils ont également observé que durant les jours venteux ou

[4] Le nuage brun d'Asie est un immense nuage de pollution de 2 à 3 km d'épaisseur recouvre une grande partie de l'Asie entre décembre à avril. Il est constitué d'un amas de poussière, d'aérosols et de gaz polluants.

immédiatement après un épisode de pluie intense sur la ville, la différence ville/campagne en termes de rayonnement incident s'était largement atténuée, probablement en raison de l'effet nettoyant du vent et de la pluie. De nuit en revanche, les aérosols vont piéger plus de rayonnement infrarouge émis par la Terre ($L_{\uparrow}$) et réémettre davantage de rayonnement à ondes longues vers la surface urbaine ($L_{\downarrow}$) (Cao *et al.*, 2016). De plus, comme le dôme de pollution a tendance à stabiliser la couche d'air limite juste au-dessus de la ville, cela réduit l'efficacité de la dissipation d'énergie de la surface vers l'atmosphère (**Figure 21**, **Annexe 7**). L'influence de la pollution atmosphérique est donc multiple avec parfois des effets opposés sur le bilan radiatif (Colombert, 2008). Les ICU sont donc non seulement propices au développement d'un dôme de pollution au-dessus du paysage urbain, mais aussi à son auto-entretien en consolidant un schéma de rétroactions qui prolonge et aggrave les épisodes de pollution (Sarrat *et al.*, 2006).

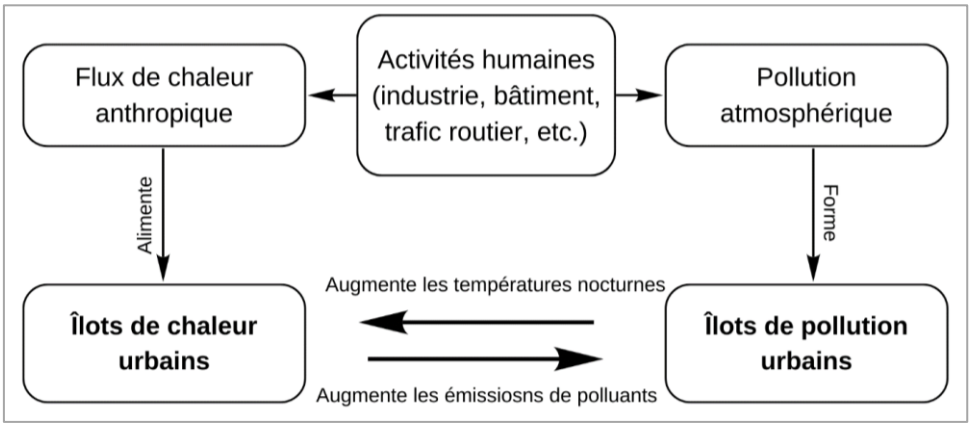


Figure 21 : Effets des activités humaines sur le milieu urbain.

1.4. Les facteurs de variabilité

Les facteurs influençant la fréquence d'apparition de l'ICU et son intensité sont principalement liés aux conditions météorologiques. Les types de temps jouent en effet, un rôle prépondérant (Foissard *et al.*, 2011). Pour plus de clarté, nous nous limiterons ici à examiner l'influence des principaux facteurs de variabilité identifiés dans la littérature, à savoir la couverture nuageuse, les précipitations, le vent et la brise marine.

1.4.1. Influence de la couverture nuageuse et des précipitations

1.4.1.1. Influence de la fraction nuageuse

La couverture nuageuse affecte considérablement autant les températures de surfaces que celles de l'air (Landsberg, 1981 ; Ackerman, 1985 ; Arnfield, 2003). En général, une augmentation de la nébulosité a pour effet direct d'atténuer l'ICU et inversement (He, 2018). Cependant, les effets de la nébulosité ne sont pas linéaires : dans leurs travaux sur l'aire urbaine de Londres (Royaume-Uni), Kolokotroni et Giridharan, (2008) ont analysé la relation entre la fraction de couverture nuageuse avec l'intensité de l'ICU, lorsque la vitesse du vent était inférieure à 5 m/s selon trois classes : « ciel clair » (nébulosité inférieur à 30 %), « partiellement nuageux » (nébulosité de 30 à 70 %) et « nuageux » (nébulosité >70 %). Ils ont constaté que

l'ICU nocturne atteignait sa moyenne maximale dans des conditions de ciel clair. En revanche, ils n'ont constaté que peu de variation d'intensité entre les conditions « ciel clair » et « partiellement nuageux » (**Figure 22**). Cela suggère qu'une couverture nuageuse partielle n'aura pas d'effet perceptible sur l'intensité de l'ICU nocturne. Celui-ci n'est atténué que si la nébulosité atteint un certain niveau de couverture.

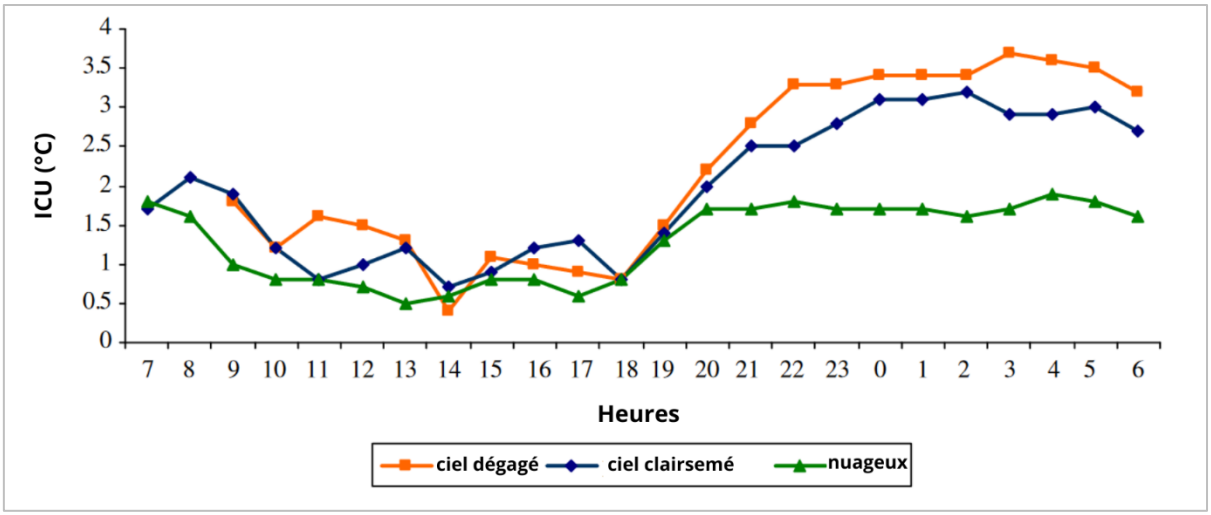


Figure 22 : Amplitude de l'ICU moyen horaire selon la fraction de la couverture nuageuse avec une vitesse de vent inférieure à 5m/s à Londres (adapté de Kolokotroni et Giridharan, 2008).

Oke *et al.* (2017) explique que la couverture nuageuse a tendance à absorber et à réfléchir dans l'atmosphère une part importante du rayonnement à ondes courtes et à ondes longues provenant de l'atmosphère, tout en absorbant la plupart des rayonnements à ondes longues provenant de la surface urbaine, ce qui entraîne une réduction de la chaleur globale à la surface du sol. Cela explique pourquoi la couverture nuageuse ne peut réduire efficacement l'intensité de l'ICU qu'après avoir atteint un certain niveau. De plus, l'étude de Yow (2007) suggère que l'amplitude de l'ICU est également sensible à la hauteur de la couverture nuageuse puisqu'une hauteur de nuages élevée n'a eu que peu d'effets sur l'intensité de l'ICU nocturne. Cela montre que la fraction de couverture nuageuse, tout comme le type de nuage sont tous deux des variables influençant l'amplitude de l'ICU. De manière grossière, pour des nuages de type *stratus* (altitude basse donc base relativement chaude), l'évacuation de la chaleur par rayonnement infrarouge est réduite d'environ 90 %, l'intensité de l'ICU sera donc fortement réduite. De même, pour des nuages de type *altus* (altitude moyenne), le puits d'énergie est réduit d'environ 75 %. Enfin, pour les nuages de type *cirrus* (nuages de haute altitude composés de cristaux de glace), même avec une fraction de couverture importante, le rayonnement infrarouge n'est réduit que d'environ 25 % (Oke *et al.*, 2017).

L'effet de la nébulosité sur l'intensité de l'ICU doit toutefois être nuancé. D'une part, en raison de la surchauffe urbaine, les conditions de formation des nuages sont altérées, entraînant une réduction de la couverture nuageuse (He, 2018). De plus, et de manière contre-intuitive, il a été constaté que dans des conditions de chaleur nocturne intense, la nébulosité peut paradoxalement stimuler la surchauffe urbaine en piégeant le rayonnement à ondes longues émis par la Terre ($L_{\uparrow}$) à l'intérieur de la CLA et réémettre davantage de rayonnement à ondes

longues vers la surface urbaine ($L\downarrow$) de manière analogue au dôme de pollution (***cf.* 1.3.4.2**) (Zhao *et al.*, 2014a ; He, 2018). Les nuages auront tendance à stabiliser la couche d'air limite juste au-dessus de la ville par effet de serre, réduisant ainsi l'efficacité de la dissipation d'énergie de la surface vers l'atmosphère.

1.4.1.2. Influence des pluies

De l'effet atténuateur de la nébulosité sur l'ICU, on s'attendrait logiquement à ce que les précipitations soient considérées comme l'un des principaux facteurs de contrôle des effets de l'ICU (Arifwidodo et Tanaka, 2015). Cependant, la plupart des études explorant la relation ICU/précipitations s'intéressent plutôt à l'inverse, c'est-à-dire aux effets de la surchauffe urbaine sur la fréquence et l'intensité des précipitations (Yang *et al.*, 2019b). Certaines études indiquant que la rugosité urbaine pourrait entraîner une grande convection des circulations à méso-échelles engendrant des précipitations anormales en zone urbaine (par exemple : Bornstein et Lin, 2000 ; Guo *et al.*, 2006).

L'effet de la pluie s'explique par le fait que les épisodes pluvieux en milieu urbain sont généralement suivis d'un taux élevé d'humidité dans l'air dû à l'évaporation des eaux en surface. L'étude de Zhou *et al.* (2004) relève par exemple, que l'intensité de l'ICU augmente de 1,1 K si les précipitations diminuent de 500 mm. Or, comme expliqué précédemment (***cf.* 1.3.1.1**), le processus d'évaporation induit un effet rafraîchissant considérable du fait de l'absorption d'une partie de la chaleur sensible en zone urbaine (Jauregui, 1997). Cependant, dans certains cas, les précipitations peuvent avoir des effets contrastés sur la surchauffe urbaine. L'enquête de Zhao *et al.* (2014) sur la relation entre les précipitations et l'intensité de l'ICU dans 65 villes d'Amérique du Nord a montré que dans certaines villes, l'ICU pouvait se maintenir sur des intensités élevées en dépit de précipitations annuelles importantes. Il semble qu'à mesure que la quantité de précipitations augmente, l'intensité de l'ICU suit une tendance croissante. Cela est principalement dû à la minéralisation importante des zones urbaines étudiées qui fait que les eaux de pluie sont trop rapidement évacuées vers les cours d'eau, sans avoir le temps de s'évaporer et de dissiper la chaleur sensible (He, 2018).

1.4.2. Influence du vent et de la brise côtière

1.4.2.1. Le vent synoptique

L'effet atténuateur du vent sur les îlots de chaleur est très documenté. Il est généralement reconnu que le vent peut largement atténuer l'intensité de l'ICU à travers deux mécanismes : par advection tout d'abord, car lorsque le vent souffle, l'air en ville se renouvelle constamment et le temps de contact avec les surfaces se réduit (Kastendeuch *et al.*, 2010). Par mélange turbulent, ensuite, puisque le vent frais arrivant de l'extérieur de la zone urbaine va se mélanger à l'air chaud ambiant, ce qui a pour effet de dissiper les chaleurs urbaines et entraîner une réduction de la température moyenne.

Les études relèvent que cet effet atténuateur dépend essentiellement de deux variables à savoir la vitesse du vent et la taille de la zone urbaine. Sur la base de ses mesures dans cinq villes de Corée du Sud, Park (1986) a analysé les relations entre la vitesse du vent et l'intensité de l'ICU de saison chaude, il a constaté que l'ICU d'une ville pouvait être complètement inhibé lorsque la vitesse du vent atteignait une valeur seuil. Cette valeur varie en fonction de la population urbaine : plus la population est importante, plus le seuil de vitesse du vent sera élevé et plus la population urbaine est petite, plus le seuil de vitesse du vent sera bas. Par exemple, ce n'est que lorsque le vent atteint 12 m/s que l'ICU de Londres (population de 8,5 millions d'habitants) disparait, tandis qu'un vent de 3 à 5 m/s pourrait éliminer les effets de l'ICU à Palo Alto (Etats-Unis). Le tableau 2 présente les seuils de vitesse du vent propres à éliminer complètement l'ICU nocturne tels que mesurés dans la littérature.

Tableau 2 : Seuils de vitesse du vent propre à éliminer l'ICU pour des villes de différentes tailles (He, 2018).

Ville	Population (10^3)	Seuil de vitesse du vent (m/s)
Londres (Royaume-Uni)	8500	12
Séoul (Corée du Sud)	8400	11,1
Montréal (Canada)	2000	11
Brême (Allemagne)	400	8
Seongnam (Corée du Sud)	380	6.9
Hamilton (Canada)	300	6–8
Gwangmyeong (Corée du Sud)	150	4,6
Uijeongbu (Corée du Sud)	130	4,2
Reading (Royaume-Uni)	120	4–7
Shindo (Corée du Sud)	60	3,9
Kimagaya (Japon)	50	5
Palo Alto (États-Unis)	33	3–5

Il convient également de prendre en compte l'origine du vent car si le vent provient d'une zone chaude telle que le désert (Sirocco, Harmattan, Levêche, Chergui, Simoun, etc.) l'effet sur les températures urbaines ne sera pas le même que pour un vent provenant de l'océan.

1.4.2.2. L'effet de brise côtière

Comme vu précédemment, la température de l'air est directement influencée par les températures de surface, l'air au contact d'une surface chaude se réchauffe par conduction et convection et s'élève dans l'atmosphère. Or, lorsque deux surfaces contiguës connaissent un contraste thermique marqué, un gradient de pression se met en place générant un phénomène de brise, car l'air chaud se mettra à s'élever dans l'atmosphère, pour être aussitôt remplacé par de l'air frais. En situation côtière, la terre ferme se réchauffe en journée plus vite que la mer sous l'action du rayonnement solaire, ce qui aura une influence sur l'air sus-jacent. La différence de température des deux volumes d'air voisins générera un gradient de pression et donc une circulation atmosphérique locale dans les basses couches de l'atmosphère. L'air chaud qui s'est élevé depuis la terre ferme est aussitôt remplacé par de l'air plus froid chargé d'humidité venu de la mer. Cet air froid et humide se réchauffe à son tour et s'élève (Oke *et al.*, 2017). Au cours

de son ascension, il va se refroidir et se condenser sous la forme d'un *cumulus*, donnant ainsi naissance au phénomène de brise côtière (**Figure 23**). On parlera plus souvent de « brise de mer », car en journée, le déplacement se fait dans le sens mer-continent. La nuit, le phénomène s'inverse : le refroidissement différentiel des deux surfaces donne lieu à un gradient de température inversé. L'inertie thermique de l'eau fait que la masse hydrique atteint sa température maximale en soirée et devient plus chaude que le continent, ce qui donne lieu à un phénomène opposé à celui constaté en journée avec un flux terre-mer (brise de terre).

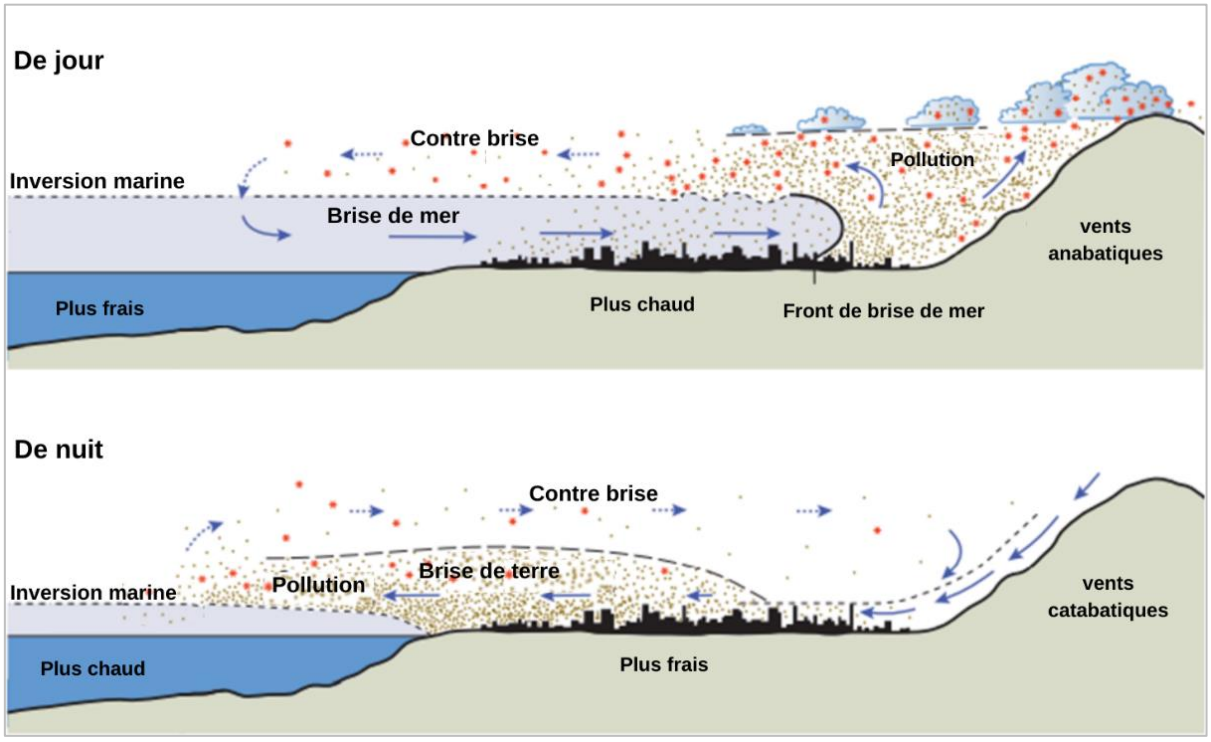


Figure 23 : Schéma de circulation de la brise côtière (adapté de Oke *et al.*, 2017).

La brise de mer est donc causée par le réchauffement différentiel entre les surfaces terrestres et aquatiques, et consiste en une circulation complexe constituée de plusieurs phénomènes de différentes échelles, allant de la méso-échelle à l'échelle micro, imbriqués les uns dans les autres. C'est la raison pour laquelle elle est souvent qualifiée de "système" de brise de mer (SBM) (Puygrenier, 2005). Les études ont montré, en s'appuyant sur des simulations numériques et les modèles CFD[5], que la brise de mer influence largement le développement de l'ICU : plus la zone urbaine est petite et proche de la côte, plus l'ICU aura du mal à se développer avant la formation du SBM (Dandou *et al.*, 2009 ; Shen *et al.*, 2019 ; Peng *et al.*, 2022). Par ailleurs, les caractéristiques de la brise littorale varient dans chaque zone en raison du profil littoral de la saisonnalité et du gradient thermique terre-océan (Crosman et Horel, 2010). En particulier, le relief côtier joue un rôle important, car il va contribuer à perturber et à modifier l'écoulement du vent. En fonction de la forme du relief et de la direction générale du vent (hors effet de côte), on obtient différents cas de figures. De manière générale, les brises littorales sont plus fréquentes dans les zones où dominent les situations anticycloniques et une topographie basse permettant leur incursion dans le continent (Dahech, 2014).

[5] Le CFD désigne la mécanique des fluides numérique (*Computational Fluid Dynamics*).

Synthèse

Cette synthèse de la littérature scientifique montre que la connaissance de la surchauffe urbaine et des îlots de la chaleur en particulier, à travers leurs formes, leurs causes, leurs facteurs de contrôle est en progression constante. L'ICU présente des formes multiples en fonction de l'échelle d'analyse et selon que l'on s'intéresse aux températures de surface ou aux températures de l'air, avec chacune une variabilité propre et des méthodes d'observations différentes.

Les processus moteurs à l'origine des îlots de chaleur dans les zones urbaines peuvent être résumés en quatre catégories (Oke, 2006 ; Zhou *et al.*, 2011) : (1) la structure urbaine, y compris les dimensions et l'espacement des bâtiments et des rues ; (2) la composition et la configuration de la couverture terrestre urbaine ; (3) les types de revêtements utilisés et la fraction de végétation ; (4) le métabolisme urbain (flux de chaleur, d'eau et de polluants dû aux activités humaines) (**Figure 24**). Leurs formes et leur intensité sont sujettes à d'importantes variations sous l'effet des conditions météorologiques et de certains phénomènes tels que la brise littorale.

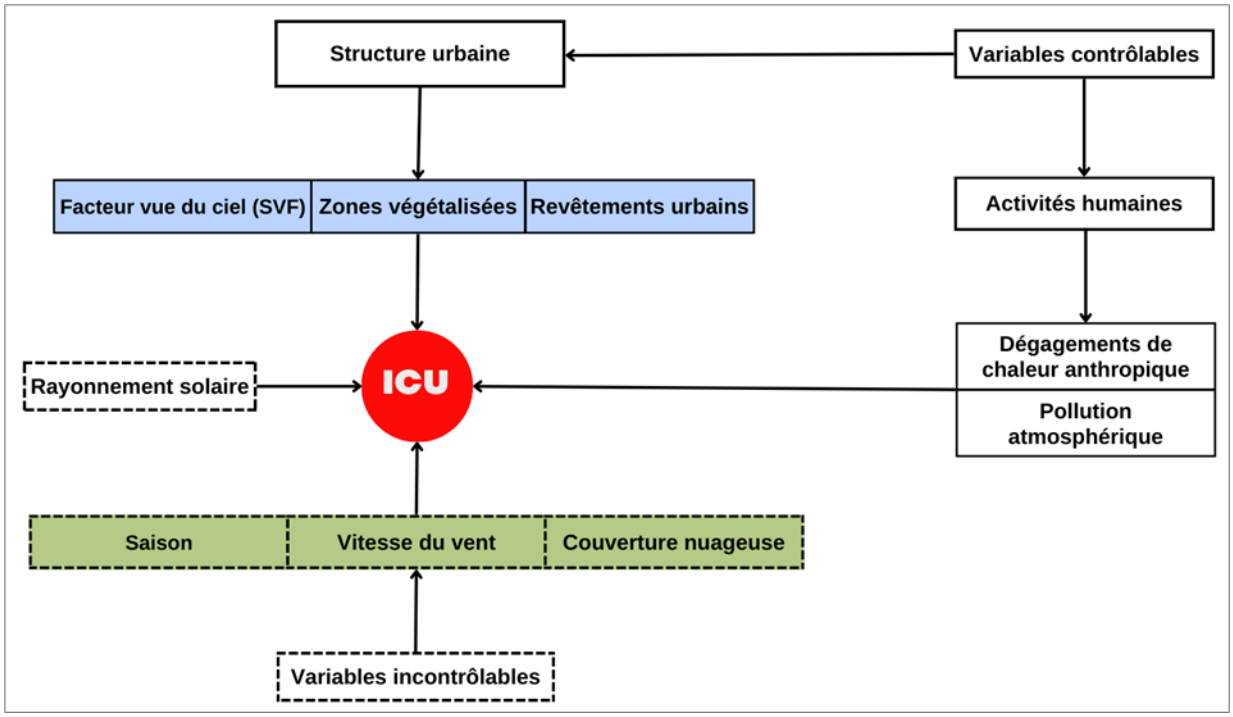


Figure 24 : Principales causes du phénomène de l'ICU (adapté de Busato *et al.*, 2014).

Néanmoins, une étude de la surchauffe urbaine ne serait pas complète sans s'intéresser aux enjeux que ce phénomène soulève en termes de vulnérabilité et d'impact sanitaires liés au stress thermique ressenti par les populations vivant en ville.

Chapitre 2 : Vulnérabilités humaines face à la chaleur intense

Les êtres humains semblent avoir toujours été conscients de leur vulnérabilité face aux fortes chaleurs. Cette préoccupation a été documentée dès les plus anciens écrits tels que le Livre des Rois qui fait partie de la Bible hébraïque : le narrateur y rapporte qu'un enfant, fils d'une riche famille sunamite, alors qu'il était sorti rejoindre son père dans les champs pendant la saison des moissons cria : « Ma tête ! ma tête ! » avant de mourir peu après[6]. En l'an 24 av. J.-C., une expédition militaire romaine dirigée en Arabie par Aelius Gallus fut complètement anéantie par ce qui ressemble à un coup de chaleur, décrit comme suit : « Cette maladie ne ressemble à aucune autre, elle s'attaque à la tête qu'elle dessèche complètement et tue sur-le-champ la plupart de ceux qui ont été atteints » (Michel, 2007). Néanmoins, cette menace n'affecte pas tout le monde de la même manière. Le fait que certains individus résistent mieux que d'autres aux aléas et aux risques environnementaux est reconnu depuis des siècles, mais est resté largement inexpliqué. Ce n'est que récemment que les interactions entre les individus et leurs milieux de vie ont été prises en considération, menant à des approches systémiques fructueuses. La vulnérabilité a alors émergé pour devenir aujourd'hui un concept central de l'analyse des risques, particulièrement en milieu urbain (Quenault, 2015).

Cependant, la vulnérabilité est un concept complexe qui transcende le clivage traditionnel entre la géographie humaine et la géographie physique. Toute tentative d'explication se heurte rapidement à la multitude d'approches et de définitions proposées par la littérature scientifique. En effet, après quarante ans d'analyses et de discussions, la recherche sur ce sujet s'est enrichie d'une pluralité parfois déconcertante de notions et de concepts qui s'entrecroisent : vulnérabilité, sensibilité, fragilité, risque, aléa, exposition, enjeu, perception, résilience, capacité d'adaptation, capacité à faire face, etc. (Books, 2003). Ces termes polysémiques renvoient généralement à des notions imbriquées dont les délimitations ne sont pas toujours claires, un même terme pouvant revêtir différentes significations selon le contexte et les auteurs. Les chercheurs spécialisés dans les risques naturels ont tendance à se concentrer sur le concept de risque, tandis que ceux issus des sciences sociales et du domaine du changement climatique préfèrent souvent parler en termes de vulnérabilité (Allen, 2003 ; Downing *et al.*, 2005).

Afin d'éviter les confusions engendrées par la diversité des conceptualisations de la vulnérabilité et la profusion terminologique qui l'accompagne, il est essentiel de proposer un cadre théorique permettant de comprendre et de mettre en œuvre la notion de vulnérabilité dans ses différentes dimensions (Füssel, 2007). C'est la première étape que nous proposons dans la première partie de ce chapitre. Le reste du chapitre examine ensuite les méthodes permettant de mesurer et de spatialiser la vulnérabilité à l'échelle d'un territoire, et la mise en place des plans de vigilance-canicule.

[6] 2 Rois, chapitre 4, versets 17 à 20.

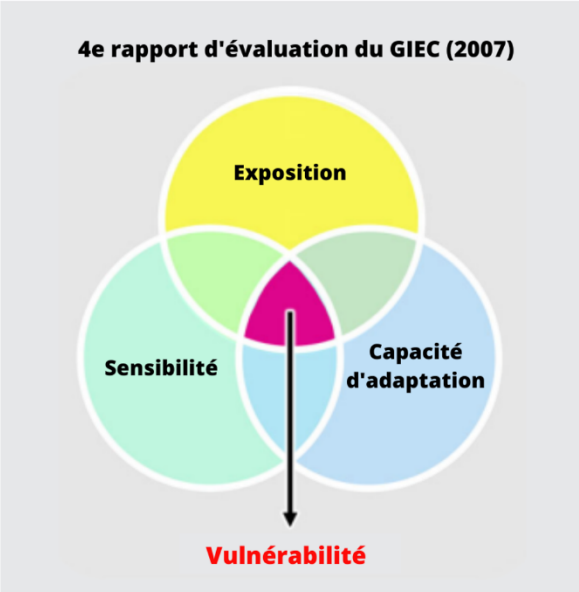
2.1. La notion de vulnérabilité aux risque liés à la chaleur 44
2.1.1. Le récent changement de paradigme sur la notion de vulnérabilité 44
2.1.2. L'exposition à l'aléa comme premier facteur de vulnérabilité 47
2.1.3. La sensibilité, aspect passif de la vulnérabilité 51
2.1.4. La résilience, dimension active de la vulnérabilité 54
2.2. Les méthodes de mesure 58
2.2.1. Les méthodes participatives 58
2.2.2. Les indices d'évaluation spatialisés 59
2.3. La veille sanitaire face aux vagues de chaleur 61
2.3.1. Les systèmes d'alerte canicule-santé dans le monde 61
2.3.2. Le plan d'alerte-canicule français 63
Synthèse 66

2.1. La notion de vulnérabilité aux risque liés à la chaleur

2.1.1. Le récent changement de paradigme sur la notion de vulnérabilité

Comme évoqué en introduction, la plus grande occurrence des épisodes de chaleur extrême pourrait se traduire par des impacts sanitaires plus importants, particulièrement en contexte urbain (Valois *et al.*, 2018). La chaleur est en effet l'une des principales causes de mortalité liée aux conditions météorologiques dans les milieux urbains puisque les fortes chaleurs touchent l'ensemble de la population, y compris les personnes en bonne santé notamment dans leurs activités quotidiennes et productives. Toutefois, ce sont surtout les populations les plus fragiles qui sont affectées : on parle alors de personnes vulnérables (Cutler *et al.*, 2018). Cette notion renvoie dans son sens commun, au degré de fragilité de certaines populations en fonction de la sensibilité individuelle des personnes (âge, sexe, état de santé, grossesse, etc.) et de leur exposition à l'aléa (type d'habitat, environnement immédiat, profession, lieu de travail, etc.). Les travaux de recherche portant sur ce sujet se penchent généralement sur les processus contribuant à la vulnérabilité, et visent à développer des stratégies d'adaptation et de résilience afin de renforcer la capacité des populations à faire face aux aléas. À cette fin, la définition la plus couramment utilisée est celle proposée par le GIEC, dont les différents rapports synthétisent l'état des connaissances sur le changement climatique et ses impacts. Ces rapports exercent non seulement une influence considérable sur la recherche mondiale liée au climat, mais également sur l'élaboration de normes internationales (par exemple, les normes ISO 14090 et suivantes) (Estoque *et al.*, 2023).

Plus précisément, dans ses troisième (IPCC, 2001 ou AR3) et quatrième (IPCC, 2007 ou AR4) rapports d'évaluation, le GIEC définit la vulnérabilité comme la « mesure dans laquelle un système est sensible – ou incapable de faire face – aux effets défavorables des changements climatiques, y compris la variabilité du climat et les phénomènes extrêmes ». Cette représentation, largement reprise dans la littérature, considère que la vulnérabilité représente la propension à être affecté négativement et serait fonction de la nature, de l'ampleur et de la vitesse d'évolution de l'aléa auquel le système est exposé, ainsi que de la sensibilité de ce système et de sa capacité d'adaptation (IPCC, 2007a). En revanche, dans son cinquième rapport d'évaluation publié en 2014 (AR5), le GIEC fait évoluer sa conception de la vulnérabilité pour adopter une approche centrée sur le risque, appréhendé comme le produit de l'aléa, de l'exposition et de la vulnérabilité (IPCC, 2014). Alors que dans le rapport de 2007, la vulnérabilité était envisagée comme une fonction de propriétés intrinsèques, à savoir la sensibilité et la capacité d'adaptation, ainsi que de l'ampleur et du taux de changement climatique auxquels le système est exposé, dans le rapport de 2014, la vulnérabilité est dissociée de l'aléa et de l'exposition (**Figure 25**).

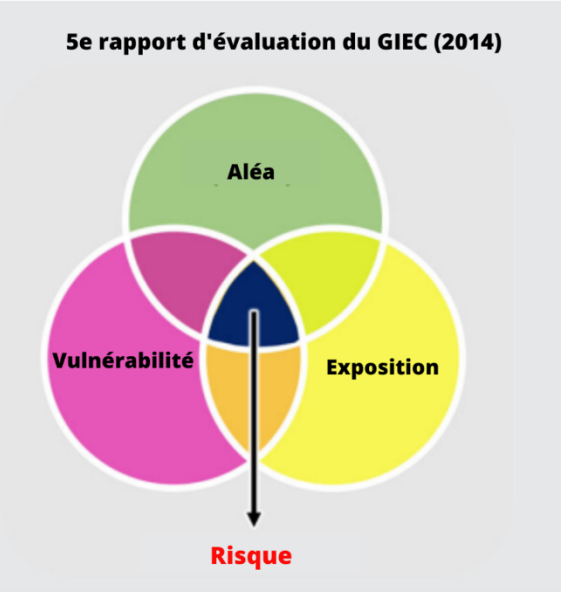


Vulnérabilité (2007, p.89) : « Mesure dans laquelle un système est sensible – ou incapable de faire face – aux effets défavorables des changements climatiques, y compris la variabilité du climat et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité est fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme de l'évolution et de la variation du climat à laquelle le système considéré est **exposé**, de la **sensibilité** de ce système et de sa **capacité d'adaptation**. »

Exposition (2001, p.181) : « Nature et degré d'exposition d'un système à des variations climatiques significatives. »

Sensibilité (2007, p.87) : « Degré auquel un système est influencé, positivement ou négativement, par la variabilité du climat ou les changements climatiques. Les effets peuvent être directs (par exemple la modification des rendements agricoles due à un changement de la valeur moyenne, de l'amplitude ou de la variabilité de la température) ou indirects (par exemple les dommages causés par une augmentation de fréquence des inondations côtières en raison d'une élévation du niveau de la mer). »

Capacité d'adaptation (2007, p.77) : « Ensemble des capacités, des ressources et des institutions d'un pays ou d'une région lui permettant de mettre en œuvre des mesures d'adaptation efficaces. »



Risque (2014, p.141) : « Conséquences éventuelles et incertaines d'un événement sur quelque chose ayant une valeur. Le risque est souvent représenté comme la probabilité d'occurrence de tendances ou d'événements dangereux que viennent amplifier les conséquences de tels phénomènes ou tendances lorsqu'ils se produisent. »

Vulnérabilité (2014, p.144) : « Propension ou prédisposition à subir des dommages. La vulnérabilité englobe divers concepts ou éléments, notamment les notions de **sensibilité** ou de fragilité et l'**incapacité de faire face et de s'adapter**. »

Exposition (2014, p.136) : « Présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, ressources ou services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu ou dans un contexte susceptible de subir des dommages. »

Danger (hazard) (2014, p.134) : « Éventualité d'un phénomène ou d'une tendance physique, naturel ou anthropique, ou d'une incidence physique susceptible d'entraîner des pertes en vies humaines, des blessures ou autres effets sur la santé, ainsi que des dégâts et des pertes touchant les biens, les infrastructures, les moyens de subsistance, la fourniture des services, les

Figure 25 : Les cadres d'évaluation des impacts liés au changement climatique du GIEC. A gauche le cadre d'évaluation de la vulnérabilité dans les troisième (2001) et quatrième (2007) rapports, et à droite le cadre du risque dans le cinquième rapport (2014) (adapté de Estoque *et al.*, 2023).

Ce changement de paradigme pour l'analyse des impacts du changement climatique et des voies d'adaptation a des implications pour l'évaluation de la vulnérabilité. Si dans le cadre de l'AR4, des indicateurs pour les trois éléments constituant la vulnérabilité étaient sélectionnés pour l'évaluer, après le rapport de 2014, cette dernière n'est désormais plus évaluée que sur la base d'indicateurs de sensibilité et de la capacité d'adaptation. La vulnérabilité est alors considérée comme une propriété interne du système-risque, composée de la sensibilité et de sa capacité d'adaptation (Sharma et Ravindranath, 2019). Les experts expliquent que cette évolution vers une approche axée sur le risque vise à promouvoir l'intégration des deux domaines de recherche souvent dissociés, à savoir l'adaptation au changement climatique (ACC) et la réduction des risques de catastrophe (RRC). Il s'agit d'encourager la communauté scientifique à intensifier ses efforts pour déterminer les probabilités de conséquences préjudiciables dans le cadre de l'évaluation des risques (Rivera, 2014). Par conséquent, le concept de risque tel qu'issu du rapport de 2014 introduit non seulement de nouveaux termes et de nouvelles définitions pour d'anciens termes, mais il repose également sur une philosophie sous-jacente différente (**Figure 26**).

	Exemple	AR 4	AR 5
Signal climatique externe	Manque de précipitations	Exposition	Danger (signal climatique)
Impact physique direct	Sècheresse	Impact potentiel	Danger (impact physique direct)
Caractéristiques internes : sensibilité	Type de culture	Sensibilité	Vulnérabilité (sensibilité)
Caractéristiques internes : capacité	Connaissance de la gestion de l'eau	Capacité d'adaptation	Vulnérabilité (capacité)
Présence et pertinence des éléments exposés	Pertinence des petites exploitations agricoles dans la région	Implicitement comprise dans la sensibilité	Exposition
Résultat final	Pénurie en eau pour les petites exploitations agricoles	Vulnérabilité	Risque

Figure 26 : Comparaison de la signification des termes clés entre l'AR4 et l'AR5 (GIZ et EURAC, 2017).

Cependant, il semble que l'acception révisée de la vulnérabilité telle qu'issue du rapport de 2014 n'a reçu que peu d'attention dans la recherche traitant de la vulnérabilité liée au climat (Foden *et al.*, 2019). La revue de la littérature conduite par Estoque *et al.* (2023) montre qu'une grande partie des études au niveau international utilise la définition de la vulnérabilité issue de l'AR4 qui demeure prédominante. Aussi, afin de faciliter la comparabilité de nos résultats avec les études précédentes, nous choisissons d'adopter la définition de la vulnérabilité formulée par l'AR4. Nous considérons donc que la vulnérabilité d'un objet est fonction de trois composantes interactives : le degré d'exposition à un aléa, la sensibilité de cet objet et sa capacité d'adaptation (**Figure 27**). Chaque composante s'appréhende à l'aide d'un ensemble d'indicateurs dynamiques et spatialement variables, qui sont à leur tour influencés par des facteurs externes tels que les conditions climatiques, les contraintes socio-économiques et environnementales et les trajectoires d'urbanisation.

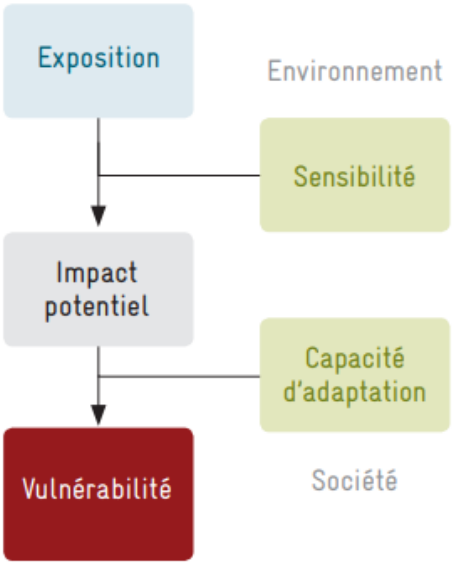


Figure 27 : Composantes de la vulnérabilité au changement climatique dans l'AR4 (GIZ et EURAC, 2017).

2.1.2. L'exposition à l'aléa comme premier facteur de vulnérabilité

Pour être vulnérable à un aléa, il faut avant tout y être exposé. Le degré d'exposition à l'aléa est ainsi un paramètre essentiel pour comprendre comment les caractéristiques géographiques d'un lieu ou d'une population peuvent influencer sa vulnérabilité aux risques et leur capacité d'adaptation. Schématiquement, l'exposition représente la quantité de risque qui ne peut pas être évitée, c'est-à-dire, la nature et le degré du stress subi, sa magnitude, sa fréquence, sa durée et sa superficie (Adger, 2006). Elle est caractérisée lorsque des communautés humaines sont installées dans une zone affectée par un aléa potentiel. En l'absence de personnes ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu susceptible de subir des dommages, c'est-à-dire sans exposition, il n'y a tout simplement pas d'impact possible sur les sociétés, et donc *a priori* aucun risque climatique (IPCC, 2012). Dans le cas des risques environnementaux, cette notion fait référence à la mesure dans laquelle une zone ou une population est directement confrontée à l'aléa, et dépendra alors du caractère, de l'ampleur et du rythme de variation des conditions climatiques. En effet, une variation de certains paramètres tels que la température, l'intensité et la durée des précipitations, le vent ou le bilan hydrique peut exercer un stress important sur les personnes et les territoires. L'échelle temporelle est également un paramètre important : l'exposition peut être plus ou moins forte à certains moments plutôt qu'à d'autres. Un cyclone tropical provoquera par exemple des conséquences très différentes selon qu'il touche une côte inhabitée ou un littoral urbanisé, qui plus est durant une saison touristique (Van Gameren *et al.*, 2014). Une évaluation permettra alors de déterminer les zones et les groupes de population les plus exposés, ce qui permet d'orienter les politiques d'aménagement du territoire, la gestion des risques et les mesures d'adaptation appropriées.

En particulier, l'exposition au stress thermique a tendance à s'accroitre en raison de l'augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des épisodes de chaleur intense à l'échelle mondiale. Il a été estimé qu'entre 2000 et 2016, le nombre de personnes exposées aux vagues de chaleur a augmenté d'environ 125 millions. Rien qu'en 2015, 175 millions de personnes supplémentaires ont été exposés aux vagues de chaleur par rapport aux années moyennes[7]. Cette exposition peut se produire à la fois au niveau des bâtiments, dans l'environnement extérieur et à l'échelle des villes. Par exemple, certains emplois, comme ceux exercés à l'extérieur ou dans des environnements chauds, comme ceux du bâtiment ou du secteur agricole, peuvent exposer les travailleurs à des conditions thermiques intenses et augmenter leur sensibilité (Kjellstrom *et al.*, 2014). Outre les menaces sanitaires liées à la chaleur, le stress thermique induit par les températures élevées affecte également les activités socio-économiques et la productivité. Enfin, rappelons que la chaleur et la mortalité reliée à celle-ci sont plus élevées dans les centres urbains denses comme décrit dans nos développements précédents sur l'ICU. Avec la concentration de l'habitat dans des agglomérations, de plus en plus de personnes sont exposées à la surchauffe urbaine et à des niveaux importants de pollution de l'air.

2.1.2.1. Risque et perception du risque

La notion de perception des risques est née des débats autour de l'exploitation de l'énergie nucléaire, et repose sur le constat que les individus ne s'appuient pas uniquement sur des facteurs techniques, mais aussi sur des éléments subjectifs (Verlynde, 2018). Elle diffère de l'évaluation scientifique objective des risques, qui se base sur des données quantitatives et des analyses rigoureuses. On distingue ainsi d'un côté, le « risque objectif » qui fait l'objet d'évaluations et d'études statistiques quant à sa probabilité d'occurrence ; et de l'autre, le « risque perçu » reposant sur l'idée que les individus et les groupes évaluent les menaces qui peuvent peser sur leur environnement selon une représentation qui leur est propre et qui n'est pas toujours rationnelle.

Sur le plan scientifique, la perception du risque ne possède pas de définition unique. A minima, on peut la décrire comme une sorte de représentation de la réalité propre à chaque individu qui résulte d'un processus cognitif complexe influencé par une combinaison de facteurs internes et externes tels que :

- Les expériences personnelles antérieures en lien avec l'aléa considéré : le fait d'avoir déjà fait l'expérience d'un aléa influence la perception qu'on en a, et rend généralement le sujet moins vulnérable grâce à une meilleure adaptation.
- L'accès à l'information : la diffusion d'informations joue un rôle important dans la culture du risque et peut aider à influencer les comportements en diffusant des consignes comportementales. Par ailleurs, l'intensité de la couverture médiatique d'un événement particulier peut amplifier la perception du risque, même si le risque réel est faible.

[7] Organisation Mondiale de la Santé, 2018, https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health, consulté le 6 juin 2023.

- La confiance dans les autorités : en fonction du niveau de confiance que les individus accordent aux autorités gouvernantes et aux organismes chargés de la gestion des risques, ils peuvent se sentir plus ou moins en sécurité.

- Les facteurs socio-économiques : des conditions de vie précaires peuvent induire une perception plus aiguë des risques, car les personnes concernées sont souvent plus vulnérables aux conséquences négatives des aléas.

La perception préfigure le comportement (D'Andrade, 1995). Elle joue dès lors un rôle considérable dans la prise de décisions individuelles et collectives en ce qu'elle influence directement la manière dont les individus réagissent aux risques pesant sur leur lieu de vie ou leur activité. Elle influe sur leur occupation de l'espace et intervient dans leurs comportements, leurs représentations, leurs croyances et leurs stratégies d'adaptation, et se manifeste par des attitudes variées allant du déni du risque à sa surestimation (D'Ercole et Pigeon, 1999). Par conséquent, il s'agit d'un paramètre susceptible d'accroitre ou de diminuer la vulnérabilité face à un aléa (Hellequin *et al.*, 2013). L'étude de la perception des risques des populations est donc utile pour comprendre comment les individus appréhendent et font face aux risques dans leur vie quotidienne, et aide à identifier les facteurs influençant leur vulnérabilité. Par exemple, elle peut contribuer à une meilleure sensibilisation aux risques, nourrir la planification et la gestion des risques, ainsi qu'éclairer l'aménagement du territoire et la politique de prévention et d'atténuation des risques. En mettant l'accent sur la compréhension de la perception des risques, les décideurs peuvent prendre des mesures appropriées pour réduire les vulnérabilités identifiées et agir de manière proactive afin de prévenir et d'atténuer les risques.

2.1.2.2. Stress thermique et risques liés à la chaleur intense

Les risques liés à la chaleur intense n'ont commencé à attirer l'attention des pouvoirs publics et de la recherche qu'à partir du moment où il y a eu des canicules meurtrières et marquantes, d'abord aux Etats-Unis, notamment avec la canicule de Chicago en 1995 (Semenza *et al.*, 1996; Klinenberg, 2002), puis plus largement à partir de la canicule de 2003 en Europe de l'Ouest. Depuis cette canicule historique, il y a eu de nombreux travaux partout dans le monde sur les liens entre température et mortalité, avec d'importants progrès sur le plan méthodologique.

Ces risques sont fortement associés aux événements d'extrême chaud et à leurs effets sur la santé. Toutes les études sur les vagues de chaleur montrent systématiquement des excès de mortalité et de morbidité au sein de la population exposée lors de ces vagues de chaleur (Gil Cuesta *et al.*, 2017). Des chercheurs ont comparé le nombre total de décès quotidiens pendant les vagues de chaleur avec celui des périodes sans vague de chaleur, et ont constaté une augmentation de la mortalité quotidienne due aux maladies coronariennes, au diabète, aux accidents vasculaires, aux maladies respiratoires, aux accidents, à la violence, aux suicides et aux homicides pendant les vagues de chaleur (Auger et Tom, 2002). En France, l'impact sanitaire de ces vagues de chaleur, au cours des années 1974 à 2018, s'est traduit par un excès de 36 000 décès, avec plus 2 000 passages quotidiens aux urgences pour hyperthermie et coup de chaleur (Pascal *et al.*, 2019). De surcroît, plusieurs auteurs signalent que les chiffres de la

mortalité liée à la chaleur sont probablement en deçà de la réalité puisqu'une bonne partie des études sur le sujet se limitent aux cas pour lesquels le certificat de décès fait mention de causes directement liées à la chaleur. Or, les certificats de décès n'indiquent généralement pas la chaleur comme cause associée au décès, ce qui fait que les décomptes sont inférieurs au surplus total de mortalité (Auger et Tom, 2002 ; Rey *et al.*, 2007).

Toutefois, ces risques ne sont pas exclusivement tributaires des vagues de chaleur. Ils englobent un éventail plus large de situations où l'exposition, même brève, à des températures élevées entraîne des conséquences néfastes sur la santé (**Figure 28**). Ils peuvent être associés à des conditions météorologiques extrêmes, à des activités physiques intenses, à des environnements professionnels spécifiques ou à d'autres circonstances qui peuvent entraîner des problèmes de santé et des complications liées à la chaleur. Le terme « risques liés à la chaleur intense » nous semble donc plus approprié que celui de « risque caniculaire », bien que la littérature emploie les deux vocables sans nécessairement les distinguer.

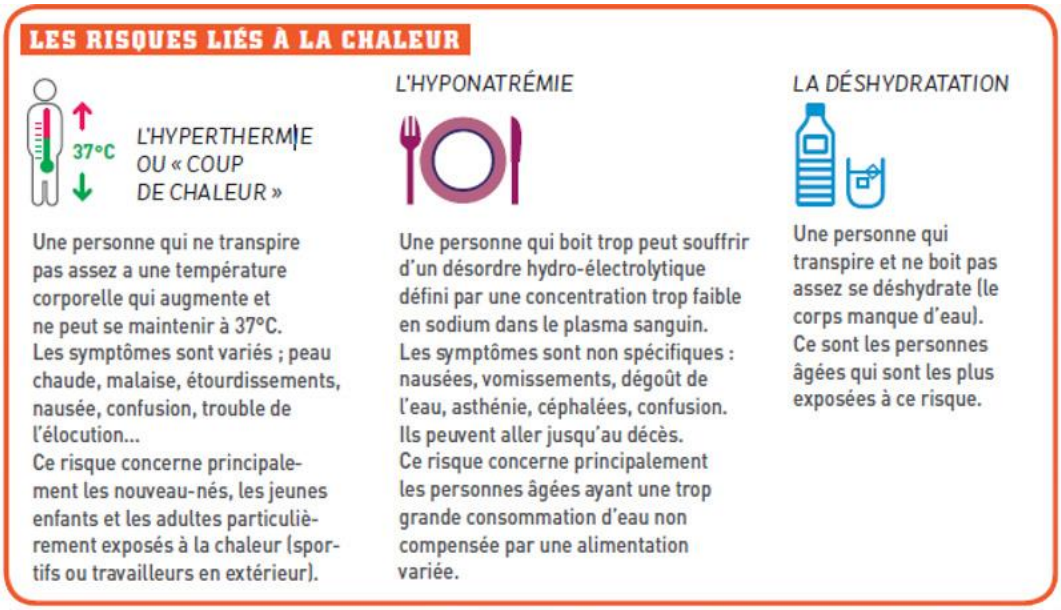


Figure 28 : Infographie diffusée par Santé Publique France au sujet des risques liés à la chaleur.

S'il est évident que des températures élevées exposent l'organisme à un risque sanitaire important dont les atteintes les plus graves conduisent au décès ou à des séquelles irréversibles, les mécanismes sous-jacents qui lient les températures élevées et la mortalité ne sont néanmoins pas complètement élucidés (Gasparrini *et al.*, 2015). D'un point de vue physiologique, l'organisme humain est homéotherme puisqu'il conserve une température constante indépendamment du milieu extérieur. Cela entraîne des échanges thermiques permanents avec le milieu ambiant, la chaleur s'écoulant passivement du milieu le plus chaud vers le moins chaud. En condition normale, cet écoulement de chaleur va du corps vers le milieu extérieur. En cas de chaleur extérieure élevée, l'organisme réagit en augmentant cet écoulement par l'accélération du débit circulatoire, une vasodilatation périphérique, l'hypervascularisation des extrémités et la transpiration (**Figure 29**). Or, lorsqu'il est exposé à une chaleur excessive,

l'organisme peut dépasser son seuil de thermorégulation et le décès arrive alors après l'altération du rythme cardiaque, de la viscosité et de la coagulabilité du sang, des diminutions de la perfusion cérébrale, et une réponse vasoconstrictrice atténuée (Keatinge *et al.*, 1986). Ainsi, de manière schématique, le risque se manifeste lorsque qu'une personne est exposée à un stress thermique, une situation qui survient lorsque l'organisme n'est plus en mesure de dissiper la chaleur vers l'environnement extérieur, ce qui engendre un état de stress caractérisé par des réponses physiologiques telles que la sudation et la vasodilatation périphérique (**Figure 29**).

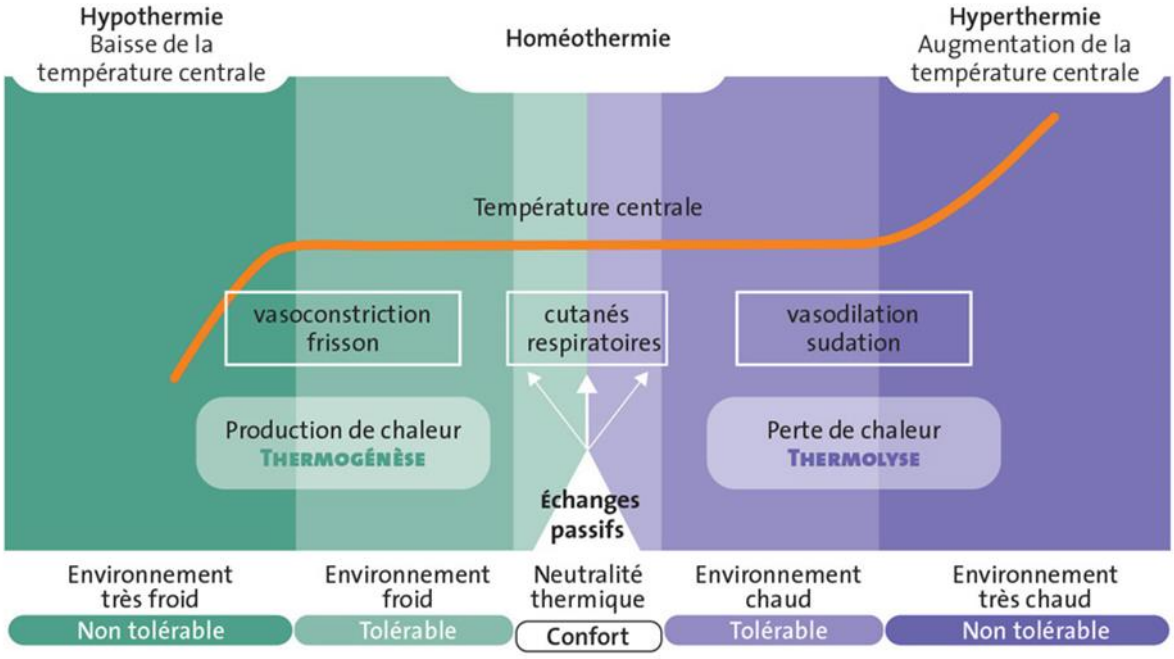


Figure 29 : Équilibre des échanges thermiques de l'organisme (source : Institut National de Recherche et de Sécurité).

Les effets néfastes de la chaleur ne surviennent pas toujours immédiatement après l'exposition, et peuvent persister plusieurs jours après (San Marco, 2018). De plus, la relation entre la température et la mortalité n'est pas linéaire, mais un pic de mortalité peut s'observer lorsque les températures restent très élevées pendant plusieurs jours, comme c'est le cas lors d'une canicule. En effet, il a été observé que les vagues de chaleur déploient leur effet maximal en termes de mortalité après les vagues de chaleur avec un décalage de 0 à 3 jours, ce qui montre que la mortalité liée à la chaleur est un événement aigu nécessitant une intervention rapide (Basu et Samet, 2002).

2.1.3. La sensibilité, aspect passif de la vulnérabilité

Au-delà de l'exposition à la chaleur, la recherche tente également de définir les facteurs de sensibilité accroissant la vulnérabilité. La sensibilité est une condition intrinsèque d'un objet qui le rend particulièrement vulnérable. Elle se traduit par une propension à être affecté, favorablement ou défavorablement, par la manifestation d'un aléa (Angignard *et al.*, 2013). Cela renvoie au fait constaté que certains groupes au sein d'un territoire peuvent être plus vulnérables que d'autres, ce qui fait qu'ils peuvent subir potentiellement plus de dommages que

les autres en cas d'aléa, à exposition et capacité d'adaptation égales (Klein *et al.*, 2003). Ainsi, une personne ou un endroit très exposé à un aléa ne sera vulnérable que dans la mesure où il y est sensible. Faut-il encore qu'il présente un certain potentiel à être endommagé qui résulte d'un ensemble de conditions favorables à l'apparition de défaillances en cas d'aléas.

Les indicateurs de sensibilité correspondent donc aux caractéristiques qui fragilisent l'objet considéré (individu, société, territoire) et le prédisposent à subir des impacts négatifs plus importants en cas d'aléa. En revanche, il faut souligner que la sensibilité ne peut pas être générique. On ne peut parler de sensibilité que spécifiquement à l'égard d'un certain risque (Books, 2003). En ce qui concerne les risques liés à la chaleur intense, les études sur les facteurs de vulnérabilité montrent clairement qu'une convergence de certaines caractéristiques individuelles et socio-démographiques expose certaines personnes à un risque de mortalité liée à la chaleur plus élevé que la moyenne. On peut ainsi schématiquement répartir les facteurs de vulnérabilité en deux catégories selon qu'ils relèvent des déterminants physiques propres à l'individu, on parle alors de sensibilité biophysique, ou bien des conditions de vie, auquel cas, on parle de vulnérabilité socio-économique.

2.1.3.1. Facteurs biophysiques

La sensibilité physique d'un individu, aussi désignée comme la vulnérabilité biophysique, est entendue comme les caractéristiques de l'organisme humain susceptibles de jouer un rôle dans la réponse aux vagues de chaleur (Alonso, 2021).

- **L'âge**

La relation entre l'âge et la sensibilité à la chaleur est établie depuis longtemps. Environ 84 études couvrant la période allant de 1970 à 2008 ont régulièrement rapporté une augmentation de la mortalité liée à la chaleur avec l'âge lors d'épisodes de chaleur accablante (Bayomi et Fernandez, 2023). Par exemple, les plus de 65 ans représentaient 72 % des décès liés à la chaleur lors de la grande canicule 1995 à Chicago (Whitman *et al.*, 1997). L'étude de Kenny *et al.* (2017) montre que l'accroissement de la vulnérabilité à la chaleur avec le vieillissement s'explique principalement par une l'incapacité à maintenir une pression artérielle stable en cas d'exposition à une chaleur extrême, ainsi qu'une altération de la thermorégulation corporelle, avec une diminution de la capacité de sudation. Le déclin de la réserve cardiaque et la réduction de la vascularite liée au vieillissement diminuent la capacité d'amener le sang dans les vaisseaux sanguins périphériques, ce qui réduit l'efficacité de la dissipation de la chaleur (Weiss *et al.*, 1992). Par ailleurs, le vieillissement réduit considérablement la perception de la chaleur et la sensation de soif. Alors que l'individu jeune ressent le besoin de se protéger avec 0,5 °C d'élévation de sa température cutanée, les personnes âgées ont cette même perception avec une élévation de 3 à 5 °C (Sakhy, 2016). A cela, s'ajoute le fait que cette frange de la population est souvent atteinte d'une perte d'autonomie, réduisant leur capacité à se protéger de la chaleur. Ces trois facteurs combinés augmentent le risque de mortalité par hyperthermie chez l'adulte âgé.

Les personnes âgées ne sont pas les seules concernées : les enfants de moins de 5 ans, courent un risque accru de mortalité par temps chaud principalement à cause de leur immaturité cognitive et immunitaire, et aussi en raison de leur dépendance envers les autres et des maladies préexistantes (Rowland, 2008).

- **Le sexe**

Plusieurs études suggèrent que les femmes seraient plus vulnérables à la chaleur accablante que les hommes (Navas-Martín *et al.*, 2022). Les raisons avancées tiennent au fait que les femmes présentent, à partir de la soixantaine, une plus forte occurrence de troubles de la thermorégulation, et notamment de troubles de la sudation, ce qui en théorie accroit leur sensibilité à la chaleur (Hémon et Jougla, 2004). Toutefois, la recherche n'est pas unanime sur le sujet. Des études menées aux États-Unis indiquent que ce sont les hommes qui sont le plus sujets à la mortalité liée à la chaleur (CDC, 2006). Mais cela pourrait s'expliquer par un niveau d'activité physique plus élevé chez la population masculine américaine moyenne, ce qui tend à augmenter leur exposition à la chaleur intense et donc leur vulnérabilité.

- **L'état de santé**

Toutes les études sur le sujet établissent que certaines conditions médicales, telles que les maladies cardiovasculaires, les maladies pulmonaires, les troubles rénaux, les problèmes de peau et les maladies chroniques entraînent un risque accru de mortalité en cas de forte chaleur (Tomlinson *et al.*, 2011). Cela concerne également la santé mentale, car la perception sensorielle de la chaleur est fortement affectée par les conditions mentales (Hansen *et al.*, 2008 ; Nitschke *et al.*, 2013). Il s'agit en particulier, de troubles tels que le stress, la dépression, l'anxiété, la démence et la schizophrénie. De plus, les personnes ayant une mauvaise santé mentale sont généralement moins capables de prendre des mesures d'adaptation ou de protection en cas d'exposition à des températures élevées (Lee *et al.*, 2018). L'addiction à l'alcool ou aux stupéfiants est un autre facteur aggravant la vulnérabilité en cas de températures élevées, car cela détériore la capacité de l'organisme à la thermorégulation (Trang *et al.*, 2016).

Enfin, les résultats de la recherche ont montré que les personnes handicapées ressentent généralement plus de douleur et de fatigue lors de températures extrêmes (Field *et al.*, 2012). Ces personnes sont plus vulnérables en raison de leur accès limité aux réponses d'adaptation et d'atténuation, ce qui réduit leur résilience à la chaleur extrême.

2.1.3.2. Facteurs socio-économiques

Certains facteurs socio-économiques peuvent rendre certaines personnes, groupes ou communautés plus vulnérable aux aléas climatiques y compris les épisodes de chaleur intense. Cela concerne entre autres :

- **Le niveau de revenus**

Les mécanismes du risque accru de mortalité qu'on observe chez les personnes au statut socioéconomique faible ne sont pas bien examinés dans la documentation sur le temps chaud. Il se peut que les personnes pauvres, souvent moins instruites, n'aient pas suffisamment de connaissances concernant les consignes sanitaires ou les mesures de protection nécessaires en cas d'exposition à la chaleur extrême (Borrell *et al.*, 2006). Ces personnes ont aussi plus fréquemment une maladie chronique ou un autre facteur augmentant la vulnérabilité à la chaleur associé à un accès individuel limité à des soins de santé adéquats (Bouchama *et al.*, 2007).

Par ailleurs, les personnes vivant dans des logements mal isolés ou dans des quartiers urbains densément peuplés peuvent être davantage exposées à la chaleur intense en raison de l'absence de climatisation, une mauvaise isolation du domicile ou de l'accès limité à des espaces verts (Whitman *et al.*, 1997).

- **L'isolement social**

Enfin, plusieurs études sur la vulnérabilité à la chaleur, ont avancé le fait que des effets accrus sur la santé pendant les vagues de chaleur étaient liés à l'isolement social (Mayrhuber *et al.*, 2018). Klinenberg (2003) par exemple, a signalé une augmentation du nombre de décès parmi les résidents vivant seuls pendant la chaleur de Chicago en 2005. Néanmoins, ce facteur reste difficile à définir et à mesurer (NCCEH, 2010).

2.1.4. La résilience, dimension active de la vulnérabilité

Emprunté aux sciences physiques, le concept de résilience a connu un succès considérable dans de nombreuses disciplines allant de la psychologie à l'informatique en passant par les sciences environnementales, et a été largement promu dans le discours politique et médiatique. Divers adjectifs lui sont accolés : écologique, alimentaire, énergétique, urbaine, collective, professionnelle, bancaire, etc. C'est par exemple à ce terme que l'on a eu recours lorsque l'on a baptisé « Opération Résilience » la mobilisation des forces armées françaises dans le cadre de la lutte contre la propagation de l'épidémie de COVID-19. Un tel engouement n'a pas manqué d'interroger et de susciter la critique. D'aucuns, le qualifient de « terme à la mode » (Reghezza-Zitt *et al.*, 2012) et parlent d'un concept mobilisateur, mais creux. Il y a donc lieu de clarifier ce concept afin qu'il puisse garder sa pertinence en tant que concept opérationnel.

2.1.4.1. La résilience, capacité à faire face par l'adaptation et l'innovation

Dans le contexte de la psychologie clinique qui l'a popularisé, le concept de résilience est né de la rencontre de deux idées : d'une part la notion de « *coping* », ou « *cope with* », qui correspond à l'idée de faire face et de s'ajuster ; d'autre part la notion d'invulnérabilité qui désigne un caractère intrinsèque dont l'individu serait dépositaire (Koninckx et Teneau, 2010). Résilience et vulnérabilité apparaissent en symétrie : alors que la vulnérabilité désigne la susceptibilité des personnes à subir des dégâts et transformer la réalisation d'un aléa en préjudice, la résilience aborde la capacité des individus à faire face aux crises. La résilience est alors vue comme le « ressort » psychologique ou moral permettant à l'individu de se ressaisir et d'aller de l'avant. On remarquera que les deux notions présentent des similitudes et des zones de recoupement : tout comme la vulnérabilité, le terme résilience implique nécessairement la présence d'une menace, d'un traumatisme ou d'une crise. Cela sous-tend un constat de fragilité et une part d'incertitude, d'imprévisibilité. De surcroît, les deux concepts peuvent reposer sur les mêmes paramètres sociaux, géographiques, économiques, culturels, etc. (Verlynde, 2018).

Dans le domaine de la gestion des risques, le Bureau des Nations Unies pour la Réduction des Risques de Catastrophes (UNDRR) définit la résilience comme « la capacité d'un système, d'une communauté ou d'une société exposée aux risques, de résister, d'absorber, d'accueillir et de corriger les effets d'un danger (...), notamment par la préservation et la restauration de ses structures essentielles et de ses fonctions de base » (UNDRR, 2015). Pour illustrer la différence d'approche, Dauphiné et Provitolo (2007) donnent l'exemple des mesures antisismiques : tandis que la notion de résistance implique de chercher à prédire l'occurrence des tremblements de terre pour mettre la population à l'abri, une démarche de résilience implique d'accepter de vivre avec l'impossibilité d'éliminer cet aléa, tout en essayant d'en réduire au maximum les conséquences dommageables en adaptant les constructions. La résilience « vise, non pas à s'opposer à l'aléa, mais à en réduire au maximum les impacts » (Dauphiné et Provitolo, 2007). La résilience serait ainsi à la fois une conscience des risques encourus et une capacité à agir pour y faire face.

Adaptée à l'aménagement des territoires, cette notion exprime la capacité d'un territoire ayant subi une perturbation à retrouver son état d'équilibre structurel (Querci et Oliveau, 2015). Cela recouvre également la capacité de ce territoire à s'organiser pour gérer l'évènement perturbateur (Verlynde, 2018). Cette capacité est influencée par la situation socio-économique de la population qui peut favoriser ou au contraire réduire la résilience des individus. Les personnes les plus démunies disposant de moins de ressources, auront plus de difficultés à faire face à une catastrophe telle qu'un incendie, un ouragan ou un séisme et à s'en remettre. Erman *et al.* (2020) par exemple, ont constaté, que deux ans après les grandes inondations qui ont frappé Accra au Ghana en juin 2015, les ménages qui s'en sont le mieux remis étaient en moyenne ceux disposant d'un revenu plus élevé.

Cependant, cette approche semble trop restrictive, car la résilience ne peut se limiter à la faculté pour un système, à retrouver sa condition normale. Aussi rapide que soit ce relèvement, la résilience implique nécessairement une évolution, voire une transformation, destinée à rendre le système plus robuste. Il n'y a donc pas de réel « retour à la normale ». En réalité, la démarche consiste à initier une évolution qui, selon la nature des enjeux, les ressources disponibles et les caractéristiques propres au système considéré, permettra d'atteindre un état meilleur qu'avant la perturbation (**Figure 30**). Dans ce contexte, la résilience peut être considérée comme incluant un degré dans lequel un système peut construire et augmenter sa capacité d'apprentissage et d'adaptation (Carpenter *et al.*, 2001). Le rôle de l'aménageur est alors de s'appuyer sur l'innovation et la créativité pour orienter son territoire vers un nouvel état en « équilibre dynamique » préservant ses fonctionnalités (Cerema, 2017).

Figure 30 : Les composantes de la résilience (source : Cerema).

2.1.4.2. La résilience face aux risques liés à la chaleur intense

Des trois composantes de la vulnérabilité, la capacité d'adaptation est sans doute celle qui a le moins retenu l'attention de la littérature sur les risques liés à la chaleur intense (Guardaro *et al.*, 2022), ce qui limite la compréhension des comportements spécifiques qui contribuent à la résilience. La prédominance des approches quantitatives dans une grande partie de cette littérature en est sans doute la principale raison. Néanmoins, les mécanismes de la résilience peuvent être regroupés en deux catégories : il y a d'une part des pratiques d'adaptation observées au niveau des individus et de l'autre, les mesures de niveau institutionnel.

Les stratégies d'adaptation utilisées à l'échelle individuelle relevées dans la littérature visent en premier lieu à réduire l'intensité de la chaleur à l'intérieur des domiciles. Valois *et al.* (2018) par exemple, mentionnent des actions telles que le fait de fermer les rideaux pour conserver la fraîcheur aux heures chaudes de la journée, la prise plus fréquente de douches ou de bain, la baignade dans des cours d'eau ou des piscines publiques ou privées, la sortie sur les balcons en soirée pour profiter de l'air frais, ou encore la fréquentation de lieux climatisés. De fait, le recours à la climatisation est un moyen de protection incontournable en cas de forte chaleur. Cependant, cet outil s'inscrit davantage dans une stratégie de résistance que de résilience. Face à une vague de chaleur, un climatiseur joue un rôle similaire à celui d'une digue face à une crue. Ce moyen s'inscrit d'autant moins dans une démarche de résilience que les climatiseurs

augmentent la demande d'énergie et le risque de pannes de courant dangereuses pendant les vagues de chaleur. Un exemple concret de cette situation s'est produit en Californie lors des canicules de l'été 2020, lorsque l'usage massif de climatiseurs a conduit à la première panne d'électricité continue dans cet Etat en près de 20 ans[8].

La résilience collective, quant à elle, se concentre principalement sur les mesures prises par les pouvoirs publics. En cas de vague de chaleur, leur intervention passe, entre autres, par (Poulin *et al.*, 2021) :

- La mise à disposition du public de transports en commun et d'espaces publics climatisés.
- La distribution d'eau aux personnes sans abri.
- La prise en charge des personnes vulnérables, notamment celles dépendantes des services de soins à domicile et ayant des difficultés de mobilité.
- La recherche active de personnes à risque par le biais d'appels téléphoniques ou de visites à domicile afin de leur proposer de l'aide.

Rohat *et al.* (2021) s'intéressant à l'efficacité de différentes mesures d'adaptation aux vagues de chaleur à Houston aux États-Unis, ont conclu que les mesures d'adaptation communautaires visant à réduire l'isolement social seraient les plus efficaces. Ce type d'action dépend néanmoins des caractéristiques géographiques des sites, de leur mode de développement urbain (plus ou moins dense et compact) et de la population (Poulin *et al.*, 2021).

Par ailleurs, une démarche de résilience collective réellement efficace passe par la mise en place d'un système d'alerte et de surveillance sanitaire de la chaleur tel que le Sacs en France (***cf.* 2.3.2**). Ce type de dispositif facilite la mobilisation des professionnels de la santé, des bénévoles, des travailleurs sociaux et des soignants formés à la surveillance et la prise en charge des personnes présentant des vulnérabilités connues, ainsi que la mise à disposition des infrastructures nécessaires pour faire face aux températures extrêmes. Ces systèmes ont aussi pour avantage de faciliter l'information et la sensibilisation de la population aux risques liés à la chaleur. À cet égard, des études ont démontré que fournir des informations sur la gravité d'un danger favorise la recherche d'informations par la population et, par conséquent, incite à prendre des mesures de protection (Neuwirth *et al.*, 2000). Pour cela, il est important d'identifier les canaux par lesquels le public préfère recevoir des alertes au sujet des vagues de chaleur et les consignes sanitaires. Et de quelles sources il préfère recevoir ces informations. Des efforts innovants visant à sensibiliser sur ce sujet ont été entrepris par des groupes tels que l'Alliance pour la Résilience face aux Chaleurs Extrêmes (*Extreme Heat Resilience Alliance*), qui œuvre pour établir un classement-appellation des vagues de chaleur par des prénoms, de la même manière que pour les ouragans et tempêtes[9]. Ils espèrent que la mise en place d'un système de dénomination des vagues de chaleur permettra de communiquer l'urgence et les conséquences sanitaires liées aux températures élevées.

---

[8] Le Figaro, 20 août 2020, « *La Californie en surchauffe victime de pannes de courant* », (https://www.lefigaro.fr/conjoncture/la-californie-en-surchauffe-victime-de-pannes-de-courant-20200820).

[9] *The Waghington Post*, 6 août 2020, "*Heat wave 'Hugo?' New coalition seeks to name hot weather like hurricanes*" (https://www.washingtonpost.com/weather/2020/08/06/naming-heat-waves/).

Enfin, des mesures de résilience de plus long terme consistent à créer des environnements urbains plus résilients face à la chaleur en améliorant le confort thermique des habitants.

2.2. Les méthodes de mesure

De la difficulté à en établir une définition précise, il découle que la notion de vulnérabilité, en tant que construction sociale, est difficile à mesurer. « Plus encore que l'aléa, la vulnérabilité sociale est difficilement quantifiable et encore moins modélisable » (Leone et Vinet, 2006). En effet, si les dimensions conceptuelles de la vulnérabilité sont aujourd'hui globalement reconnues, il n'y a pas de consensus sur la manière de l'évaluer, que ce soit sur la collecte de données comme à propos de leur agrégation dans un indice synthétique (Becerra, 2012). En réalité, cette difficulté est liée au caractère transdisciplinaire de cette notion. Depuis que la prévention des risques est devenue une préoccupation importante des politiques publiques, différentes disciplines ont investi ce champ de la recherche, travaillant chacune avec une approche qui lui est propre. Par conséquent, les outils méthodologiques pour mesurer la vulnérabilité sont fonction des visions disciplinaires (Bidou et Droy, 2012). Nous pouvons globalement distinguer les méthodes participatives et les indices d'évaluation.

2.2.1. Les méthodes participatives

Les méthodes d'évaluation dites participatives ont de plus en plus de succès dans l'évaluation de la vulnérabilité (Becerra, 2012). Cette évaluation repose principalement sur les retours d'expérience concernant les réponses, les adaptations et les comportements face aux événements dommageables, ainsi que sur leurs conséquences socio-économiques et territoriales. Les travaux dans ce domaine s'inscrivent également dans une démarche d'évaluation des risques lorsque les auteurs cherchent à diagnostiquer la vulnérabilité humaine en étudiant la qualité de la perception des menaces, la mémoire du risque, la connaissance des moyens de protection, les types de comportements potentiels, etc. Ces études conduisent assez souvent, à des cartographies utiles pour définir des stratégies de prévention prenant en compte la dimension psycho-sociale des risques (Leone et Vinet, 2006).

Sur le plan méthodologique, l'approche consiste généralement à impliquer les personnes interrogées dans l'évaluation de leur propre vulnérabilité, en partant du principe que les représentations sociales ainsi obtenues peuvent fournir des informations sur la conscience du risque et la capacité à réagir face à l'aléa. Pour cela, les méthodes classiques d'entretiens, de *focus groups* ou de recherches documentaires restent privilégiées du côté des chercheurs en sciences humaines (Delor et Hubert, 2000 ; Riaux *et al.*, 2009 ; Becerra, 2012).

En particulier, les enquêtes de terrain, que ce soit par le biais de questionnaires ou d'entretiens, présentent un réel intérêt pour collecter des informations sur la culture locale du risque, les comportements, les connaissances, et permettent ainsi d'identifier les points de vulnérabilité dans le but de les réduire (Verlynde, 2018). Elles peuvent aussi fournir un éclairage précieux en vue d'identifier les décalages qui existent au sein d'une ou plusieurs

populations en termes de perception ainsi que l'opportunité pour la mise en place d'actions de communication pour améliorer la connaissance du risque. Il est alors possible d'entreprendre des actions dans le but de tendre vers une culture commune du risque parmi les habitants.

L'enquête peut aussi s'appuyer sur des entretiens avec les parties prenantes locales pour bénéficier de leur expertise et/ou de leur connaissance du terrain. Il s'agit de données qualitatives qu'il est possible de mettre à profit pour mieux identifier les zones de vulnérabilité accrue. Néanmoins, cette démarche sert généralement d'auxiliaire aux méthodes quantitatives (Depietri *et al.*, 2013 ; Shih et Mabon, 2021).

2.2.2. Les indices d'évaluation spatialisés

Une approche commune de la caractérisation de la vulnérabilité est le développement de modèles d'évaluation. Effectivement, l'absence de données suffisantes fait que la vulnérabilité est souvent représentée par le biais d'indicateurs de substitution plutôt que par une mesure directe. Ces indicateurs sont ensuite agrégés pour créer un indice unique de vulnérabilité. Cette caractérisation de la vulnérabilité sous forme d'une mesure unique est souvent discutée ou effectivement utilisée comme un outil pour traduire la recherche en actions, notamment à travers des cartes de vulnérabilité (Conlon *et al.*, 2020). L'objectif de cette mesure est de mettre en évidence les zones très vulnérables afin de concevoir des stratégies spécifiques d'atténuation et d'adaptation visant à réduire la probabilité de conséquences dommageables en cas de survenance de l'aléa considéré. Ce travail peut également avoir pour objectif de prédire les zones ou les populations les plus susceptibles de subir des préjudices.

Traditionnellement, les indices de vulnérabilité ont été axés sur les risques géophysiques et environnementaux tels que les inondations et la sécheresse, tandis que la vulnérabilité à la chaleur a reçu peu d'attention. Néanmoins, cette situation est en train de changer, comme en témoigne l'augmentation progressive du nombre d'études portant sur la compréhension des facteurs climatiques et socioéconomiques influençant la vulnérabilité à la chaleur, ainsi que sur le développement d'indices, principalement en Amérique du Nord (Wolf et McGregor, 2013). Par exemple, dans un article précurseur, Smoyer (1998) a décrit et expliqué les variations spatiales des décès liés à la chaleur à Saint-Louis aux États-Unis. Cet article initial a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs pour les déterminants sociaux de la vulnérabilité à la chaleur et les impacts sur la santé. En conséquence, un certain nombre d'études axées sur le développement et la cartographie des indices de vulnérabilité à la chaleur ont été menées au cours des dernières années (Johnson et Wilson, 2009 ; Tomlinson *et al.*, 2011 ; Uejio *et al.*, 2011).

Concernant la manière dont les indices sont construits, les évaluations vont s'opérer sur les variables représentant quantitativement les facteurs de la vulnérabilité à la chaleur. Ensuite, une fois les variables influençant la vulnérabilité à la chaleur recensées, celles-ci font l'objet d'un tri et d'une sélection. Les évaluations peuvent suivre plusieurs méthodes statistiques, appartenant à différentes approches, qui ont chacune des façons de décomposer et d'analyser

les variables de vulnérabilité, leurs relations et leur distribution (Bao *et al.*, 2015). Généralement, les valeurs des variables retenues sont normalisées à des positions relatives comprises entre 0 et 1. Une première approche consiste à comparer différentes options de pondération des indicateurs. Il a été suggéré dans diverses études que la pondération des variables en collaboration avec les parties prenantes ou avec le concours d'experts aide à adapter les indices plus généraux au contexte local (Räsänen *et al.*, 2019). Cependant, recourir à l'opinion d'experts pour déterminer l'importance relative des variables déterminantes de la vulnérabilité à la chaleur n'est pas sans poser problème. Les opinions d'experts ne sont pas nécessairement objectives ou neutres, et leurs jugements sur l'importance relative des variables (déclarations normatives) ne relèvent pas toujours de preuves fondées sur des données empiriques (Shih et Mabon, 2021).

D'autres chercheurs ont supposé que toutes les variables sont d'égale importance et leurs ont donc attribué la même pondération, avant de regrouper les valeurs normalisées de toutes les variables pour former un indice de vulnérabilité composite (Vescovi *et al.*, 2005 ; Wolf *et al.*, 2014 ; Bao *et al.*, 2015). Cette approche permet d'éviter une subjectivité supplémentaire dans le développement du modèle. La standardisation des variables (sur une plage de 0 à 1) et l'agrégation quantitative non pondérée sont une approche courante dans la composition des indicateurs (Turvey, 2007 ; Bao *et al.*, 2015).

Enfin, une autre stratégie consiste à intégrer des méthodes statistiques multivariées telles que l'analyse en composantes principales (ACP). Cette approche implique l'utilisation d'une multitude de facteurs de risque reconnus comme influençant la vulnérabilité à la chaleur (Reid *et al.*, 2009 ; Inostroza *et al.*, 2016 ; Guo *et al.*, 2019). Ensuite, l'ACP est employée pour regrouper certains de ces indicateurs de risque en un nombre réduit de facteurs, permettant ainsi de modéliser la vulnérabilité d'une population. Cette approche facilite la comparaison de la vulnérabilité à la chaleur entre différents groupes de population et la classification de ces groupes en fonction de leur niveau de vulnérabilité (par exemple, faible ou élevé). La matrice des coefficients de score des composants obtenue peut ensuite servir à dériver l'équation finale du score factoriel, permettant ainsi d'obtenir les poids de chaque variable et d'évaluer son impact sur le résultat.

Pour comparer facilement la vulnérabilité de différentes zones à la chaleur intense et entreprendre une analyse spatiale plus approfondie, l'indice de vulnérabilité peut être spatialisé via des systèmes d'information géographique (SIG) (Bao *et al.*, 2015). En revanche, il convient de souligner que l'ensemble des variables choisies et la méthode de sélection de ces variables ont un impact sur les cartes finales.

2.3. La veille sanitaire face aux vagues de chaleur

La canicule et la vague de chaleur correspondent à des périodes d'extrême chaud, c'est-à-dire présentant des températures anormalement élevées pendant plusieurs jours consécutifs. Cependant, les deux notions sont peu différenciées dans la littérature, et il n'existe pas de définition universelle de l'une ou de l'autre. En 2013, l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) définissait une vague de chaleur comme « *une période pendant laquelle la température maximale quotidienne dépasse de 5 °C la température normale (1961- 1990), pendant plus de cinq jours consécutifs* » (WMO, 2013). Pour sa part, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) la définit comme « *des périodes prolongées de températures inhabituellement élevées qui augmentent la morbidité et la mortalité* ». De même, le GIEC parle d'« *une période continue de temps anormalement et inconfortablement chaud* » (GIEC, 2007 ; Kotharkar et Ghosh, 2022). Dans la littérature, les vagues de chaleur sont généralement définies comme « *des épisodes estivaux avec des températures de l'air extrêmement élevées pendant au moins deux à trois jours* » (Robinson, 2001 ; Lau et Nath, 2012).

La notion de canicule est utilisée pour désigner une anomalie thermique impliquant l'occurrence de valeurs supérieures ou inférieures à des seuils prédéfinis et un écart vis-à-vis de la gamme de températures habituellement observées. Ce sont alors les niveaux de températures et la durée de l'épisode qui permettent d'établir une distinction entre la notion de canicule et celle de vague de chaleur. On peut ainsi dire que la période de fortes chaleurs peut donner lieu à des canicules. Mais pour qu'il y ait canicule, certains seuils de température doivent être atteints et maintenus pendant une certaine durée prédéfinie. Ces seuils de température et la durée de l'épisode varient en fonction des régions du monde et des domaines considérés (domaine agricole, vigilance sanitaire, activité de recherche, etc.).

2.3.1. Les systèmes d'alerte canicule-santé dans le monde

L'augmentation du nombre et de la sévérité des événements caniculaires a conduit plusieurs pays et organisations internationales à développer des systèmes de veille et d'alerte sanitaire liés à la chaleur intense (Casanueva *et al.*, 2019). Les premiers remontent aux années 1990, lorsque, après avoir constaté 120 décès liés à une vague de chaleur en 1993, les autorités de Philadelphie, aux Etats-Unis, ont élaboré le premier système de veille-alerte sanitaire en cas de temps chaud. Un dispositif qui a montré son efficacité dès la grande canicule de 1995 : Philadelphie n'avait perdu que 73 habitants en dépit du manque de robustesse du dispositif, tandis que Chicago dénombrait 670 victimes (Kalkstein *et al.*, 1996 ; Kalkstein et Greene, 1997). Au cours des années suivantes, plusieurs villes nord-américaines se sont à leur tour équipées de systèmes d'alerte similaires. En Europe, c'est principalement à la suite de l'été 2003 que les premiers efforts de recherche ont été déployés en vue de mettre en place des plans d'action. En 2008 et en 2011, sur la base des premières expériences, le Bureau Régional de l'OMS pour l'Europe a publié un document complet pour guider la préparation des plans d'action chaleur-santé, fournissant des conseils au grand public, aux professionnels de la santé et aux services de santé (WHO et ROE, 2011 ; Martinez *et al.*, 2019).

Dans leur rapport, l'OMS et l'OMM décrivent les axes sur lesquels bâtir une stratégie de prévention des conséquences des chaleurs extrêmes (WHO et ROE, 2008 ; WMO, 2015). Elle repose d'abord sur la prévision météorologique de la température, mais aussi du taux d'humidité, ces deux paramètres agissant ensemble sur le corps humain. Ensuite, le dispositif doit déterminer des seuils associés au niveau de stress thermique attendu, en tenant compte des particularités climatiques de la région.

Ces documents et orientations ont ensuite été adoptés comme modèle pour la prévention et la gestion des canicules et, progressivement, de nombreux pays qui étaient en retard particulièrement dans la région Asie-Pacifique (Pakistan, Inde, Maldives, Chine, Australie, etc.) ont développé leurs propres dispositifs d'action sanitaire. Kotharkar et Ghosh (2022) ont examiné les plans d'alerte existants et ont relevé que seuls 47 pays disposent d'un tel dispositif. Ces plans d'action sont pour la plupart déployés dans la région Europe (35/53), suivie par l'Asie du Sud-Est (5/11), le Pacifique occidental (4/37), les Amériques (2/35), la Méditerranée orientale (1/22) tandis que les pays du continent africain n'en comptent actuellement aucun (**Figure 31**).

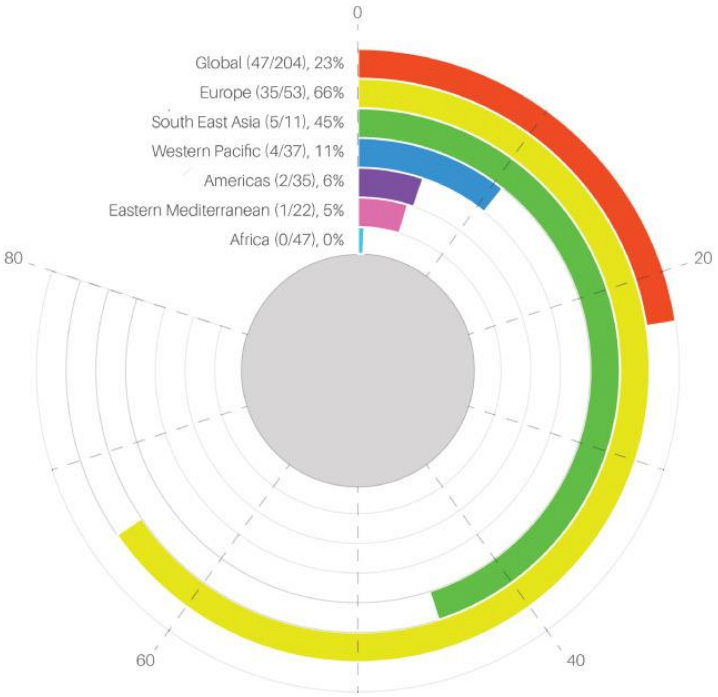


Figure 31 : Parts de pays disposant de système d'alerte canicule-santé à l'échelle des continents (Kotharkar et Ghosh, 2022).

Ces systèmes sont généralement basés sur différents indicateurs météorologiques (températures maximales, minimales ou moyennes, taux d'humidité, masses d'air, etc.), et des seuils au-dessus desquels une hausse significative de mortalité est attendue (Hajat *et al.*, 2010 ; Chebana *et al.*, 2013 ; Issa *et al.*, 2021). Leur utilisation n'est cependant possible qu'au niveau local puisque la définition des seuils d'alerte est propre au territoire concerné. L'une des difficultés principales pour la mise en place de ces plans porte alors sur le choix des indicateurs et la définition du seuil d'alerte. Hajat *et al.* (2010) classent les systèmes d'alerte actuellement en vigueur dans le monde en quatre types principaux : classification synoptique, classification physiologique, évaluation épidémiologique de la relation température-mortalité et indice température-humidité (**Tableau 3**). L'approche synoptique et l'évaluation température-mortalité portent sur la relation entre les conditions météorologiques et la surmortalité observée au niveau local ; tandis que l'indice température-humidité et la classification physiologique reposent sur la relation entre les conditions météorologiques et la santé. Ces quatre systèmes sont explicités dans le tableau 3, incluant les endroits où ils sont actuellement utilisés.

Tableau 3 : Les différents systèmes d'alerte canicule-santé dans le monde (Hajat *et al.*, 2010).

Système d'alerte canicule-santé	Mécanisme	Pays
Classification synoptique	Ce système se base sur le fait que les effets sanitaires résultent de plusieurs facteurs météorologiques agissant en combinaison. Il identifie différentes catégories de masse d'air et utilise l'analyse épidémiologique des données historiques de mortalité pour modéliser la relation de mortalité au sein de chaque catégorie.	Australie (Victoria), Azerbaïdjan, Biélorussie, Belgique, Canada (Ontario), Chine (Shanghai), Croatie, République Tchèque, Angleterre, Grèce, Hongrie, Inde, Kazakhstan, Italie (Turin, Milan et Bologne), Lettonie, Maldives (Malé), Népal, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Serbie et Monténégro, Espagne, Slovénie, États-Unis (Arizona, Chicago, Cincinnati, Dayton, Nouvelle-Orléans, Philadelphie, Phoenix et Washington DC).
Évaluation épidémiologique de la relation température-mortalité	Ce système recourt à l'analyse épidémiologique des historiques de surmortalité dans le but d'identifier la part de mortalité attribuable à la température, mais ne modélise que la corrélation directe entre la température et la mortalité. Les alertes de vagues de chaleur sont basées sur des seuils de température qui pourraient influencer la mortalité.	Australie (Adélaïde), France, Pakistan (Karachi), Portugal (Lisbonne), Espagne (Madrid), Corée du Sud (Séoul), Suède.
Indice température-humidité	Ce système explore la relation entre la température et l'humidité. L'indice *Humidex* est le plus couramment utilisé sur le plan opérationnel.	Canada (Montréal, Toronto), Roumanie, Turquie, Suisse, Macédoine du Nord.
Classification physiologique	Le système physiologique s'intéresse au stress thermique des populations pendant les périodes de forte chaleur en étudiant la relation entre le ressenti thermique et les conditions météorologiques relevées.	Allemagne et Autriche.

2.3.2. Le plan d'alerte-canicule français

À la suite de la vague de chaleur meurtrière de l'été 2003, l'Institut national de Veille Sanitaire (InVS) en collaboration avec Météo-France, a mis au point dès 2004, un plan national canicule (PNC) destiné à réduire les impacts sanitaires des vagues de chaleur (**Figure 32**) grâce à l'instantanéité des recueils d'informations climatiques et sanitaires comme des interventions, sur l'ensemble du territoire (Wagner *et al.*, 2018).

Pour cela, il définit les actions de prévention des effets sanitaire des vagues de chaleur et intègre des recommandations à destination de différents acteurs du socio-médical, dont certaines incluent une déclinaison légale : organisation des institutions accueillant des personnes âgées ou vulnérables, constitution d'un fichier de personnes vulnérables dans les mairies, mise en place d'une pièce rafraîchie dans le cadre des plans bleu, etc. Si l'accent est mis sur la prévention tout au long de l'été, certaines actions sont renforcées lorsqu'une vague

de chaleur est anticipée. Il s'agit en particulier de la communication auprès du grand public, de la mobilisation des professionnels de santé, et de l'appel des personnes vulnérables par les travailleurs sociaux (Laaidi *et al.*, 2012).

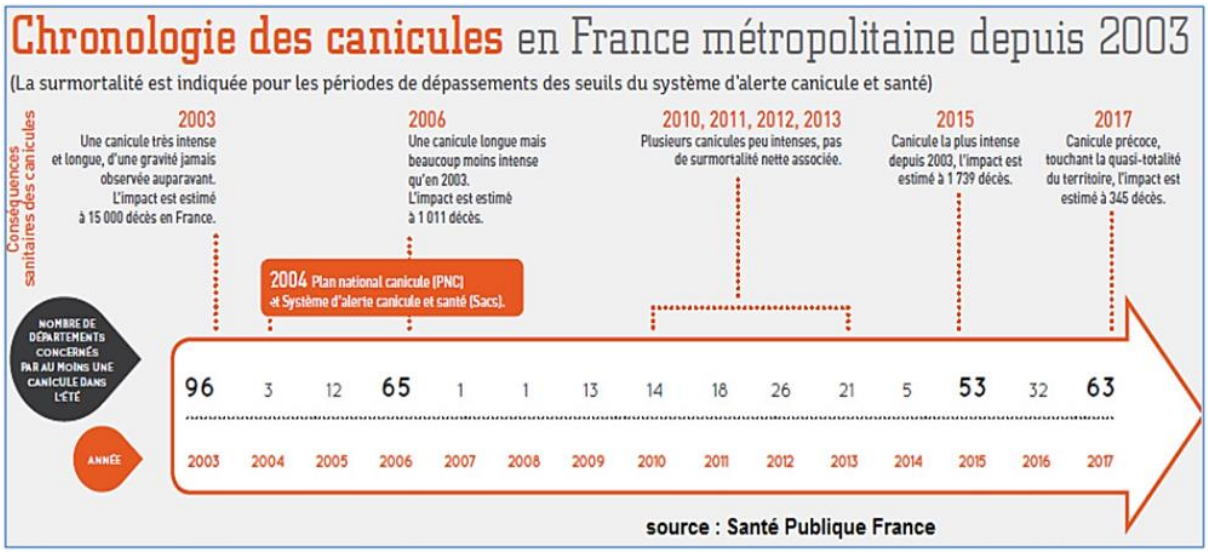


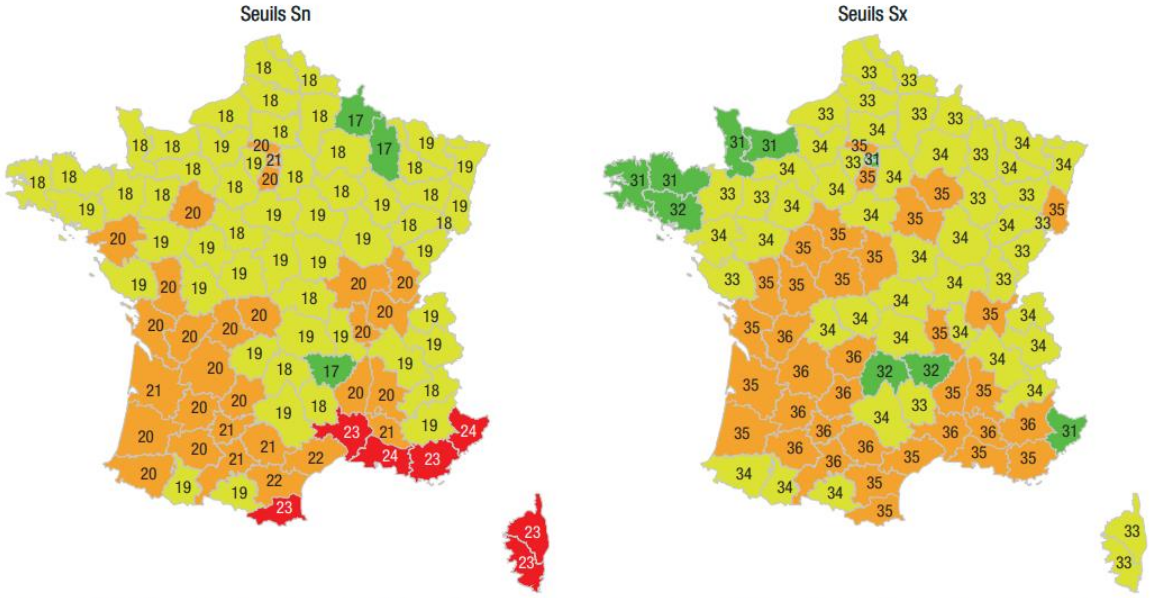
Figure 32 : PNC et effets bénéfiques sur la mortalité en France (Santé Publique France, 2018).

Après avoir comparé les systèmes existants dans le monde, il a été décidé de mener une analyse descriptive des données en fonction des paramètres météorologiques (Tn, Tm, Tx, couverture nuageuse, humidité, jours consécutifs de temps chaud, vitesse du vent, etc.) afin d'identifier le descripteur qui présente la meilleure corrélation avec la surmortalité observée. Ce descripteur doit être basé sur des données faciles à prévoir avec un certain niveau de confiance et devait être associé à un indicateur biométéorologique (IBM), capable de distinguer les jours où la mortalité est supérieure au seuil d'intervention et les jours où elle est inférieure à ce seuil (Pascal *et al.*, 2006). Or, si Météo-France est capable d'établir des prévisions de température fiables jusqu'à cinq jours à l'avance, l'humidité et la température du point de rosée sont plus difficiles à prévoir. Aussi, l'IBM qui a montré les meilleures performances tout en étant adapté à la prévision était finalement la combinaison de la température minimale et de la température maximale au-dessus de seuils spécifiques. En effet, il a déjà été observé que la température maximale seule n'était pas suffisante pour estimer le risque sanitaire. Une température nocturne élevée la nuit ne permettant pas au corps de se reposer est aussi un important facteur de risque (Besancenot, 2002).

Les raisons qui ont motivé le choix de cette méthode étaient d'ordre pratique, puisque la tâche consistait à développer un système complet le plus rapidement possible avec un temps et des ressources limités. Par conséquent, une méthode simple mais robuste a été choisie, car il fallait rapidement préparer le pays à l'été 2004. L'application d'une approche plus complexe telle que celle des masses d'air aurait sans doute pris plus de temps et nécessité de mobiliser plus de paramètres météorologiques. Le choix des indicateurs météorologiques peut également paraître approximatif. En effet, plusieurs paramètres sont pertinents pour comprendre une vague de chaleur et devraient être pris en compte pour expliquer les conséquences sanitaires des

vagues de chaleur. Néanmoins, le but n'était pas d'expliquer l'influence des vagues de chaleur sur la santé, mais simplement d'identifier les jours potentiellement à risque. Le choix des températures prévues jusqu'à cinq jours à l'avance apparaît alors cohérent avec le besoin d'un indicateur simple et efficace (Pascal *et al.*, 2006).

Cela a donc donné lieu au système d'alerte canicule et santé (Sacs) inclus dans le PNC. Le Sacs est basé sur le couple IBMn/IBMx[10], où l'IBMn est la moyenne glissante sur trois jours des températures minimales, et l'IBMx la moyenne glissante sur trois jours des températures maximales (Laaidi et al., 2012). Chaque jour, dans chaque département, le niveau de risque est évalué par Météo-France en comparant les prévisions de températures avec des seuils d'alerte départementaux. Pour la Moselle par exemple, le seuil IBMn est de 19 °C, et le seuil maximal IBMx est de 34 °C (**Figure 33**). Si les prévisions des indicateurs font ressortir un risque suffisamment élevé d'atteindre ou de dépasser les seuils d'alerte sur une période minimale de trois jours, une alerte pourra alors être déclenchée par le préfet du département. Parallèlement, la surveillance d'indicateurs sanitaires (décès, appels à SOS Médecins, fréquentation des services d'urgences pour des pathologies en lien avec la chaleur) permet d'évaluer l'impact éventuel pour les services concernés (santé, gestion, communication, etc.) (Laaidi *et al.*, 2012).



Sn : seuil pour la moyenne sur trois jours des températures minimales en °C. Sx : seuil pour la moyenne sur trois jours des températures maximales en °C.

Figure 33 : Seuils des indicateurs météorologiques utilisés en 2016 (Wagner *et al.*, 2018).

[10] IBM minimal et IBM maximal renvoient aux seuils de température (minimale et maximale) permettant de définir une canicule par département.

Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons pu voir que des progrès significatifs ont été accomplis aussi bien dans la connaissance des risques sanitaires liés à la chaleur intense, que dans la gestion de crise. En particulier, nous avons exploré la notion de vulnérabilité, qui joue un rôle essentiel dans l'étude de l'adaptation des espaces urbains aux défis posés par la chaleur intense. Cependant, force est de constater que la vulnérabilité est une notion aussi complexe à définir qu'à mesurer tant elle fait l'objet d'approches et de conceptions diverses et évolutives. Nous avons néanmoins pu établir un cadre analytique, en identifiant les trois principales composantes à considérer : l'exposition, la sensibilité (physiologique ou socio-économique), ainsi que la résilience ou capacité à faire face.

Malgré ces avancées, certaines zones d'ombre existent encore, et des efforts restent à faire notamment pour renforcer la résilience des villes face à l'augmentation prévue et observée de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur. Il est donc impératif de disposer de données à échelle fine sur les facteurs de vulnérabilité à la chaleur afin de contribuer de manière significative à la compréhension du climat urbain et à la gestion des villes. Cela permettra de mieux appréhender les risques actuels et futurs pour le bien-être et la santé en ville, et de guider de manière plus éclairée les mesures d'adaptation au niveau local.

Chapitre 3 : Présentation des terrains d'étude

Ce chapitre présente les deux ensembles urbanisés que nous croisons dans cette thèse. Plusieurs aspects du territoire sont abordés ici : la dynamique urbaine et démographique, les données topographiques et les caractères du climat. Ces éléments sont essentiels pour évaluer leurs influences sur la formation des îlots de chaleur. Outre la présentation des terrains d'étude, notre objectif est également de dresser un état des lieux des tendances climatiques des deux territoires autant par le biais de l'historique des épisodes d'extrême chaud, que grâce aux projections climatiques simulées pour ce siècle.

3.1. Données socio-démographiques et socio-économiques 68
3.1.1. L'Eurométropole de Metz 68
3.1.2. Le Grand Casablanca 70
3.2. Milieu physique 73
3.2.1. Cadre topographique 73
3.2.2. Analyse comparée des principaux éléments du climat 77
3.2.3. Les changements climatiques déjà « observables » 83
Synthèse 87

3.1. Données socio-démographiques et socio-économiques

3.1.1. L'Eurométropole de Metz

L'aire urbaine de Metz est située en région Grand Est, dans le quart nord-est de la France (49° 07' N, 6° 40' E), dans le département de la Moselle, au cœur de l'ancienne région Lorraine (**Figure 34**). Elle regroupe environ 390 000 habitants, ce qui en fait une agglomération de taille moyenne, arrivant au 21ème rang en France (Insee, 2020).

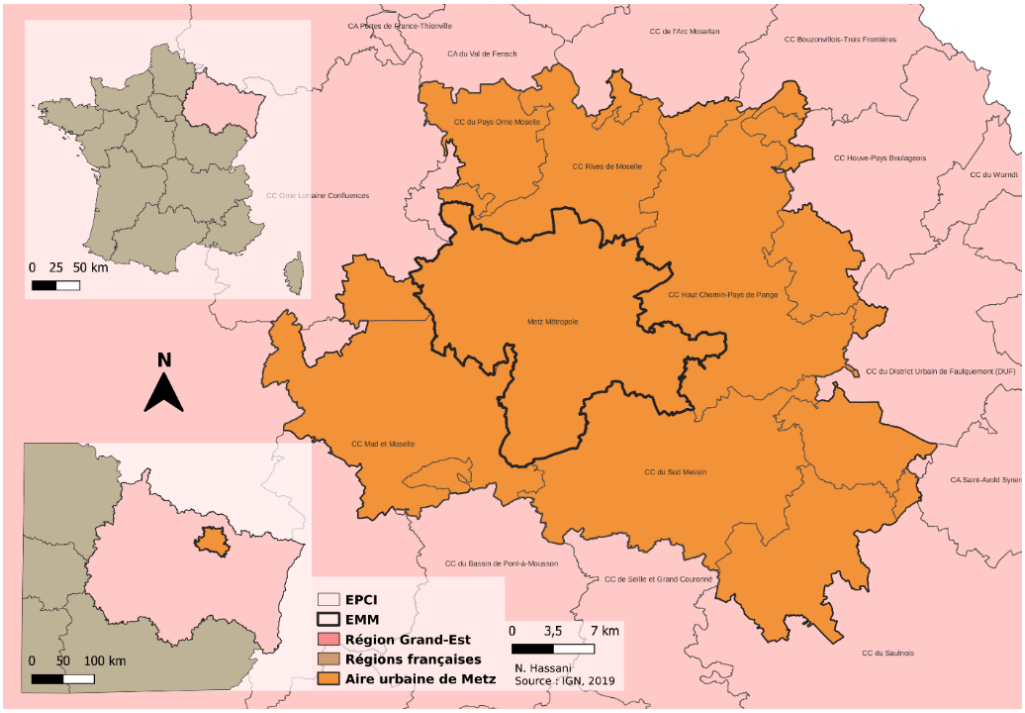


Figure 34 : Situation de l'aire urbaine de Metz à l'échelle nationale et régionale.

3.1.1.1. Structure administrative

Notre étude des îlots de chaleur est menée au sein du territoire de l'Eurométropole de Metz (EMM), qui est l'entité administrative autour de laquelle s'articule l'aire urbaine de Metz (**Figure 35**). En effet, les communes autour de la ville de Metz se sont structurées en intercommunalité avec la création, dès 1975, du District de l'agglomération messine, qui est un établissement public de coopération intercommunale. C'est seulement en 2018, dans le sillage de l'Acte III de la décentralisation que cette structure acquiert le statut de Métropole avec la loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (loi MAPTAM) de 2014[11].

L'Eurométropole de Metz s'étend sur 306 km² et compte 225 000 habitants, ce qui correspond à une densité de population de 313 hab/km² (Insee 2019). Cette densité atteint 7 657

[11] Le statut de Métropole est accordé par le décret n° 2017-1412 du 27 septembre 2017.

hab/km² au centre-ville de Metz. Regroupant 44 communes (au moment de notre étude)[12], l'EMM est constituée d'un cœur métropolitain regroupant 10 communes autour du noyau urbain qu'est la ville de Metz (**Figure 35**). Le cœur métropolitain comptabilise 186 000 habitants, soit 85 % de la population de l'Eurométropole. La ville de Metz à elle seule, concentre 53 % de la population (AGURAM, 2020a).

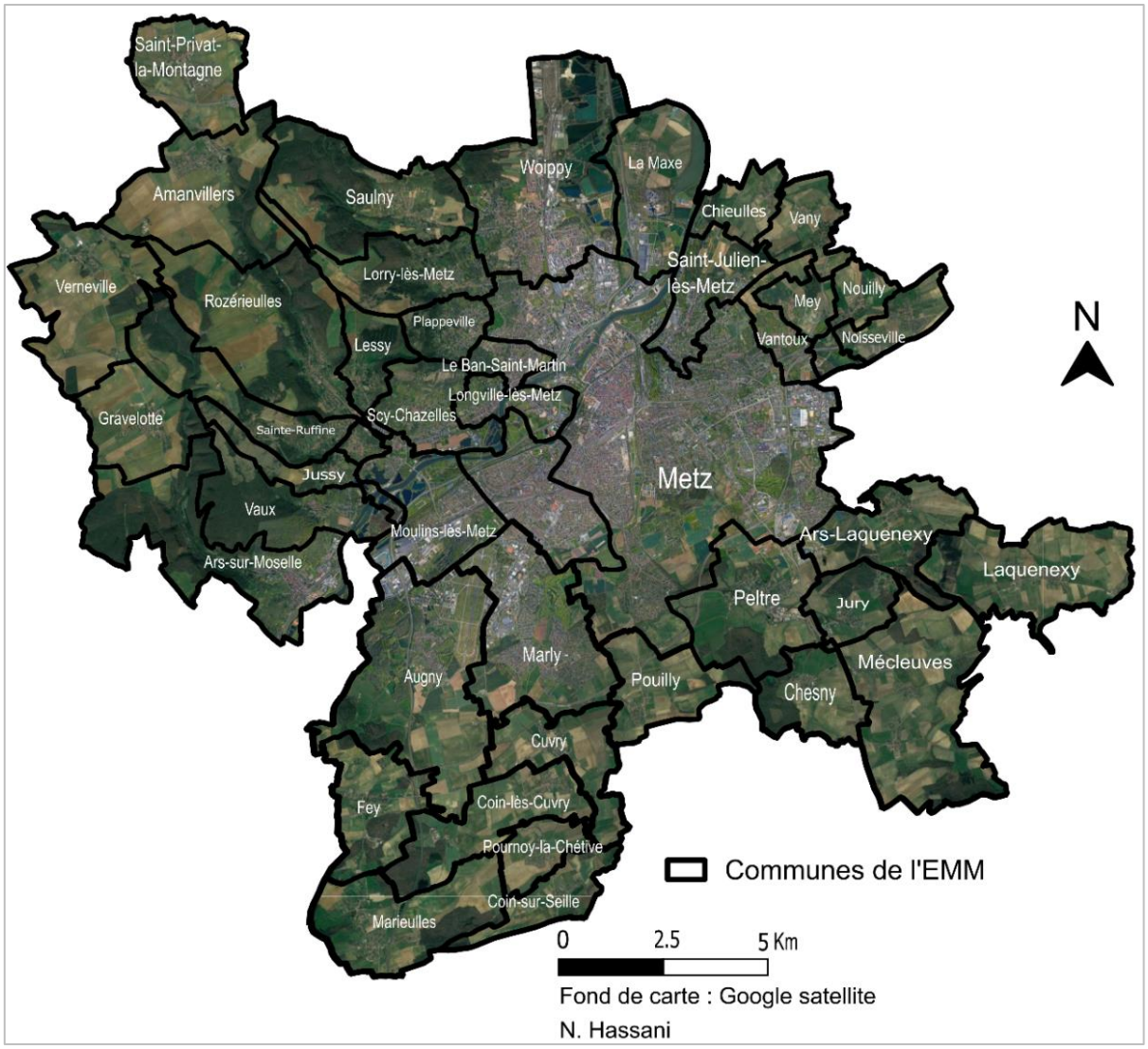


Figure 35 : Les 44 communes de l'Eurométropole de Metz. *NB* : la carte ne tient pas compte de l'intégration des deux communes de Roncourt et de Lorry-Mardigny.

L'EMM s'appuie sur la ville de Metz qui constitue à la fois un centre historique, administratif et un pôle accueillant des activités à haut niveau de service et un pôle culturel et universitaire de niveau régional. Du fait de sa tradition militaire et commerçante, ce territoire a développé des fonctions principalement tertiaires en jouant la carte des nouvelles technologies de l'information et de la communication.

[12] Il est à noter que deux nouvelles communes se sont rattachées à l'EMM le 1er janvier 2022 (Roncourt) et le 1er janvier 2023 (Lorry-Mardigny).

3.1.1.2. Un profil sociodémographique stable

Avec 225 000 habitants, l'Eurométropole rassemble un cinquième de la population du département de la Moselle. Dans un contexte de concurrence territoriale, la dynamique démographique a été fortement influencée par le départ de militaires induit par les restructurations liées au Plan National de la Défense de 2008 (Kubiak et Serre, 2010). Le solde naturel reste cependant positif car la démographie locale présente un visage plus jeune que la moyenne régionale. Les autres faits notables, qui ne sont pas propres à l'Eurométropole, sont le vieillissement marqué de la population et la baisse de la taille des ménages qui induisent un besoin en logements toujours plus important. Le profil des ménages évolue vers une diminution de la taille des familles, et une hausse des personnes seules, qui sont passées de 34 % en 1999 à 43 % des ménages en 2019.

Il y a toutefois des dynamiques démographiques très différentes entre les communes composant la Métropole (**Annexe 1**). Le noyau urbain connaît un déclin démographique et a perdu plus de 500 habitants par an en moyenne entre 2006 et 2016. La ville-centre de Metz est particulièrement touchée avec 6 545 habitants en moins sur cette période. Les 33 autres communes qui entourent le noyau urbain gagnent un peu plus de 1 300 habitants sur la même période. En bref, la ville-centre connaît un fort déclin démographique, la population des 10 autres communes du noyau urbain est globalement stable et celle des 33 autres communes de la couronne métropolitaine en légère hausse (**Annexe 2**). Si l'agglomération reste la porte d'entrée pour les nouveaux arrivants, on observe une relocalisation des ménages du noyau urbain vers les espaces périphériques proposant des logements adaptés aux aspirations et au budget des ménages, ce qui laisse penser à un mouvement centrifuge de la population.

Avec un revenu moyen annuel par foyer fiscal de 25 806 € en 2014, Metz Métropole affiche une moyenne supérieure à l'ensemble des agglomérations du Grand Est. Cependant, l'économie locale est fortement liée à celle du Luxembourg voisin qui, du fait de ses hauts revenus et du dynamisme de son secteur tertiaire (banques, services, institutions européennes) attire environ 8 000 travailleurs (AGURAM, 2020a). Le territoire messin, comme le reste du sillon lorrain dépendait en grande partie de la sidérurgie et des mines de charbon depuis le XIX^{e} siècle. Après la crise de ces industries à la fin du XX^{e} siècle, le territoire s'est retrouvé sinistré et tente aujourd'hui de promouvoir de nouvelles activités basées sur le savoir-faire industriel et technologique avec notamment le parc du Technopôle.

3.1.2. Le Grand Casablanca

Le Grand Casablanca, situé au centre-ouest du Maroc sur la côte atlantique (33° 36' N, 07° 36' O), au sein de la région Casablanca-Settat (**Figure 36**), est le principal pôle urbain et économique du pays avec une population estimée à 4 270 000 habitants (HCP, 2014)[13] pour une superficie de 1 615 km². Il s'agit d'une métropole presque 20 fois plus peuplée que l'EMM et 5 fois plus étendue.

[13] Haut-Commissariat au plan.

3.1.2.1. Structure administrative

Sur le plan administratif, la ville de Casablanca correspond à la Préfecture de Casablanca qui s'est intégrée depuis le nouveau découpage territorial de 2015 -issu de la réforme constitutionnelle de 2011-, à la grande région de Casablanca-Settat. Elle regroupe 10 % de la population du Maroc en 2014 avec 3,36 millions d'habitants soit 80 % de la population de l'ensemble métropolitain (**Annexe 4**). Grâce à son histoire, sa situation géographique et son ouverture sur le monde, la ville de Casablanca a connu un essor fulgurant et est devenue la capitale économique du Maroc.

Nos recherches portent sur l'ensemble de l'agglomération de Casablanca qui correspond à l'ancienne région du Grand Casablanca aujourd'hui disparue (**Figure 36**) afin de disposer d'un contraste urbain-rural. Elle est composée deux préfectures à dominante urbaine, la Préfecture de Casablanca et celle de Mohammédia et de deux provinces à dominante rurale, Nouaceur et Médiouna.

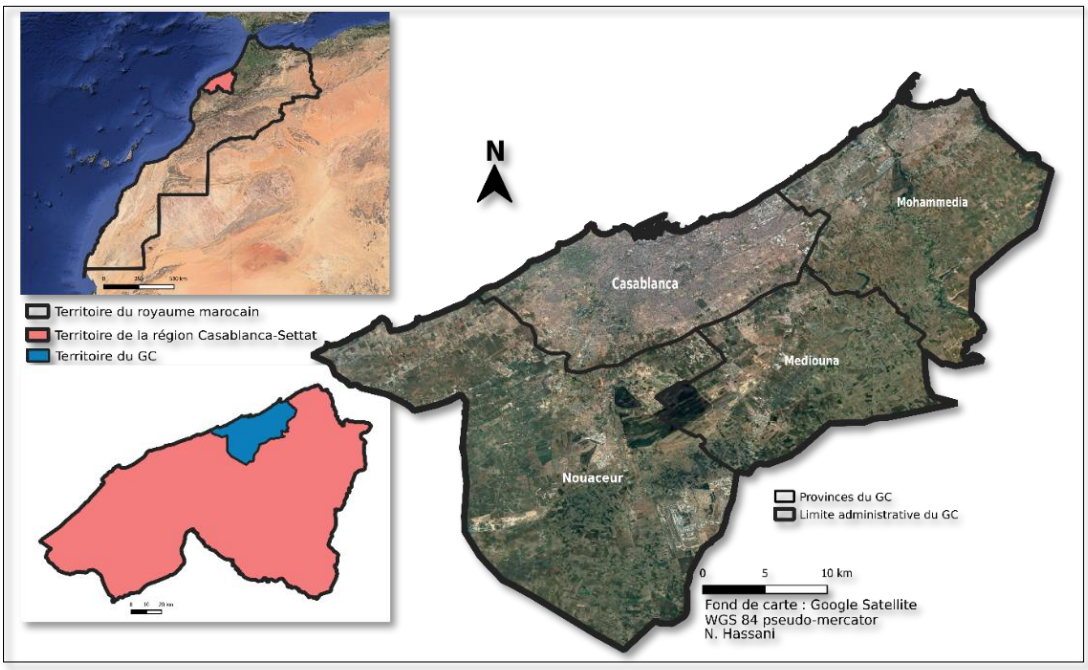


Figure 36 : Situation du Grand Casablanca à l'échelle nationale et à l'échelle régionale (découpage en provinces).

Regroupant 33 communes, le Grand Casablanca s'organise autour d'un cœur métropolitain composé de 16 arrondissements (ou communes urbaines). La densité de population s'élève à 15 000 hab/km², mais dépasse les 40 000 hab/km² dans certains arrondissements très peuplés comme Al Fida, Mers Sultan et Ben M'sick (**Annexe 3**).

3.1.2.2. Une croissance démographique exceptionnelle, soutenue par l'exode rural

Du fait de son exceptionnelle croissance démographique, la population de Casablanca a été multipliée par 100 entre 1907 et 1982 passant de 25 000 à 2 500 000 habitants pour accueillir aujourd'hui 10 % de la population marocaine. Cette explosion démographique est avant tout due aux flux migratoires puisqu'une population nombreuse vient à la recherche d'opportunités économiques. Ces flux migratoires tendent aujourd'hui vers un équilibre entre les « ruraux » et les « urbains ». La ville accapare néanmoins à elle seule près du tiers de la masse globale de ceux qui ont choisi de se fixer dans une ville de 100 000 habitants et demeure le pôle privilégié pour l'exode rural à l'échelle nationale. Ce sont les provinces du sud qui alimentent essentiellement ces flux migratoires (75 % contre 25 % de la zone nord).

Cette croissance démographique a induit un développement anarchique et incontrôlé du tissu urbain. Les premiers bidonvilles (Ben M'sick et Carrières Centrales) font leur apparition au fur et à mesure que les déséquilibres démographiques et les contradictions économiques s'accentuent entre la métropole atlantique et les campagnes environnantes. Les quartiers d'habitat insalubre se multiplient et s'étendent rapidement à l'espace rural et au mépris des règles d'utilisation du sol définies par les plans d'urbanisme. Dans les zones périphériques comme dans les centres urbains, l'ampleur du mouvement d'urbanisation est manifeste. Il impose à la métropole de trouver des solutions pour absorber et intégrer les nouveaux Casablancais (Hassani *et al.*, 2021a).

À l'heure actuelle, le front d'urbanisation casablancais est constitué par un réseau compact de quartiers populaires, en forme de demi-cercle, allant des hauteurs de Hay El Oulfa jusqu'aux limites d'Aïn Harrouda en passant par Lissasfa, Sidi Maârouf, Salmia et la nouvelle cité Moulay Rachid (**Annexe 3**). Les noyaux anciens, en particulier la médina, Derb Ghallef et Derb Sultan connaissent une densification accrue et une dégradation accélérée des conditions d'habitat et d'existence de leur population. En effet, les besoins en logement et en équipement s'accumulent et le déficit en logement est évalué à près d'un million et demi sur le plan national et à plus de 200 000 logements à Casablanca où les besoins en terrain sont estimés à 7 000 ha. C'est dire l'ampleur de l'entreprise et l'importance de la propriété foncière urbaine comme enjeu économique, social et politique (Zyani, 1986).

Cette explosion démographique s'explique en grande partie par le dynamisme économique de la métropole : Casablanca représente aujourd'hui le moteur du développement économique et de la compétitivité du Maroc et représente 50 % du PIB national. En effet, la métropole dispose d'une structure industrielle diversifiée contrairement aux autres villes du Maroc. Elle rassemble 53 % des actifs nationaux du secteur, monopolise la majorité des industries de haute technologie, 85 % de l'industrie chimique, 75 % des industries mécaniques et électriques et plus de la moitié de l'industrie du textile et de l'agro-alimentaire (Joumady, 1999). Ce dynamisme industriel repose principalement sur le port maritime, qui est le plus grand du pays, auquel s'ajoute le secteur secondaire qui représente un poids est très important dans l'axe littoral atlantique central.

3.2. Milieu physique

3.2.1. Cadre topographique

3.2.1.1. Le territoire de l'EMM

Situé à l'est du Bassin parisien, le territoire de l'EEM est constitué d'une multiplicité d'ambiances paysagères. Une bonne partie de son territoire est occupée par la vallée de la Moselle dont le fond est situé à ~150 m d'altitude et qui est marquée par quelques buttes en centre-ville et au Sablon qui concentre l'essentiel du tissu urbain dense et des infrastructures de transport (**Figure 37**). Le nord et le sud-ouest du territoire sont jalonnés par un ensemble d'étangs formant de vastes zones humides, entrecoupées de trois îles habitées dont les bras de la Moselle dessinent les contours : Chambière et les deux îles du Saulcy. Ces îles sont reliées entre elles par de nombreux ponts dont certains datent du Moyen Âge.

Entre les communes de Metz et de Longeville-lès-Metz, se trouve un vaste bassin artificiel créé dans les années 1970, appelé « Plan d'eau » entouré de 7,2 hectares de prairies parcourues de promenades. Cet espace constitue l'un des plus importants espaces verts de l'agglomération et accueille de nombreuses activités de loisir (port de plaisance, plage, etc.).

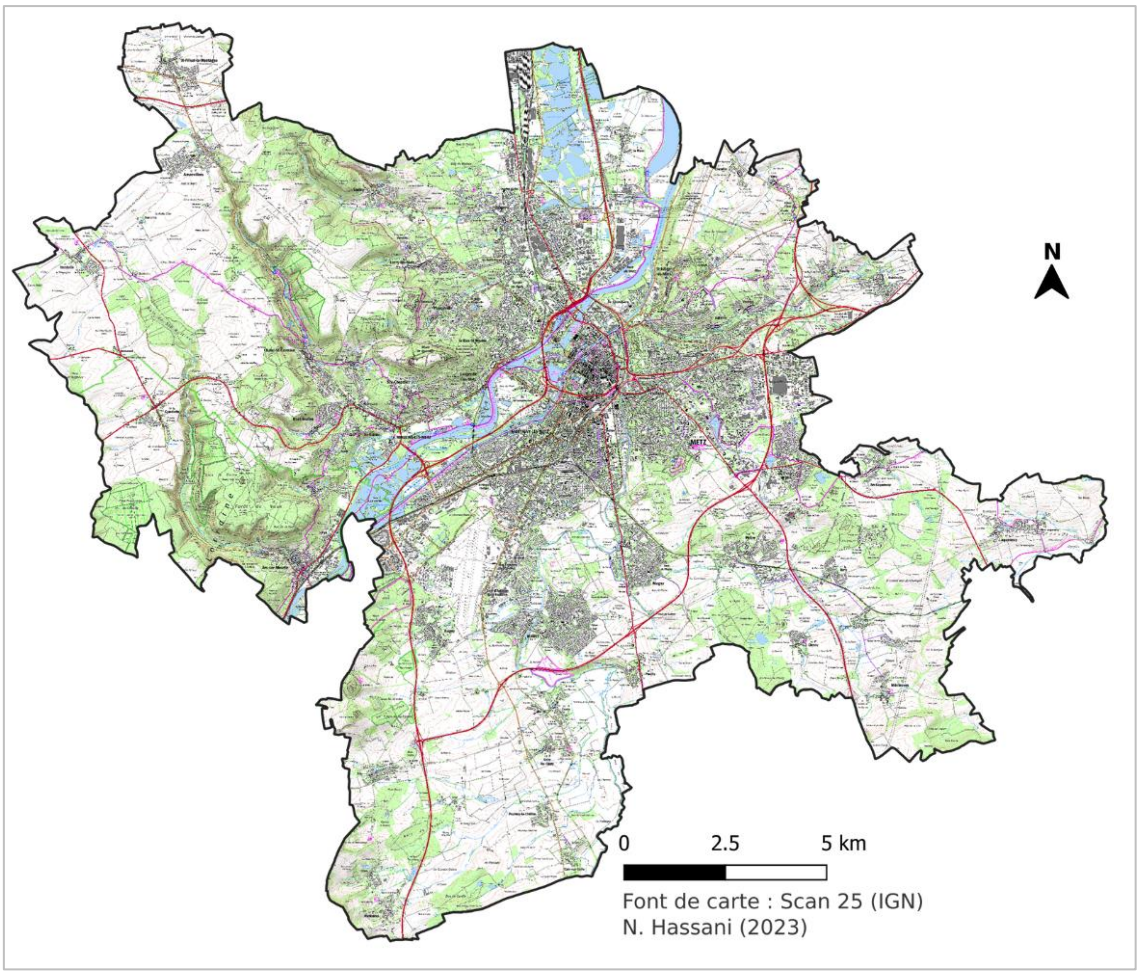


Figure 37 : Extrait de la dalle Scan 25 de l'IGN décrivant le territoire de l'EMM. *NB* : la légende est disponible dans la documentation de la BD Scan 25.

Les quartiers à l'est de la ville sont situés en hauteur sur les contreforts du plateau lorrain. L'aire urbaine est dominée, au nord-ouest et à l'ouest, par trois plateaux formant une partie des coteaux de la Moselle, dont le point haut est le mont Saint-Quentin, véritable poumon vert de l'agglomération, qui culmine à 358 mètres. La partie ouest des côtes de Moselle est caractérisée par de vastes étendues agricoles à vocation céréalière, entrecoupées de quelques boisements (pays-haut). Le sud-est est occupé par le plateau lorrain, versant Rhin, à vocation agricole.

De manière schématique, cinq grandes unités paysagères composent le territoire de l'Eurométropole (**Figure 38**) :

- La vallée de la Moselle, regroupant l'essentiel des zones urbaines.
- La vallée de la Seille, consacrée principalement à l'agriculture.
- Les côtes de Moselle : concentrant une bonne partie des zones végétales et forestières de la métropole.
- Le pays-haut, vaste plateau agricole à vocation céréalière, ponctué de quelques zones boisées.
- Le plateau lorrain versant Rhin, également marqué par l'agriculture sur de grandes surfaces.

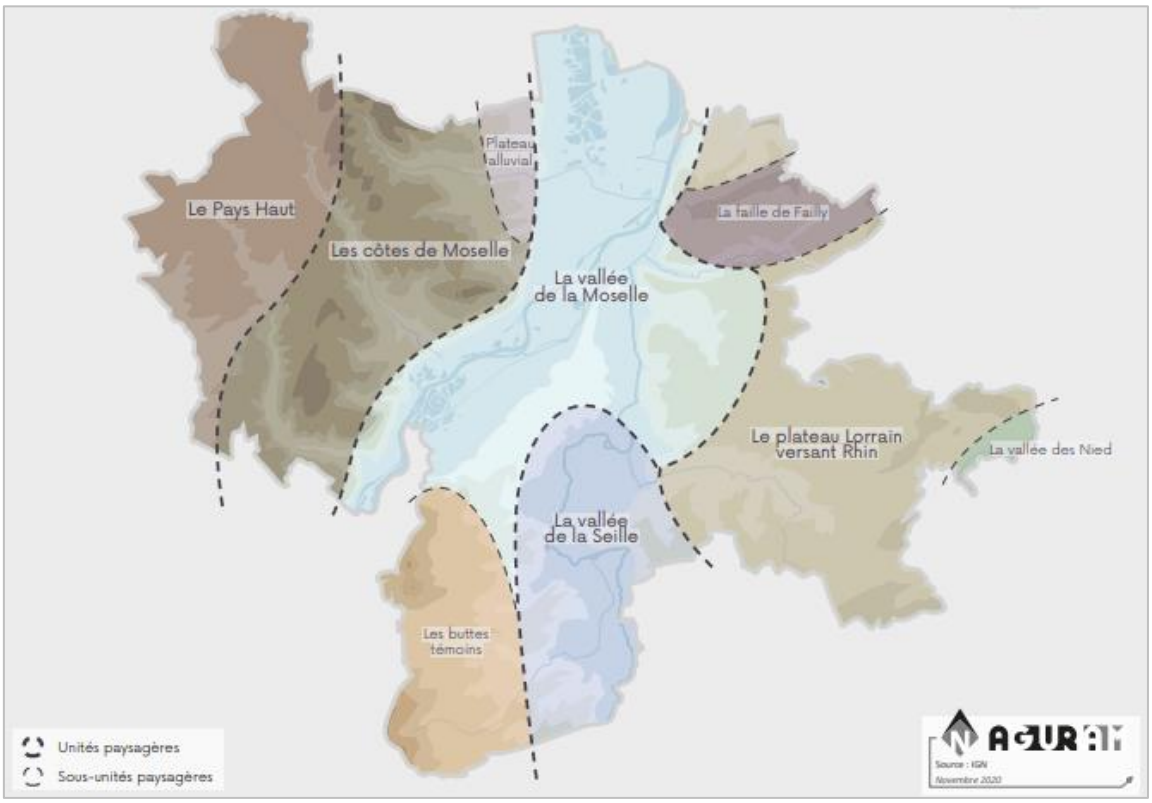


Figure 38 : Les grandes unités paysagères du territoire l'EMM (AGURAM, 2020b).

3.2.1.2. Le territoire du Grand Casablanca

Le cadre topographique du GC est très différent de celui de l'EMM. Le site de Casablanca appartient historiquement au bassin de la Chaouia, vaste plaine à vocation agricole du centre-ouest du Maroc. Cela se traduit dans son profil altimétrique qui est relativement uniforme

puisque la région se présente comme une grande plaine ondulée dont le relief est très peu accidenté. Celui-ci se compose de plaines et de plateaux avec de petites buttes éparpillées dans l'espace limitrophe de la ville de Casablanca. De l'Océan Atlantique qui la borde au nord, cette plaine s'élève progressivement vers Médiouna et Oulad Saleh au sud, à raison de 2 degrés de pente tous les 100 mètres en moyenne. La zone littorale laisse ensuite place à la plaine de Berrechid, tout aussi plate et qui est parsemée de petites dépressions circulaires, souvent humides (**Figure 39**). Les cours d'eau qui drainent la région sont des rivières de faible débit s'écoulant perpendiculairement à la côte en formant des vallées d'oueds qui présentent des types très différents : doux sur la partie ouest de la région (l'Oued Merzeg et l'Oued Bouskoura), très encaissés à l'est (l'Oued N'fifikh et l'Oued Maleh qui s'écoulent près de la ville de Mohamm'dia) et marquant le paysage par une occupation du sol originale (forêts ou zones naturelles ou agricoles irriguées sur les flancs).

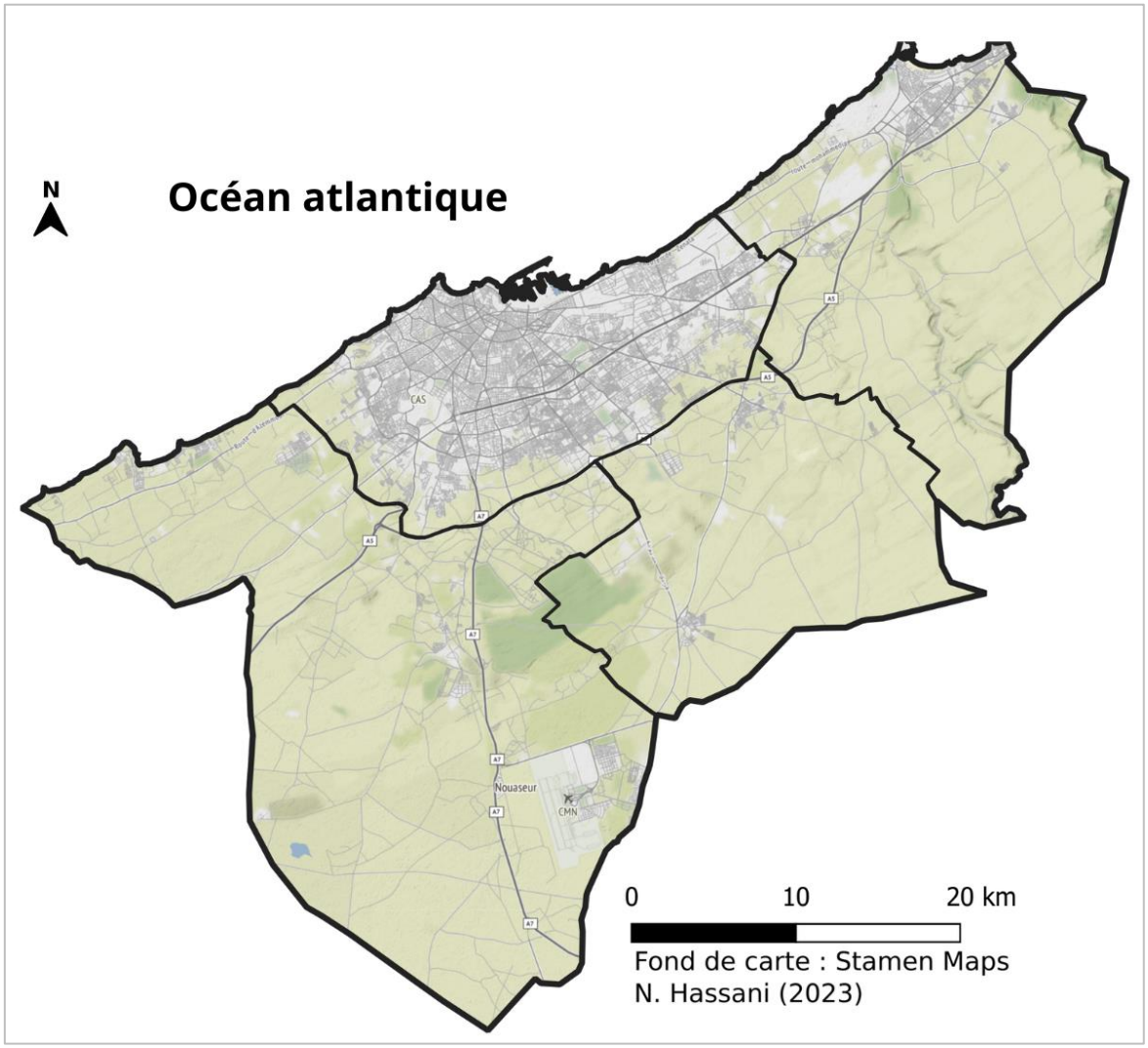


Figure 39 : Description du territoire du Grand Casablanca (source : fond de carte QGIS).

La forêt ne couvre qu'environ 4 000 ha dans la région du Grand Casablanca, soit moins de 4 % du territoire, ce qui représente environ 10 m^2 par habitant. Les principales zones boisées sont la forêt de Bouskoura (3 000 ha), la forêt de l'Oued N'fifikh (270 ha), la forêt d'Oued El

Malleh (340 ha) et la forêt de Krouta (210 ha). Le reste des espaces boisés est réparti sur les dunes côtières au niveau de Dar Bouazza/Tamaris (130 ha) et Sidi Abderrahmane (50 ha).

3.2.1.3. La couverture du sol des deux terrains étudiés

Les parts d'occupation du sol des deux terrains d'étude sont différentes (**Figure 41** et **Figure 42**) : le territoire de l'EMM est dominé par le couvert forestier (18,1 %) et les zones agricoles (64,1 %), tandis que celui du GC est occupé majoritairement par des zones agricoles (59,6 %) et des zones bâties (30,9 %). On constate d'après la figure 40 que les % des zones bâties et artificielles du GC sont deux fois plus élevés celles de Metz. Enfin, le GC est très peu pourvu en surfaces en eau qui représentent tout de même 2,5 % du territoire de l'EMM.

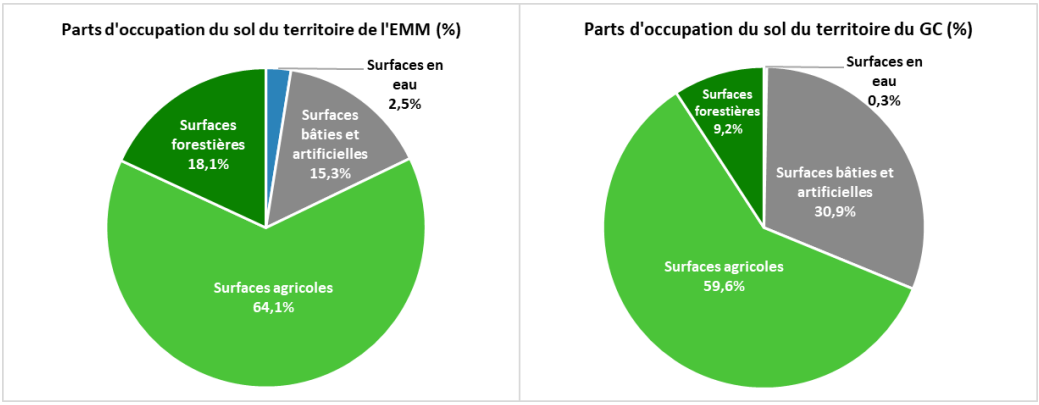


Figure 40 : Parts d'occupation du sol dans les deux terrains d'étude.

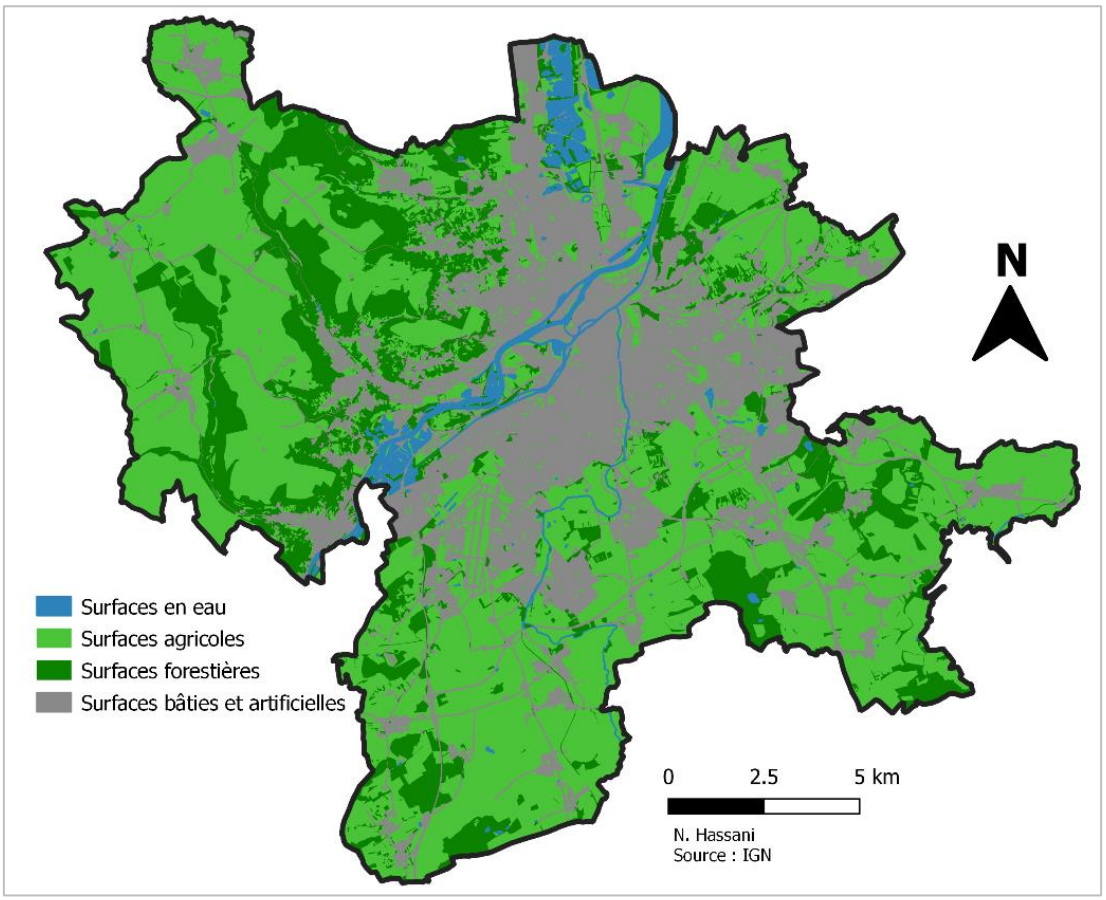


Figure 41 : Carte d'occupation du sol du territoire de l'EMM (données : BD TOPO® (2019)).

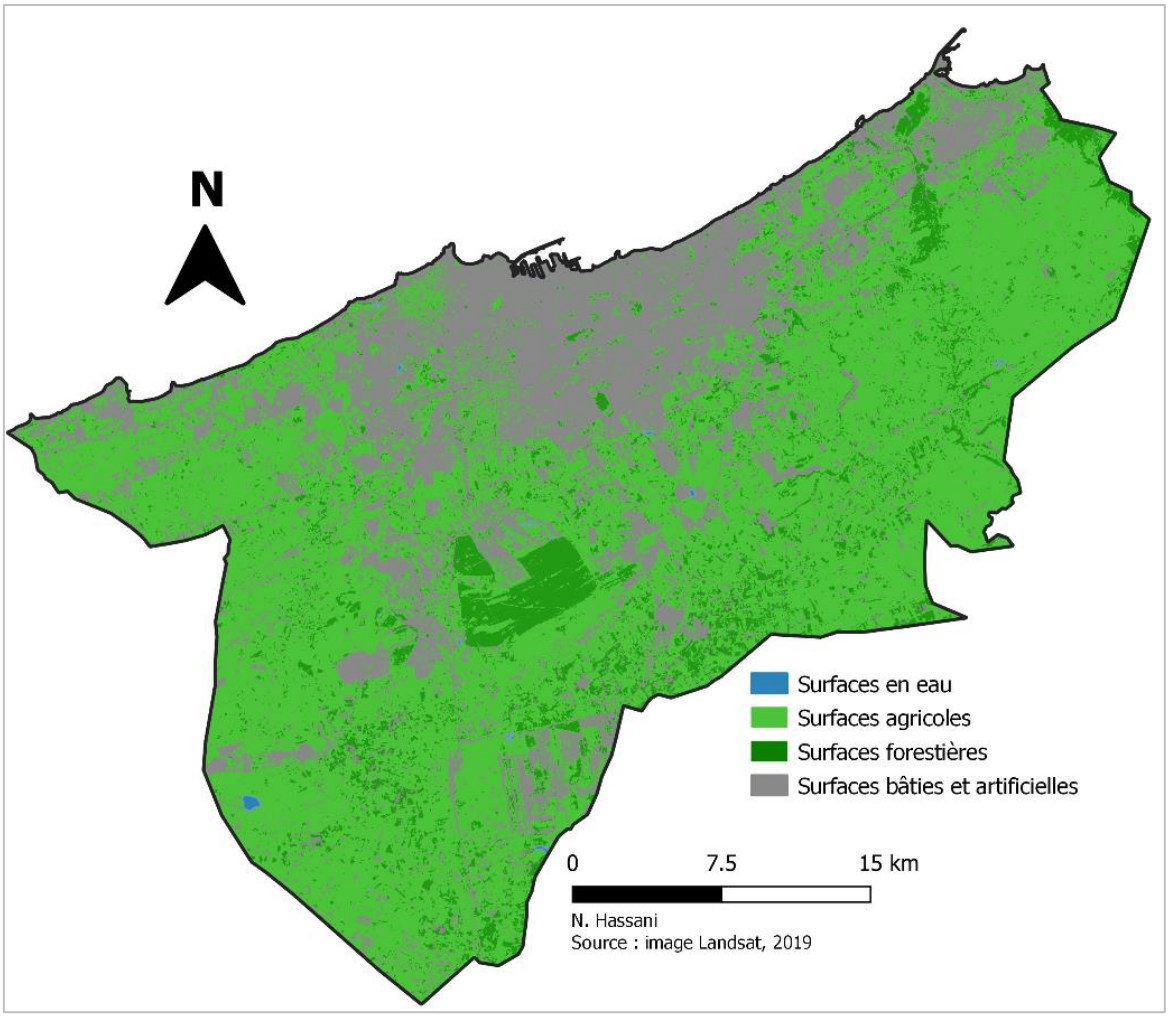


Figure 42 : Carte de l'occupation du sol du territoire du GC (données : *Landsat* 2019).

3.2.2. Analyse comparée des principaux éléments du climat

Dans le but de qualifier le climat de chaque territoire, nous proposons, dans cette section, une analyse de quelques éléments du climat. Cette analyse repose en général sur des données « d'aéroport » provenant pour le GC, de la station synoptique de *Casablanca-Anfa* (altitude : 62 m ; 33°57' N, 7°67' O) située à environ 3 km de la côte atlantique ; et pour l'EMM, de la station automatique de *Metz-Frescaty* (altitude : 192 m ; 49°04' N ; 6°07' E (**Annexe 5**)).

Précisons que si les données disponibles pour qualifier le climat messin sont officielles et fiables, celles utilisées pour qualifier le climat casablancais le sont beaucoup moins. Cela tient au fait qu'à notre connaissance, la Direction Générale de la Météorologie du Maroc ne publie pas gratuitement et en accès libre des fiches climatologiques pour son réseau d'observation synoptique sur des périodes de référence de 30 ans, qualifiées de normale climatique, contrairement à Météo-France. Par conséquent, c'est en recoupant différentes sources documentaires (articles scientifiques[14], thèses de doctorat[15], sites internet[16]) que nous avons pu

[14] Lachgar et al., 2022
[15] Nfaoui, 2004
[16] infoclimat.fr, https://climexp.knmi.nl, ogimet.com, https://worldweather.wmo.int/

collecter des données climatiques pour la ville de Casablanca, vérifier la cohérence des sources puis décrire et qualifier son climat. Les données relatives au site de Metz sont tirées de la fiche climatologique de la station météorologique de *Metz-Frescaty* (située en périphérie de la ville de Metz sur la commune d'Augny) récemment actualisée par Météo-France dans le cadre de la production des nouvelles normales climatiques 1991-2020[17].

3.2.2.1. La classification des climats selon Köppen-Geiger

L'application de l'algorithme de Köppen-Geiger (Köppen, 1900 ; Geiger, 1954) aux données de précipitations et de température permet de dessiner une mosaïque climatique du globe et d'identifier le climat propre à chaque territoire. Selon la mosaïque la plus récente à notre connaissance (Beck *et al.*, 2018b), le climat casablancais est de type méditerranéen avec pour caractéristiques d'être tempéré et de posséder un été chaud et sec (notation Csa) (**Figure 43a**). Le climat messin, quant à lui, est de type tempéré à été frais sans saison sèche (notation Cfb) (**Figure 43b**).

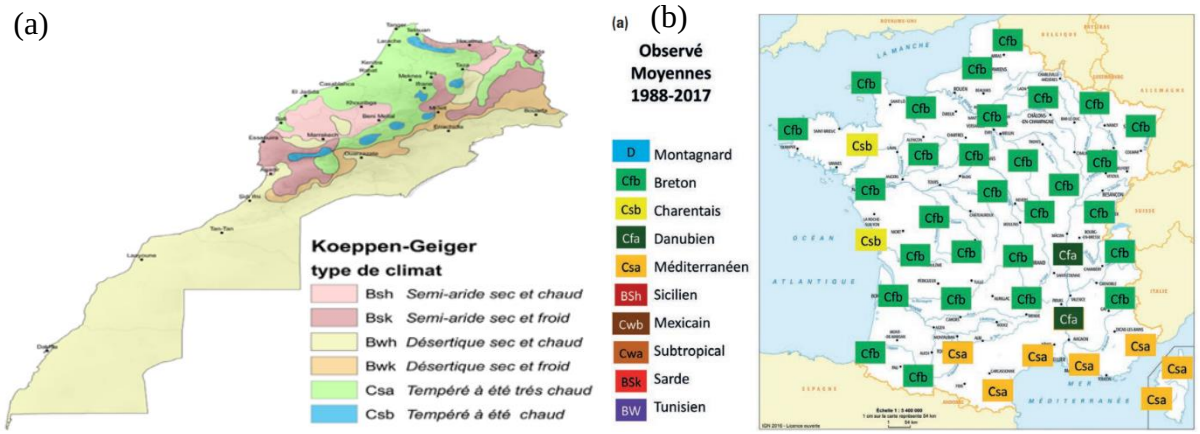


Figure 43 : (a) Classification de Köppen-Geiger appliqué au Maroc (1981-2010) (DGMM, 2021) et (b) à la France (1988-2017) (Dubreuil, 2022).

3.2.2.2. Les hauteurs de précipitations

A Casablanca, la hauteur annuelle de précipitations se situe autour de 420 mm. La saison sèche (au sens de l'indice de Gaussen P < 2T) dure 6 mois. Elle débute généralement en mai et s'achève en octobre (**Figure 44**). Le maximum pluviométrique mensuel (78 mm) s'observe habituellement au début de l'hiver météorologique (*i.e.* en décembre) et le minimum au mois d'août (<1 mm). A Metz, la hauteur annuelle de précipitations s'élève à 713,5 mm. La plus faible hauteur mensuelle de précipitations y est enregistrée au mois d'avril (45,1 mm), et la plus forte en décembre (76,5 mm) (**Figure 45**). Les précipitations sont bien réparties sur l'année (entre 9 et 11,8 jours par mois avec au moins 1 mm, soit 116,6 jours de précipitations par an) et il n'y a pas de mois secs.

[17] https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/de-nouvelles-normales-pour-qualifier-le-climat-en-france

3.2.2.3. La température de l'air

Les deux villes se caractérisent par un régime thermique « unimodal » centré sur l'été météorologique (maximum mensuel d'août pour Casablanca et de juillet pour Metz) (**Figure 44** et **Figure 45**). Le mois de janvier est le plus frais pour les deux villes mais avec un écart de température important (+10 °C en faveur de Casablanca où les hivers sont beaucoup plus doux qu'à Metz).

Pour Casablanca, la température annuelle est d'environ 18,6 °C et l'amplitude thermique annuelle (AMTA) vaut approximativement 10,4 °C (écart entre la température mensuelle d'août (23,2 °C) et celle de janvier (12,8 °C)). Dans le cas de Metz, la température annuelle est de 11,1°C contre 10,7 °C pour la normale 1981-2010. Entre les deux normales, c'est la température maximale annuelle qui augmente le plus avec +0,6 °C (15,6 *vs* 15) contre +0,2 °C (6,6 *vs* 6,4) pour la température minimale annuelle. L'AMTA vaut 17,4 °C (écart entre la température mensuelle de juillet (20,1 °C) et celle de janvier (2,7 °C)) (**Figure 46**).

Les courbes de température de Casablanca-Anfa, Fès-Sais et *Metz-Frescaty* tracées sur la figure 46 montrent bien l'effet « adoucissant » de l'océan Atlantique (réduction de l'AMTA). Cependant, compte tenu des données manquantes et de quelques valeurs douteuses dans les séries de température et de précipitations, les moyennes mensuelles sont indicatives. Les données de température issues de la réanalyse ERA5 0,25° Afrique extraites au point de grille le plus proche de Casablanca pour la période 1991-2020 à partir du portail https://climexp.knmi.nl/ n'ont pas été utilisées, car elles présentent un biais chaud de +3 à +3,5°C en température maximale (Tx) pour les mois d'été par rapport aux données stationnelles trouvées dans la littérature scientifique (voir par exemple Lachgar *et al.* (2022)).

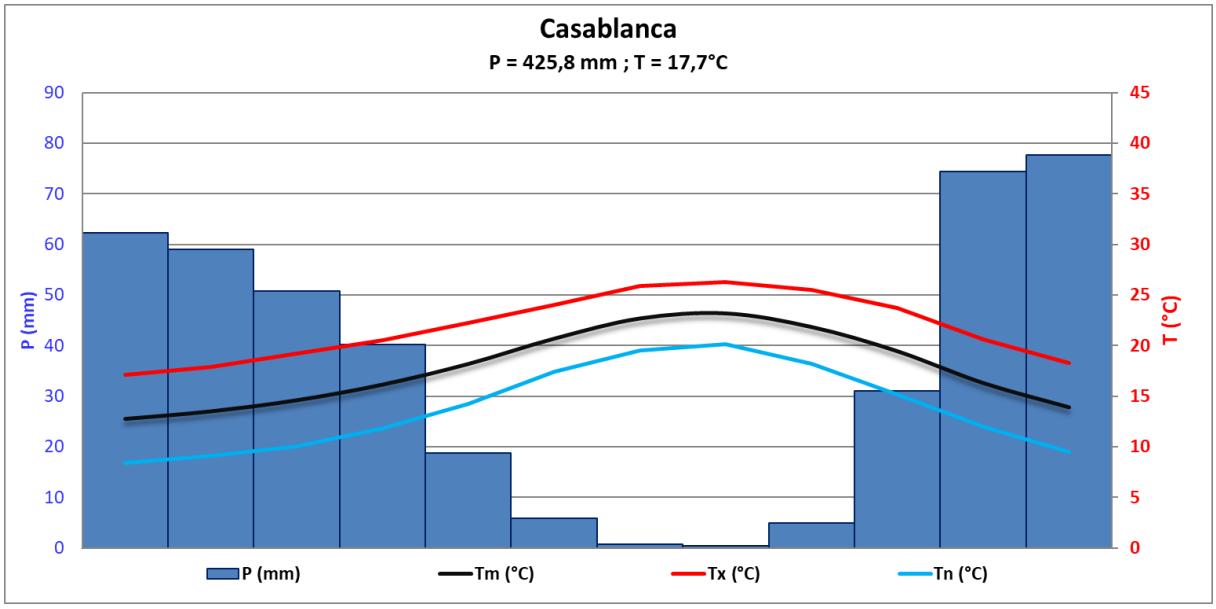


Figure 44 : Diagramme ombro-thermique de la ville de Casablanca établi à partir de données provenant du *Hong Kong National Observatory* (https://worldweather.wmo.int/) mises à disposition dans le cadre de la résolution 40 de la WMO. Tm : température moyenne, Tx : température maximale, Tn : température minimale.

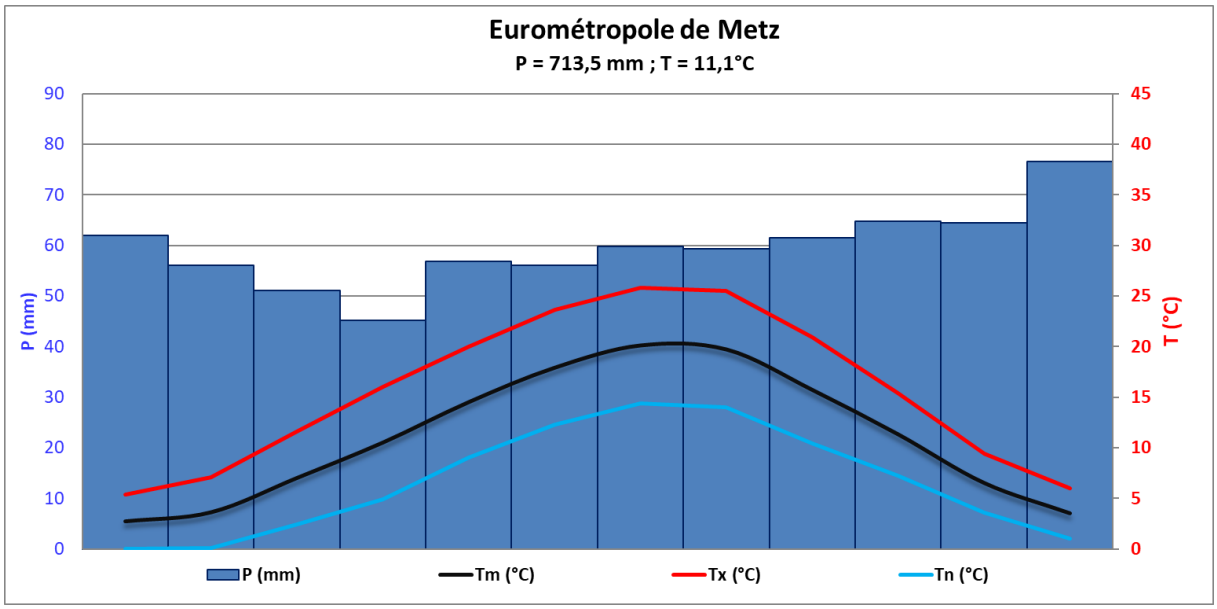


Figure 45 : Diagramme ombro-thermique établi à partir des données de la station de Metz-Frescaty. Normale climatique 1991-2020 (source des données : https://donneespubliques.meteofrance.fr/).

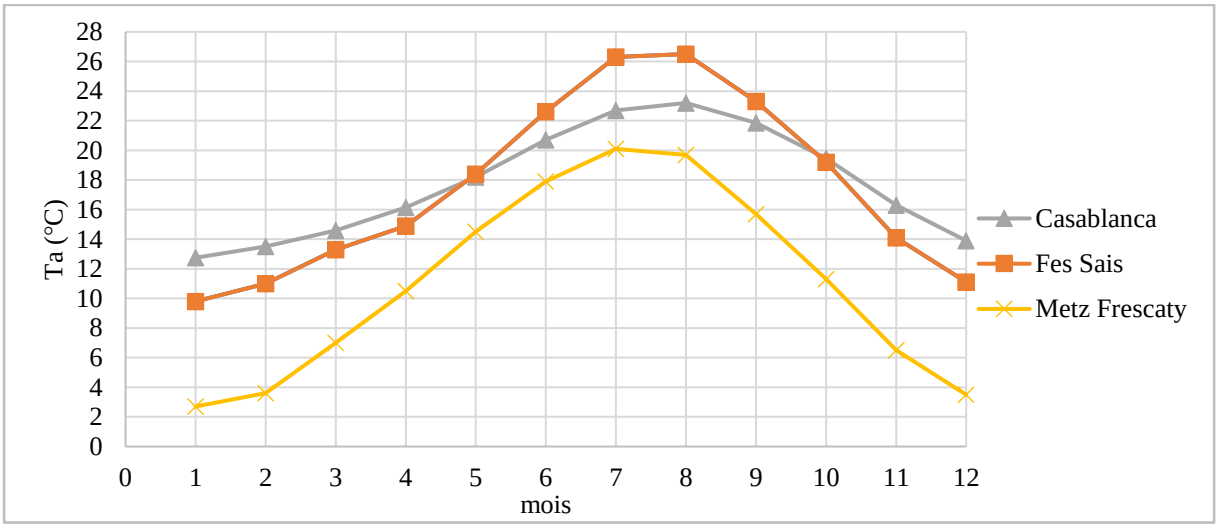


Figure 46 : Températures moyennes mensuelles des stations Casablanca-Anfa, Fès-Sais (données du site infoclimat.fr) et Metz-Frescaty. *NB* : Les périodes de référence toutes centrées entre 2005 et 2010 varient d'une station à l'autre, mais leur longueur (>15 ans) est suffisante pour que les courbes puissent être considérées comme robustes.

Au chapitre des températures extrêmes, on relève qu'à Metz la température la plus élevée date du 25 juillet 2019 (39,7 °C), record de chaleur absolu qui « détrône » celui du 8 août 2003 (39,5 °C). Quel que soit le mois considéré, toutes les températures les plus basses datent du XX^{e} siècle à l'exception de la température la plus basse du mois de mars (-15,3 °C) observée le 1er mars 2005. A Casablanca, sur la période 1991-2020, la température la plus élevée serait de 40 °C (valeur enregistrée le 15 septembre 1992), la température la plus basse de -2,3 °C (record daté du 19 décembre 1998).

3.2.2.4. L'aridité

La combinaison des hauteurs de précipitations et des températures annuelles permet de calculer, par exemple, la valeur de l'indice d'aridité de De Martonne à l'échelle des deux voire des trois dernières décennies selon les données disponibles. On obtient une valeur de 14,7 pour le Grand Casablanca (climat qualifié de semi-aride) contre une valeur de 33 pour l'EMM (climat qualifié d'humide), ce qui souligne le contraste climatique existant entre ces deux métropoles.

3.2.2.5. La durée d'insolation

D'après la carte d'insolation dressée par Nfaoui (2004) page 49, la durée d'insolation annuelle à Casablanca s'élève à 2900 heures annuelles (période 1981-1990[18]). Cette donnée est cohérente avec les données mensuelles fournies par ogimet.com[19] (**Figure 47**) qui, une fois cumulées, donnent un total moyen annuel de 3057 heures sur la période 1996-2020. L'insolation mensuelle est maximale en août avec un total de 305 heures et minimale en décembre avec un total de 204 heures.

Pour l'EMM, la station de référence *Metz-Frescaty* ne fournit pas de données relatives à l'insolation. Nous nous référons dès lors aux données fournies par la fiche climatologique de la station de l'aéroport Metz-Nancy-Lorraine (**Annexe 6**) située à environ 15 km à vol d'oiseau au SSE du centre-ville de Metz (altitude : 260 m ; 48°58' N, 6°14' E) d'après laquelle, l'insolation annuelle se situe autour de 1 832,6 heures. Elle atteint son maximum en juillet (257,8 heures) et son minimum en décembre avec 46,2 heures (**Figure 47**). Les distributions mensuelles d'insolation sont *grosso modo* parallèles d'avril à septembre, l'écart relatif entre les deux villes étant plus prononcé au cours de l'automne et surtout de l'hiver (**Figure 47**). En raison de sa situation géographique, fortement influencée par l'anticyclone subtropical des Açores, l'ambiance est en moyenne beaucoup plus radiative à Casablanca qu'à Metz.

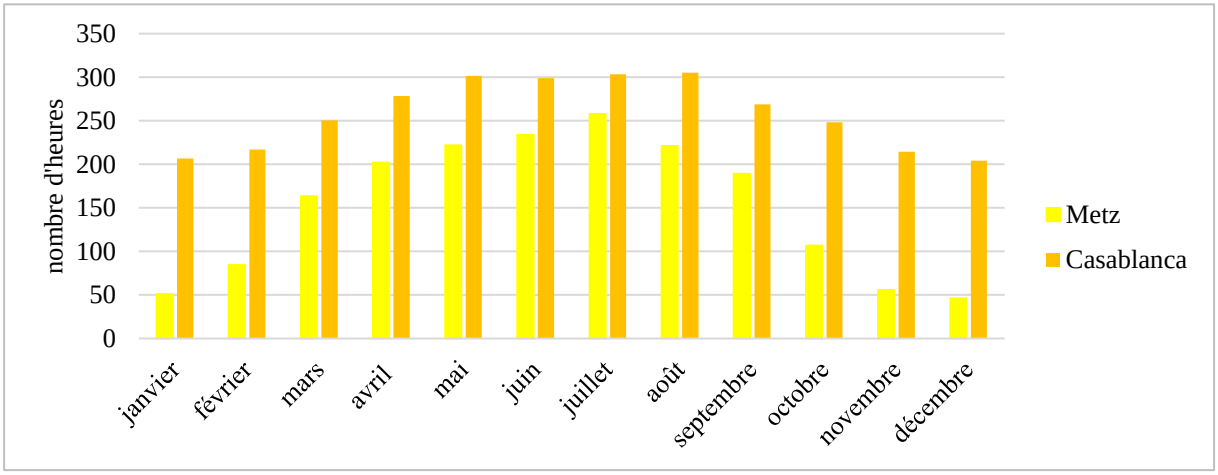


Figure 47 : Durées d'insolation mensuelle des stations de Casablanca-Anfa (1996-2018) et de Metz-Nancy-Lorraine (1991-2020) (source des données : Nfaoui (2004), ogimet.com, Météo-France).

[18] Période de référence incertaine

[19] Ogimet : Service d'information météorologique qui utilise des données accessibles au public, issues principalement de l'agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA), ogimet.com

3.2.2.6. Le vent

a) La force du vent

Les données sur le vent ont été difficiles à collecter pour Casablanca. Là encore, c'est au prix d'une recherche longue et fastidieuse que nous avons réussi à identifier des données anémométriques crédibles pour cette ville. Celles-ci restent cependant disparates. Les données mensuelles de vitesse du vent de la figure 48 sont tirées de Nfaoui (2004) page 45. La série est courte et n'est pas « tuilée » à celle de Metz, ce qui rend la comparaison particulièrement délicate entre les deux terrains d'étude. Les données sont néanmoins cohérentes avec celles de la station d'Essouira située sur la frange atlantique (31°51' N , 9°76 'E) publiées dans Allouhi *et al.* (2017).

Ces auteurs indiquent une vitesse moyenne mensuelle située entre 5 et 7 m/s tout au long de l'année à 50 m d'altitude sur la période 2011-2015 avec un maximum en août et un minimum en décembre. D'après les données de Nfaoui (2004) la moyenne annuelle se situe entre 3 et 4m/s, ce qui là encore, est cohérent avec la carte nationale produite par Allouhi *et al.* (2017). A Metz, la moyenne annuelle est plus faible (2,8 m/s). Les vents semblent donc plus forts à Casablanca qu'à Metz, ce qui est cohérent avec leur situation géographique respective (distance à la mer d'environ 250 km à vol d'oiseau pour Metz et situation côtière pour Casablanca).

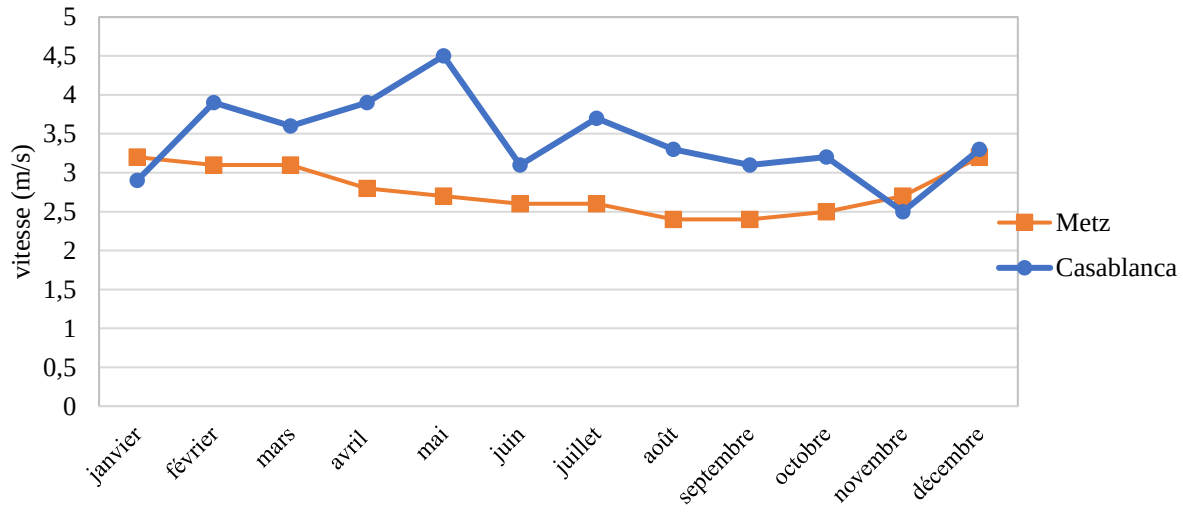


Figure 48 : Vitesses de vent mensuelles à Casablanca (1978-1982) et *Metz-Frescaty* (1991-2020) (source : Nfaoui (2004) et Météo-France).

b) Roses des vents annuels

La rose des vents présentée sur la figure 49 est extraite de Raihani et al. (2012). Elle a été construite à partir de mesures effectuées en 2004 à 8 m du sol dans la ville de Mohammedia qui fait partie du Grand Casablanca. D'après ces données, les vents viennent préférentiellement des directions NNE avec une fréquence dépassant 50 %. Les directions SSO arrivent ensuite. Ce schéma se répète en 2005 et 2006. Les études de Allouhi *et al.* (2017) et Benazzouz *et al.* (2021) respectivement fondées sur des données *in situ* et des données diffusiométriques, confirment cette tendance (voir les sites d'Essaouira et de Safi) et montrent que les vents de secteur NNE

sont aussi les plus puissants avec une force pouvant dépasser 12 m/s (**Figure 49a**). La physionomie moyenne de la rose des vents semble assez stable d'une saison à l'autre (Raihani *et al.*, 2012).

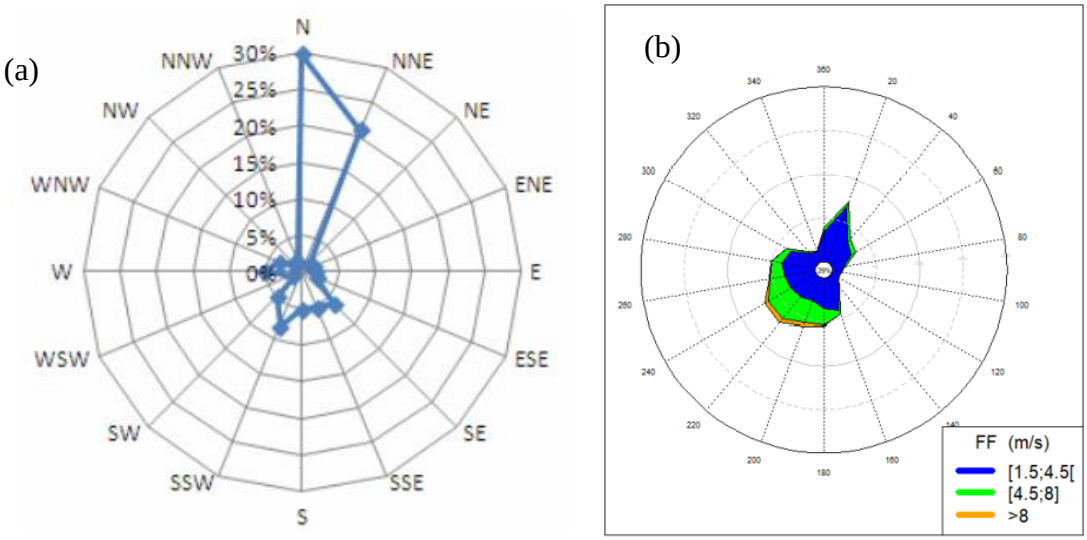


Figure 49 : Roses des vents annuelles à (a) Mohammédia (année 2004) et (b) *Metz-Frescaty* (normale 1961-1990) (source : Allouhi *et al.* (2017) (vent à 8 m) ; Jougla et Hidalgo (2018) (vent à 10 m)).

Les données font malheureusement défaut pour caractériser le régime de la brise terre-mer sur le territoire casablancais. On sait qu'il s'agit d'un phénomène de beau temps, que l'on suppose fréquent l'été.

D'après les données compilées par Leonard et Rossignol (1997) et Jougla et Hidalgo (2018), la rose des vents annuelle de *Metz-Frescaty* montre que les vents dominants viennent de l'OSO (30 %) suivis par des secteurs continentaux (NNE) représentant 16 % des directions. Ces vents contribuent à imprimer au climat messin son influence continentale (**Figure 49b**).

3.2.3. Les changements climatiques déjà « observables »

Nous nous limiterons dans cette section aux paramètres météorologiques communs aux deux terrains d'étude.

3.2.3.1. Evolution récente de la température : tendance décennale et vagues de chaleur

Le réchauffement climatique au cours des quatre dernières décennies est un signal fort sur les deux terrains étudiés. Les observations climatiques qui ont été faites au Maroc font ressortir que les climats de type aride et semi-aride progressent vers le Nord, au détriment des zones classifiées comme semi-humides ou humides (**Figure 50**) (Woillez, 2019). Le changement climatique est donc déjà discernable au Maroc au cours des 30 dernières années, avec un climat globalement plus chaud et plus sec, accompagné dans certaines régions d'une augmentation des épisodes de pluies intenses. La tendance est même nettement supérieure à la moyenne globale, avec +0.42 °C/décennie en moyenne depuis 1990, contre +0.28 °C/décennie sur l'ensemble des

continents. Pour la région du GC, la base de connaissances la plus récente et celle de Driouech *et al.* (2021). Elle fait état d'un réchauffement de +0,32 °C/décennie pour la période 1984-2016. Cette tendance est conforme à l'anomalie de température positive et statistiquement significative observée à l'échelle nationale bien qu'un peu atténuée par rapport à des stations plus continentales (**Figure 51**).

Le signal est de même intensité et de même signe sur le territoire de l'EMM (environ +0,4°C/décennie (**Figure 52**). Driouech *et al.* (2021) détectent également une tendance positive et significative sur les températures les plus élevées (*warm days)* et sur les nuits les plus chaudes (*warm nights*) et concluent que le réchauffement annuel est surtout imputable à la saison chaude. Cette tendance se vérifie également pour l'EMM où les évolutions saisonnières traduisent une accentuation des contrastes saisonniers, la saison chaude se réchauffant plus que la saison froide. Sur la période allant de 1959 à 2009, une augmentation du nombre de journées chaudes de l'ordre de 4 à 5 jours par décennie a été observée. Les années 2003, 2018 et 2020 sont les années ayant connu le plus grand nombre de journées chaudes. En particulier, l'année 2018 est considérée comme une année record avec plus de 80 journées chaudes observées dans la région Lorraine (Météo-France).

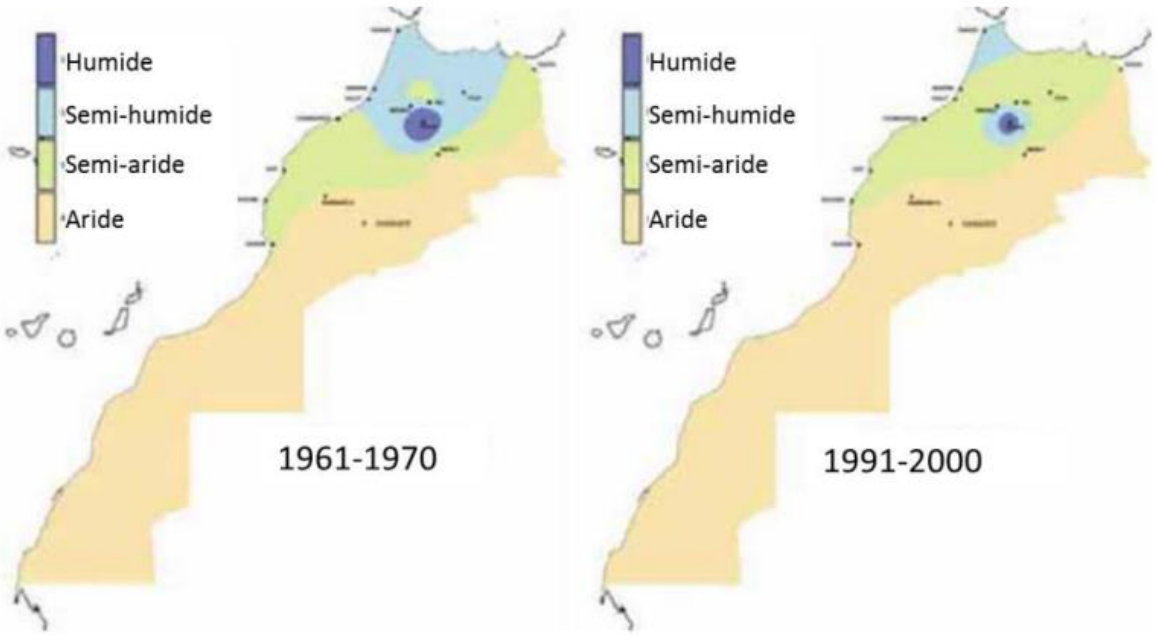


Figure 50 : Evolution des types de climat au Maroc durant les périodes 1961-1970 et 1991-2000, définis selon l'indice d'aridité de De Martonne (Driouech *et al.*, 2010 cité par Woillez, 2019).

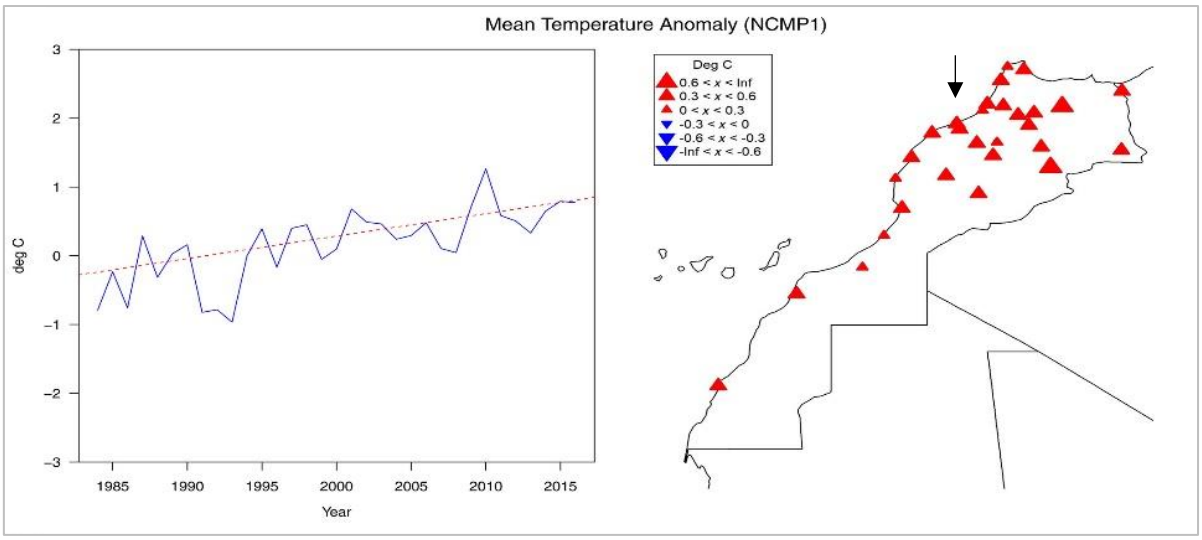


Figure 51 : Anomalies de température annuelle sur la période 1984-2016 au Maroc et tendance au réchauffement à Casablanca-Anfa (flèche noire). Les triangles rouges indiquent une tendance positive significative (seuil de 5 %) (source des données: Driouech *et al.* (2021)).

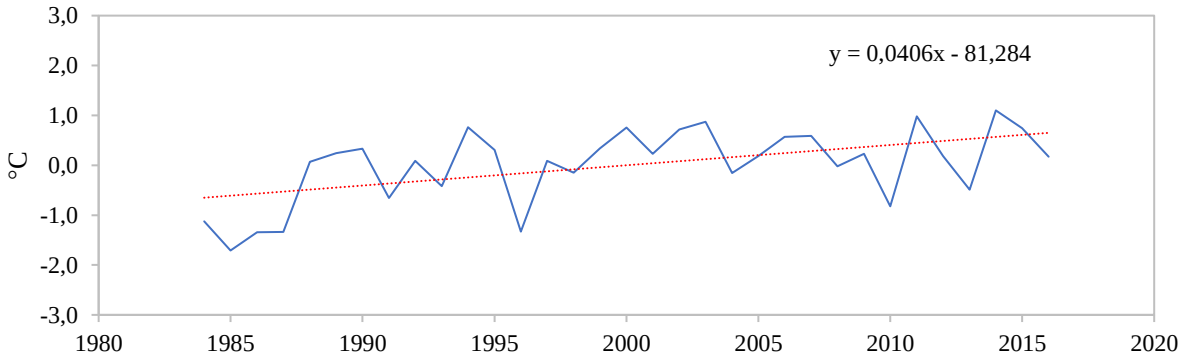


Figure 52 : Anomalies de température annuelle sur la période 1984-2016 pour la station Metz-Frescaty (source des données : Météo-France).

3.2.3.2. La pluviométrie et la sécheresse météorologique

Comme souvent, le signal sur la pluviométrie annuelle est moins net en raison de la forte variabilité interannuelle de ce paramètre. Pour la région du Grand Casablanca où cette variabilité est particulièrement forte (**Figure 53a**), Driouech *et al.* (2021) détectent des tendances non significatives de signes contraires selon la période de référence considérée (positive sur 1984-2016 ; négative sur la période 1964-2016). Pour l'EMM, la pluviométrie est moins variable d'une année sur l'autre, stationnaire voire en très légère baisse au cours des années 1984 à 2016 (**Figure 53b**).

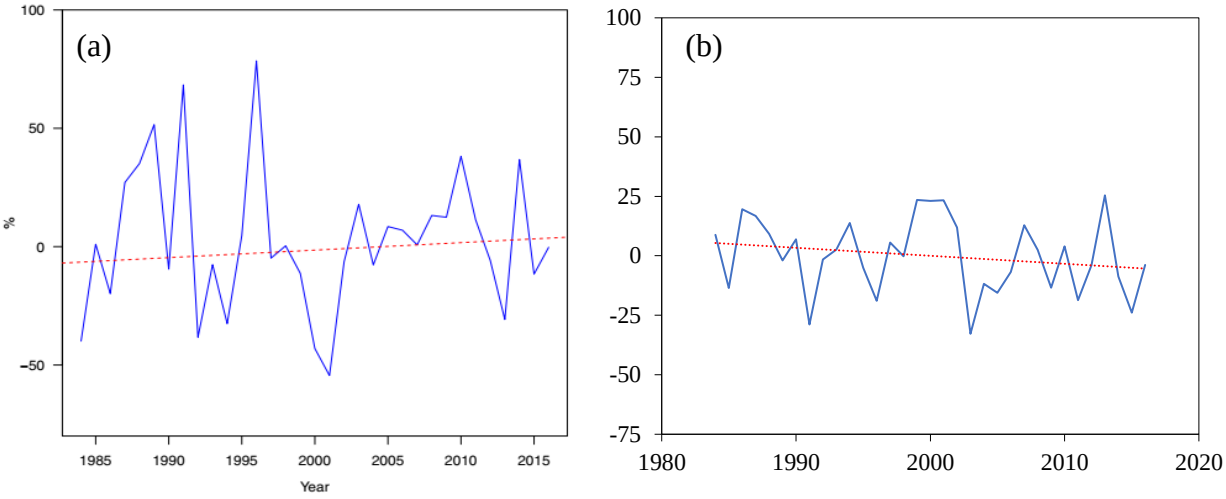


Figure 53 : (a) Courbes d'anomalie de la pluviométrie annuelle pour la région du Grand Casablanca et (b) la station Metz-Frescaty. Période de référence : 1984-2016 (source : Driouech *et al.* (2021) et Météo-France).

3.2.3.3. Les tendances climatiques futures

Pour le Grand Casablanca, les bases de connaissances consultées sont :

- La base de Filahi *et al.* (2017), fondée sur des projections climatiques régionalisées forcées par l'expérience CMIP5.
- Les bases plus récentes de Lachgar *et al.* (2022) (2 GCM) centrées sur la région de Casablanca-Settat et de Babaousmail *et al.* (2022), qui couvre le bassin méditerranéen et l'Afrique sub-saharienne et se fonde sur des ensembles de GCM forcés par l'expérience CMIP6.

Quel que soit le scénario considéré, les bases de connaissance anticipent un réchauffement intense particulièrement en saison chaude avec et une baisse importante de précipitations sur le territoire du Grand Casablanca au cours du XXI^{e} siècle. En particulier, l'amplitude des hausses anticipée des températures journalières minimales et maximales est de l'ordre de 2 à 6 °C en fonction des différents modèles pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, ce qui correspond aux projections du GIEC (IPCC, 2007b, 2018, 2022). Les études prévoient aussi une diminution de l'ordre de 20 à 30 % du cumul des précipitations annuelles et saisonnières, particulièrement en hiver et en automne. Le phénomène d'aridification en cours devrait donc s'amplifier dans les décennies à suivre. Cela risque d'exacerber les tensions sur l'usage de l'eau, menaçant en premier lieu le secteur agricole, secteur clé de l'économie marocaine, représentant 12,4 % du PIB annuel et 37 % de la main d'œuvre en 2017, résultat des récents investissements massifs destinés à développer une agriculture irriguée, tournée vers l'exportation.

Le diagnostic est globalement identique sur le territoire de l'EMM pour les indicateurs de température (Soubeyroux *et al.*, 2021) avec plus d'extrêmes chauds dans un climat réchauffé. En revanche, pour les précipitations, on pourrait assister à une légère hausse de la pluviométrie annuelle (de +2 à +6 % selon les horizons et les scénarios) avec une modulation saisonnière (baisse l'été qui ne serait pas totalement compensée par la hausse en hiver).

Synthèse

Cette brève présentation de nos deux terrains d'étude montre que les deux aires urbaines présentent des visages différents sur de nombreux aspects, ce qui rend la partie expérimentale de cette thèse d'autant plus intéressante. En dépit de leur opposition géographique évidente, ces deux territoires sont tous deux confrontés à la problématique du changement climatique, avec un pattern qui semble valider le paradigme selon lequel "*wet gets wetter, dry gets drier*". Le point majeur étant, selon nous, de montrer que la question du changement climatique futur en saison chaude, doit être traitée sur les deux territoires en « P-E » (Précipitations-Evaporation). La réduction tendancielle de cet écart devrait conduire à une aridification progressive du climat sur nos deux terrains d'étude avec un signal plus fort pour le Grand Casablanca.

Pour mettre en perspective ces deux territoires climatiquement contrastés en vue d'un diagnostic de la surchauffe urbaine, il est nécessaire de disposer d'un support de comparaison adéquat. Le concept de zonage climatique nous a paru l'outil le plus adapté. Des cartes issues de ce zonage en « LCZ » ont donc été produites dans ce but, et seront présentées dans le chapitre 7.

PARTIE I - CONCLUSION

Cette première partie de la thèse, a permis d'avoir un aperçu théorique du microclimat urbain et de la surchauffe urbaine. Ce champ de la climatologie est né au moment où l'on a pris conscience du fait que la ville peut être source de phénomènes radiatifs et aérodynamiques perturbant le bilan d'énergie en occasionnant une surchauffe urbaine, source d'inconfort pour les populations urbaines. On a alors identifié un « climat urbain » dont les conditions météorologiques sont différentes de celles rencontrées dans la campagne alentour, et dont l'aspect le plus marquant est la présence d'un îlot de chaleur urbain. Ce phénomène est le résultat d'interactions environnementales, climatiques et anthropiques complexes au niveau local (**Figure 54**). En plus de causer un stress thermique aux citadins, ce phénomène peut, en cas de canicule, aggraver les risques sanitaires liés à la chaleur intense, dont les atteintes les plus graves conduisent au décès ou à des séquelles irréversibles.

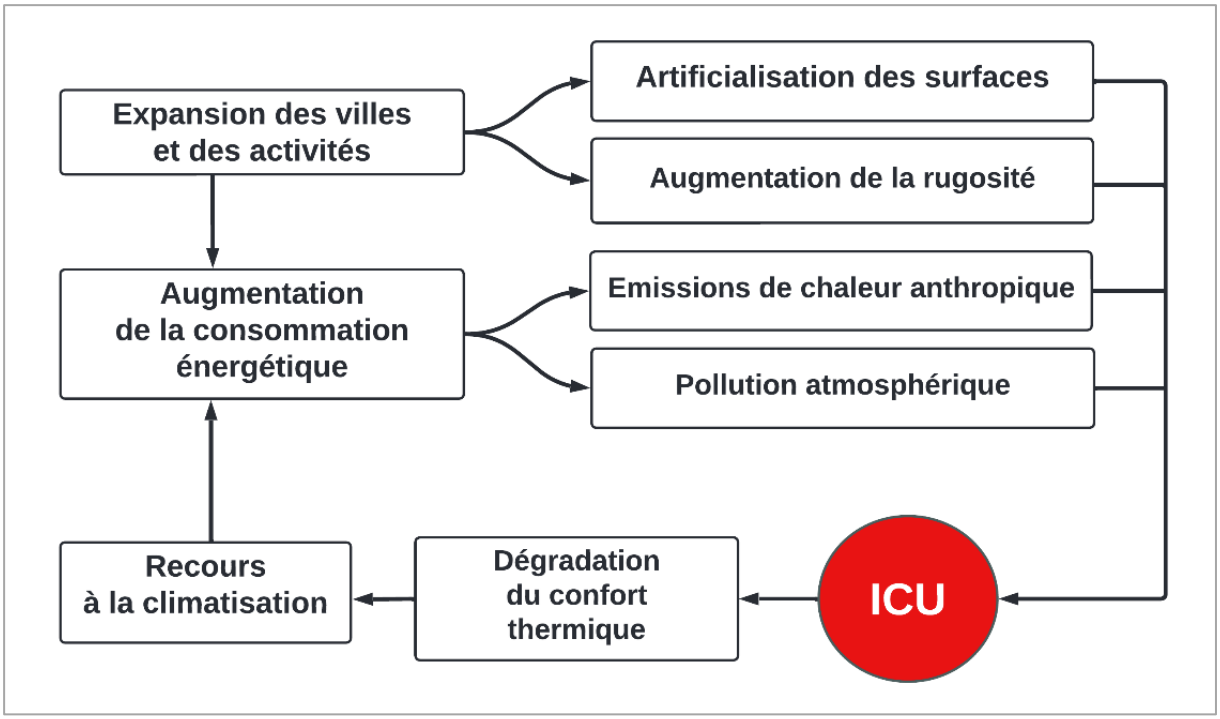


Figure 54 : Schéma des interactions systémiques entre la dynamique urbaine et la formation d'un ICU.

Par conséquent, l'observation et la cartographie des îlots de chaleur dans un contexte urbain diversifié s'avère indispensable pour approfondir notre compréhension de la corrélation entre chaleur et santé, ainsi que pour élaborer des stratégies d'adaptation urbaine efficaces. C'est ce que nous nous proposons de développer dans les chapitres qui suivent.

PARTIE II : OBSERVATION ET CARTOGRAPHIE DES ILOTS DE CHALEUR

PARTIE II - INTRODUCTION

Les éléments abordés dans la première partie de cette thèse fournissent le cadre théorique et les bases méthodologiques pour répondre à la problématique de cette recherche. Ils conduisent naturellement la réflexion sur l'utilisation de différents outils pour caractériser l'intensité et la variabilité spatio-temporelle des températures de surface et des températures de l'air. Pour cela, plusieurs questions doivent être traitées : i) comment se présentent les deux aires urbaines étudiées sur le plan de l'ambiance thermique ? ii) comment celle-ci varie en fonction des différentes échelles de temps ? iii) quelle est l'influence des typologies urbaines et des zones climatiques sur la distribution des Ts et des Ta ? iv) quel est l'impact microclimatique des opérations de rénovation urbaine ?

Aussi, cette deuxième partie porte sur le diagnostic climatique et l'analyse géophysique de la surchauffe urbaine. L'accent est alors mis sur le suivi expérimental et la construction d'un patrimoine de données climatiques à l'échelle des deux terrains que nous croisons dans le cadre cette thèse. Ces données expérimentales seront ensuite valorisées dans le but de relier l'intensité des gradients thermiques aux caractéristiques du milieu urbain par une approche géostatistique. L'ICU de surface est abordé en premier. À l'échelle de l'agglomération tout d'abord, par le moyen de la télédétection satellitaire **(chapitre 4)**, puis à une échelle plus fine ensuite, en nous appuyant sur la télédétection aéroportée par drone **(chapitre 5)**. Après cela, l'ICU de la canopée urbaine est étudié sur la base des relevés de terrain issus d'un réseau de mesures fixes déployé au sein du territoire messin **(chapitre 6)**. Des données issues de mesures mobiles viennent ensuite approfondir l'analyse de l'ICU nocturne à l'échelle du quartier dans les deux villes étudiées **(chapitre 7)**. Ce faisant, nous aurons à cœur de confronter les approches et de mettre en parallèle les résultats obtenus par chacune de ces méthodes.

Chapitre 4 : Les îlots de chaleur de surface à l'échelle de l'agglomération

La demande extensive des données de température de surface (Ts) pour les sciences environnementales et l'étude du microclimat urbain a fait de la télédétection spatiale un sujet académique important durant les deux dernières décennies (Qin et Karnieli, 1999). Les Ts jouent en effet un rôle essentiel dans le système d'interactions sol-atmosphère (Li *et al.*, 2023b). Cette variable décrit l'émission de radiance thermique de la surface terrestre où l'énergie solaire entrante interagit avec les surfaces en les réchauffant (il peut s'agir de neige et de glace, de l'herbe sur une pelouse, du toit d'un bâtiment, d'une canopée végétale ou de sols nus). Sa sensibilité aux changements dans les conditions de surface en fait un bon indicateur de la partition de l'énergie à la limite entre la surface terrestre et l'atmosphère (Nemani *et al.*, 1993). Elle est dès lors utilisée pour de nombreux modèles environnementaux tels que les prévisions météorologiques, la circulation océanique mondiale, et les scénarios de changement climatique (Valor et Caselles, 1996). Or, la télédétection satellitaire est aujourd'hui l'unique méthode qui, par sa répétitivité, permet d'étudier la variabilité spatio-temporelle des Ts à des échelles suffisamment larges pour couvrir l'intégralité de la tâche urbaine.

Cependant, pour que les Ts issues de l'imagerie satellitaire puissent être mises à profit dans l'étude de la surchauffe urbaine, il est nécessaire de pouvoir les estimer avec précision. Il y a besoin alors de disposer d'un protocole efficace pour dériver les Ts à partir des données infrarouges thermiques. Aussi, dans ce chapitre, nous nous appuyons sur les données issues de la télédétection satellitaire afin de réaliser une étude diachronique des Ts dans les aires urbaines de Casablanca et de Metz. L'objectif est de mettre en lumière les facteurs influençant leur distribution spatiale sur une nuit, comme sur plusieurs décennies. Après un bref exposé des principes de l'observation des Ts par télédétection, nous présenterons la méthode utilisée pour le traitement des images satellitaires, avant d'analyser les résultats obtenus.

4.1. Observation des températures de surfaces par télédétection **92**

4.2. Détection et cartographie des températures de surface **100**

4.3. Analyse spatio-temporelle des thermographies diurnes **107**

4.4. Analyse spatio-temporelle des thermographies nocturnes **123**

Synthèse **131**

4.1. Observation des températures de surfaces par télédétection

La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées ou spatiales (Bonn, 1994). Comme son nom l'indique, elle suppose l'acquisition d'informations sur les caractéristiques physiques d'un objet à distance, sans contact direct avec celui-ci (Bonn *et al.*, 1992). Cependant, pour comprendre comment il est possible de mesurer les Ts via cette technique « non-invasive », il convient de s'arrêter sur la base physique du rayonnement infrarouge (1) et sur les plateformes d'observation spatiale disponibles (2), avant d'envisager les différentes méthodes d'exctraction mobilisables (3).

4.1.1. Principes de l'infrarouge thermique

La thermographie infrarouge est une méthode d'imagerie qui enregistre le rayonnement électromagnétique émis par un objet à des longueurs d'onde comprises entre le domaine visible (≈ 0,7 µm) et le domaine des micro-ondes (0,1 mm) (**Figure 55**)[20]. L'infrarouge est associé à la chaleur car, à température ambiante ordinaire, les objets émettent spontanément un rayonnement thermique dans le domaine de l'infrarouge en raison de mouvements moléculaires qui dépendent de leur température (**Figure 56**) : plus l'objet est chaud, plus ses molécules s'agitent et plus il émet de rayonnement dans l'infrarouge thermique (Gade et Moeslund, 2014). La loi de Planck fournit un modèle de ce rayonnement pour un corps noir parfait (objet théorique idéal à émissivité $\varepsilon = 1$, ce qui fait qu'il absorbe les radiations sur la totalité du spectre du rayonnement et les réémet intégralement). Selon cette fonction, les radiations émises par un corps noir ne dépendent que de sa température, quelle que soit sa composition ou sa forme :

$$B\lambda(Ts) = 2hc^2 / (\lambda^5 [exp(hc / \lambda_\lambda kTs) - 1]) \qquad (13)$$

avec,
Ts : température de surface du sol,
c : vitesse de la lumière (c = 2,9979 × 10^8 m / s),
h : constante de Planck (h = 6,6261 × 10^{-34} J · s),
k : constante de Boltzmann (k = 1,3806 × 10^{-23} J / K),
λ_λ : longueur d'onde effective de la bande λ.

[20] La Commission électrotechnique internationale estime que l'infrarouge s'étend de 780 nm à 1 mm : https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=731-01-05.

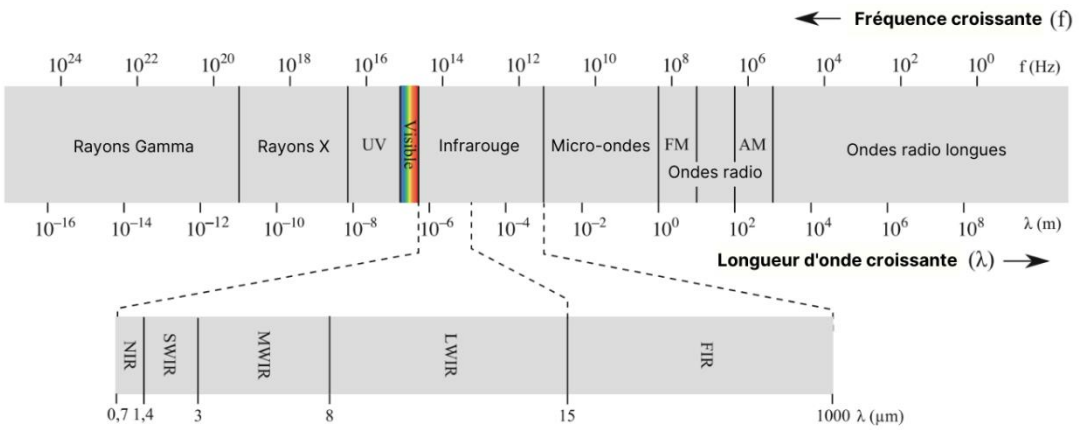


Figure 55 : Le spectre électromagnétique avec le spectre infrarouge subdivisé (adapté de Gade et Moeslund, 2014).

Cependant, la plupart des matériaux étudiés pour des applications pratiques ne sont pas noirs. Ils sont assimilables à des corps « gris » présentant une valeur d'émissivité comprise entre 0 et 1 selon la composition chimique et la structure physique de l'objet. Par conséquent, tout objet dont la température est supérieure au zéro absolu (-273,15 °C ou 0 K, température à laquelle s'arrête tout mouvement moléculaire) émettra une quantité définie de rayonnement dans la bande infrarouge thermique en fonction de sa température et de son émissivité.

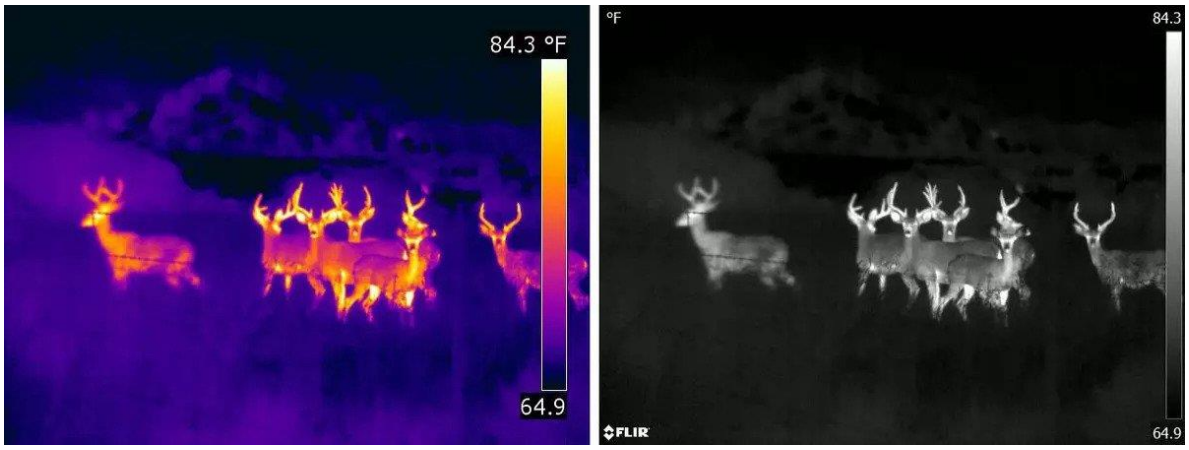


Figure 56 : Image infrarouge thermique d'une harde de cervidés (source : *clearview imaging*).

Le rayonnement infrarouge thermique possède également une longueur d'onde d'émission maximale qui est inversement proportionnelle à la température absolue de l'objet, conformément à la loi de déplacement de Wien[21].

La norme ISO 20473 introduit la division en trois bandes spectrales (**Tableau 4**) : le proche infrarouge (PIR ou NIR pour *Near-IR* en anglais), le moyen infrarouge (MIR ou *Mid-IR* en anglais) et l'infrarouge lointain (LIR ou FIR pour *Far-IR* en anglais). Cependant, la délimitation

[21] En sciences physiques, la loi du déplacement de Wien se déduit de la loi de Planck. Elle énonce que la longueur d'onde à laquelle un corps noir émet le plus de flux lumineux énergétique est inversement proportionnelle à sa température.

de ces différentes bandes varie en fonction des domaines d'étude. Le découpage peut être lié à la longueur d'onde (ou à la fréquence) des émetteurs, des récepteurs, ou encore aux fenêtres de transmission atmosphérique qui sont de 3 à 5 µm et de 8 à 13 µm (Taillet *et al.*, 2018).

Tableau 4 : Subdivisons de la bande infrarouge thermique selon la norme ISO 20473.

Désignation	Abréviation	Longueur d'onde
Infrarouge proche	PIR	0,78 – 3 µm
Infrarouge moyen	MIR	3 – 50 µm
Infrarouge lointain	LIR	50 µm – 5 mm

En climatologie, la télédétection infrarouge thermique offre la possibilité de convertir le rayonnement émis par la couverture terrestre sous forme de rayonnement infrarouge en températures de surface ou LST (*Land Surface Températures*) en anglais. La plus grande part de l'énergie détectée par le capteur dans l'infrarouge thermique est, en effet, directement émise par la surface terrestre (Jimenez-Munoz et Sobrino, 2008). En conséquence, le développement de capteurs sensibles à l'infrarouge thermique émis par la surface de la Terre embarqués dans des satellites a facilité l'étude des îlots de chaleur urbains à des échelles spatiales de plus en plus précises (Streutker, 2002).

4.1.2. La télédétection satellitaire

Le recours à la télédétection à partir de plates-formes orbitales spatiales pour la collecte d'informations a commencé au début des années 1960, lorsque cela est devenu possible pour la première fois de placer des caméras en orbite polaire terrestre afin de photographier à distance n'importe quel point du globe de manière régulière et prévisible (Pabian, 2015). La collecte d'images de la surface terrestre par satellite trouvait alors ses premières applications dans le domaine du renseignement militaire. Cependant, dans la décennie suivante, cette technologie s'est ouverte à des applications civiles ; les pays du bloc de l'ouest, avec les États-Unis en tête, ont alors commencé à rendre les ressources d'observation de la Terre accessibles au public. En particulier, le programme Landsat (1972) lancé par la NASA a été le premier projet *open-source* à ouvrir l'accès aux images acquises depuis l'espace (Matese, 2022). Le satellite *Landsat 1* était équipé de capteurs à balayage couvrant quatre bandes spectrales, offrant une résolution spatiale de 80 m. Les générations suivantes à partir de Landsat 4 ont vu leurs résolutions spatiales et spectrales augmenter en passant respectivement à 30 m et à 7 (Landsat 4/5), 8 (Landsat 7) puis 11 bandes spectrales (Landsat 8/9) dont 1 puis 2 bandes sont consacrées à l'infrarouge thermique (TIRS à 100 m). Le satellite français *SPOT-1*, lancé en 1986, offrait une résolution spatiale de 20 m pour les bandes multispectrales et de 10 m pour la bande panchromatique.

Depuis cette époque, de nombreux bouquets satellitaires ont vu le jour, dont certains ont accueilli des instruments IRT tels que la série de satellites de l'agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA), le système d'observation de la Terre (OT) *Terra* et les satellites *Aqua*, la série de satellites *Meteosat* de deuxième génération (MSG) et la série de satellites chinois *Fengyun* (FY) (**Tableau 5**).

Tableau 5 : Quelques satellites/plateformes d'observation de la Terre (OT) embarquant un capteur thermique (liste non-exhaustive).

Nom du satellite/ plateforme	Année de lancement	Capteur thermique	Nombre de bandes thermiques	Résolution spatiale	Résolution temporelle
Landsat 5	1984	TM, MSS	1	120 m (30 m)	16 jours
Tarra (EOS PM)	1999	MODIS	2	1 km	2 fois par jour
	1999	ASTER	5	90 m	16 jours
Aqua (EOS PM)	2002	MODIS	2	1 km	2 fois par jour
Metop A	2006	AVHRR/4	1	1 km	14 fois par jour
Landsat 8	2013	OLI-2 TIRS-2	2	100 m (30 m)	16 jours
ISS	2018	ECOSTRESS	5	70 m	1-7 jours
Landsat 9	2021	OLI-2 TIRS-2	2	100 m (30 m)	16 jours

Ces divers programmes et la diffusion publique de nombreuses archives de données satellitaires, accompagnés de l'augmentation rapide des capacités de traitement et d'exploration des mégadonnées, ont fait de la télédétection le moyen le plus adapté actuellement pour l'étude des processus environnementaux sur de vastes domaines géographiques (Kuenzer *et al.*, 2019). La télédétection satellitaire concerne aujourd'hui des domaines d'application aussi variés que la caractérisation des zones humides (Ozesmi et Bauer, 2002), la dérivation de l'altitude (Altena et Kääb, 2017) et les études d'affaissement du sol (Lin *et al.*, 2009), l'analyse du risque d'inondation (Farhadi et Najafzadeh, 2021) ou encore, la lutte contre la déforestation (Dupuis *et al.*, 2020) et les feux de forêt (Xiao-rui *et al.*, 2005).

Le milieu urbain est pour sa part, un champ d'action récemment ouvert de la télédétection spatiale. Avec l'extension urbaine qui s'observe partout dans le monde, le suivi des dynamiques territoriales a pris une place importante dans le cadre de la planification urbaine. Il est alors apparu nécessaire de disposer de données fiables, précises et continuellement mises à jour sur l'évolution du territoire. Dans ce contexte, la télédétection pallie les carences de sources d'informations traditionnelles que sont les cartes et les photographies aériennes, souvent partielles, périmées, de dates différentes qu'il faut assembler en un puzzle incomplet (Collin Delavaud, 2000). La télédétection spatiale constitue une source d'information précieuse pour établir l'état d'occupation d'un espace urbain, et la répétitivité des observations en fait un outil particulièrement intéressant pour suivre les transformations, souvent rapides, de cet espace (Dureau, 1990).

En revanche, en dépit de l'importance acquise par la télédétection spatiale, l'extraction de la température de surface à partir des images satellitaires s'avère complexe. Beaucoup de travaux y ont été consacrés et de nombreuses méthodes ont été proposées.

4.1.3. L’extraction des températures de surface

L'estimation directe des Ts à partir du rayonnement émis dans l’infrarouge est difficile à réaliser avec précision puisque les luminances mesurées par les radiomètres à bord des satellites dépendent non seulement des paramètres de surface (température et émissivité), mais aussi des effets atmosphériques (Li *et al.*, 2013). En effet, la présence de l'atmosphère entre la surface terrestre et les capteurs affecte les luminances mesurées par un radiomètre au sommet de l’atmosphère (*top of the atmosphere* en anglais ou TOA). Ces luminances résultent principalement d'émissions/réflexions à la surface modulée par les effets d’absorption et diffusion de l'atmosphère. Par conséquent, outre l'étalonnage radiométrique et le filtrage des nuages, la détermination des Ts à partir de mesures IRT spatiales requiert également de tenir compte de l'émissivité des surfaces et de corriger les effets atmosphériques. Les corrections atmosphériques consistent à corriger la luminance mesurée par les capteurs des effets d'atténuation atmosphérique sur la base d’une connaissance précise des profils verticaux de la vapeur d'eau atmosphérique et de la température, qui sont toutes deux très variables (Perry et Moran, 1994).

De ce fait, plusieurs méthodes ont été développées pour estimer les Ts à partir d'images satellitaires en utilisant le spectre infrarouge thermique. Aucune d’entre elles n’est en soi meilleure, ni ne permet de toujours extraire avec précision les Ts des données satellitaires (Li *et al.*, 2013). Chaque méthode a été conçue en vue d’une utilisation avec différentes hypothèses en tenant compte des caractéristiques du capteur, de la disponibilité des données d'émissivité et des données atmosphériques (**Tableau 6**). La majorité de ces méthodes s'appuie sur l'équation du transfert radiatif (Benmecheta, 2016). Cette section présente une vue d’ensemble des quatre méthodes les plus couramment utilisées : celle utilisant un algorithme à canal unique (*Single Canal* - SC), celle basée sur l'algorithme à fenêtre fractionnée (*Split-Window* - SW), celles utilisant un algorithme séparant les Ts de l'émissivité (*Temperature-Emissivity-Separation* - TES), et enfin, celle reposant sur l'algorithme jour/nuit (*Day/Night* - D/N).

4.1.3.1. Les méthodes à canal unique

Les méthodes à canal unique (*Single Channel* (SW), également appelées *Mono-Window* (MW)) consistent à extraire les Ts à partir d’un seul canal thermique. Il s’agit d’estimer la radiance mesurée par le capteur du satellite dans un seul canal, généralement choisi dans une fenêtre atmosphérique, et corriger les absorptions résiduelles à l’aide d’un modèle radiatif dans lequel la description de l’état de l’atmosphère est fournie par des sondeurs verticaux du satellite, des modèles de prévision météorologique, ou par des radiosondages atmosphériques (Benmecheta, 2016 ; Li *et al.*, 2023). Les Ts sont obtenues en inversant l’équation du transfert radiatif à condition que l’émissivité soit connue *a priori* (Mushkin *et al.*, 2005 ; Wang *et al.*, 2019). Cependant, les radiosondages n'étant pas toujours disponibles avec une densité spatiale suffisante, plusieurs algorithmes ont été proposés pour réduire la dépendance vis-à-vis des données de radiosondage.

Qin *et al.* (2001b) ont développé l'algorithme *Mono-window* (MW) à partir des données de la bande thermique unique de *Landsat TM* en utilisant des relations linéaires empiriques entre la transmission atmosphérique et la teneur en vapeur d'eau, et entre la température atmosphérique moyenne et la température de l'air proche de la surface. Cet algorithme requiert impérativement la connaissance de trois paramètres fondamentaux : l'émissivité, la transmittance, et la température atmosphérique moyenne effective. Les deux derniers paramètres sont utilisés pour effectuer une correction atmosphérique en prenant en compte la teneur en vapeur d'eau atmosphérique et la température de l'air près de la surface (Qin *et al.*, 2001b ; Wang *et al.*, 2015). Ces paramètres peuvent également être déterminés par la simulation des conditions atmosphériques avec le programme *LOWTRAN 7* (Wang *et al.*, 2019). Wang *et al.* (2015) ont amélioré cet algorithme en l'adaptant aux données issues du *Landsat 8* en utilisant uniquement la bande 10. Par la suite, Sobrino *et al.* (2004) et Jimenez-Munoz et Sobrino (2010) ont développé un algorithme *Single-canal* (SC) généralisé pour extraire la Ts de n'importe quel canal IRT à condition que l'émissivité et la teneur en vapeur d'eau atmosphérique totale soient connues.

Les méthodes à canal unique permettent généralement une extraction de Ts précises. Cependant, elles nécessitent une estimation de l'émissivité pour chaque pixel ainsi qu'une connaissance précise des profils atmosphériques sur la zone d'étude au passage du satellite. Un tel niveau de précision est difficile, voire impossible à atteindre dans la plupart des situations pratiques (Li *et al.*, 2013), ce qui fait que de nombreux chercheurs se tournent vers d'autres méthodes moins exigeantes.

4.1.3.2. La méthode à fenêtre fractionnée (*Split-Window*)

La méthode de l'algorithme à fenêtre fractionnée (*Split-Window* ou SW en anglais), aussi connue sous le nom de méthode à double canal, a été introduite par McMillin (1975) pour obtenir les Ts à partir de données IRT de la surface des océans. Son principe de base est que l'atténuation atmosphérique subie par le rayonnement émis par la surface est proportionnelle à la différence entre les luminances mesurées par le capteur simultanément dans deux canaux thermiques différents. Il s'agit de récupérer la Ts en utilisant l'absorption atmosphérique dans deux canaux IRT adjacents centrés à 11 et 12 µm pour corriger les effets atmosphériques, à condition que l'émissivité soit connue *a priori* (Becker et Li, 1990 ; Wan et Dozier, 1996). Les effets atmosphériques sont alors corrigés en se basant sur l'absorption différentielle dans les bandes infrarouges thermiques adjacentes et non sur la transmission atmosphérique absolue en une seule bande, de sorte qu'elle est moins sensible aux incertitudes sur les propriétés optiques de l'atmosphère (Wan et Dozier, 1996).

Bien qu'il ne soit pas adapté aux atmosphères très humides, l'algorithme SW a été largement utilisé du fait de son efficacité élevée et de sa simplicité puisqu'il n'exige aucune information sur les profils atmosphériques au moment de l'acquisition des données. Tous les algorithmes produits présentent la même forme générale, à savoir : $Ts = T4 + A(T4 - T5) + B$, mais le calcul des paramètres A et B diffère selon les auteurs (Benmecheta, 2016). Par exemple, Sobrino *et al.* (1991) ont développé une méthodologie pour réaliser les corrections atmosphériques et

celles de l'émissivité en intégrant la transmittance atmosphérique, la teneur en eau de l'atmosphère et l'absorption atmosphérique. Ensuite, Qin *et al.* (2001a) ont développé un algorithme SW pour les images AVHRR qui ne nécessitent que deux variables essentielles : l'émissivité et la transmission atmosphérique. Selon leur test de validation, leur algorithme présente une précision de 1,75 °C pour les données du monde réel. Par la suite, ces algorithmes ont été modifiés et améliorés par d'autres auteurs (Li *et al.*, 2013).

4.1.3.3. L'algorithme de séparation Température-Émissivité (TES)

Étant donné que les algorithmes à canal unique et à fenêtre fractionnée requièrent une connaissance de l'émissivité de surface -paramètre difficile à mesurer à l'échelle du pixel-, Gillespie *et al.* (1998) ont développé l'algorithme TES pour extraire les valeurs d'émissivité et de Ts en utilisant les données IRT de plusieurs canaux, à condition que les effets atmosphériques puissent être corrigés avec précision à l'avance (Li *et al.*, 2013). Cet algorithme s'appuie sur une relation empirique entre le contraste spectral et l'émissivité minimale pour augmenter le nombre d'équations afin que le problème sous-déterminé devienne déterministe (Gillespie *et al.*, 1998). L'idée est de séparer puis d'estimer indépendamment les Ts et l'émissivité des objets observés. L'algorithme TES tient compte de plusieurs facteurs pour effectuer la séparation précise des températures de surface et des valeurs d'émissivité, tels que les propriétés radiatives des surfaces (notamment les revêtements urbains, la végétation et l'eau/la neige), les caractéristiques spectrales et les conditions atmosphériques. Il peut également prendre en compte d'autres informations disponibles, telles que des indices de végétation ou des données auxiliaires, pour améliorer les estimations. Il est adapté pour calculer la Ts et l'émissivité à partir des données *ASTER* (Benmecheta, 2016).

L'algorithme TES présente l'avantage de pouvoir récupérer avec précision la Ts et l'émissivité pour des cibles présentant des valeurs d'émissivité très contrastées. Cependant, pour obtenir des résultats précis, une correction atmosphérique préalable est primordiale, ce qui peut être difficile, surtout dans les cas d'une atmosphère très humide (Li *et al.*, 2013). De plus, les performances de cet algorithme se détériorent lorsque l'on traite des « corps gris » ayant peu de variations d'émissivité spectrale, telle qu'une végétation dense (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2006).

4.1.3.4. L'algorithme jour/nuit basé sur la physique

Selon Li et Becker (1990) et Wan et Li (1997), l'algorithme jour/nuit (D/N) permet d'extraire les Ts et les données d'émissivité en utilisant les mesures du canal moyen infrarouge issues de paires d'images enregistrées de jour et de nuit sur une courte période (Wang *et al.*, 2021). L'idée principale sous-jacente à cette méthode est de prendre en compte les différences entre les observations diurnes et nocturnes pour obtenir des estimations plus précises des Ts en supposant qu'il n'y a pas de changement significatif dans l'émissivité (Wan et Li, 1997). L'algorithme présente trois avantages importants : (1) il permet une récupération précise des Ts et de l'émissivité par des méthodes physiques, (2) il n'exige pas de profils atmosphériques précis *a priori*, et (3) il améliore la stabilité et la précision des mesures en utilisant les canaux infrarouges moyens.

En revanche, pour extraire les Ts, cet algorithme nécessite une estimation appropriée du profil atmosphérique, qui doit être fournie à l'avance. En utilisant ces informations et en combinant les mesures des canaux IRT et du canal moyen infrarouge, qui contient à la fois la luminance réfléchie et émise pendant la journée, l'algorithme est capable de réduire l'influence des corrélations entre les équations d'observation des canaux IRT. De plus, un alignement géométrique précis entre les images diurnes et nocturnes est nécessaire. Les observations diurnes et nocturnes doivent alors être effectuées sous des angles de vue similaires (Li *et al.*, 2013).

Tableau 6 : Méthodes d'extraction des Ts à partir des données satellitaires.

Méthode	Avantages	Limites et exigences	Références
Les méthodes à canal unique	-Simplicité d'application. -Applicable à tout capteur IRT.	- Nécessite une connaissance préalable de l'émissivité. - Exige une connaissance précise des profils atmosphériques et des températures de l'air près de la surface. - La précision de l'algorithme dépend de l'estimation des profils et des quantités atmosphériques. - La quantité de données requise limite l'application de l'algorithme à l'échelle mondiale. - L'incertitude des profils atmosphériques peut avoir un impact significatif sur la précision de la récupération des Ts.	(Qin *et al.*, 2001a ; Jiménez-Muñoz et Sobrino, 2003 ; Cristóbal *et al.*, 2009 ; Jimenez-Munoz *et al.*, 2009)
La méthode à fenêtre fractionnée	-Simplicité d'application. -Les profils atmosphériques ne sont pas requis.	- Nécessite une connaissance préalable de l'émissivité. - L'algorithme requiert la présence d'au moins deux canaux IRT dans les fenêtres atmosphériques. - La précision de l'algorithme est altérée en présence d'une humidité atmosphérique élevée. - Il existe une variété de paramétrages des coefficients disponibles, pouvant aboutir à la création de différents algorithmes présentant des performances différentes.	(McMillin, 1975 ; Becker et Li, 1990 ; Sobrino *et al.*, 1994 ; Wan et Dozier, 1996)
L'algorithme de séparation Température-Émissivité	-Récupère simultanément les Ts et l'émissivité. - Affine la récupération de l'émissivité maximale.	- Requiert des corrections atmosphériques précises. - Requiert au minimum 3 bandes IRT dans les fenêtres atmosphériques. -La précision de l'algorithme dépend de la fiabilité de la relation empirique entre la différence d'émissivité maximale-minimale et l'effet de la correction atmosphérique. - L'incertitude est plus prononcée pour les corps gris.	(Gillespie *et al.*, 1998)
L'algorithme jour/nuit basé sur la physique	-Récupération simultanée des Ts et de l'émissivité. -Des profils atmosphériques précis ne sont pas requis.	- Requiert l'utilisation de données multi-temporelles provenant de plusieurs canaux dans les fenêtres atmosphériques MIR et IRT. - Nécessite un enregistrement géométrique précis des données. -La connaissance approximative des profils atmosphériques doit être fournie préalablement. -Le processus de récupération des Ts est complexe et nécessite des valeurs initiales. - Les observations doivent être réalisées à des angles de vue similaires.	(Li et Becker, 1990 ; Wan et Li, 1997)

4.2. Détection et cartographie des températures de surface

Les méthodes et résultats présentés dans cette section ont été publiés partiellement dans un article paru dans le Bulletin de la Société Géographique de Liège en 2021 (Hassani *et al.*, 2021a).

4.2.1. Acquisition et description des données

4.2.1.1. Les données *Landsat*

Comme nous souhaitions disposer de la plus grande profondeur historique possible, notre choix s'est porté sur les données infrarouges thermiques multi-dates acquises par les capteurs *Landsat Thematic Mapper* (TM) et les capteurs *Operational Land Imager/Thermal InfraRed Sensor* (OLI/TIRS) embarqués respectivement à bord des satellites Landsat 5 et 8 de la NASA. Ces données offrent une opportunité unique de suivre les Ts à une large échelle, avec une fréquence temporelle relativement faible (tous les 16 jours) mais suffisante pour caractériser une évolution interannuelle. Les images prises par les capteurs TM sont constituées de sept bandes spectrales en lumière visible (V) et infrarouge (NIR) avec une résolution spatiale de 30m et sont définies au format entier signé 8 bits [0-255] (**Tableau 7**). Celles acquises par les capteurs OLI/TIRS sont dotées de neuf bandes spectrales dont le visible (V), le proche infrarouge (NIR) et l'infrarouge à ondes spectrales courtes (SWIR) et proposent une résolution de 30 m et sont définies au format entier signé 16 bits [0-65535] (**Tableau 8**). Les bandes IRT quant à elles disposent d'une résolution spatiale relativement précise avec 120 m pour les données TM et 100 m, mais rééchantillonnées à 30 m, pour les données OLI/TIRS.

Tableau 7 : Les métadonnées de Landsat TM 5 (source : http://earthexplorer.usgs.gov).

Bandes TM	Résolution spectrale (micromètres µm)	Résolution Spatiale (mètres m)	Couleur
Bande TM 1	0.45 - 0.52	30	Bleu
Bande TM 2	0.52 - 0.60	30	Vert
Bande TM 3	0.63 - 0.69	30	Rouge
Bande TM 4	0.76 – 0.90	30	Proche infrarouge
Bande TM 5	1.55 - 1.75	30	Moyen infrarouge
Bande TM 6	10.40 - 12.50	120 rééchantillonné à 30	Infrarouge thermique
Bande TM 7	2.08 - 2.35	30	Moyen infrarouge

Tableau 8 : Les métadonnées de Landsat OLI/TIRS 8 (source : http://earthexplorer.usgs.gov).

Bandes spectrales	Résolution spectrale (micromètres µm)	Résolution Spatiale (mètres m)	Couleur
Les bandes spectrales du capteur OLI			
Bande OLI 1	0,433 - 0,453	30	Aérosols
Bande OLI 2	0,450 - 0,515	30	Bleu
Bande OLI 3	0,525 - 0,600	30	Vert
Bande OLI 4	0,630 - 0,680	30	Rouge
Bande OLI 5	0,845 - 0,885	30	Infrarouge proche
Bande OLI 6	1,560 - 1,660	30	Infrarouge moyen 1
Bande OLI 7	2,100 - 2,300	30	Infrarouge moyen 2
Bande OLI 8	0,500 - 0,680	15	Panchromatique
Bande OLI 9	1,360 - 1,390	30	Cirrus
Les bandes spectrales du capteur TIRS			
Bande TIRS 10	10,30 - 11,30	100 rééchantillonné à 30	Infrarouge thermique moyen
Bande TIRS 11	11,50 - 12,50	100 rééchantillonné à 30	Infrarouge thermique moyen

Ces images nous ont permis d'estimer l'émissivité, les Ts de jour et de nuit, ainsi que les indices spectraux tels que l'indice de végétation par différence normalisée (*Normalized Difference Vegetation Index ou NDVI*), l'indice de construction par différence normalisée (*Normalized Difference Built-up Index ou NDBI*), l'indice hydrique par différence normalisée (*Normalized Difference Water Index ou NDWI*) et l'indice hydrique par différence normalisée modifiée (*Modified Normalized Difference Water Index ou MNDWI*[22]). Les images satellitaires ont été téléchargées à partir du portail internet de l'USGS (*United States Geological Survey*)[23]. Seules les images ayant une couverture nuageuse inférieure à 10 % ont été retenues, soit celles correspondant aux étés 1984, 1985, 1995, 2011, 2010, 2015, 2018 et 2019 (**Tableau 9**). Pour la période diurne, l'échantillon d'images est composé d'images enregistrées dans des conditions météorologiques anticycloniques assez similaires (**Tableau 10**).

Tableau 9 : Caractéristiques des images *Landsat* multi-dates utilisées dans cette étude.

Capteur	Date d'acquisition	Heure d'acquisition (heure locale)	Résolution spatiale de la bande IRT (m)	Séquence
***Landsat TM* (GC)**	25/08/1984	11h40	120 (30)	jour
***Landsat TM* (GC)**	21/06/1995	11h40	120 (30)	jour
***Landsat TM* (GC)**	04/08/2011	11h40	120 (30)	jour
***Landsat OLI/TIRS* (GC)**	17/06/2015	23h22	100 (30)	nuit
***Landsat OLI/TIRS* (GC)**	07/06/2019	11h03	100 (30)	jour
***Landsat TM* (EMM)**	09/08/1985	12h00	120 (30)	jour
***Landsat TM* (EMM)**	07/08/2010	12h00	120 (30)	jour
***Landsat OLI/TIRS* (EMM)**	26/06/2018	12h30	100 (30)	jour
***Landsat OLI/TIRS* (EMM)**	23/08/2019	12h30	100 (30)	jour

[22] Le MNDWI permet d'éliminer le bruit issu des surfaces bâties, tandis que le NDWI élimine le bruit issu de la végétation et des sols nus.
[23] http://earthexplorer.usgs.gov

4.2.1.2. Les données météorologiques

L'algorithme permettant d'estimer les Ts requiert la connaissance des valeurs de température de l'air, d'humidité relative et de pression atmosphérique à l'heure de passage du satellite. Aussi, les données horaires de la station météorologique de la Direction Nationale de la Météorologie de Casablanca (DNMC) située au sein de l'ancien aéroport Casa-Anfa (33, 57°N ; -7, 67° O) et celles de la station de Météo-France située sur le plateau de Frescaty (49, 04° N ; 6, 07° O) ont été utilisées (**Tableau 10**).

Tableau 10 : Données météorologiques (moyennes horaires) au moment du passage des satellites (source : Direction Nationale de la Météorologie de Casablanca et Météo-France).

Jour	Température de l'air (°C)	HR (%)	Vent moyen (km/h)	Direction du vent	Pression (hPa)
25/08/1984 (GC)	23,2	89	10	360	1015,6
21/06/1995 (GC)	22,5	81	9	360	1016,5
04/08/2011 (GC)	23,0	74	11	360	1018,0
17/06/2015 (GC)	21,0	85	6	360	1014,0
07/06/2019 (GC)	22,5	58	19,5	20	1018,0
09/08/1985 (EMM)	18,0	83	2	120	1036,0
07/08/2010 (EMM)	17,2	63	4	160	1020,1
26/06/2018 (EMM)	21,0	57	6,5	360	1023,6
23/08/2019 (EMM)	20,7	56	4,5	35	1024,9

Outre les paramètres précités, nous avons également pris en compte les données anémométriques afin de s'assurer que les journées au cours desquelles les images satellitaires ont été capturées présentent des conditions météorologiques suffisamment proches.

4.2.2. Méthodologie de prétraitement des images Landsat

Comme expliqué dans la **section 4.1.3**, il existe plusieurs méthodes pour estimer les Ts à partir des données *Landsat*. L'algorithme SC utilise un seul canal thermique, ce qui fait qu'il est adapté aux capteurs TM qui n'ont qu'une seule bande thermique de disponible. L'algorithme SW quant à lui, est utilisé pour les données satellitaires disposant de deux canaux thermiques, il est donc adapté aux données du capteur OLI/TIRS comportant les bandes thermiques 10 et 11. Cependant, l'USGS conseille de n'utiliser que la bande 10 car elle comporte moins d'erreurs causées par des anomalies de lumière parasite (Renard *et al.*, 2019). Par ailleurs, bien que la NASA ait corrigé toutes les données OLI/TIRS, elle recommande de ne pas utiliser l'algorithme SW pour la correction atmosphérique (Renard *et al.*, 2019). De fait, dans de nombreuses études, les Ts ont été déterminées à partir des données OLI/TIRS en utilisant uniquement la bande 10 à l'aide de l'algorithme SC (Yuan et Bauer, 2007 ; Imran et Mehmood, 2020 ; Mukherjee et Singh, 2020 ; Hidalgo García, 2021).

Aussi, puisque nos données proviennent des capteurs TM et OLI/TIRS dans le cadre cette étude, l'estimation des Ts est réalisée à l'aide de l'algorithme SC. Cette méthode, développée par Qin *et al.* (2001), Jiménez-Muñoz et Sobrino (2003), Sobrino *et al.* (2004) et Jimenez-Munoz *et al.* (2009), permet d'extraire les Ts avec une marge d'erreur de 0,6 K, à partir de la brillance mesurée en limite d'atmosphère (TOA) dans la bande spectrale IRT en inversant l'équation du transfert radiatif (Sobrino *et al.*, 2004a) :

$$Ts = B^{-1}.\left[\frac{L_\lambda - R_{ati\uparrow} - (1-\varepsilon_i).R_{ati\downarrow}.\tau_i}{\varepsilon_i.\tau_i}\right] \qquad (14)$$

avec,

Ts : température de surface terrestre,
$R_{ati\downarrow}$: radiance atmosphérique descendante,
$R_{ati\uparrow}$: radiance atmosphérique montante,
B^{-1} : inverse de la fonction de Planck,
L_λ : luminance spectrale,
ε_i : émissivité effective de la surface du sol,
τ_i : transmittance de l'atmosphère le long du trajet cible/capteur.

Comme l'indique la figure 57, le calcul des Ts à partir de la luminance spectrale L_λ enregistrée en TOA nécessite de connaître les caractéristiques atmosphériques au moment de la prise de vue pour quantifier la transmittance τ_i de l'atmosphère ainsi que les rayonnements atmosphériques descendant $R_{ati\downarrow}$ et ascendant $R_{ati\uparrow}$. Il est également nécessaire de connaître l'émissivité spectrale effective de la surface du sol ε_i.

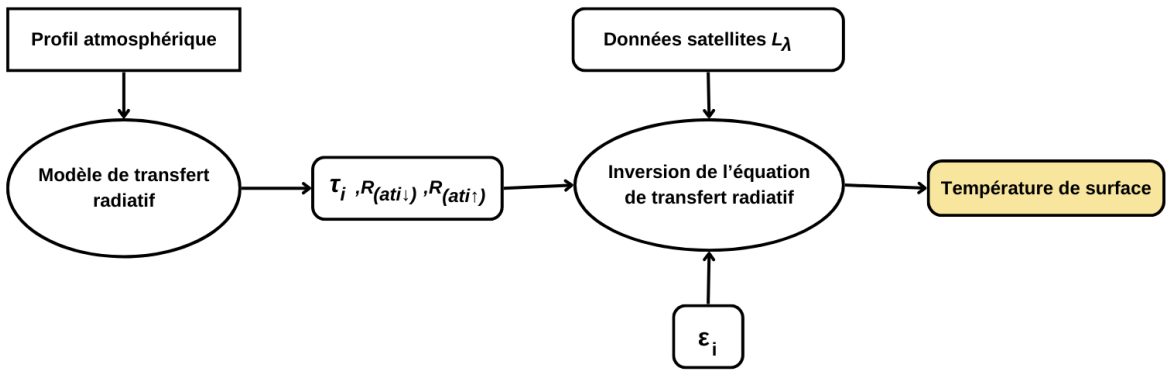


Figure 57 : Chaine de traitement suivie pour l'extraction des Ts à partir de données satellitaires par la méthode à fenêtre unique (SC) (adapté de Tang et Li (2014)).

Les variables τ_i, $R_{ati\downarrow}$, $R_{ati\uparrow}$, dépendantes de l'état de l'atmosphère, ont été obtenues à partir de données issues de radiosondages, donc sur un maillage très lâche. Lorsque les données de

radiosondage ne sont pas disponibles -ce qui le cas en général, en particulier pour les images prises dans le passé-, l'algorithme SC permet de calculer les Ts à partir des données *Landsat* selon la formule suivante (Sobrino *et al.*, 2004 ; Cristóbal *et al.*, 2009 ; Jimenez-Munoz *et al.*, 2009) :

$$Ts = \gamma.(\left(\frac{1}{\varepsilon}\right).(\psi 1.L_\lambda + \psi 2) + \psi 3) + \delta \quad (15)$$

avec,

ε : émissivité effective de la surface du sol,

Lλ : luminance spectrale en limite d'atmosphère (TOA) pour la longueur d'onde λ en W/(m².sr.µm),

γ et δ : paramètres dépendants de la fonction de Planck,

ψ1, ψ2 et ψ3 : fonctions atmosphériques,

γ et δ sont estimés à l'aide des équations (16) et (17) :

$$\gamma = \{\frac{C2.L_\lambda}{Tb^2}.[\lambda^4 \times L_\lambda.C1 + \frac{1}{\lambda}]\}^{-1} \quad (16)$$

et

$$\delta = -\gamma.L_\lambda + T_b \quad (17)$$

avec,

T_b : la température de brillance en K,

C1 : constante de rayonnement de Planck (C1 = 1,19104.10^8 W.µm^4.m^{-2}·sr^{-1}),

C2 : constante de rayonnement de Planck (C2 = 1,43877.10^4 µm.K),

λ : longueur d'onde effective (λ = 11,45 µm pour la bande 6 de *Landsat 5 TM* et λ = 10,89 µm pour la bande 10 de *Landsat 8 OLI/TIRS*).

La figure 58 récapitule toutes les étapes de la chaine de traitement et de détermination des Ts :

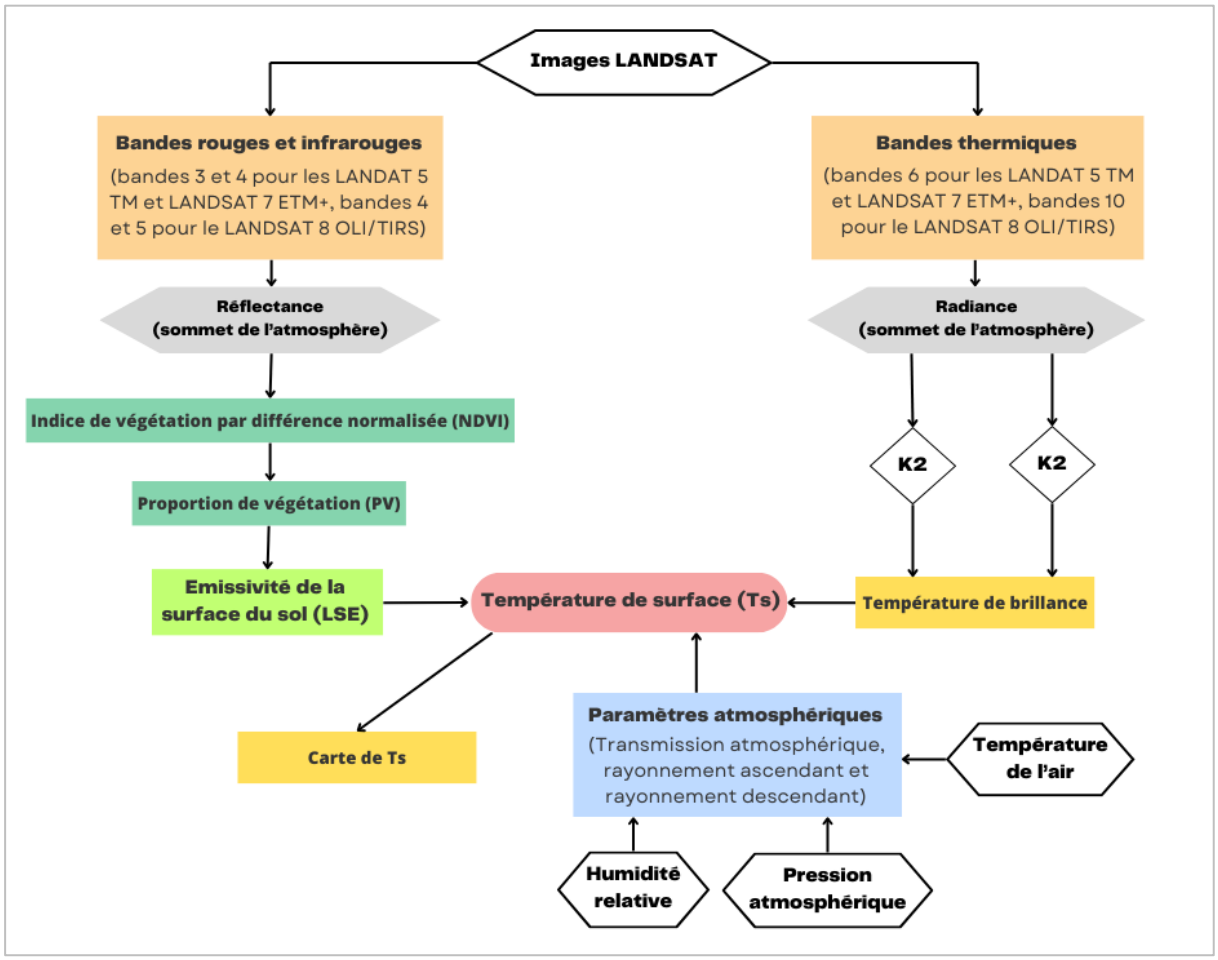


Figure 58 : Chaîne de traitement décrivant la méthodologie suivie pour le calcul des températures de surface (Ts) à partir des données infrarouges *Landsat*.

La luminance spectrale en limite d'atmosphère L_λ est calculée à partir des valeurs en compte numérique (CN) et des paramètres d'étalonnage du capteur (Chander *et al.*, 2007 ; Markham *et al.*, 2014 ; Czapla-Myers *et al.*, 2015).

$$L_\lambda = M_L . DN + A_L \qquad (18)$$

avec,

M_L et AL : paramètres d'étalonnage du capteur.

La température de brillance Tb, température apparente de la surface mesurée au niveau du capteur, est calculée comme suit (Chander *et al.*, 2007) :

$$Tb = K2 / ln\,(K1 / L_\lambda + 1) \qquad (19)$$

Avec,

K1 et K2 : constantes spécifiques d'étalonnage du capteur.

Depuis l'espace, les surfaces terrestres apparaissent hétérogènes du fait de la résolution spatiale des images. Dans ce cas, on considère que l'émissivité globale d'un pixel dépend de la végétation, de l'humidité du sol, de la rugosité et de l'angle de prise de vue (Salisbury et D'Aria, 1992). Des nombreuses méthodes qui existent pour estimer l'émissivité à partir des images d'observation de la Terre, c'est la méthode basée sur les NDVI qui est retenue ici (Van De Griend et Owe, 1993), et plus précisément celle recourant au seuillage du NDVI ou *NDVI-threshold method* ($NDVI^{THM}$). Largement utilisée et considérée comme la plus appropriée pour estimer les Ts à partir de données *Landsat* (Sobrino et Raissouni, 2000 ; Sobrino *et al.*, 2004, 2008 ; Walawender *et al.*, 2014 ; Renard *et al.*, 2019), elle se calcule par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon_v . PV + \varepsilon_s . (1 - PV) + C \qquad (20)$$

avec,

ε_s et ε_v : émissivité du sol et de la végétation,
PV : proportion de la végétation,
C : effet de cavité.

L'effet de cavité C rend compte de la rugosité de la surface (C=0 pour les surfaces planes) et il peut être calculé par l'équation ci-dessous pour les surfaces mixtes (Sobrino et Raissouni, 2000) :

$$\varepsilon = (1 - \varepsilon_s) . \varepsilon_v . F' . (1 - PV) \qquad (21)$$

F' est un facteur géométrique dont la valeur est comprise entre 0 et 1 selon la répartition géométrique de la surface. Sobrino et Raissouni (2000) ont donné une valeur moyenne de 0,55 pour les surfaces hétérogènes. Les autres symboles ont la même signification que dans les équations précédentes. La proportion de végétation PV appelée aussi couverture végétale fractionnelle (CVF) est obtenue à partir de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) avec :

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \qquad (22)$$

et

$$\mathrm{PV} = \left(\frac{(\mathrm{NDVI} - \mathrm{NDVI}_{min})}{(\mathrm{NDVI}_{max} - \mathrm{NDVI}_{min})} \right)^2 \qquad (23)$$

Les variables $\Psi 1$, $\Psi 2$, $\Psi 3$, schématisant l'interaction du rayonnement électromagnétique avec l'atmosphère, sont déterminées en utilisant le calculateur de paramètres de la correction atmosphérique élaboré par la NASA (Barsi *et al.*, 2003, 2005) disponible en ligne (ACPC - https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/). L'ACPC requiert de renseigner quelques informations comme la localisation de la zone d'étude, la date et l'heure de la prise de vue. Les résultats en sortie de cet algorithme sont améliorés par la prescription de variables météorologiques mesurées telles que la pression atmosphérique, la température de l'air et l'humidité relative (**Tableau 10**). Pour cela, comme indiqué précédemment, ce sont les données des stations météorologiques de la DNMC et de Météo-France qui ont été utilisées.

Au final, à l'issue de tous ces traitements, nous obtenons quatre cartes de Ts diurnes pour les deux sites d'étude (**Tableau 10**), ainsi qu'une carte nocturne datée du 17/06/2015 pour le Grand Casablanca.

4.3. Analyse spatio-temporelle des thermographies diurnes

Notre étude se décompose en trois parties : en premier lieu, nous procédons à l'analyse de la distribution spatiale des Ts en nous appuyant sur la série de thermographies de surface diurnes issues des images *Landsat* précédemment sélectionnées (Hassani *et al.*, 2020, 2021a ; Lebaut *et al.*, 2022). Dans notre analyse, les Ts diurnes sont utilisées pour identifier les zones propices à la surchauffe urbaine sous l'effet de l'énergie solaire, étant donné que l'ICU, phénomène nocturne, se prépare en journée. Ces résultats sont ensuite approfondis par une étude comparative des Ts diurnes des différentes classes d'occupation du sol entre le GC et l'EMM. Enfin, nous examinerons les effets de certains projets d'aménagement sur l'intensité et la distribuion des Ts (Hassani *et al.*, 2021b).

4.3.1. Evolution sur le long terme

Cette section porte sur l'analyse spatiale des Ts à travers une série de quatre images prises lors de la période la plus chaude de l'année dans des conditions météorologiques équivalentes (périodes anticycloniques) pour chacun des terrains d'étude. La sémiologie adoptée est identique sur toutes les cartes afin de pouvoir les comparer entre elles, et les valeurs des Ts ont été réparties en sept classes (**Figure 59** et **Figure 60**). Nous analyserons successivement les spatiocartes obtenues pour chacune des deux agglomérations étudiées avant de les comparer entre elles.

4.3.1.1. Cas du Grand Casablanca

La figure 59 représente les valeurs de Ts obtenues à partir des images *Landsat* prises au-dessus du GC en 1984, 1995, 2011 et 2019 lors de journées anticycloniques avec des températures de l'air comprises entre 21 et 23,2 °C et un vent faible (**Tableau 10**). Notons que bien que, les images satellitaires aient été acquises à des dates différentes de la période estivale, l'impact sur l'organisation spatiale des Ts est limité ce qui les rend comparables dans le temps (Hassani *et al.*, 2021).

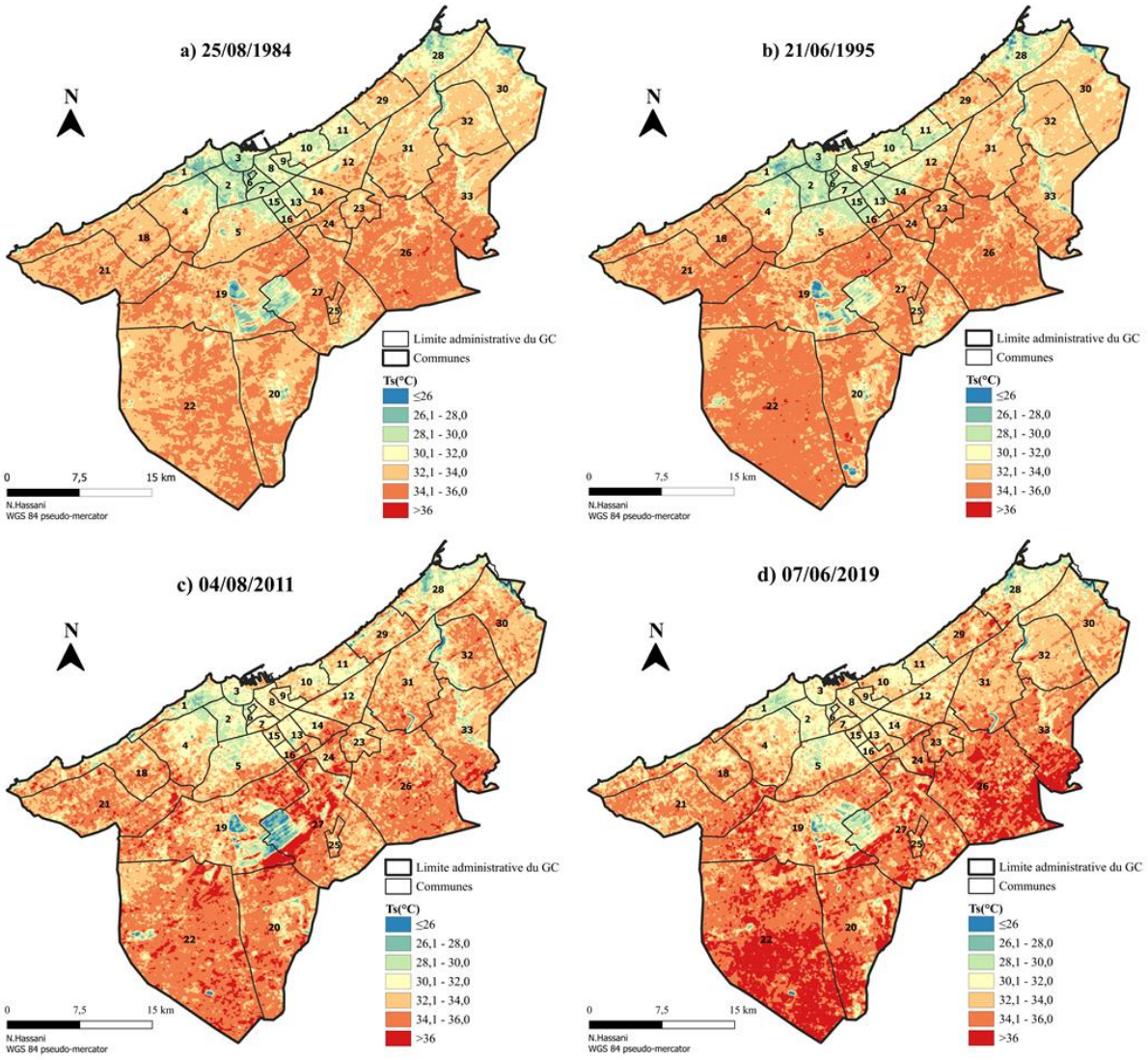


Figure 59 : Températures de surface (Ts) du Grand Casablanca pour quatre journées d'été réparties entre 1984 et 2019. a) 25/08/1984 ; b) 21/06/1995 ; c) 04/08/2011 ; d) 07/06/2019.

Quelle que soit l'année considérée, les spatiocartes montrent une forte hétérogénéité thermique (amplitude spatiale >10 °C) et l'existence, en fin de matinée, d'un écart de température négatif de plusieurs degrés entre les quartiers densément bâtis de Casablanca et Mohammédia (Médina et ancienne ville) et l'environnement rural. À titre d'exemple, le centre-ville de Casablanca bénéficie en moyenne d'une Ts inférieure de 2,5 °C à celle estimée en périphérie de la ville. Cet écart de température « ville-campagne » négatif coïncide avec l'apparition d'îlots de fraîcheur urbains au niveau du sol (IFUs) formant un quasi-continuum au niveau des deux pôles urbains (**Figure 59**).

De 1984 à 1995, les Ts intermédiaires, comprises entre 30 et 32 °C se limitent aux quartiers industriels de Roches Noires (commune de Sidi Bernoussi) et d'Ain Sabaa situés le long du littoral à l'est de Casablanca (voir **Annexe 3** pour la localisation) ; tandis que les Ts maximales dépassant 34 °C sont enregistrées sur les terres agricoles nues en périphérie sud et est du Grand Casablanca, ainsi qu'entre les villes de Casablanca et de Mohammédia (**Figure 59**).

Sur les thermographies de 2011 et de 2019 (**Figure 59**), on note que les valeurs de Ts les plus élevées (32 - 36 °C) se sont remarquablement étendues dans les centres-villes de Casablanca et de Mohammédia et vers les espaces péri-urbains, où de nouveaux pôles urbains périphériques ont été construits (voir les communes de Médiouna et de Nouaceur situées au sud et la commune de Tit Mellil située au centre-est de la métropole -**Annexe 3**). Au point que, dans la thermographie de 2019, la plupart des IFUs ont disparu. Il ne demeure que quelques noyaux de fraîcheur (<28 °C) épars principalement localisés au niveau de la forêt de Bouskoura au centre-ouest de la zone d'étude (**Figure 36**), ainsi que dans les quartiers résidentiels d'Aïn Diab (commune d'Anfa -**Annexe 3**) et de Californie (commune d'Aïn Chock -**Annexe 3**) constitués de maisons entourées de jardins, souvent avec piscine.

4.3.1.2. Cas de l'Eurométropole de Metz

La figure 60 représente les thermographies de surface issues des images *Landsat* prises au-dessus du territoire de l'EMM en 1985, 2010, 2018 et 2019 lors de journées anticycloniques avec des températures de l'air comprises entre 17,2 et 21 °C et une vitesse de vent moyenne inférieure à 7 Km/h (**Tableau 10**).

L'aire urbaine de Metz y apparaît comme un territoire-archipel constitué d'une mosaïque de microclimats, où se côtoient des zones chaudes et des zones plus fraîches (**Figure 60**). Sur le plan de l'évolution interannuelle, on remarque que sur la carte de 1985, les Ts élevées étaient rares, variant entre 28-32 °C et se limitaient au milieu urbain dense des centres-villes de Metz, Woippy et Montigny-lès-Metz. Vingt-cinq ans plus tard, on constate une progression du front des Ts élevées (>32 °C) : en 1985, les zones les plus chaudes représentaient 26,9 % du territoire métropolitain contre 37,2 % en 2019. Les zones de forte chaleur se sont développées au cours de la période étudiée (34 ans), cette extension étant corrélée à la croissance urbaine de l'agglomération. La part des surfaces urbanisées est en effet passée dans le même temps, de 9,1 à 18,7 %. Cela démontre la relation étroite liant la distribution spatio-temporelle des Ts et l'artificialisation des sols. Par ailleurs, l'intensité des Ts s'est nettement accrue et les températures les plus élevées correspondent désormais aux zones industrielles en périphérie de l'aire urbaine qui comptent d'importantes étendues minérales ou métalliques comme les hangars et les parkings. En effet, durant la période d'étude, l'agglomération a vu la création de plusieurs zones d'activité économiques (ZAE) telles que la ZAE du Technopôle, la ZAE d'Augny, la ZAE de la Maxe et la ZAE de Woippy (Hassani *et al.*, 2020).

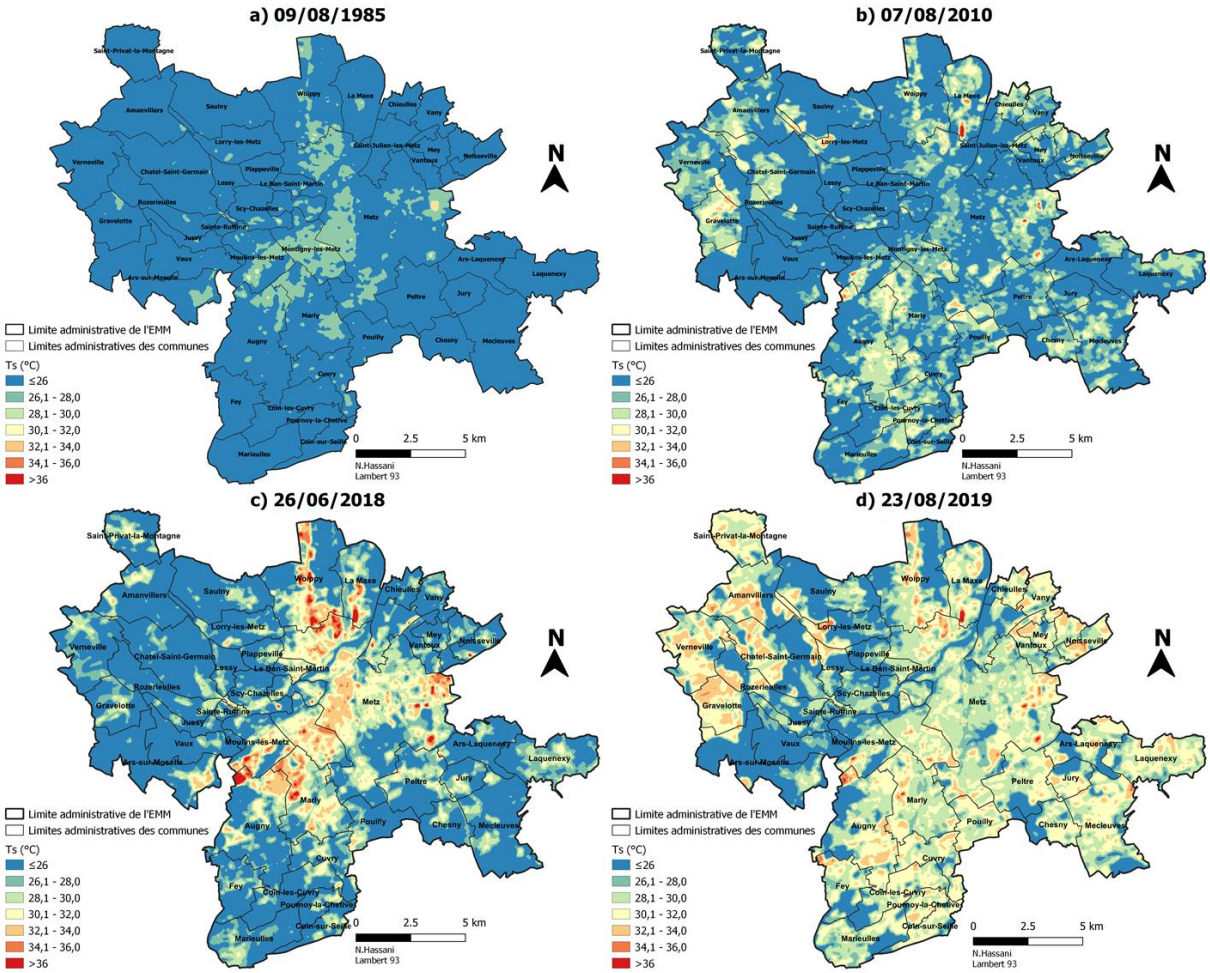


Figure 60 : Températures de surface (Ts) de l'EMM pour quatre journées d'été réparties entre 1985 et 2019. a) 9/8/1985 ; b) 7/8/2010 ; c) 26/6/2018 ; d) 23/8/2019.

Fait intéressant, on remarque une nette différence dans la distribution spatiale des Ts entre les images prises au mois de juin et celles prises au mois d'août. Les Ts élevées (>32 °C) sont spatialement plus étendues au mois d'août qu'au mois de juin, au point que les Ts maximales dépassent le cadre strictement urbain et s'étendent jusqu'aux espaces agricoles. En effet, des températures extrêmes sont relevées de manière identique aussi bien au centre-ville (milieu bâti dense) que dans les espaces ruraux, car la végétation y est plus clairsemée à la fin de l'été (moisson, sols secs, etc.). Cela montre que l'échauffement de surface nécessite, outre un fort ensoleillement, un assèchement des sols pour se développer et atteindre son intensité maximale (Hassani *et al.*, 2020).

4.3.1.3. Comparaison des deux territoires d'étude

La comparaison entre l'évolution spatio-temporelle des Ts et celle de la dynamique d'urbanisation des deux villes étudiées met en lumière une tendance commune à une augmentation des Ts et à l'extension des surfaces chaudes en corrélation avec la densification et l'étalement urbain. Les espaces présentant un excédent thermique ont tendance à s'étendre à l'ensemble de l'aire urbanisée, ne laissant que quelques cellules de fraîcheur qui soulignent l'influence des parcs et jardins, des points d'eau et des zones résidentielles les moins denses. Si

cet étalement n'est pas maîtrisé et accompagné de mesures d'aménagement destinées à limiter l'échauffement, on peut s'attendre à une amplification future du phénomène (Hassani *et al.*, 2020).

En revanche, l'analyse des thermographies de surface *Landsat* débouche sur des résultats très différents dans les deux aires urbaines. Si sur le territoire de l'EMM, les Ts les plus élevées durant les situations radiatives d'été, en fin de matinée heure locale, se concentrent sur les centres urbains denses et les zones d'activités périphériques, dans le GC, à l'inverse, les surfaces de la grande banlieue rurale de Casablanca et de Mohammédia et celles de l'arrière-pays sont généralement plus chaudes (ensemble d'îlots de chaleur au niveau du sol) que celles de la conurbation littorale (ensemble d'îlots de fraîcheur urbains au niveau du sol ou IFUs). Cette opposition entre les deux territoires s'explique par deux facteurs principaux : l'effet de brise littorale et le niveau de couverture végétale sur les terres agricoles environnant l'aire urbaine (Hassani *et al.*, 2021a).

En premier lieu, les températures fraîches relevées au niveau des hypercentres de Casablanca et de Mohammédia résultent sans doute de la situation côtière de l'agglomération qui lui fait bénéficier de l'effet rafraîchissant de la brise de mer. Des études montrent en effet que le front de brise peut atteindre le continent quelques heures après le lever du soleil (voir Dahech *et al.*, 2012 ; Bahi *et al.*, 2016). L'étude de Dahech et Charfi (2017) sur la ville de Bizerte en Tunisie a montré que l'air chaud de la ville était déplacé d'environ 10 km à l'intérieur des terres du fait de la brise de mer, ce qui est proche de ce que l'on peut estimer à partir des spatiocartes produites dans ce travail. De surcroît, la topographie locale (côte basse de la plaine de la Chaouia) favorise la pénétration de la brise de mer à l'intérieur des terres selon une direction quasi-perpendiculaire au trait de côte (voir les études de Johnson et O'brien, 1973 et Redaño *et al.*, 1991).

Par ailleurs, les données agricoles du GC indiquent que 50 % de la surface agricole utile (≃1150 km²) sont cultivées en bour (cultures sèches), 5 % en cultures irriguées (maraîchage et arboriculture) et 45 % en surfaces forestières, parcours et surfaces incultes (Direction Régionale de l'Agriculture Région Casablanca-Settat, 2018). De plus, dans ce climat semi-aride (selon l'indice de De Martonne), les cultures céréalières et fourragères en bour (blé tendre, maïs et orge fourrager) sont généralement moissonnées au printemps et au début de l'été (avril pour l'orge fourrager, juin pour le blé tendre et juillet pour le maïs). Au moment de l'enregistrement des images IRT *Landsat*, le rayonnement solaire incident est donc peu intercepté et les sols se comportent comme des surfaces sèches (faible évaporation), claires (réflectivité solaire élevée) et faiblement conductrices (la porosité du sol étant principalement remplie d'air) : la majeure partie de l'énergie solaire incidente se transforme alors en chaleur sensible à peu près de la même manière que dans les espaces urbanisés (un constat similaire a été fait par Bounoua *et al.* 2009 à Oran en Algérie). Au même moment, les immeubles de grande hauteur dans les hypercentres de Casablanca et Mohammédia, créent des zones ombragées importantes et contribuent à maintenir la fraîcheur jusqu'en fin de matinée (voir nos développements sur le *Sky View Factor* en première partie). À l'inverse, les espaces végétalisés de l'EMM, dominés

par le colza et les cultures céréalières[24], restent couverts de végétation jusqu'à la fin juillet, ce qui permet de garder les sols relativement frais une bonne partie de l'été.

4.3.2. Distribution des Ts diurnes en fonction des classes LCZ

Pour approfondir notre analyse de la relation entre les Ts diurnes et l'occupation du sol, nous nous sommes intéressés au comportement thermique de différentes classes LCZ (***cf.7.4.3.4***) couvrant l'intégralité des deux aires urbaines. Pour cela, nous avons sélectionné dix classes LCZ identiques pour les deux villes auxquelles s'ajoute la classe LCZ 7 (bidonvilles) propre à Casablanca (**Figure 61** et **Figure 62**). Les écarts de température sont déterminés par rapport à la moyenne spatiale des Ts. Les statistiques de température ont été obtenues en superposant deux thermographies *Landsat* (du 07/06/2019 pour le GC et du 23/08/2019 pour l'EMM) à des couches vectorielles représentant chacune les classes LCZ choisies à partir des cartes produites dans la section **7.4.3.4** grâce à l'outil « statistiques zonales » du logiciel QGIS. Pour chaque classe LCZ, les valeurs de Ts sont représentées sous la forme d'une boîte à moustaches.

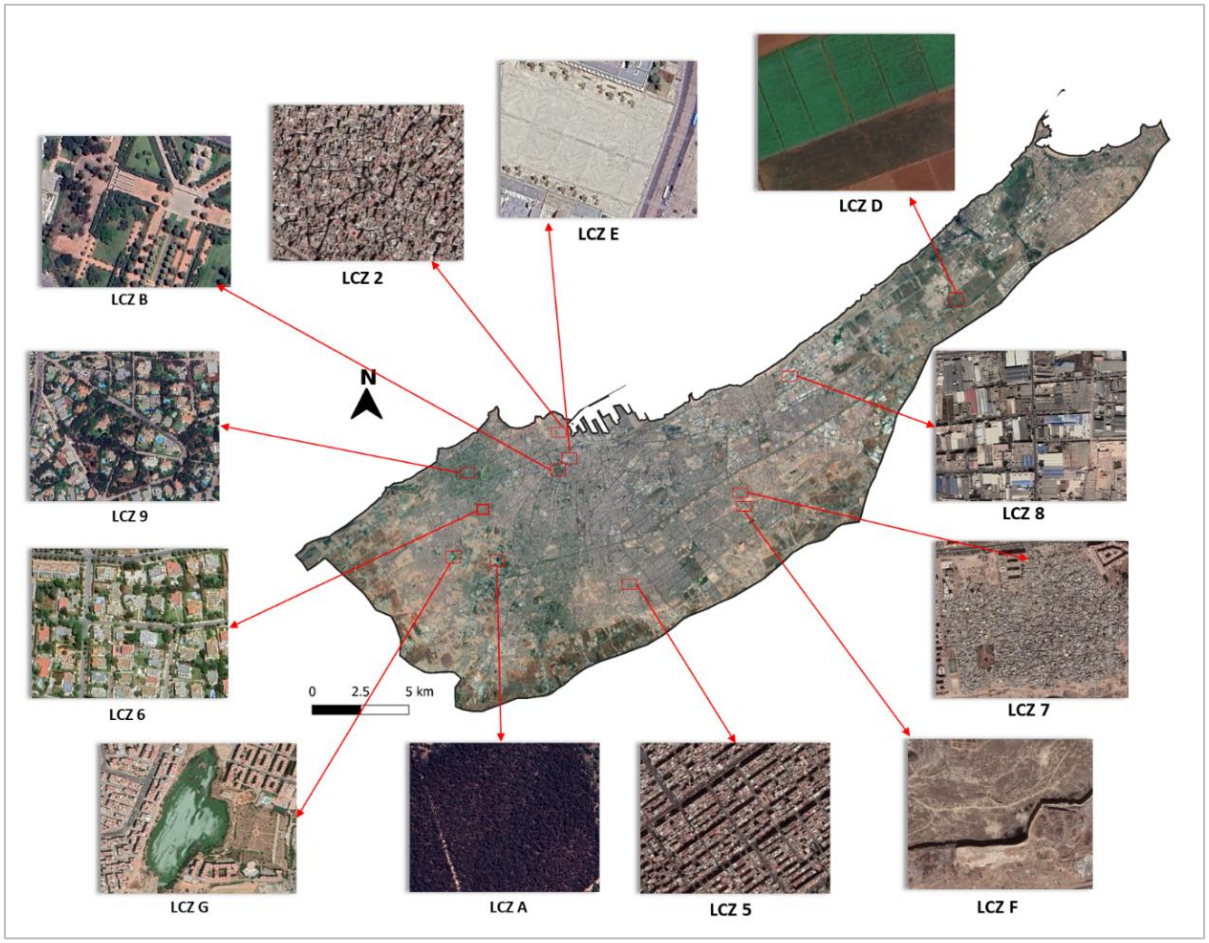


Figure 61 : Vues détaillées des différentes LCZ de Casablanca (fond de carte : *Google Earth*).

[24] Projet Alimentaire Territorial de l'Eurométropole de Metz : https://www.eurometropolemetz.eu/fileadmin/user_upload/mediatheque_metropole/conseil_metropolitain/2022/09_26_22/C260922_P9.pdf

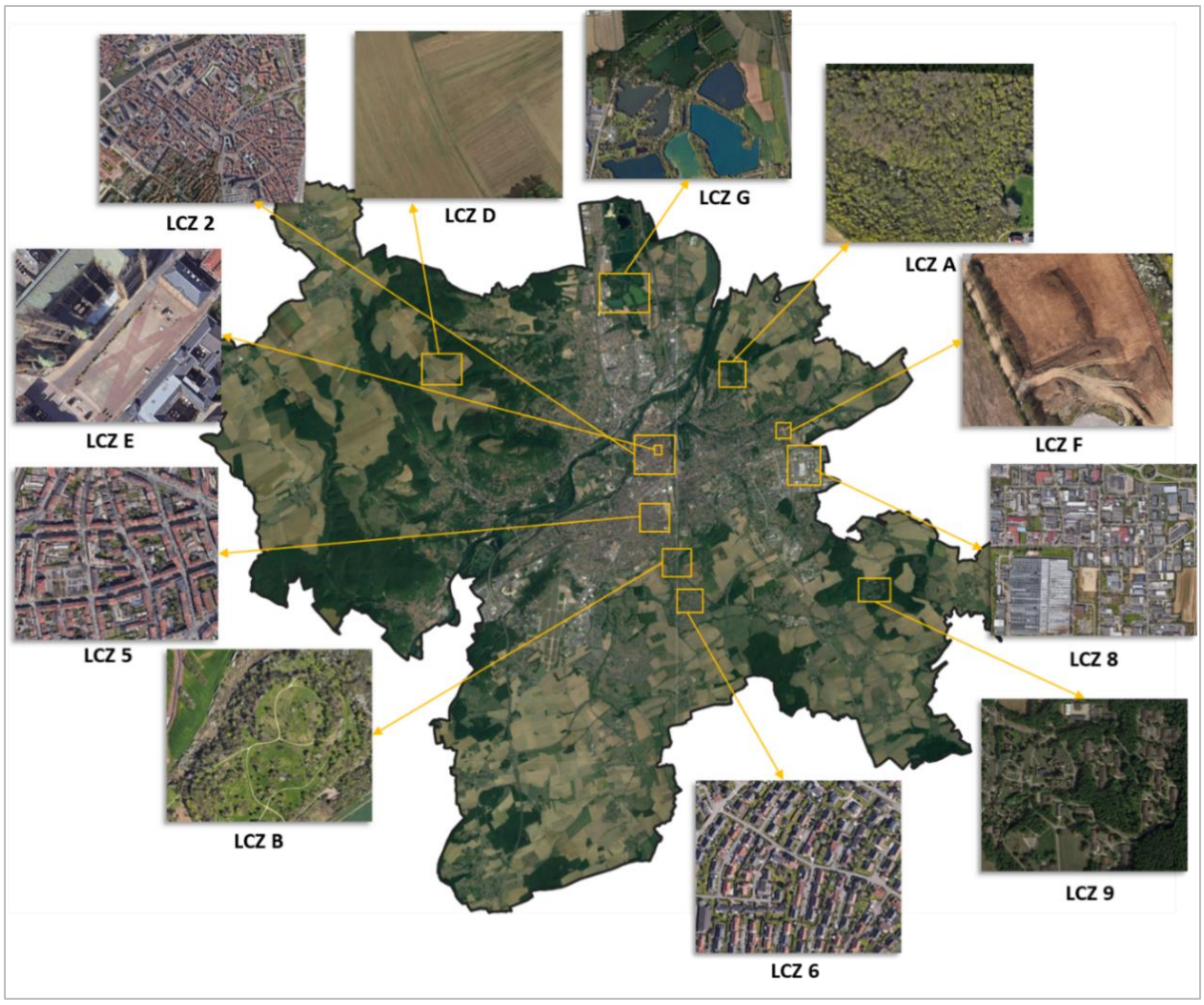


Figure 62 : Vues détaillées des différentes LCZ de l'EMM (fond de carte : *Google Earth*).

Tout d'abord, les boites à moustache mettent en évidence une amplitude thermique inter-LCZ plus marquée à Metz (≃11 °C) qu'à Casablanca (≃7,5 °C). Ensuite, des tendances similaires se dégagent : les surfaces en eau (LCZ G) se démarquent par leur fraîcheur (**Figure 63**). Les zones avec végétation, qu'il s'agisse de zones boisées (LCZ A et LCZ B) ou de zones d'habitat peu dense (LCZ 9), affichent des températures relativement fraîches. A l'inverse, les zones bâties (LCZ 2, LCZ 5 et LCZ 8) et dépourvues de végétation (LCZ D, LCZ E et LCZ F) sont les plus chaudes. Les températures élevées dans les espaces dépourvus de végétation s'expliquent par le fait que certaines parcelles sont dépourvues de végétation au moment du passage du capteur, ce qui entraîne un réchauffement dès le lever du soleil. Il est à noter que les sols nus (LCZ F) sont beaucoup plus chauds dans l'aire urbaine de Casablanca (Ts moyenne de 34 °C) qu'à Metz (Ts moyenne de 27 °C). Enfin, les bidonvilles (LCZ 7) affichent des Ts très proches de celles des zones d'activités (LCZ 8) avec une Ts moyenne de de 32 °C pour les deux classes.

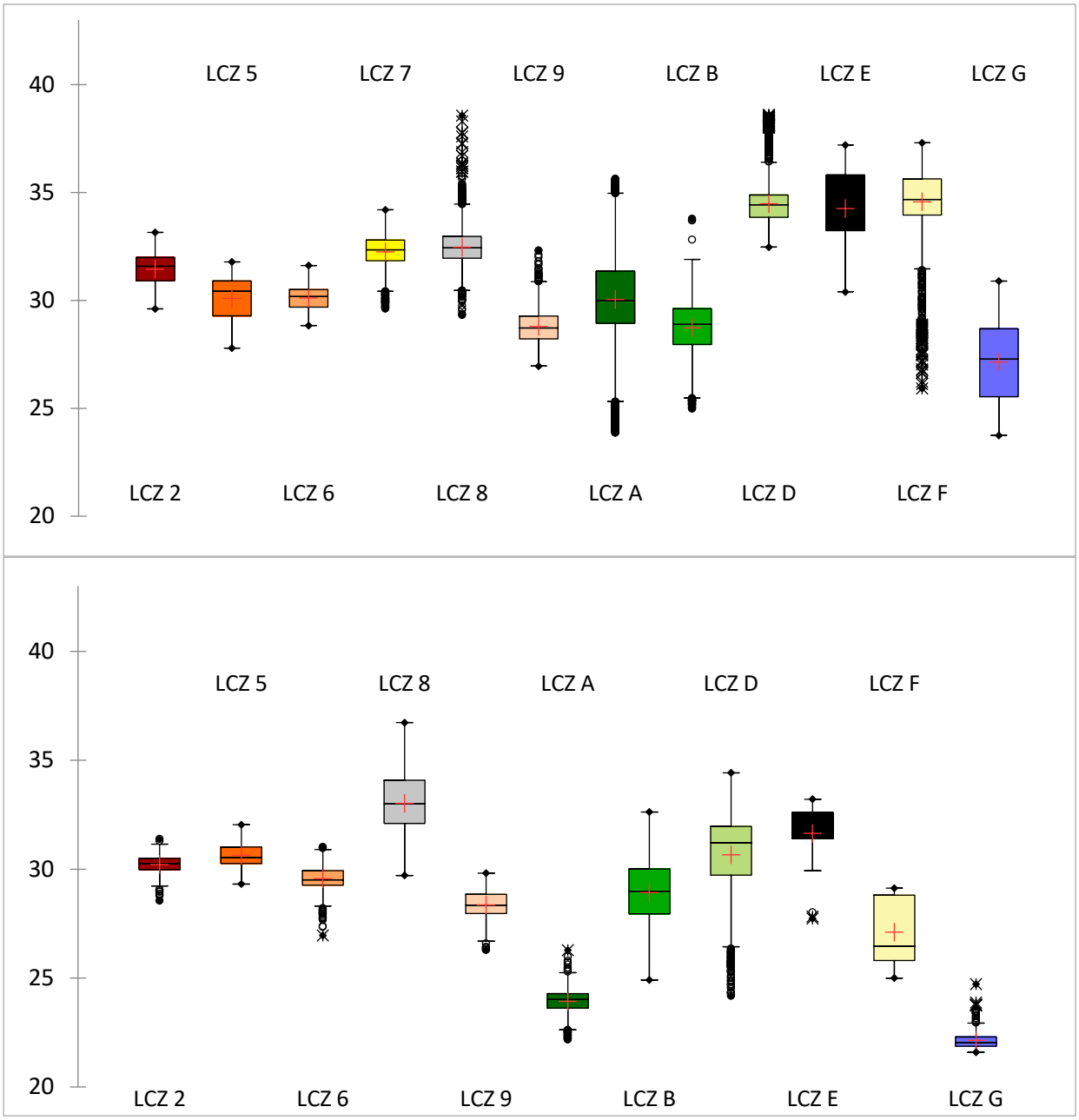


Figure 63 : Boites à moustache des Ts par classes LCZ : en haut les Ts du GC (07/06/2019) et en bas les Ts de l'EMM (23/08/2019). *NB* : se référer au chapitre 7 pour la production des cartes LCZ.

4.3.3. Impacts de certaines opérations de réaménagements sur les Ts

Mesurer les effets de l'urbanisation sur le climat local implique idéalement, de comparer la situation « pré-urbanisation » à la situation « post-urbanisation ». Les observations antérieures à l'urbanisation sont en effet les références idéales dans l'étude du climat urbain (Lowry, 1977). Certains espaces urbains dans nos deux terrains d'étude offrent justement cette opportunité puisqu'ils ont fait l'objet d'opérations de réaménagement au cours de la période d'étude. Il nous apparaît donc intéressant d'examiner leur impact thermique potentiel à l'instar des travaux de Renard *et al.* (2019) et Li *et al.* (2023a) par exemple. Aussi, nous avons sélectionné sept sites ayant fait l'objet, au cours des vingt dernières années, d'une opération de réaménagement

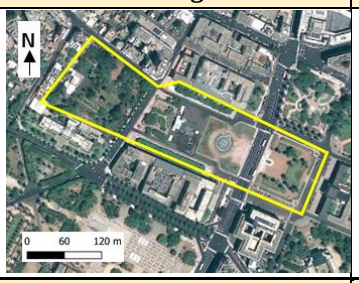
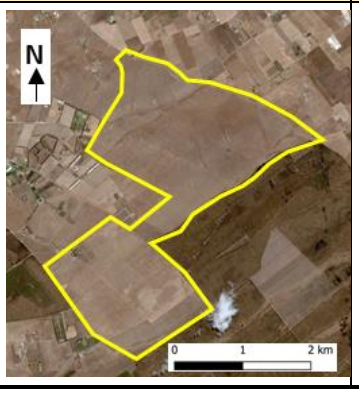
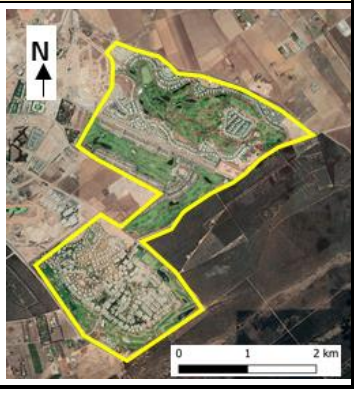
remarquable par son ampleur, sa couverture médiatique et/ou par l'importance symbolique du site concerné. L'objectif est de mettre en évidence l'impact de ces opérations sur les Ts en comparant, à l'aide des données *Landsat*, l'évolution des Ts et des indices spectraux d'humidité et de végétation (NDVI, NDBI, NDWI et MNDWI) pour des jours de conditions climatiques similaires, avant et après aménagement.

Les sites retenus peuvent être classés en deux catégories : d'un côté des sites ayant fait l'objet d'une requalification urbaine, et de l'autre, des sites ayant subi une urbanisation *stricto sensu*.

4.3.3.1. Les projets de réaménagement dans le Grand Casablanca

Comme évoqué dans le chapitre 3, la métropole de Casablanca a vu son paysage urbain se transformer au cours des dernières décennies : de nombreux projets d'envergure ont été lancés pour accompagner son développement socio-économique et sa croissance démographique. Nous avons sélectionné quatre sites emblématiques ayant fait l'objet d'un réaménagement entre 2003 et 2020 (**Tableau 11**).

Tableau 11 : Présentation des quatre sites emblématiques du GC.

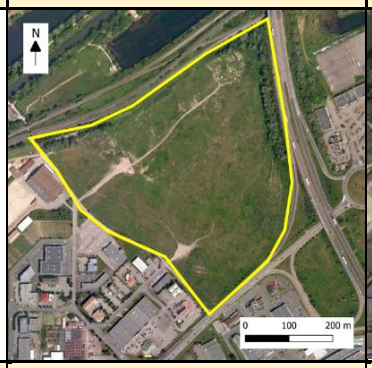
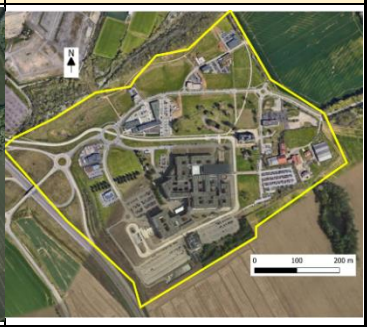
Site 1 : Anfa Park	**Site ante aménagement 2011**	**Site post aménagement 2020**
Chantier phare et symbole du renouveau urbain du Maroc, le projet Casa-Anfa vise à créer un pôle urbain moderne sur le site de l'aéroport historique de la ville, fermé en 2007. La partie nord a été transformée en un grand parc central de 50 hectares (Anfa Park).		
Site 2 : la Place Mohammed V	**Site ante aménagement 2009**	**Site post aménagement 2020**
La grande place Mohammed V, créée par l'urbaniste Henri Prost pendant le protectorat français, a fait l'objet d'une rénovation importante en vue de la construction du Grand Théâtre de Casablanca, plus grand édifice de ce genre en Afrique.		
Site 3 : La ville verte de Bouskoura	**Site ante aménagement 2008**	**Site post aménagement 2020**
La ville verte de Bouskoura est un éco-quartier construit au sud de Casablanca et attenant à la forêt de Bouskoura à quelques kilomètres du centre-ville. Il s'agit d'un centre urbain mixte composé d'une zone d'activités et de résidences haut standing autour d'un golf paysager, destiné à alléger la pression démographique sur le centre-ville en attirant les citadins « huppés » vers la périphérie sud.		

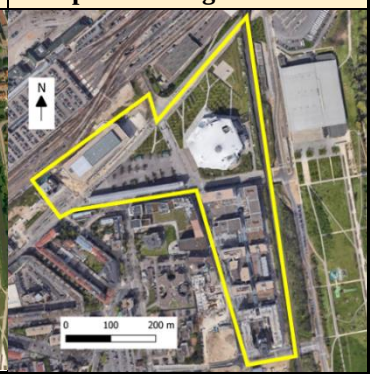
Site 4 : Le quartier d'affaires de Sidi Maârouf	Site ante aménagement 2003	Site post aménagement 2020
Du fait de sa situation stratégique à mi-chemin entre le centre-ville de Casablanca et l'aéroport international Mohamed V, ce qui fut autrefois un espace boisé a été transformé en un quartier d'affaires flambant neuf.		

4.3.3.2. Les projets de réaménagement dans l'EMM

À l'inverse du GC, la dynamique urbaine au sein de l'EMM est plus stable et les projets urbains d'envergure y sont beaucoup moins nombreux. Nous avons sélectionné trois sites ayant fait l'objet d'une opération d'envergure entre 2000 et 2019 (**Tableau 12**). Les deux premiers sites sont intéressants dans la mesure où ils traduisent la tendance à un développement de la ville vers sa périphérie en privilégiant des configurations adaptées à la voiture et à proximité des infrastructures autoroutières. Le troisième est pour sa part, le plus vieux et le plus ambitieux projet d'urbanisme à Metz.

Tableau 12 : Présentation des trois sites emblématiques de l'EMM.

Site 1 : Le centre commercial Waves-Actisud	Site ante aménagement 2006	Site post aménagement 2019
Inauguré en octobre 2014, le centre commercial Waves Actisud s'étend sur près de 61 000 m² au sein de la commune de Moulins-lès-Metz. L'édifice se démarque par son esthétique singulière avec des lignes courbées en forme de vague surplombée d'un toit recouvert d'inox.		
Site 2 : ZAC Innovation-Santé de Mercy	**Site ante aménagement 2003**	**Site post aménagement 2020**
L'opération d'aménagement du site de Mercy initiée en 2010 a consisté en la création, au sud-est de l'agglomération, d'un pôle « Santé-Innovation » regroupant l'Hôpital Mercy et d'autres établissements médicaux de pointe. Ce site qui s'étale sur 58 ha, poursuit son développement pour des programmes tertiaires et de l'activité artisanale.		

Site 3 : Le quartier de l'Amphithéâtre	Site ante aménagement 2006	Site post aménagement 2019
Aménagé sur le site de l'ancienne gare de marchandises, le quartier de l'Amphithéâtre s'inscrit dans le prolongement du centre-ville de Metz. La mixité urbaine et le développement durable sont les deux lignes directrices de ce projet d'aménagement débuté en 2006 avec la pose de la première pierre du Centre Pompidou-Metz, destinée à en être la pièce maîtresse.		

4.3.3.3. Résultats et discussion

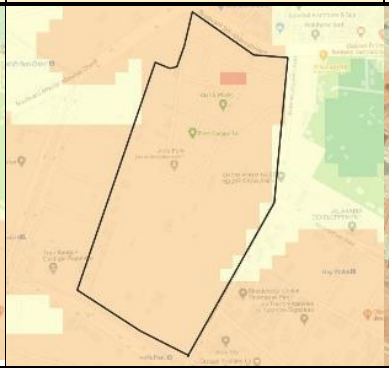
a) Les projets de requalification urbaine

- Anfa Park (GC)

Sur la partie nord de l'ancien aéroport de Casa-Anfa, une augmentation de l'indice de végétation et d'humidité est relevée, coïncidant avec une baisse des Ts moyennes de 2 °C et de l'indice NDBI (

Tableau 13 et **Figure 64**). Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où pour la création d'Anfa Park, des sols nus et des surfaces imperméables ont cedé la place à des surfaces végétalisées, des fontaines, un miroir d'eau de 700 m², ainsi qu'un canal long de 400m, en cohérence avec l'objectif du projet qui était de créer un « poumon vert » au sein de la ville *intra-muros*. Cela confirme l'effet rafraîchissant sur les surfaces obtenu en journée grâce à l'intégration d'espaces verts et de points d'eau.

Tableau 13 : Evolution des Ts sur le site d'Anfa Park sur la période 1995-2019.

Ts (°C)	Juin 1995	Août 2011	Juin 2019
<26 26 - 28 28 - 30 30 - 32 32 - 34 34 - 36 >36			

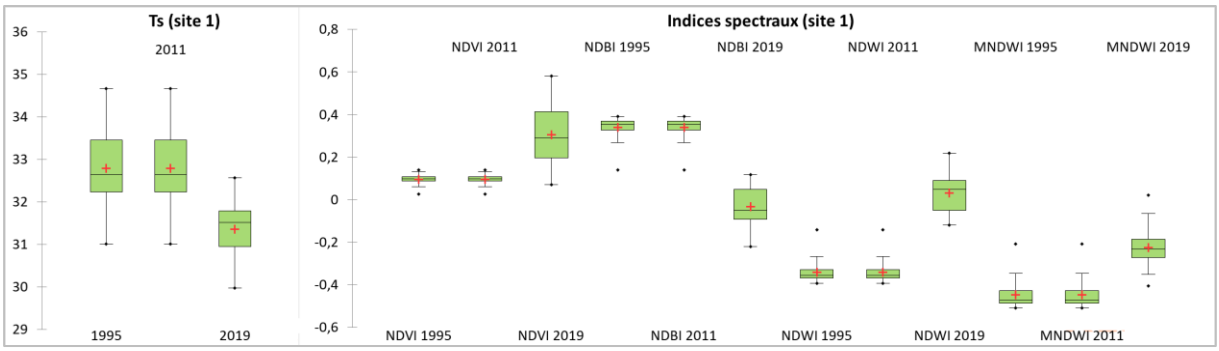


Figure 64 : Boîtes à moustaches des Ts et des indices spectraux du site d'Anfa Park (croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile).

- La Place Mohammed V (GC)

Contrairement au Anfa Park, une augmentation des Ts entre 2 et 3 °C est constatée sur la place Mohammed V, associée à une baisse logique de l'indice NDVI (**Tableau 14** et **Figure 65**). Cela s'explique par le fait que l'espace boisé dans la partie ouest a été supprimé et remplacé par des revêtements imperméables. En revanche, de manière surprenante, l'indice NDBI a enregistré une baisse due au recours à des couleurs claires, ce qui a permis de limiter en partie les effets de l'imperméabilisation du sol.

Tableau 14 : Evolution des Ts sur le site de la place Mohammed V sur la période 1995-2019.

Ts (°C)	Juin 1995	Août 2011	Juin 2019
<26 26 - 28 28 - 30 30 - 32 32 - 34 34 - 36 >36			

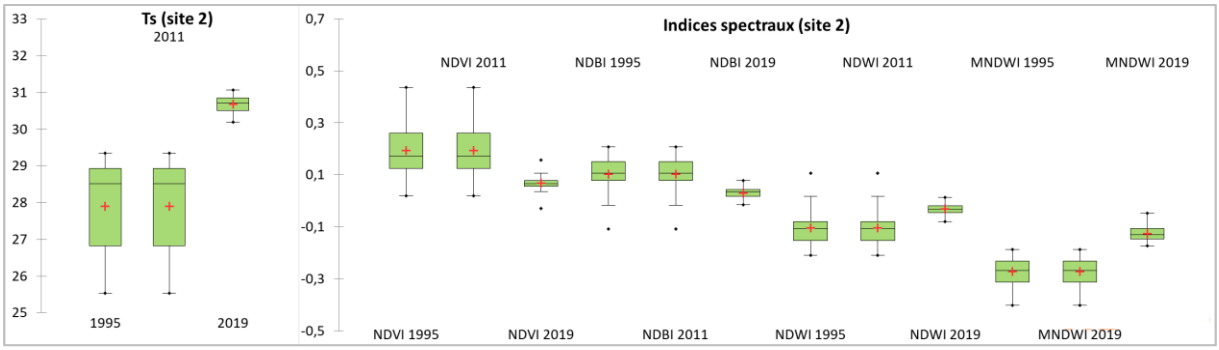
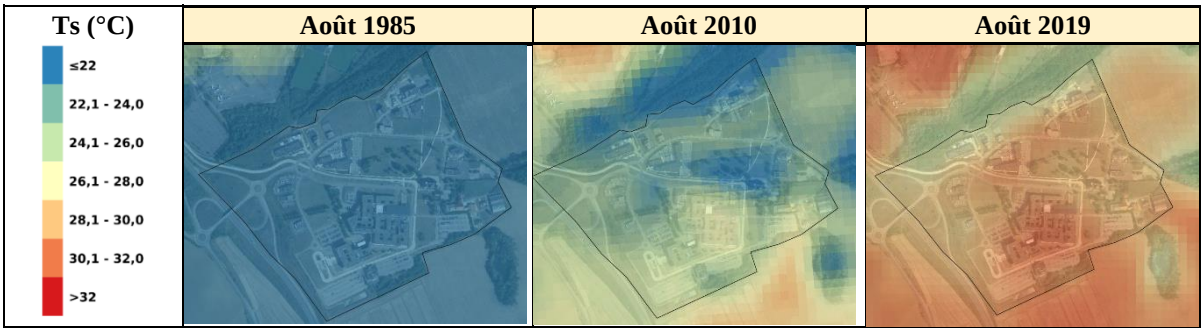


Figure 65 : Boîtes à moustaches des Ts et des indices spectraux de la place Mohammed V (croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile).

- La ZAC Santé-Innovation de Mercy (EMM)

Implantée sur d'anciens terrains militaires au sud-est de l'agglomération, la ZAC Santé-Innovation de Mercy a été aménagée de sorte à préserver un environnement naturel arboré de 11 ha afin de favoriser la qualité de vie des patients. Ce souci paysager ne s'est pas traduit par un gain en termes de températures de surface puisqu'une augmentation des Ts moyennes d'environ 5 °C est constatée entre 2010 et 2019 (**Tableau 15** et **Figure 66**).

Tableau 15 : Evolution des Ts du pôle Innovation-Santé Mercy sur la période 1985-2019.



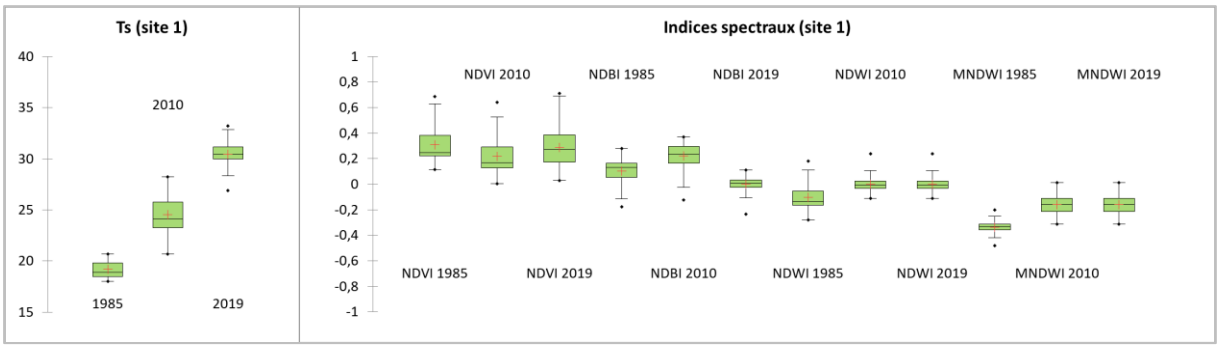


Figure 66 : Boites à moustaches des Ts et des indices spectraux du pôle Innovation-Santé Mercy (croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile).

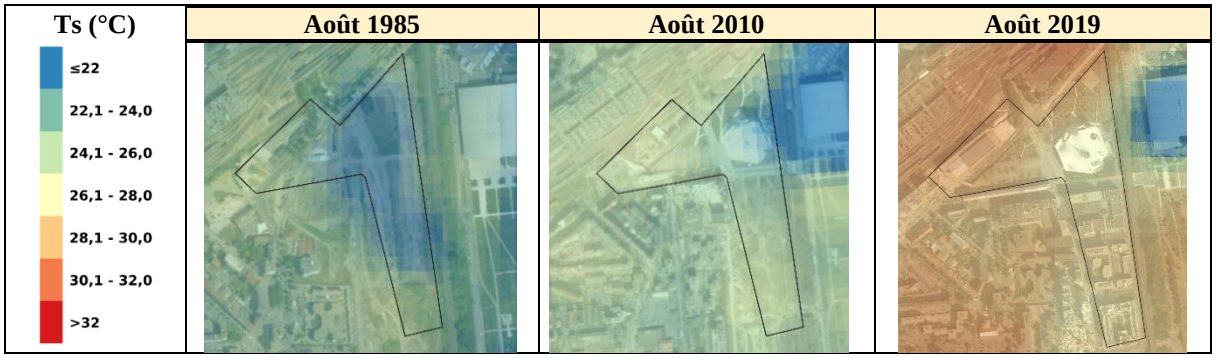
- Le quartier de l'Amphithéâtre (EMM)

Un échauffement des surfaces est également constaté au niveau du quartier de l'Amphithéâtre qui a été implanté sur le site d'une ancienne friche industrielle. Les thermographies font en effet apparaître une disparition de la poche de fraîcheur au centre du site. Cela est confirmé par l'analyse statistique (**Figure 67**) qui montre que l'aménagement de ce site a induit une augmentation des Ts moyennes de 2 à 3 °C, associée à une diminution logique de l'indice NDVI (**Tableau 16** et **Figure 67**). A l'inverse, l'indice NDBI a connu une légère baisse. Comme dans le cas de la place Mohammed V, nous supposons qu'elle est liée à l'utilisation de couleurs claires comme avec la toiture du Centre Pompidou par exemple. Ainsi, bien que le développement durable ait été inscrit en filigrane dans toutes les phases du projet[25], cela s'est traduit en pratique, par une dégradation de l'ambiance thermique locale. L'aménagement de ce quartier fait d'ailleurs débat pour sa densité élevée du bâti et son manque

[25] Alma Consulting, 2014, *QUARTIER DE L'AMPHITHEATRE l'avenir se construit ici*.

de végétation[26]. Cela a particulièrement été mis en évidence pendant les confinements liés à la crise sanitaire de 2020-2021 (***cf.* 10.3.1**).

Tableau 16 : Evolution des Ts du quartier de l'Amphithéâtre 1985-2019.



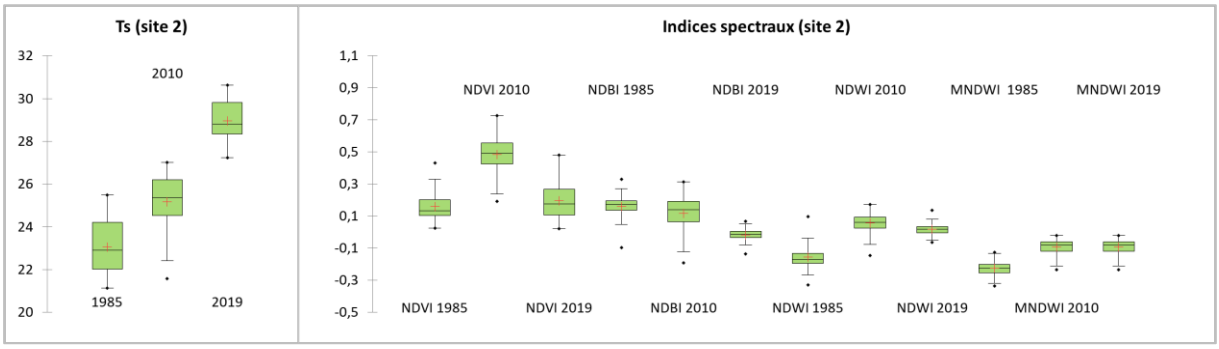


Figure 67 : Boites à moustaches des Ts et des indices spectraux du quartier de l'Amphithéâtre (croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile).

b) Les nouveaux quartiers « sortis de terre »

- La ville verte de Bouskoura (GC)

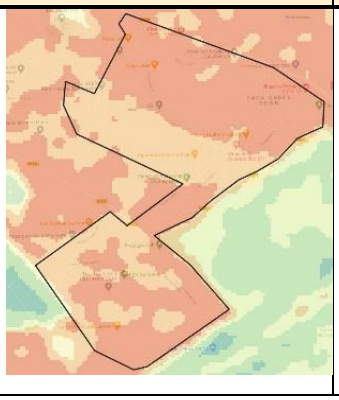
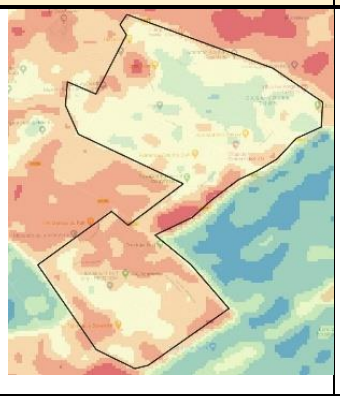
Réalisé entre 2011 et 2019, l'aménagement de la ville verte de Bouskoura a consisté en la conversion de champs de culture, faiblement irrigués et nus une bonne partie de l'année[27] en un écoquartier flambant neuf. Cela a conduit à des changements urbains majeurs affectant les Ts du fait de l'implantation d'une végétation importante (toits végétalisés, jardins, terrains de golf de 92 ha, etc.) et de zones humides ou en eau (lacs, piscines, etc.). Les Ts moyennes ont ainsi diminué d'environ 2 °C (**Tableau 17** et **Figure 68**). Le changement d'occupation du sol est détecté par les indices spectraux NDVI, NDWI et MNDWI qui ont connu des hausses significatives, accompagnées d'une baisse du NDBI (**Figure 68**). Ainsi, bien que ce projet puisse s'analyser comme un étalement urbain avec l'urbanisation de terres agricoles, le fait

[26] Le moniteur, 14 février 2020, « Metz : L'Amphithéâtre en quête d'espace et de verdure », https://www.lemoniteur.fr/article/metz-l-amphitheatre-en-quete-d-espace-et-de-verdure.2075214

[27] Conseil Général du Développement Agricole, 2009. « Atlas de l'agriculture marocaine ». Edition 2008, Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime, 51 p.

d’intégrer une végétation importante associée à une faible densité du bâti a produit localement un îlot de fraîcheur.

Tableau 17 : Evolution des Ts pour la ville verte de Bouskoura sur la période 1995-2019.

Ts (°C)	Juin 1995	Août 2011	Juin 2019
<26 26 - 28 28 - 30 30 - 32 32 - 34 34 - 36 >36			

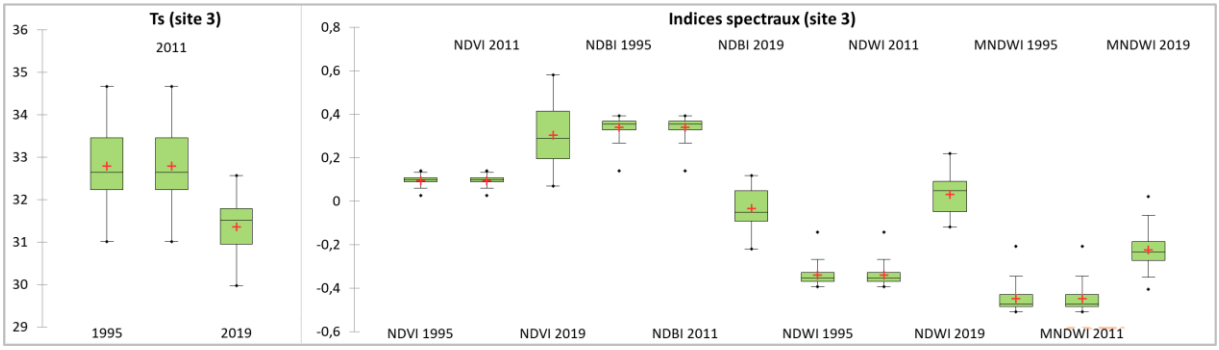
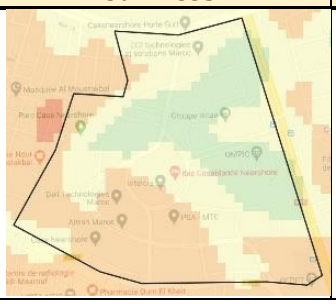


Figure 68 : Boites à moustaches des Ts et des indices spectraux de la ville verte de Bouskoura croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile).

<u>- Le quartier d’affaire Sidi Maârouf (GC)</u>

Le quartier d’affaires de Sidi Maârouf, pour sa part, a été construit en lieu et place d'un site naturel boisé. Ce changement dans l’occupation du sol a logiquement entraîné une augmentation des Ts (**Tableau 18**), mais de manière très modérée (hausse de la Ts moyenne d’environ 1 °C) car le nouveau quartier présente une faible densité de bâti et intègre un parc urbain dans sa partie ouest ainsi que de la végétation entre les immeubles. De même, les indices de végétation et d’humidité ont peu varié (**Figure 69**).

Tableau 18 : Evolution des Ts pour le quartier d’affaires de Sidi Maârouf sur la période 1995-2019.

Ts (°C)	Juin 1995	Août 2011	Juin 2019
<26 26 - 28 28 - 30 30 - 32 32 - 34 34 - 36 >36			

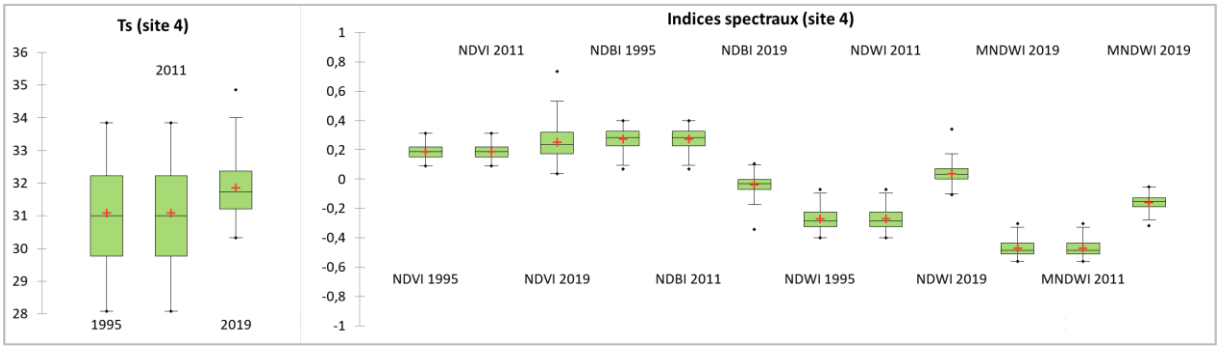
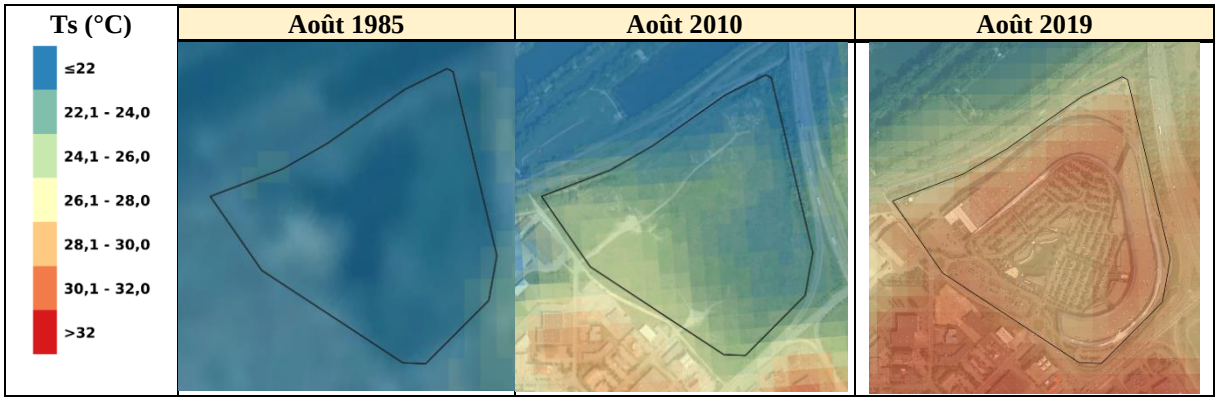


Figure 69 : Boites à moustaches des Ts et des indices spectraux du quartier d'affaires de Sidi Maârouf (croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile).

- Le centre commercial Waves Actisud (EMM)

Implanté en lieu et place d'un espace naturel, le centre commercial Waves Actisud a été conçu comme un « village commercial à ciel ouvert », avec en son centre, un lac autour duquel se déploient des restaurants et des lieux de loisir. Il est à noter qu'un millier d'arbres ont été plantés sur les parkings et aux abords du lac. Cependant, une hausse significative des Ts moyennes (de l'ordre de 7 °C) est constatée entre 2010 et 2019 (**Tableau 19**), accompagnée d'une diminution du NDVI (**Figure 70**). Cela est lié aux changements d'utilisation des terres, mais aussi choix qui a été fait de revêtir le toit et les façades de l'édifice de métal poli. Ce matériau a tendance à surchauffer en cas d'exposition au soleil du fait de sa forte conductivité thermique. L'analyse statistique met aussi en évidence une baisse du NDBI due à l'effet « miroir » de la structure.

Tableau 19 : Evolution des températures de surface pour le centre commercial Waves Actisud 1985-2019.



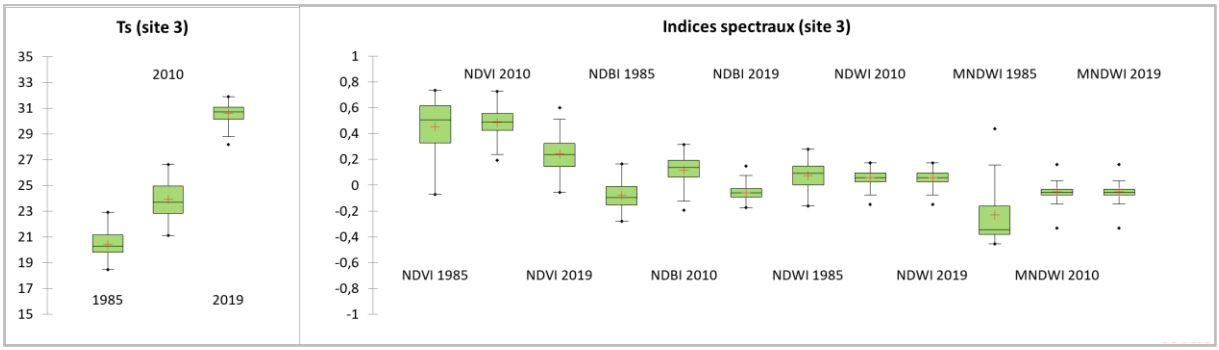


Figure 70 : Boites à moustaches des Ts et des indices spectraux du centre commercial Waves Actisud (croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile).

4.4. Analyse spatio-temporelle des thermographies nocturnes

4.4.1. Les données *ECOSTRESS*

Bien que l'étude de la distribution spatiale des Ts en période diurne présente un intérêt certain pour identifier les surfaces accumulatrices de chaleur, notre étude des îlots de chaleur et de fraîcheur de surface ne saurait se limiter à la seule période diurne puisque c'est la nuit que l'essentiel de la chaleur accumulée est restituée au milieu urbain. Aussi, nous proposons de compléter notre analyse de la distribution spatiale des Ts en journée en nous intéressant à la variabilité spatiale des îlots de chaleur et de fraîcheur de surface après le coucher de soleil (Lebaut *et al.*, 2022 ; Hassani *et al.*, 2023b). Cependant, nous nous retrouvons vite face au problème de l'insuffisance des données. Nous disposons certes d'une image *Landsat* prise au-dessus du GC au cours de la saison chaude, mais pour l'EMM en revanche, nous ne disposons d'aucune image *Landsat* nocturne exploitable. De surcroît, les images *Landsat* sont acquises au rythme de passages effectués à des heures fixes tous les 16 jours, ce qui en fait un outil adapté pour étudier l'évolution interannuelle des Ts, mais pas pour une étude de leur variabilité spatiale intra-journalière. Ces limites font qu'il y a besoin de compléter les données *Landsat* par des images issues d'un autre capteur ayant un mode de fonctionnement différent. Parmi tous les capteurs en orbite disponibles, *ECOSTRESS* est celui qui, selon nous, présente les caractéristiques à même de pallier les insuffisances de *Landsat* en vue d'échantillonner le cycle nocturne des Ts et leurs contrastes spatiaux.

Effectivement, l'*Ecosystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment* (*ECOSTRESS*) lancé en juin 2018 et amarré à la station spatiale internationale, fournit des données IRT à une fréquence d'échantillonnage élevée (entre 1 et 7 jours) pour une résolution native de 69m x 38m au nadir mais ses produits sont rééchantillonnés à 70 m x 70 m (Lebaut *et al.*, 2022). L'orbite particulière de l'ISS (orbite non polaire basse (400 km)) permet au capteur *ECOSTRESS* d'observer la même zone à différents moments du cycle journalier plutôt qu'à des heures fixes jour/nuit (Fisher *et al.*, 2020 ; Li *et al.*, 2021 ; Xiao *et al.*, 2021). Malgré cet avantage, l'utilisation d'*ECOSTRESS* dans les études de cycle diurne présente quelques limites : compte tenu du cycle de répétition de 1 à 7 jours, il faut *a minima* plusieurs semaines au capteur pour couvrir une grande partie du cycle journalier, il est alors nécessaire d'élargir la période d'étude

à plusieurs années pour pouvoir couvrir l'intégralité de ce cycle avec des images de qualité suffisante. L'utilisation combinée des données *Landsat* et *ECOSTRESS* peut alors potentiellement fournir de nouvelles informations sur les variations quotidiennes de l'ICUs ; les forces/faiblesses des deux satellites se compensant.

4.4.2. Acquisition des données *ECOSTRESS*

Les images Ts *ECOSTRESS* utilisées dans cette étude ont été obtenues à partir de la plate-forme *AppEEARS*[28] *de la NASA*. Il convient de noter que le capteur thermique *ECOSTRESS* comporte 5 bandes spectrales IRT entre 8,29 et 12,09 µm. Hulley *et al.* (2022) et Chang *et al.* (2022) indiquent que ces Ts sont générées à l'aide de la méthode TES. La précision et l'incertitude des produits de Ts (LST 2) rapportée sont respectivement de 0,15 K et 0,5 K à 300K (Hook *et al.*, 2020). Sur cette plateforme, les requêtes relatives à la période d'étude et l'aire géographique de chaque territoire ont été saisies, puis sur les centaines d'images qui sont remontées, après un travail de filtrage tenant compte de la qualité et de la couverture nuageuse, nous avons retenu 8 images nocturnes pour les deux sites (quatre pour chaque site) sur la période estivale pour les années de 2018 à 2022 (**Tableau 20**). Ensuite, les valeurs de Ts sont réparties en 6 classes par intervalles égaux sur *QGIS* afin de pouvoir les comparer entre elles.

Tableau 20 : Caractéristiques des images *ECOSTRESS* utilisées dans cette étude.

Capteur	Date d'acquisition	Heure d'acquisition (heure locale)	Résolution spatiale de la bande IRT (m)
***ECOSTRESS* (GC)**	05/07/2019	03h05	70
***ECOSTRESS* (GC)**	08/07/2021	00h11	70
***ECOSTRESS* (GC)**	17/07/2021	06h01	70
***ECOSTRESS* (GC)**	31/05/2022	22h27	70
***ECOSTRESS* (EMM)**	02/07/2019	06h38	70
***ECOSTRESS* (EMM)**	03/07/2019	05h47	70
***ECOSTRESS* (EMM)**	20/07/2020	01h08	70
***ECOSTRESS* (EMM)**	21/07/2021	21h29	70
***ECOSTRESS* (EMM)**	16/07/2022	22h34	70

4.4.3. Spatialisation des Ts nocturnes du Grand Casablanca (*Landsat*)

La thermographie *Landsat* nocturne ci-dessous (**Figure 71**) met en évidence une inversion s'opérant dans la localisation des îlots de chaleur de surface dans l'aire urbaine de Casablanca : alors que ceux-ci se localisent préférentiellement dans l'environnement rural en journée, la nuit, on les retrouve essentiellement au niveau de la conurbation littorale. Les Ts varient de 13 à 26 °C en début de nuit, ce qui représente une amplitude thermique d'environ 13 °C à l'échelle du GC. La thermographie fait également ressortir de très nets contrastes thermiques entre l'habitat pavillonnaire d'une part, et l'habitat collectif d'autre part : les Ts peu intenses apparaissent dans

[28] *Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples* : https://appeears.earthdatacloud.nasa.gov/

les quartiers résidentiels d'habitat diffus, comme le quartier d'Aïn Diab à l'ouest, le quartier Californie au sud de Casablanca, ou encore ceux de la zone côtière de Mohammédia au nord-est. En revanche, dans les quartiers d'habitat social entourant Casablanca (quartier d'Oulfa à l'ouest par exemple), des noyaux de chaleur intense apparaissent. Cela s'explique vraisemblablement par leur tissu très dense et l'absence de végétation. À la périphérie de la métropole, des îlots de fraîcheur sont clairement identifiables. Ils correspondent à des espaces plus ou moins ruraux, constitués de terrains agricoles et boisés (champs agricoles de Dar El Hadj Omar par exemple (**Figure 71**)).

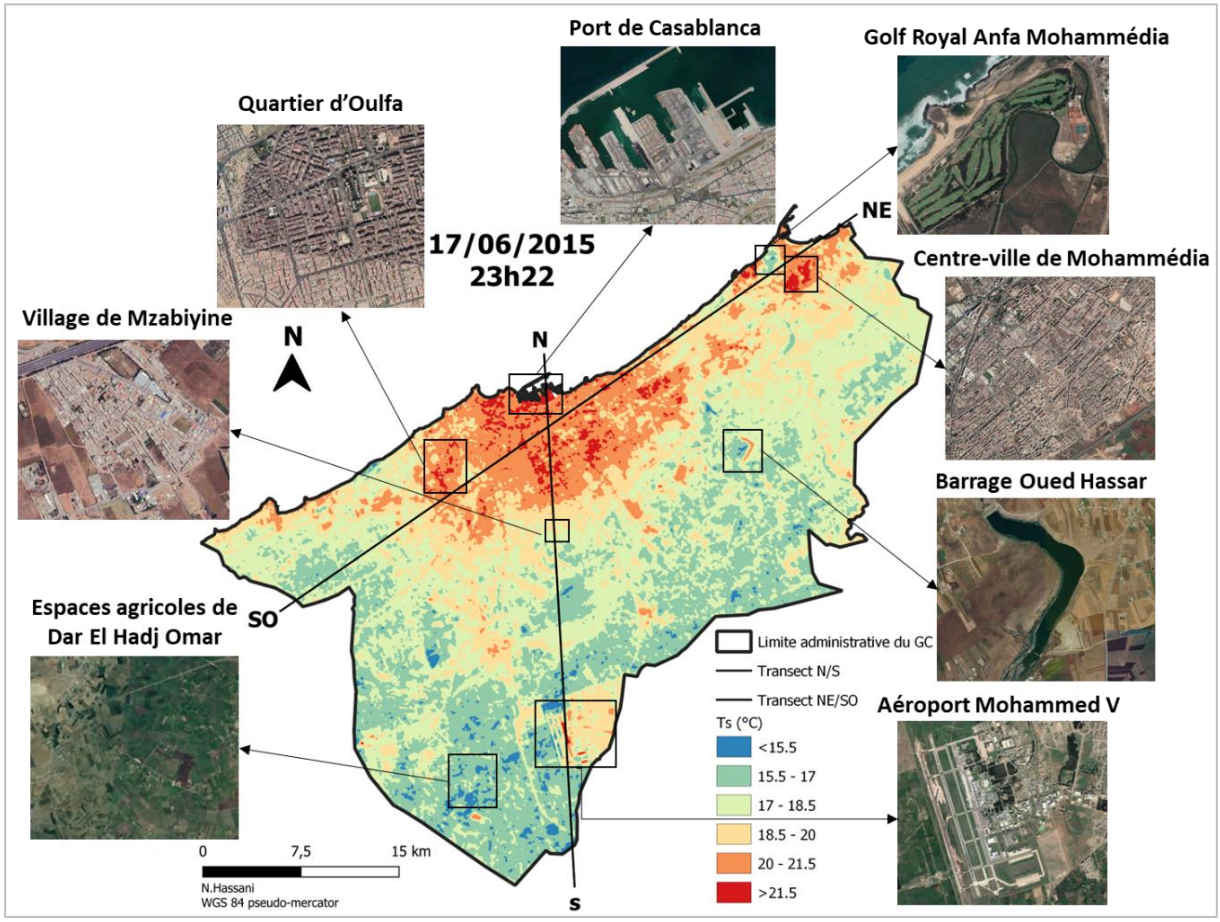


Figure 71 : Ts nocturnes du Grand Casablanca (spatiocarte du 17/06/2015 à 23h22 heure locale) et vues en miniature des sites commentés dans le texte et transects NS et NE/SO.

Les deux transects de température illustrés par la figure 71 (transect NS et transect NE/SO) confirment la formation d'un ICUs en début de nuit dans les zones densément bâties et industrielles des villes de Casablanca et de Mohammédia et sur l'aéroport Mohammed V (**Figure 72** et **Figure 73**). Les valeurs de Ts des espaces urbains et industriels dépassent les 21,5 °C, tandis que dans les espaces ruraux, les valeurs varient entre 13 et 17 °C (**Figure 71**). Plus loin, vers le sud et le sud-ouest de l'espace étudié, un archipel d'îlots de fraîcheur apparaît (**Figure 72** et **Figure 73**). Ils correspondent aux espaces fortement végétalisés (forêt de Bouskoura et parc Sindibad de Casablanca) et à certaines étendues agricoles irriguées. Cependant, des clusters de chaleur intense apparaissent également dans les pôles périphériques fortement urbanisés (communes de Mediouna et de Nouaceur situées au sud, commune de Tit Mellil située à l'est) et des surfaces en eau (Hassani *et al.*, 2021a).

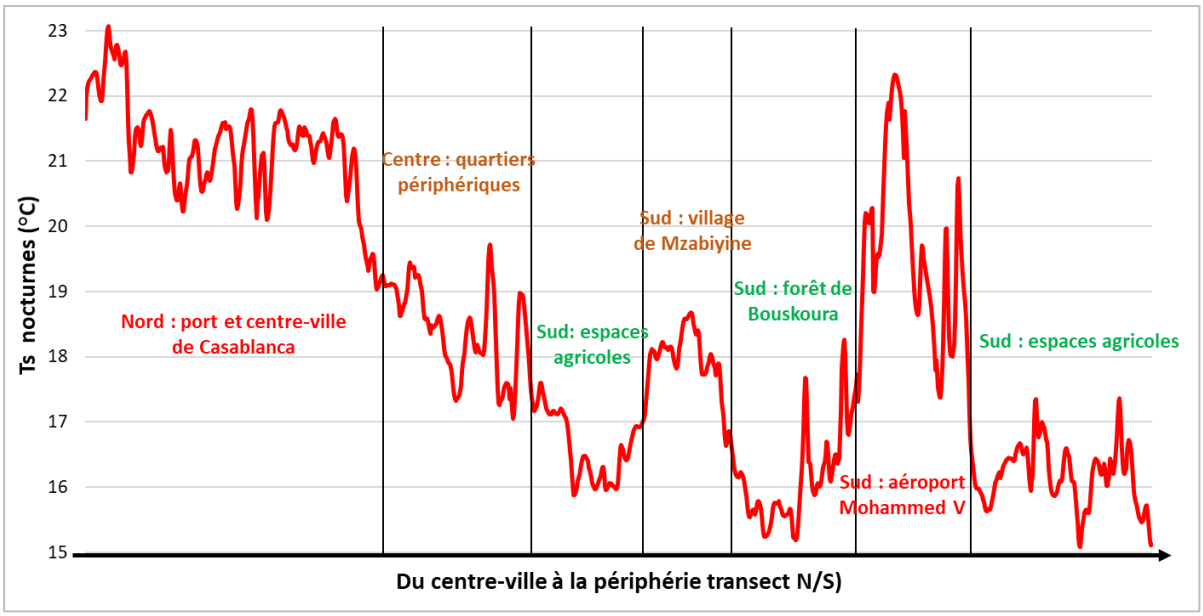


Figure 72 : Profil thermique du transect nord/sud établi à partir de la thermographie *Landsat* nocturne du 17/06/2015.

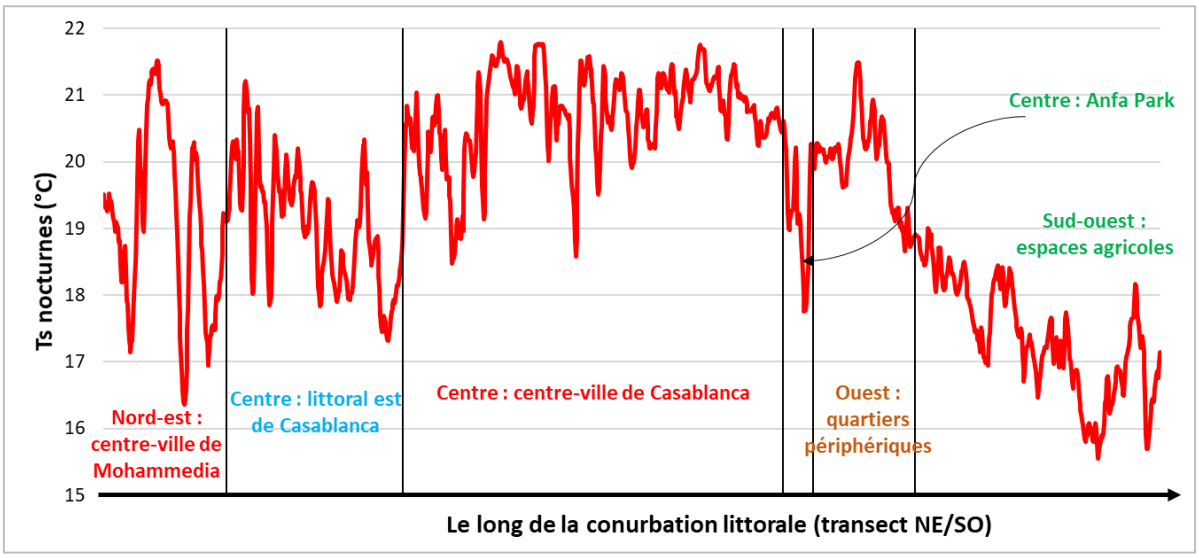


Figure 73 : Profil thermique du transect nord-est/sud-ouest établi à partir de la thermographie *Landsat* nocturne du 17/06/2015.

4.4.4. Spatialisation des Ts nocturnes à l'échelle de l'EMM (*ECOSTRESS*)

Les Ts extraites à partir de l'image *ECOSTRESS* nocturne de l'EMM (**Figure 74**) varient de 11 à 24 °C, ce qui représente une amplitude thermique d'environ 13 °C à l'échelle de l'EMM, soit un ΔT proche de celui relevé à Casablanca. En revanche, contrairement à ce que l'on relève à Casablanca, la thermographie montre que le schéma spatial de l'ICUs messin en début de nuit est, dans l'ensemble, similaire à celui observé en période diurne dans les thermographies du mois de juillet. Le front des Ts élevées se concentre dans les espaces densément bâtis et dans les ZAE périphériques ; bien qu'en termes d'intensité, les Ts mesurées sont inférieures

(>21,5°C) à celles observées pendant la journée aux heures de l'irradiance solaire maximale (>36 °C).

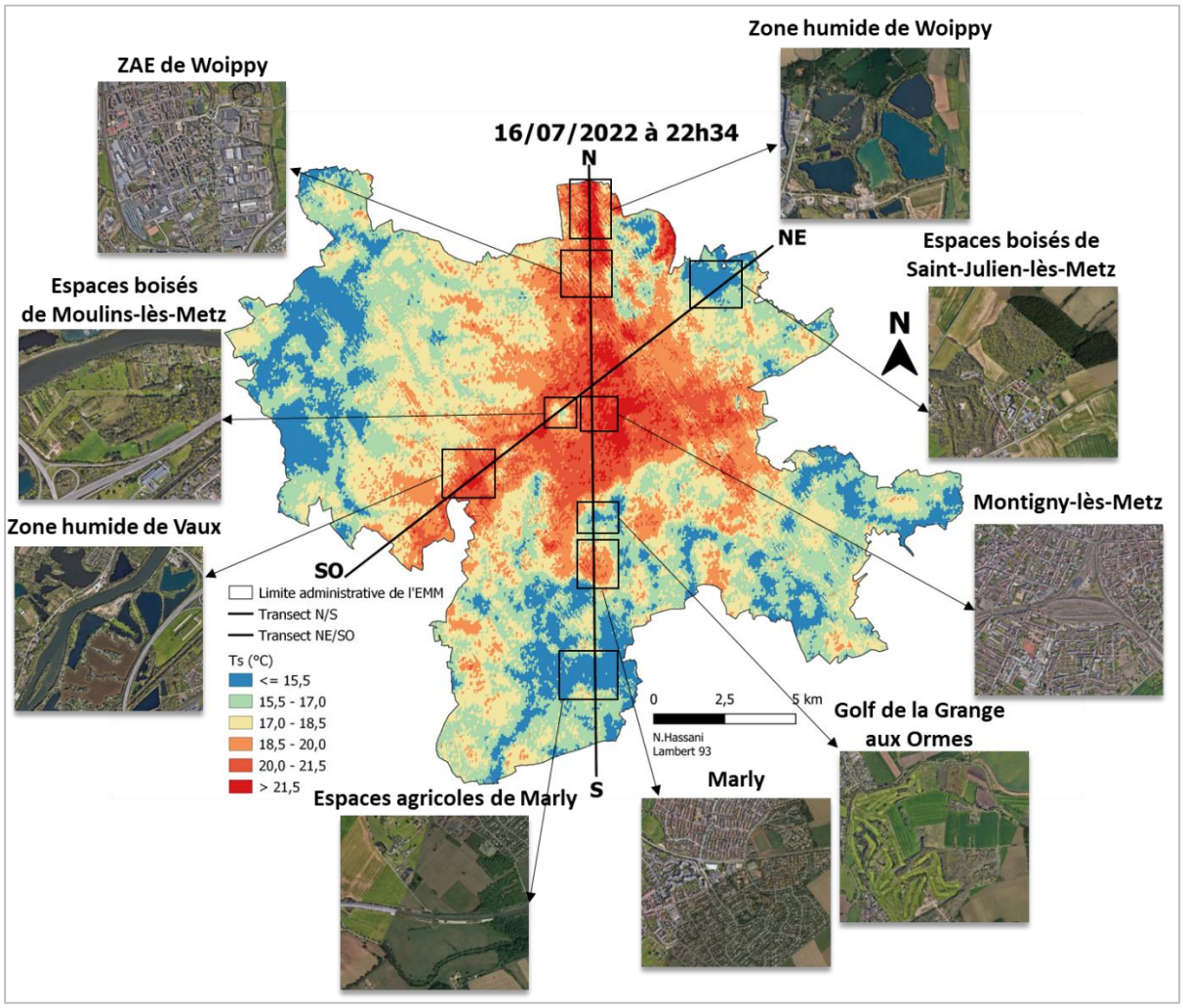


Figure 74 : Températures de surfaces nocturnes de l'EMM (spatiocarte *ECOSTRESS* du 16/07/2022 à 22h34 heure locale), vues en miniature des sites commentés dans le texte et transects N/S et E/O.

Les deux transects de température illustrés par les figures 75 et 76 (transect NS et transect NE/SO) mettent en évidence l'ICUs dans les centres urbains de Metz, Woippy, et Montigny-lès-Metz ainsi qu'au niveau des surfaces en eau (**Figure 74**). Les transects indiquent également que les espaces densément urbanisés, que ce soit en cœur de ville à Metz ou dans les villages environnants, présentent un ΔT d'environ +11 °C. Cependant, dès que l'habitat devient moins dense, notamment en périphérie de la ville de Metz comme dans la commune de Magny au sud, l'amplitude thermique tombe à environ 7 °C. Les Ts maximales au centre-ville de Metz atteignent 23 °C, mais chutent à 18 °C pour les espaces les moins denses (communes de Coin-sur-Seille, de Cuvry, de Coin-lès-Cuvry) (**Figure 75**).

Outre les espaces urbains denses, les masses d'eau sont les milieux les plus chauds la nuit. En particulier, la Moselle, large d'une centaine de mètres, présente des valeurs de Ts très élevées, comprises entre 17 °C pour les secteurs les plus profonds et 23 °C pour les secteurs peu profonds dans sa traversée de la ville de Metz (Lebaut *et al.*, 2022). De même, l'étang Saint-

Rémy et la zone humide de Woippy d'une surface d'environ 500 ha, jouxtant une ZAE au nord de l'agglomération présente un ΔT de +11 °C. Enfin, la végétation, qu'elle soit en bordure de cours d'eau, dans les parcs ou dans les espaces boisés telle que la forêt de Saint-Julien-lès-Metz au nord-est (**Figure 74**), présente les Ts les plus modérées (<14 °C), avec un différentiel de température moyenne d'environ 3 °C par rapport au centre-ville (**Figure 76**).

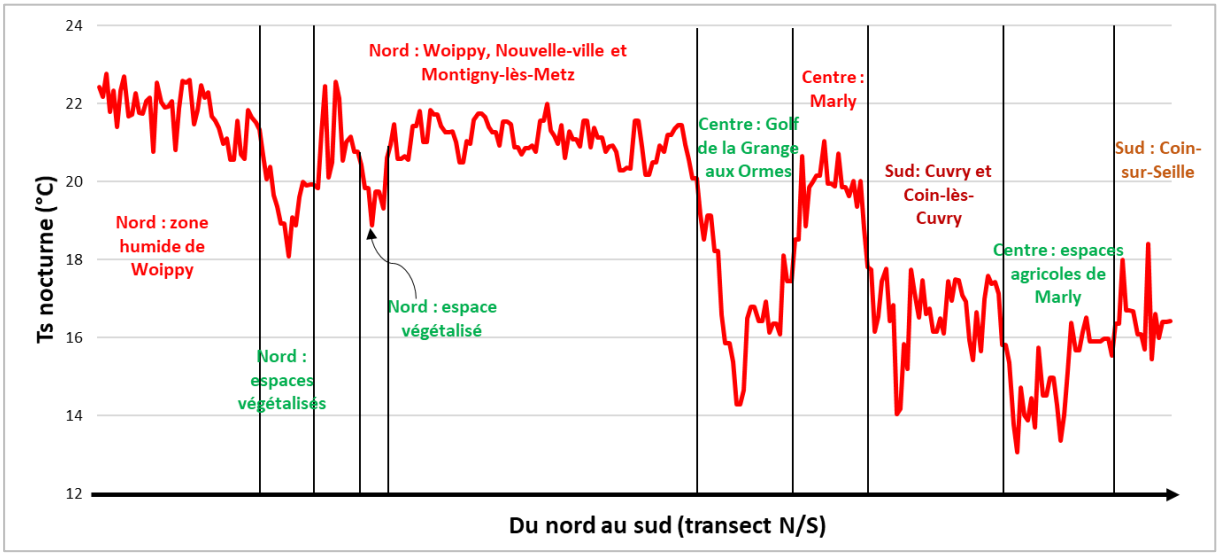


Figure 75 : Profil thermique du transect nord/sud établi à partir de la thermographie *ECOSTRESS* nocturne du 16/07/2022.

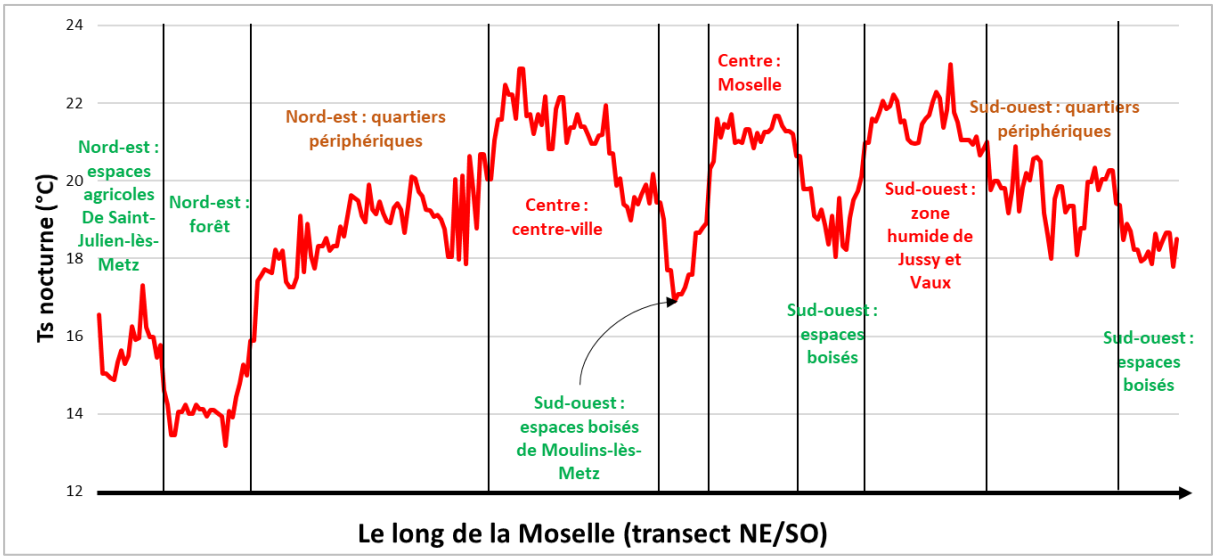


Figure 76 : Profil thermique du transect est/ouest établi à partir de la thermographie *ECOSTRESS* nocturne du 16/07/2022.

4.4.5. Dynamique nocturne de l'ICUs dans les deux métropoles à partir des données *ECOSTRESS*

L'analyse des thermographies de quatre moments du cycle nocturne montre que l'ICUs des deux aires urbaines est à son maximum en termes d'extension spatiale et d'intensité des Ts en première partie de nuit, puis s'affaiblit avec le temps (**Figure 77** et **Figure 78**). En revanche, il présente des traits propres à chacune des deux villes.

4.4.5.1. Dynamique nocturne de l'ICUs du Grand Casablanca

Sur la série de thermographies nocturnes du GC (**Figure 77**) on peut relever que, deux heures après le coucher de soleil (**Annexe 8** et **Annexe 10**), un ICUs s'est mis en place au niveau des espaces urbains denses avec un ΔT de +11 °C. Le front des Ts élevées se concentre préférentiellement au niveau de la façade littorale depuis le Cap Mohammédia au nord-est jusqu'à la commune de Tamaris au sud-ouest, et dans les nombreux pôles périphériques fortement urbanisés, ce qui corrobore la thermographie *Landsat* nocturne. Sur les thermographies suivantes, on peut observer un rafraîchissement progressif des espaces périphériques au sud et à l'est de l'agglomération, à l'exception de quelques clusters de chaleur intense (zone aéroportuaire et parc industriel de Bouskoura au sud). En revanche, les quelques masses d'eau visibles sur les images satellitaires telles que le barrage d'Oued Hassar affichent encore les Ts les plus élevées (>20 °C). En fin de nuit, juste avant le lever de soleil (**Annexe 10**), seuls les espaces urbains denses de Casablanca et de Mohammédia affichent encore des Ts relativement élevées. Tous les espaces périurbains et l'arrière-pays présentent des Ts beaucoup plus modérées. Fait notable, on ne relève pas de rétrécissement du front de Ts élevées. L'ICUs casablancais garde plus ou moins la même forme et la même étendue tout au long de la nuit.

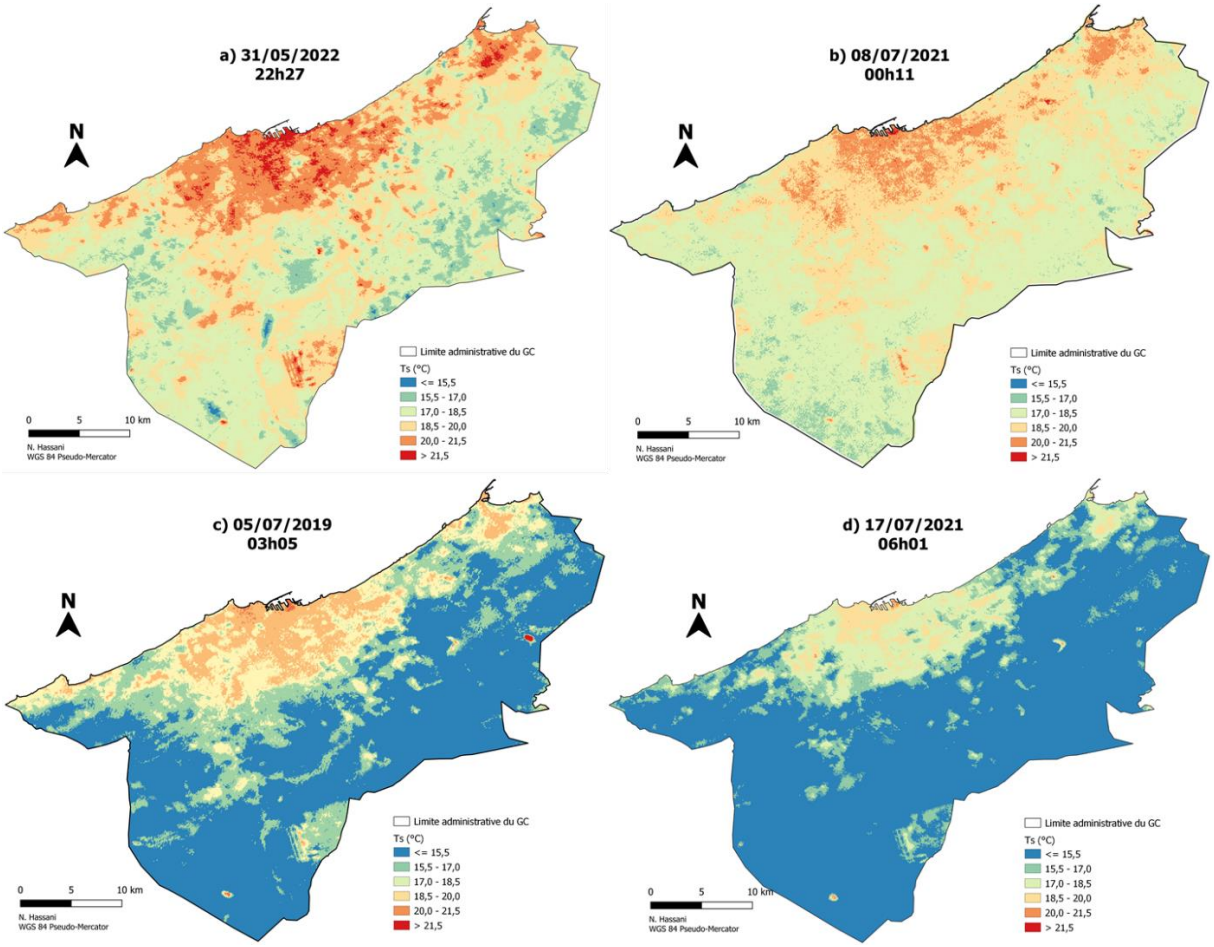


Figure 77 : Températures de surface (Ts) du GC à quatre moments de la nuit. a) 31/05/2022 ; b) 08/07/2021 ; c) 05/07/2019 ; d) 14/07/2021 (les horaires indiqués sont en heure locale).

4.4.5.2. Dynamique nocturne de l'ICUs de l'Eurométropole de Metz

Sur la série de thermographies de l'EMM -prises dans des conditions météorologiques très proches (**Annexe 11**)-, nous constatons qu'au moment du coucher de soleil (**Annexe 10**), un ICUs marqué se distingue au niveau des espaces urbains denses avec un ΔT identique à celui relevé à Casablanca (11 °C) (**Figure 78a**). En revanche, contrairement à ce que nous avons relevé dans le cas du GC, les thermographies suivantes révèlent une contraction de l'ICUs et un rafraîchissement plus rapide qu'à Casablanca. En effet, à 1h du matin, les Ts élevées (>18,5°C), ne se retrouvent plus guère qu'au niveau des masses d'eau, dont la Moselle, le plan d'eau près du centre-ville de Metz et la zone humide de Woippy au nord. Le reste des espaces urbanisés présente des Ts intermédiaires (15 -17 °C). En fin de nuit, la totalité de la zone urbaine s'est rafraîchie. Seules les surfaces en eau se démarquent encore par leur Ts élevées. Cela met en évidence l'inertie thermique de l'eau évoquée en **partie 1.4.2** dont l'effet rafraîchissant se limite dès lors à la période diurne.

Enfin, la dernière thermographie, prise 45 minutes après le lever du soleil (**Annexe 9**), montre les prémices de l'ICUs qui commence à se mettre en place progressivement en partant du centre-ville de Metz. Les espaces urbains denses sont ainsi les premiers à se réchauffer sous l'effet du rayonnement solaire.

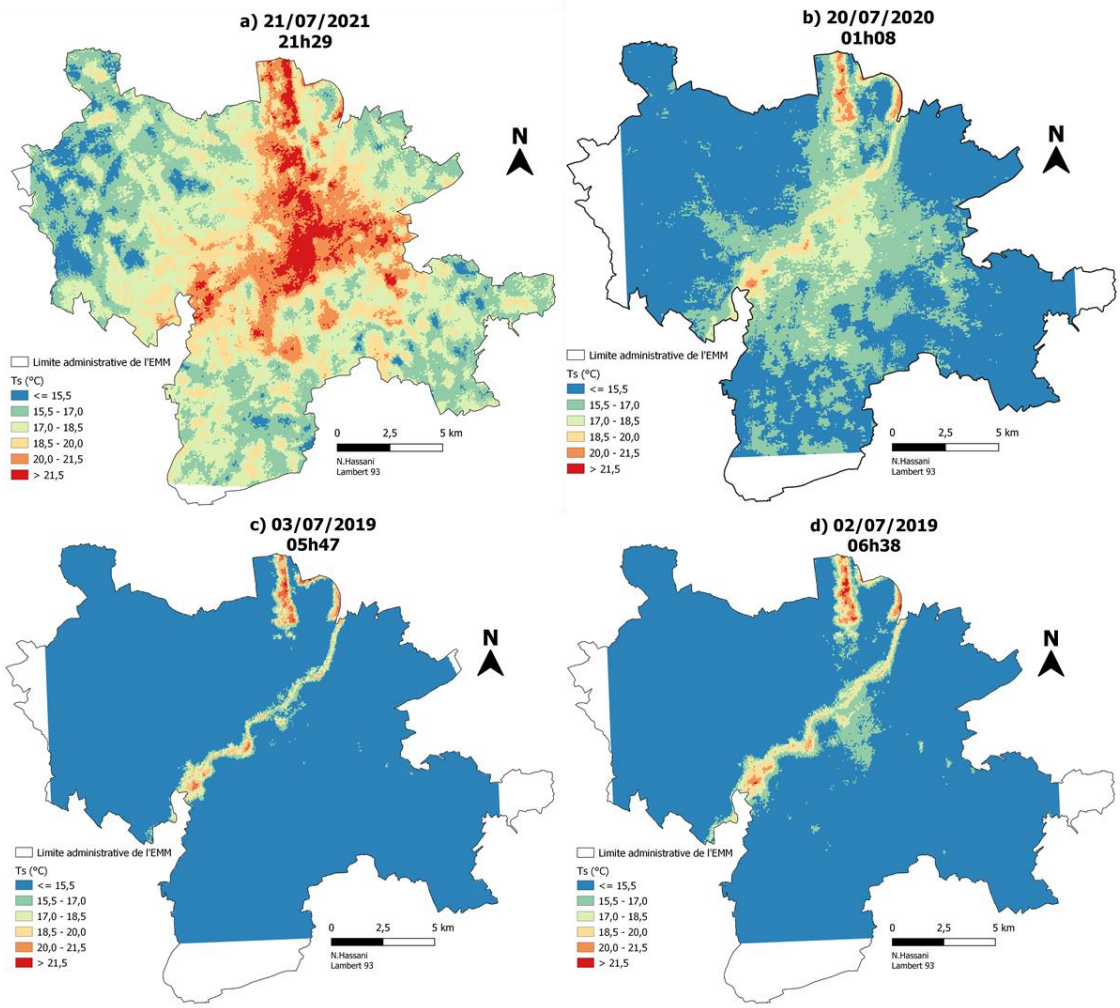


Figure 78 : Températures de surface (Ts) du l'EMM à quatre moments de la nuit. a) 21/07/2021, b) 20/07/2020, c) 09/07/2019, d) 02/07/2019 (les horaires indiqués sont en heure locale).

Synthèse

L'analyse des données de température de surface à l'aide des produits issus de la télédétection satellitaire a permis d'analyser la distribution spatiale des Ts dans les deux territoires de l'EMM et du GC et de caractériser leur variabilité spatio-temporelle journalière et interannuelle par situation anticyclonique radiative de saison chaude. Nous avons pu mettre en évidence la formation, dans les villes étudiées, d'un ICUs qui atteint son intensité maximale en début de nuit. En journée, les deux aires urbaines sont constituées d'une mosaïque de microclimats, avec parfois des contrastes thermiques conséquents en fonction des types d'occupation du sol. Ce sont en particulier les caractéristiques physiques des surfaces et le degré de densité du bâti qui expliquent la configuration spatiale des champs thermiques observés. Nous relevons également une tendance commune à l'extension des surfaces chaudes et à l'intensification des Ts corrélée à la croissance urbaine des deux agglomérations qui ont vu apparaître en leur périphérie, de nouveaux pôles urbains et des zones d'activités au cours de la période d'étude. Cela démontre la relation étroite liant la distribution spatio-temporelle des Ts et l'artificialisation des sols.

Si la différence de température nocturne est flagrante dans les deux aires urbaines étudiées, aux heures les plus chaudes de la journée en revanche, cette différence est moins marquée, particulièrement au mois d'août lorsque les espaces agricoles de l'EMM perdent leur végétation et découvrent des sols nus propices à formation de clusters chauds. La végétation est en effet un élément de fraîcheur majeur de jour comme de nuit. Ce qui n'est pas le cas des masses d'eau dont l'effet rafraîchissant est plus complexe. L'inertie thermique de l'eau fait que c'est la nuit que les surfaces en eau atteignent leurs températures maximales comparativement aux autres états de surface. Elles présentent alors des Ts élevées, équivalentes à celles des revêtements urbains. En journée, le milieu aquatique est beaucoup plus frais et joue un rôle de régulateur thermique de grande échelle (effet adoucissant) certes très localisé, mais relativement efficace (Apur, 2012). L'exemple de la Moselle est très parlant. Sur les thermographies nocturnes, ce cours d'eau qui traverse le territoire de l'EMM en le scindant en deux se démarque par ses températures fraîches en journée et relativement élevées la nuit. Il semble ainsi jouer un rôle dans le micro-climat local, mais cela demande d'avantage d'investigation avec notamment un suivi des températures de l'air. A Casablanca, c'est la situation côtière qui lui fait bénéficier de l'effet adoucissant de l'eau par le biais de la brise littorale dont le rôle de régulateur thermique a déjà été largement documenté.

Au total, le travail que nous avons mené à l'aide des données issues de la télédétection satellitaire semble fructueux. En particulier, l'utilisation combinée des données *Landsat* et des données *ECOSTRESS* est particulièrement pertinente dans la mesure où elle permet une documentation multi-échelle des variations des Ts et des champs thermiques, chacune de ces deux sources comblant les lacunes de l'autre. Néanmoins, bien que la télédétection satellitaire soit une méthode utile pour étudier la variabilité des Ts, il convient de garder à l'esprit ses limites que ce soit en termes de comparabilité temporelle, de précision et de résolution spatiale

et temporelle, ou en termes de disponibilités des données. Ces limites doivent être prises en compte lors de l'interprétation des résultats obtenus.

Au demeurant, il serait intéressant de compléter notre étude de la variabilité des îlots de chaleur et de fraîcheur de Casablanca et Metz en examinant, entre autres, leurs variations saisonnières. Il serait également intéressant d'exploiter des données anémométriques pour cerner plus précisément le rôle de la brise terre-mer (épaisseur du flux, fréquence d'occurrence, distance de pénétration, etc.) sur les Ts et la température de l'air dans le cas du GC. Cela demandera d'équiper ce territoire en stations météorologiques.

Chapitre 5 : Détection des températures de surface dans les espaces publics

Malgré la contribution significative de la télédétection satellitaire dans l'étude des îlots de chaleur dans les espaces urbains, la complexité croissante des structures urbaines rend généralement cet outil insuffisant en raison de ses trop faibles résolutions spatiales et temporelles et de son manque de flexibilité. Par conséquent, conscients de ces lacunes, nous avons souhaité compléter notre étude de la variabilité sous-maille des Ts (par comparaison par exemple à la Ts donnée par la maille *Landsat 8* à 100 m de résolution) dans l'aire urbaine de Metz, en recourant à de la télédétection de proximité (faible distance caméra-cible) basée sur l'imagerie aérienne acquise par drone (Drogue *et al.*, 2020 ; Hassani *et al.*, 2023a). Grâce aux récents progrès technologiques dans le domaine de l'infrarouge thermique et des plateformes volantes autonomes, la télédétection par drone est en plein essor en climatologie urbaine (Naughton et McDonald, 2019). Elle a pour avantage sa plus grande flexibilité d'utilisation (« pouvoir mesurer où et quand on veut ») par rapport à la télédétection satellitaire ou à l'avion, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités de surveillance environnementale à des échelles plus fines.

Dans ce chapitre, nous proposons de recourir à cette technologie pour un usage inédit, en nous intéressant à la détection et à l'évaluation de l'impact microclimatique de projets d'aménagement. A l'aide d'une caméra thermique infrarouge non refroidie embarquée à bord d'un drone quadricoptère, nous procédons à l'acquisition de thermographies à échelle fine (100m x 100m) au niveau de trois sites différents choisis en collaboration avec la ville et l'Eurométropole de Metz. Aussi, après un bref état de l'art décrivant le développement de cette technologie, nous présentons le protocole que nous avons utilisé pour établir nos mesures et la méthode d'étalonnage radiométrique élaborée, ainsi que le traitement appliqué sur les données pour obtenir les orthomosaïques thermiques. Les résultats obtenus sont ensuite commentés et discutés.

5.1. Le développement de l'imagerie par drone 134

5.2. La télédétection par drone : un intérêt technique certain, mais non dépourvu de limites

5.3. L'acquisition des images thermiques par drone 143

5.4. Cas d'étude dans l'agglomération messine 148

5.5. Traitement photogrammétrique des données et production des thermographies 162

5.6. Analyse des thermographies 172

Synthèse 178

5.1. Le développement de l'imagerie par drone

La télédétection aéroportée par drone est la conjugaison d'évolutions technologiques multiples liées au développement de la photographie aérienne et au perfectionnement constant des plateformes volantes depuis la construction des premiers avions. Nous abordons dans cette section, les innovations clé qui ont permis l'émergence de cette technologie, depuis les premières expérimentations de photographie aérienne jusqu'à l'utilisation généralisée des drones équipés de capteurs sophistiqués. Cette brève rétrospective nous permettra de comprendre comment l'imagerie aérienne par drone a pu connaître un tel essor et trouver aujourd'hui des applications tant opérationnelles, dans de nombreux domaines allant de l'agronomie au militaire, que dans la recherche dédiée à l'environnement ou à l'archéologie.

5.1.1. Aux origines de la télédétection aéroportée, la photographie aérienne

Plus d'un siècle avant l'ère des drones, des images de la Terre vue d'en haut ont été prises à l'aide d'engins sans pilote avec notamment des caméras fixées sur des cerfs-volants et des montgolfières. Nadar, de son vrai nom Gaspard-Félix Tournachon, aéronaute et photographe français, réalise en 1858 la première photographie aérienne de Paris depuis un vol captif à 80m d'altitude, au-dessus du Petit-Bicêtre (actuel Petit-Clamart). Il est considéré comme le pionnier de la photographie aérienne par ballon. Nadar passera les deux années suivantes à promouvoir son propre aéronef « plus léger que l'air », et ses vues de l'Arc de Triomphe prises en 1868 avec un appareil à objectif multiples eurent un grand succès[29].

Mais ce sont surtout les travaux du photographe français Arthur Batut qui ont le plus contribué au développement de la discipline. Son ouvrage, dédié à la photographie aérienne par cerf-volant[30] détaillant l'utilisation d'un cerf-volant et d'un boîtier en bois simple pour capturer des images aériennes, fournit une documentation remarquablement complète sur les techniques de la photographie aérienne à basse altitude sans pilote (Batut, 1890) (**Figure 79**). Le cerf-volant était alors le dispositif sans pilote le plus utilisé jusqu'au début du XXe siècle pour obtenir des images à basse altitude pour les sciences de l'environnement et les géosciences, pour la documentation archéologique et pour la photographie aérienne à des fins de loisir. Son utilisation est documentée dans des

Figure 79 : Le cerf-volant utilisé par Arthur Batut pour capturer des photos aériennes (source : Espace photographie Arthur Batut).

[29] WOKIPI DECOUVERTE, https://wokipi.com/decouverte/aerophoto.html
[30] *La Photographie aérienne par cerf-volant*, Paris, Gauthier-Villars

publications de météorologues britanniques et américaines (par exemple, Archibald, 1884 ; McAdie, 1885).

Les idées progressistes de Batut sur l'utilisation potentielle de l'imagerie incluent la stéréophotogrammétrie, une méthode proposée pour relever la topographie d'un terrain à partir de deux photographies qui se recouvrent partiellement, et qui est aujourd'hui l'une des principales applications de l'imagerie drone. Batut a également préconisé l'utilisation de la photographie par cerf-volant comme moyen prometteur de surveiller l'environnement, en donnant l'exemple de la cartographie des infestations de phylloxéra dans les vignobles (Marzolff, 2022). Les activités d'Arthur Batut et d'Émile Wenz, un autre pionnier français de la photographie aérienne par cerf-volant, ont suscité une attention considérable dans la presse, et la méthode a rapidement été reprise en Amérique du Nord (Beauffort, 1995). Le photographe américain George R. Lawrence a ainsi pris des photographies spectaculaires en utilisant une caméra panoramique de 22 kg suspendue à un train de cerfs-volants pour documenter les ruines de San Francisco après le tremblement de terre dévastateur de 1906 (Aber *et al*., 2019).

Après l'invention des avions à moteur par les frères Wright au tournant du XXe siècle, le rôle des cerfs-volants et des ballons a décliné à mesure que l'ingénierie aéronautique se perfectionnait. Les progrès techniques ont été stimulés par les deux conflits mondiaux au cours desquels la nécessité de reconnaissance militaire, de mesures et de cartographie précises a conduit à des développements spectaculaires dans les techniques de prise de vue aérienne (Marzolff, 2022). L'expertise acquise en temps de guerre est devenue disponible pour des applications civiles et scientifiques (Colwell, 1997). On a alors vu dans la photographie aérienne un potentiel important dans des disciplines aussi diverses que la géographie, la géologie, l'archéologie et dans la gestion des risques naturels, avec de nombreuses publications dans les années 1950 et 1960. En France, on voit la création, en 1946 du Centre de Documentation de Photographie Aérienne au sein de l'IGN qui rachète des bombardiers B17 américains pour les modifier en avions de photographie aérienne. Les B17 de l'IGN survoleront la France et tous ses territoires pendant plus de 30 ans en prenant des millions de clichés.

L'acquisition, le traitement et l'analyse des images aériennes et satellitaires deviennent alors dans les années 1970, le travail de professionnels formés et ayant accès à des équipements et logiciels de pointe souvent très coûteux, ce qui paradoxalement va représenter un obstacle à de nombreux travaux dans les sciences de la Terre et pousser à recherche des méthodes plus accessibles pour acquérir des images aériennes.

5.1.2. Les drones modernes, point de convergence d'évolutions technologiques multiples

Les coûts considérables et le faible taux de répétition de la photographie aérienne conventionnelle - ou la résolution spatiale de l'imagerie satellitaire- ont empêché leur utilisation dans des études portant sur des périmètres restreints et sur des phénomènes de terrain dynamiques. Il n'est donc pas surprenant que, parallèlement à la télédétection par satellite, la

photographie aérienne à basse altitude utilisant des plates-formes et des capteurs basiques ait commencé à faire un retour progressif. Les travaux s'appuyant sur des aéronefs pilotés ont rapidement été dépassés par ceux utilisant des plates-formes non pilotées telles que des cerfs-volants, des ballons, des dirigeables à hélium et d'autres aéronefs non-conventionnels, voire construits sur mesure. La photographie aérienne par cerf-volant en particulier a retrouvé une grande popularité dans les études scientifiques (Yahyanejad, 2013). L'idée d'utiliser de petits avions sans pilotes ou drones n'intervient qu'après que cette technologie a fait ses preuves dans le domaine militaire.

L'idée d'un avion sans pilote est, en effet, relativement ancienne. Le premier voit le jour en France pendant la Première Guerre Mondiale lorsque le capitaine Max Boucher parvient à faire voler son *Voisin BN32* sur une distance de 100 km (**Figure 80**) (Mercier, 2013). Mais c'est surtout pendant la Guerre Froide que ces appareils feront l'objet de programmes de développement secrets : ce fut le cas en particulier en 1959 lorsque l'armée de l'air américaine, inquiète de perdre des pilotes en territoire hostile, a commencé à planifier l'utilisation d'avions sans équipage. Le programme secret « *Red Wagon* » est alors lancé l'année suivante après que l'Union Soviétique a abattu un avion U-2 en 1960[31].

Figure 80 : Avion *Voisin BN32* du capitaine Max Boucher (www.drone-malin.com).

Les drones étaient vus à cette époque comme un moyen d'acquérir une supériorité stratégique devant permettre la surveillance et l'intervention militaire chez l'ennemi sans risquer des pertes humaines. Mais ce sont surtout les services de renseignement qui en font usage pour larguer des tracts destinés à déstabiliser leurs adversaires, mais aussi pour mener des missions de reconnaissance en effectuant des prises de vues aériennes. Ce fut par exemple le cas dans le cadre du conflit israélo-arabe, lorsque les services de renseignement israéliens

[31] Wagner, William (1982), Lightning Bugs and other Reconnaissance Drones; The can-do story of Ryan's unmanned spy planes, Armed Forces Journal International: Aero Publishers, ISBN 978-0-8168-6654-0

ont testé les premiers drones tactiques équipés de caméras de reconnaissance qui ont pu renvoyer avec succès des photos de l'autre côté du canal de Suez. C'était la première fois que des drones tactiques pouvant être lancés et atterris sur n'importe quelle piste étaient développés et testés au combat (Dunstan et Noon, 2012).

Au cours des trois décennies suivantes, d'importantes avancées techniques permettront au secteur civil de s'approprier cet outil. Outre l'amélioration des aéronefs devenus plus accessibles, ces avancées concernent aussi bien les capteurs (avec la miniaturisation des caméras et des batteries) que la communication sans fil ou les outils d'analyse des images (développement de systèmes informatiques plus performants).

Au niveau des capteurs, c'est surtout l'apparition de la photographie numérique dans les années 1990 et sa diffusion dans les années 2000 qui ont été la source des plus grandes avancées techniques. Les appareils numériques compacts et les reflex numériques à objectif unique ont alors rapidement remplacé le 35 mm dans la photographie aérienne, accélérant considérablement l'acquisition des images. Les capteurs multispectraux miniature pour les longueurs d'onde du proche infrarouge et de l'infrarouge à ondes courtes et par la suite les capteurs hyperspectraux sont devenus largement répandus et ont pu être facilement montés sur de petits drones.

De leur côté, les outils d'analyse d'images, qui étaient traditionnellement analogiques dans les années 1970 et 1980, ont beaucoup évolué grâce au développement de nouveaux logiciels souvent *open source* qui combinent les principes de la photogrammétrie avec des concepts et des algorithmes de vision par ordinateur. Les gains en termes de coût et de rapidité ont été considérables pour ce qui est de l'acquisition de géodonnées 3D haute résolution et la génération des orthophotographies. On a alors pu créer des modèles 3D sans contrôle au sol avec un degré élevé d'automatisation du flux de travail. Ainsi, au cours des 15 dernières années, les drones de qualité professionnelle avec des systèmes de navigation en temps réel ou post-traitement de haute précision sont devenus disponibles, de sorte que le contrôle au sol pour le géoréférencement n'est plus nécessaire. Les logiciels de traitement d'imagerie aéroportée comprennent désormais un ajustement automatique des faisceaux, l'extraction de nuages de points 3D, l'interpolation dans des modèles numériques d'élévation ou des maillages 3D et la création d'ortho-mosaïques ainsi que l'imagerie thermique permettant de calculer des indices spectraux. Des logiciels SIG intégrant des modules pour des traitements de données aéroportées sont également apparus. En outre, de nombreux outils logiciels non spécifiquement conçus pour ce type de données, facilitent la génération des nuages de points 3D, des maillages et de l'ortho-imagerie (par exemple, Turner *et al.*, 2015 ; Jouvet *et al.*, 2018 ; Pinton *et al.*, 2020).

Ce développement rapide de la télédétection par drone est ainsi le fruit d'importantes avancées technologiques simultanées ayant touché plusieurs secteurs clé. Il a conduit à la mise en place d'une nouvelle réglementation aérienne, spécifique à son utilisation dans l'espace aérien et l'apparition de pilotes spécialement formés.

5.1.3. La télédétection par drone aujourd'hui, un outil incontournable dans les sciences environnementales

Les avancées technologiques précédemment évoquées et la baisse des prix des systèmes de navigation et de contrôle de vol basés sur le GPS ont rendu possible et abordable le développement de drones à petite échelle. Les aéronefs à voilure fixe, multi-rotors, à 4, 6 ou 8 moteurs et hybrides VTOL (décollage et atterrissage verticaux) localisés et stabilisés par GPS sont désormais disponibles sur le marché grand public et professionnel dans un large éventail de prix, de tailles et de configurations techniques (**Figure 81**) (Marzolff, 2022). Les drones de toutes sortes sont ainsi devenus le moyen prédominant pour l'observation de la Terre à basse altitude. Ils sont employés pour un large éventail d'applications civiles, commerciales et gouvernementales concernant l'arpentage, la cartographie, le contrôle, l'inspection et la surveillance.

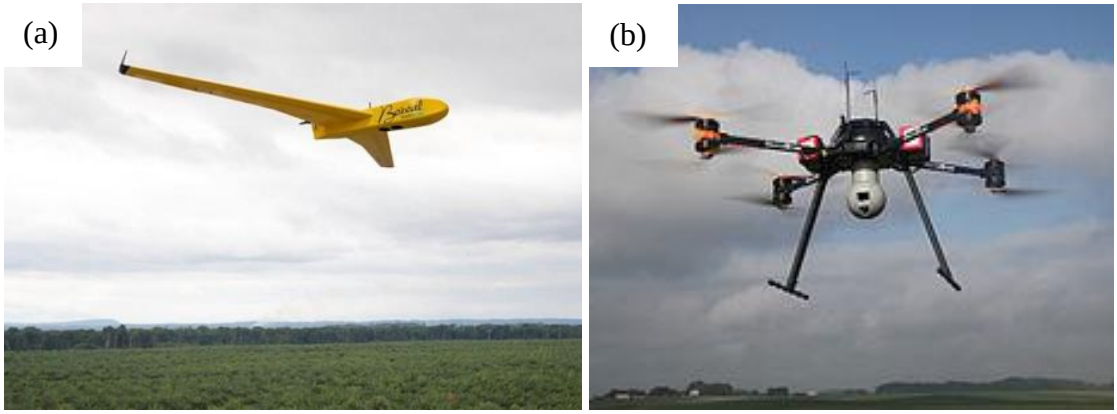


Figure 81 : (a) Drone à voilure fixe « *le Boreal* » et (b) drone à multi-motors « *OnyxStar Fox-C8 XT* ».

Dans le domaine académique, il semble que les termes « véhicule aérien sans pilote » (ou UAV) et « drone » sont apparus dans les publications scientifiques en 2005 (Marzolff, 2022). C'est avant tout l'apparition d'une grande variété de capteurs à coût réduits allant des caméras RVB, multispectrales, hyperspectrales, et thermiques, au *LiDAR*, en passant par les centrales à inertie qui a permis de nombreuses applications scientifiques. Les gammes micro (ou petit) et mini drones, avec des masses maximales au décollage d'environ 1kg et d'un diamètre inférieur à 1 m, sont alors les plus courants en utilisation scientifique. Ces drones sont équipés de capteurs tels que des accéléromètres, des gyroscopes et des baromètres pour stabiliser l'attitude de vol et peuvent transporter des charges utiles telles que des caméras visuelles pouvant photographier ou filmer en *full HD*, 4 K, et même en 8 K ou en infrarouges et d'autres capteurs permettant de récolter des données utiles aux sciences environnementales (Yahyanejad, 2013).

En agronomie en particulier, le potentiel du drone a très tôt été identifié pour l'évaluation du stress hydrique ou l'estimation du flux de chaleur latente (densité de flux d'évapotranspiration) des parcelles agricoles, avec de nombreuses études (Berni *et al.*, 2009 ; Zarco-Tejada *et al.*, 2012). En conséquence, l'imagerie thermique par drone est de plus en plus utilisée pour surveiller le stress hydrique des cultures (Gonzalez-Dugo *et al.*, 2012 ; Gómez-Candón *et al.*, 2016), cartographier l'évapotranspiration et la conductance de la canopée (Berni *et al.*, 2009 ;

Hoffmann *et al.*, 2016 ; Brenner *et al.*, 2017), évaluer la santé des arbres (Smigaj *et al.*, 2017) estimer l'humidité du sol (Sugiura *et al.*, 2007), estimer de la température des cours d'eau (Jensen *et al.*, 2012) et pour de nombreuses applications hors écologie (Stark *et al.*, 2014). Des perspectives prometteuses apparaissent aujourd'hui dans l'agriculture de précision, car les drones permettent le suivi non-destructif de la croissance des cultures, avec une très haute résolution spatio-temporelle (Bendig, 2015).

Les drones ont aussi connu plusieurs utilisations dans le domaine de l'archéologie, souvent afin de fournir une vue générale de l'environnement autour d'un site ou en vue de la modélisation et l'inspection des façades de bâtiment en distance rapprochée par les systèmes à voilure tournante. Ce type d'acquisition est souvent complété par des images terrestres et parfois par des techniques basées sur la mesure de distance comme le scanner laser (Achille *et al.*, 2015 ; Grenzdörffer *et al.*, 2015). Dans ce cas-là, le drone présente un avantage par rapport aux autres techniques terrestres grâce à sa vue aérienne. Celle-ci permet au drone de couvrir les parties qui sont difficiles, voire impossibles à lever depuis le sol (**Figure 82**).

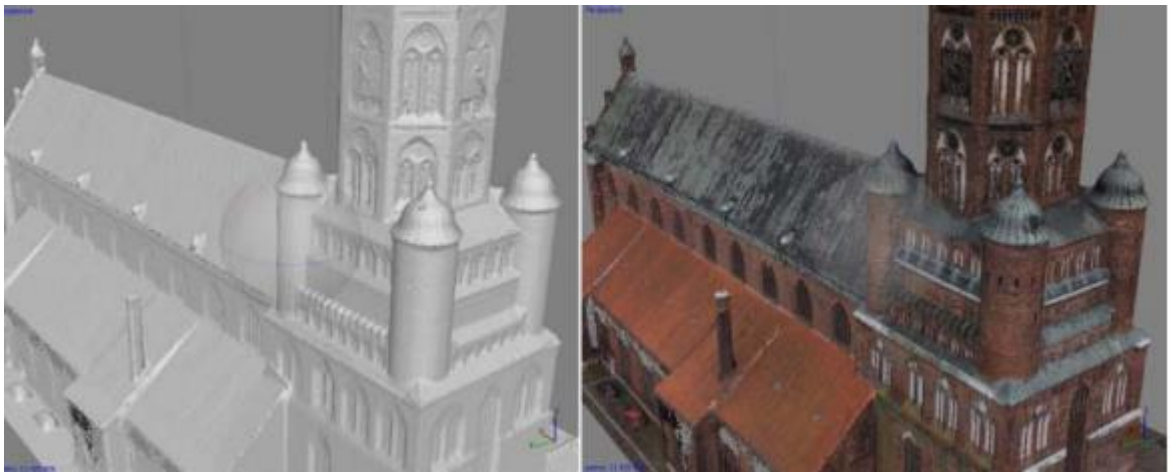


Figure 82 : Modélisation 3D de l'Église Saint-Nicolas (Greifswald en Allemagne) issue des images recueillies à l'aide d'un drone (Grenzdörffer *et al.*, 2015).

En géographie enfin, l'imagerie aéroportée par drone peut être utilisée dans de multiples domaines tels que la prévention des catastrophes naturelles, la climatologie, l'aménagement urbain, ou la planification touristique (Naughton et McDonald, 2019). A titre d'exemple, l'autorité américaine des océans et de l'atmosphère (NOAA) a commencé à utiliser le système d'aéronef sans pilote *Aerosonde* en 2006 pour l'étude des ouragans. Cet appareil d'une quinzaine de kilogrammes peut voler dans un ouragan et communiquer des données en temps quasi-réel directement à la base d'étude.

De surcroît, l'imagerie aéroportée rend entre autres possible de calculer la superficie végétalisée et de décider s'il est nécessaire ou non de planter davantage d'arbustes, de vérifier le respect des normes urbaines, d'analyser tout changement dans la structure urbaine des villes, ou encore, d'identifier les déperditions thermiques des bâtiments. De fait, grâce à cette technologie, l'imagerie thermique en temps réel peut être utilisée à des fins multiples : détection

des risques d'incendie, surveillance de la qualité de la construction urbaine, des effets de microclimatiques des aménagements urbains ou encore des fuites dans les pipelines urbains.

5.2. La télédétection par drone : un intérêt technique certain, mais non dépourvu de limites

Les avantages du recours au drone pour l'étude des températures de surface par rapport aux modèles réduits d'avions avec pilote ou à l'hélicoptère embarqué sont multiples : les coûts financiers beaucoup plus faibles, la maniabilité plus simple, la réduction des coûts opérationnels du fait que les drones sont autonomes ou semi-autonomes (le pilote pouvant être assisté par un système de contrôle de vol), etc. Mais c'est avant tout au niveau de la résolution spatiale que se situe l'atout de cet outil : les résolutions spatiales souvent inférieures au mètre permettent une lecture précise de la complexité spatiale du terrain étudié, y compris en milieu urbain, et la possibilité de mieux suivre l'évolution des phénomènes dynamiques. Néanmoins, des limites importantes existent, principalement liées à des contraintes techniques et réglementaires.

5.2.1. Des limites techniques non-négligeables

En dépit de ses nombreux avantages, le recours au drone présente certaines contraintes non-négligeables, au premier rang desquelles on peut citer leur autonomie relativement faible du fait de la faible capacité de la batterie alimentant notamment les rotors (environ 30 min pour un drone quadricoptère). Cela limite donc la zone qui peut être capturée en un seul vol (Naughton et McDonald, 2019) ; d'autant que des températures très froides ou très chaudes réduisent considérablement les performances de la batterie du drone (Leng *et al.*, 2015), ce qui réduit à son tour le temps de vol.

Par ailleurs, le fait de voler à basse altitude limite la zone de couverture, car le champ d'une image drone prise à basse altitude ne peut couvrir qu'une petite zone d'étude. A l'inverse, une altitude élevée induit une résolution d'image plus faible. Cela oblige donc à trouver une altitude d'équilibre en vue d'optimiser l'efficacité de détection du drone. Le plus souvent, il sera nécessaire d'acquérir un nombre important d'images (parfois des milliers selon la taille de la zone d'étude) qui doivent alors être géolocalisées et mosaïquées. En corollaire, la plus grande quantité de données ainsi acquises -en comparaison avec les images satellites par exemple- nécessite une puissance de calcul et une durée de traitement beaucoup plus importants. Cette lacune fait que, dans les études géo-environnementales, l'imagerie par drone n'est pour l'heure qu'un complément à la télédétection satellitaire dans la mesure où le champ d'une image drone (prise à basse altitude, ~50 m) est typiquement de l'ordre de 100 à 300 m² (Rango *et al.*, 2006).

Enfin, la petite taille des drones peut constituer une limitation importante puisqu'il est difficile d'y installer des caméras professionnelles multispectrales et à haute résolution. Les caméras présentes sur les drones bon marché ont tendance à être des modèles basiques n'offrant pas une qualité d'image optimale. Cette situation oblige à utiliser des bandes et des photos avec des chevauchements considérables en vue d'obtenir une résolution satisfaisante des objets au

sol. La petite taille peut aussi entraîner une instabilité en cours d'utilisation : des flous d'image dû au mouvement vers l'avant de la plate-forme peuvent apparaître, particulièrement en présence de vent.

Enfin, il peut également y avoir des problèmes d'orthorectification causés par la distorsion géométrique liée à une couverture d'image insuffisante, et des effets spectraux dus par exemple, à un éclairage variable pendant la mission, pour ne citer que les principaux problèmes (Matese, 2022). Afin de minimiser ces difficultés, des corrections et des calibrations radiométriques, géométriques et atmosphériques doivent être effectuées avant les procédures de mosaïquage, de géoréférencement et d'orthorectification.

5.2.2. Des contraintes réglementaires lourdes

L'usage et le vol de drones civils font l'objet d'une réglementation stricte en France avec d'importantes restrictions légales portant principalement sur la sécurité publique et celle de l'espace aérien. En effet, considéré comme un aéronef léger, le drone est facilement perturbé par la vitesse du vent, par divers signaux ainsi que par tout objet pouvant amener à une collision. De même, en volant autour d'un aéroport ou sur les voies aériennes, un drone pourrait perturber le trafic aérien. En zone urbaine, une chute accidentelle pourrait mettre en danger les habitants. Par conséquent, certaines zones peuplées, les aéroports, les voies aériennes et les sites militaires sont interdits de vol. La figure 83 présente une carte zones de restrictions et d'interdiction de vol en France métropolitaine telle que déterminées par l'arrêté du 3 décembre 2020 fixant la liste des zones interdites à la prise de vue aérienne par appareil photographique, cinématographique ou tout autre capteur.

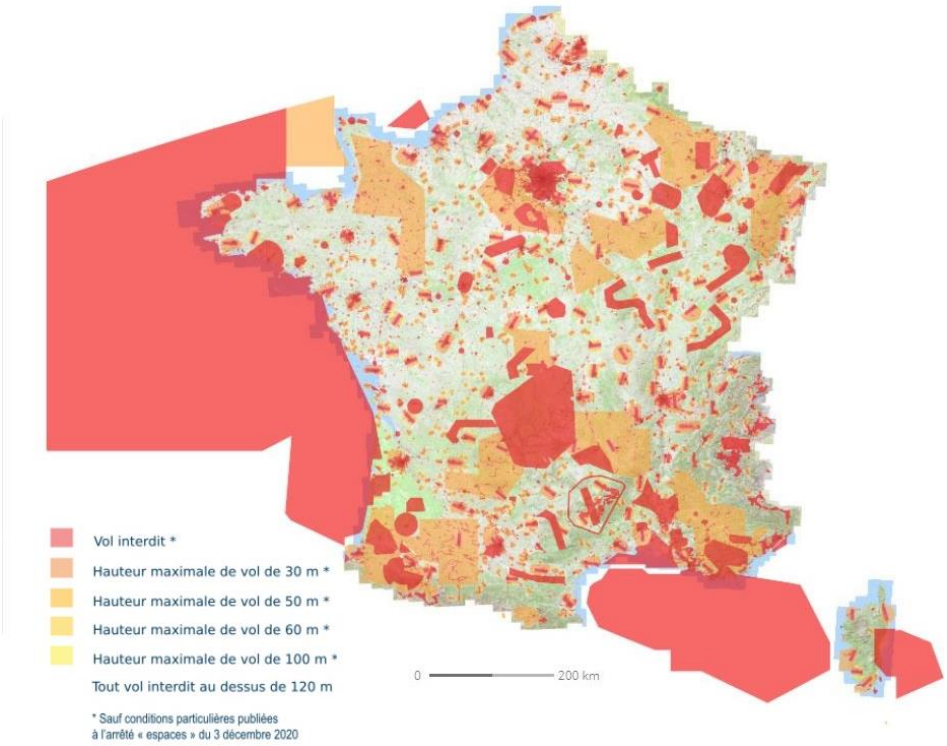


Figure 83 : Carte des restrictions pour le vol des drones en France (source : Geoportail, données avril 2022).

Ce cadre normatif définit les exigences associées à cette activité, les modalités d'exploitation et des catégories d'aéronefs autorisés afin de prévenir tout risque d'accident. L'arrêté du 3 décembre 2020 précise également les procédures de déclaration et d'autorisation d'exploitation dont doit faire l'objet chaque vol. Il s'agit d'un ensemble d'autorisations administratives obligatoires accordées le plus souvent par les services déconcentrés de l'État (autorisation préfectorale), les autorités aéroportuaires les plus proches, la Gendarmerie Nationale, l'Armée de Terre et l'Armée de l'Air. Trois scénarios nationaux sont ainsi définis pour les vols de drones (**Figure 84**) :

- Le scénario S1 est le scénario le plus simple ne nécessitant pas d'autorisation particulière. Il permet de réaliser des vols à faible risque, à titre privé ou professionnel avec des aéronefs n'excédant pas les 25 kg. Il s'agit de vols à vue, hors zone peuplée, avec une hauteur de vol de 120 m maximum et une distance horizontale du télépilote de 200 m maximum.
- Le scénario S2 requiert une autorisation préalable de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) et limite les vols à 50 m de hauteur, mais à une distance horizontale d'1 km pour des drones équipés d'un module coupe-circuit. Il est alors possible de piloter sans voir son appareil à condition d'être en dehors des zones peuplées.
- Le scénario S3 est le seul scénario qui permet de voler dans des zones peuplées ou sensibles et en agglomération. Il concerne des drones pesants entre 2 et 8kg équipés d'un système de coupe-circuit et d'un parachute. Le pilote doit pouvoir fournir une attestation qui lui a été délivrée par la préfecture en cas de contrôle.

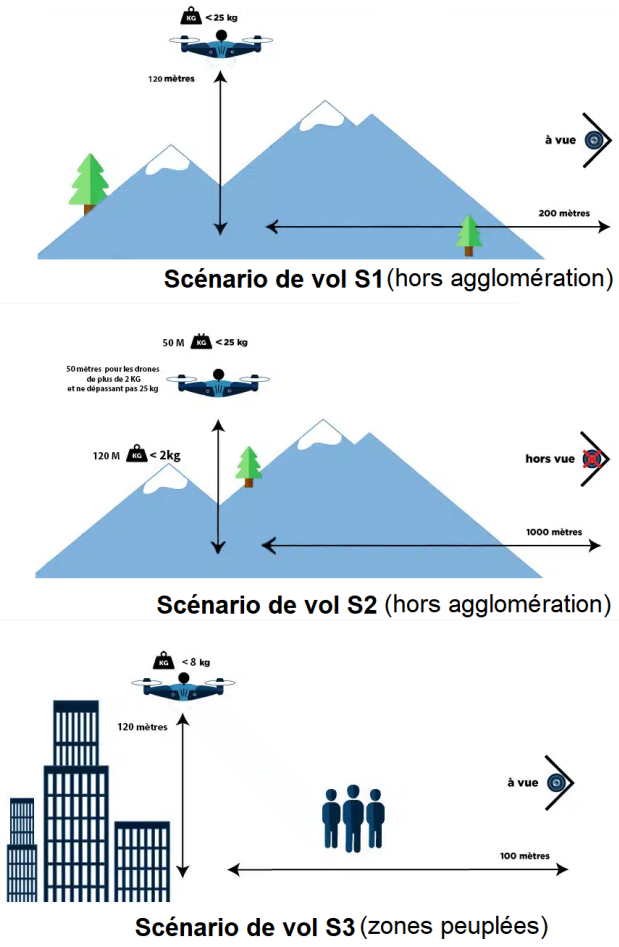


Figure 84 : Schéma illustrant les types de scénarios de vol de drone (source : https://www.flyingeye.fr/).

Enfin, à ces restrictions de vol, s'ajoute l'obligation pour les pilotes de disposer de certaines formations et qualifications sans lesquelles aucun décollage n'est autorisé (article L6214-2 du Code des Transports et arrêté du 12 octobre 2018 relatif à la formation exigée des télépilotes). Ces exigences visent à garantir un niveau de compétence en matière de pilotage et de gestion des risques, ainsi que le régime des responsabilités en cas d'accident. Pour l'exercice de son activité dans le cadre d'un scénario national, le télépilote doit être titulaire d'un titre de pilote à

distance (PAD) délivré après la réussite à l'examen théorique télépilote ou sur la base d'une équivalence.

Il est à noter qu'une modification de la réglementation européenne régissant l'usage des drones a été introduite pour une entrée en vigueur le 1er janvier 2024[32]. Ce nouveau cadre réglementaire que nous ne détaillerons pas ici, met un terme aux scénarios standards nationaux et définit des règles de vol spécifiques selon une approche basée sur le niveau de risque et ainsi, ne distingue plus l'usage de drones de loisir ou commercial. Le niveau de risque va notamment considérer le poids du drone, ses spécifications techniques ou encore le type de vol pour entraîner des dispositions détaillées sur les types de vols autorisés par classe de drones, les prérequis pour les télépilotes ainsi que les démarches administratives.

5.3. L'acquisition des images thermiques par drone

Si l'émergence des drones et la miniaturisation des caméras ont révolutionné la collecte de données aéroportées en permettant l'embarquement de caméras IRT mesurant les températures de surface, l'obtention de données de température précises à partir de ces caméras n'est pas évidente. Selon le modèle utilisé, le capteur peut être très sensible aux changements de température internes et externes et nécessiter un calibrage radiométrique. Dans cette section, nous exposons les principes de l'imagerie thermique infrarouge et les différentes caméras infrarouges disponibles pour être installées sur drone, notamment les caméras thermiques refroidies et non refroidies, et les avantages et inconvénients de chaque type de caméra.

5.3.1. Les principes de l'imagerie thermique

Après plus d'un siècle de développement, l'intérêt de l'imagerie aéroportée pour de nombreux champs de recherche ne s'est jamais démenti. Elle s'appuie principalement sur les caméras optiques, capturant la lumière visible en modes panchromatique ou RVB. Mais ces caméras dépendent de la présence d'une source d'énergie extérieure telle que le soleil ou une source de lumière artificielle, avec des variations d'intensité, d'équilibre des couleurs, de direction, etc. Elles deviennent totalement ineffectives en cas d'obscurité. D'autres systèmes de vision permettent de pallier ces limites, tout en recueillant d'autres données utiles. Il peut s'agir des caméras stéréo à vision 3D, de capteurs de vision nocturne infrarouges et proche infrarouge, ou encore, de scanners capables de détecter un objet à l'aide d'un rayonnement qui est réfléchi par ce dernier (Gade et Moeslund, 2014).

Les caméras infrarouges thermiques sont un autre moyen de pallier ces lacunes et d'enrichir l'information fournie par les caméras optiques. Elles capturent le rayonnement émis par les objets eux-mêmes dans le spectre infrarouge à moyenne et grande longueur d'onde (3–14 µm). La longueur d'onde et l'intensité de ce rayonnement -qui dépendent de la température de l'objet source- (***cf.* 4.1.1**), permet à un système de vision IRT de convertir l'énergie détectée en une valeur de température (Gade et Moeslund, 2014). Or, contrairement aux caméras optiques, les

[32] Règlements de la Commission n° 2019/947 et 2019/945

caméras IRT ne sont pas faites de verre, mais de matériaux spécifiques tels que le silicium cristallin ou le fluorure qui sont chauffés par les radiations émises par les objets-cibles. Cet échauffement du capteur produit un signal électrique dont la variation est mesurée et comparée à la température de fonctionnement du capteur. En tenant compte de la température ambiante et de l'émissivité de l'objet, ces variations d'intensité des signaux électriques sont converties en valeurs numériques de température qui sont ensuite affichées sous la forme d'une image visible par l'œil humain (Faye *et al.*, 2022). Dans l'image en niveaux de gris, chaque pixel représente une tache thermique, avec des pixels clairs pour les objets chauds.

Notons que lors de la mesure d'un objet, la caméra IRT reçoit non seulement le rayonnement émis par l'objet, mais également le rayonnement d'autres sources telles que les objets environnants ou l'atmosphère (**Figure 85**). De plus, par rapport aux images optiques, les images thermiques présentent une faible résolution et un contraste peu marqué du fait des faibles variations de températures entre les objets observés.

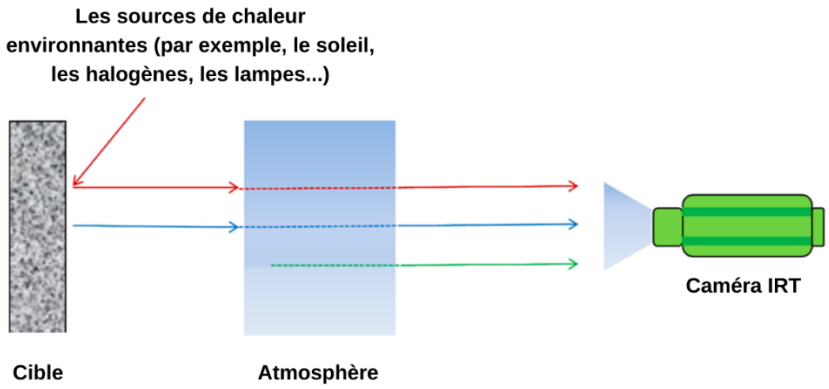


Figure 85 : Le principe d'une caméra thermique infrarouge (IR) recevant un rayonnement (adapté de Tran et *al.* (2017)).

5.3.2. Les types de caméras IRT disponibles

L'enregistrement de données thermiques appropriées à l'aide de caméras IRT embarquées sur des drones s'avère souvent beaucoup plus complexe qu'avec une caméra optique, car outre un rayonnement extérieur parasite évoqué précédemment, le capteur d'une caméra est aussi exposé aux rayonnements thermiques internes qui peuvent être parfois bien supérieurs à celui reçu de l'objet d'intérêt ; ce phénomène créé du « bruit thermique » (Kelly *et al.*, 2019). Aussi, il sera utile d'inclure un système de contrôle de la température interne afin d'éviter une dérive dans l'acquisition des températures. Les caméras IRT peuvent ainsi être globalement classées en deux types selon qu'elles disposent ou non d'un système de refroidissement intégré.

5.3.2.1. Les caméras IRT refroidies

Les modèles de caméras refroidies présentent généralement un niveau de sensibilité et de précision très intéressantes (Sheng *et al.*, 2010) puisqu'elles sont équipées d'un capteur

d'imagerie intégré à un cryoréfrigérateur qui abaisse la température du capteur à un niveau cryogénique pour réduire le bruit thermique. Néanmoins, les cryoréfrigérateurs ont des pièces mobiles qui s'usent avec le temps et de l'hélium peut s'échapper des joints d'étanchéité, nécessitant une remise en état après 10 000 à 13 000 heures de fonctionnement (Torres-Rua, 2017). En conséquence, le coût global de ces caméras dîtes « refroidies » est d'autant plus élevé du fait que la maintenance s'ajoute au coût d'acquisition. De surcroît, ces caméras sont peu adaptées pour être montées sur de petits drones en raison de leur grande taille et de leur consommation d'énergie importante (Sheng *et al.*, 2010 ; Jensen *et al.*, 2014).

5.3.2.2. Les caméras IRT non-refroidies

Les dispositifs d'imagerie IRT qui répondent aux contraintes de poids et de consommation d'énergie des drones sont le plus souvent des modèles dits « non refroidis » utilisant des microbolomètres (**Figure 86**) sans refroidisseur thermoélectrique. Plus petits et plus légers, ils consomment beaucoup moins d'énergie que les capteurs thermiques refroidis (Ribeiro-Gomes *et al.*, 2017). Leur fonctionnement repose sur la projection d'un rayonnement infrarouge à travers l'objectif, sur la matrice de détecteurs microbolomètres (Kelly *et al.*, 2019). La résistance électrique de chaque microbolomètre dépend de sa température, dont l'évolution est proportionnelle à l'énergie du rayonnement infrarouge incident.

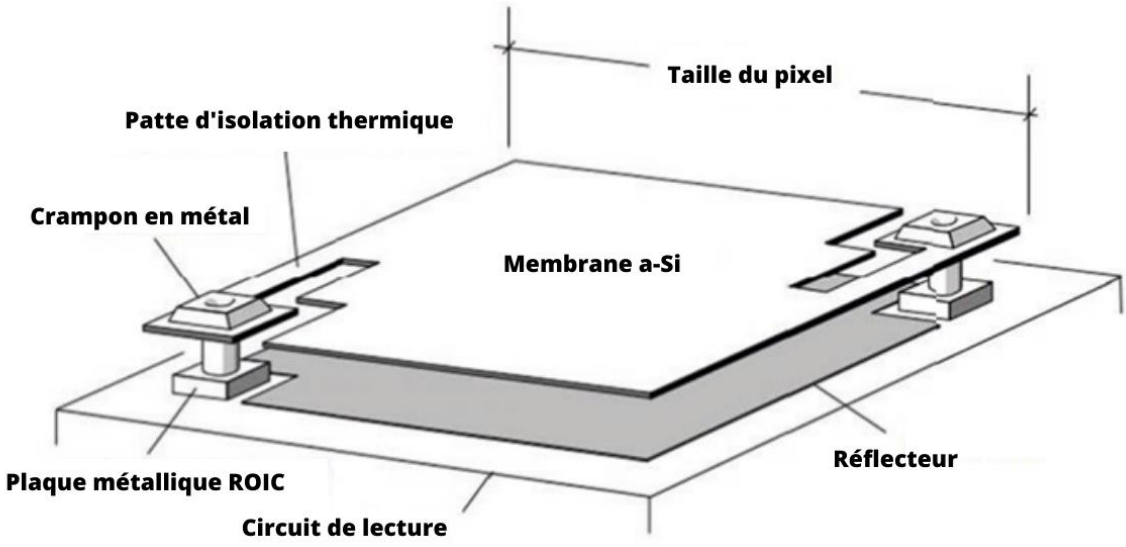


Figure 86 : Schéma d'un pixel de microbolomètre à base de silicium (adapté de Faye *et al.*, 2022).

L'inconvénient des caméras non refroidies est que leur capteur n'est pas stabilisé à une température constante ; dans ce cas, les valeurs de températures enregistrées intègrent les changements de température de la caméra et de l'atmosphère extérieure (Budzier et Gerlach, 2015). Cela peut entraîner une instabilité et une forte dérive dans l'acquisition de la température, car la sensibilité (gain) et le décalage de chaque microbolomètre changent avec la température du capteur, nécessitant un étalonnage du capteur de la caméra qui doit corriger la réponse non-uniforme des microbolomètres individuels sur le capteur (Faye *et al.*, 2022). En outre, ce type de caméra peut également présenter un bruit important au niveau du capteur en raison de l'effet

de « vignettage », lorsqu'un objectif atténue le rayonnement sur la périphérie du capteur, ainsi que du bruit de non-uniformité résultant des réponses différentes de chaque pixel au niveau du capteur (Meier *et al.*, 2011 ; Goodall *et al.*, 2015).

Enfin, les caméras thermiques à microbolomètres, souvent bon marché, ne sont pas aussi sensibles et précises que les systèmes refroidis. De plus, ces capteurs ne sont généralement pas calibrés radiométriquement, ce qui signifie qu'ils ne donnent que des informations sur les différences de température relatives qui sont exprimées en comptes numériques bruts (CN, représentant la magnitude du rayonnement IRT) et non sur la température absolue (Kelly *et al.*, 2018 ; Faye *et al.*, 2022). De ce fait, l'utilisateur doit procéder à un étalonnage radiométrique pour convertir les CN en données de température (Kelly *et al.*, 2019).

5.3.2.3. L'étalonnage radiométrique des données des caméras IRT non-refroidie et non-calibrée

Les images d'une caméra IRT non calibrée ne traduisent pas correctement la température réelle de l'objet-cible. Pour retrouver une mesure précise et absolue de cette température, il existe différentes méthodes telle que l'application de modèles de transfert radiatif (simulant les interférences atmosphériques, (Dubuisson *et al.* (2005)) et la correction des luminances atmosphériques en utilisant la température ambiante d'un corps noir (modèles linéaires ou polynomiaux, (Torres-Rua, 2017)). Mais la méthode la plus utilisée consiste à établir un étalonnage empirique en s'appuyant sur des températures connues de cibles thermiques au sol pour ensuite appliquer la correction radiométrique sur les images infra-rouges (Jolivot *et al.*, 2014 ; Kelly *et al.*, 2018). La mesures des cibles thermiques au sol peut se faire à l'aide d'un radiomètre IR, d'une deuxième caméra IRT ou de thermocouples (Berni *et al.*, 2009 ; Jensen *et al.*, 2014 ; Gómez-Candón *et al.*, 2016), et doit être effectuée lors de l'acquisition des données. Le dispositif au sol peut être composé de plusieurs cibles, comme dans l'étude de Jolivot *et al.* (2017), où quatre cibles de températures contrastées ont été utilisées afin de produire une large plage de températures : deux cibles de températures extrêmes (panneau de bois peint en noir et polystyrène blanc), qui représentent la température la plus chaude et la plus froide de la zone d'intérêt, et deux cibles de températures intermédiaires (représentants des sols nus secs et des sols humides) (**Figure 87**). Les cibles au sol doivent avoir une émissivité élevée et être suffisamment grandes pour couvrir plusieurs pixels de la caméra thermique afin d'être facilement localisées.

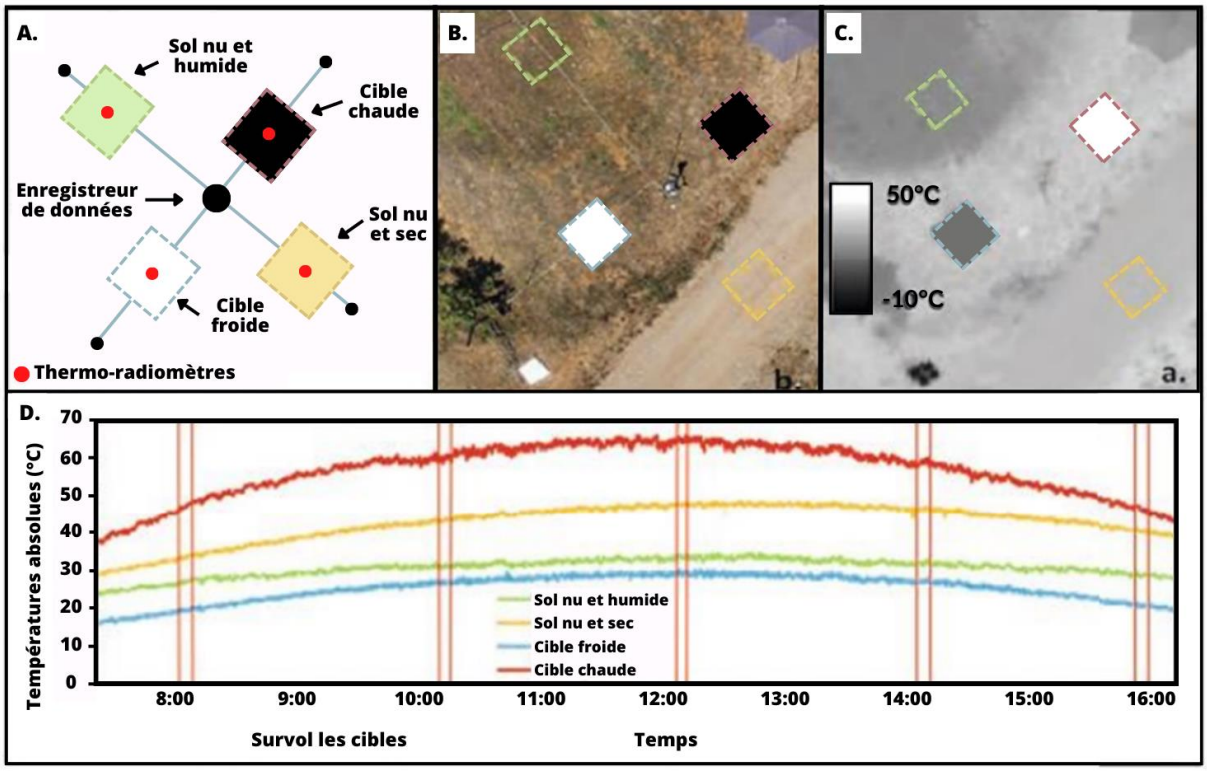


Figure 87 : A) dessin schématique du dispositif de mesure au sol (cibles thermiques), B) et C) images issues du dispositif dans les bandes RVB et IRT respectivement, D) températures absolues enregistrées sur les différentes cibles lors du vol (adapté de Jolivot *et al.*, 2017).

Les valeurs de températures moyennes pour chaque cible doivent être calculées, puis comparées aux valeurs moyennes des comptes numériques de chaque cible. Ensuite, une équation de régression linéaire calculée sur la base de ces données doit être appliquée à l'image thermique (**Figure 88**).

La calibration ou la validation de la température doit être effectuée séparément pour chaque vol de drone, car les conditions atmosphériques et la température de la caméra sont susceptibles de changer d'un vol à l'autre.

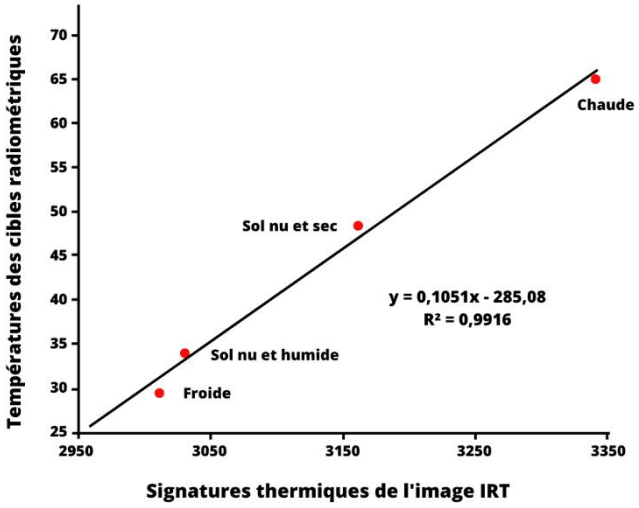


Figure 88 : Équation d'étalonnage radiométrique appliquée pour récupérer les données de température étalonnées (les marques rouges représentent les images IRT acquises sur les cibles d'étalonnage thermique) (adapté de Jolivot *et al.*, 2017).

5.4. Cas d'étude dans l'agglomération messine

Dans le cadre de nos recherches, trois sites faisant l'objet de réaménagement ont été choisis en concertation avec l'Eurométropole et la ville de Metz pour acquérir des thermographies de surface à l'aide d'une caméra IRT embarquée sur drone (**Annexe 12**). Le choix des sites a été effectué en tenant compte de plusieurs critères tels que la variété des aménagements mis en œuvre, de la situation géographique et du public concerné (présence de personnes vulnérables aux risques liés à la chaleur intense). Ce travail permettra de faire un retour d'expérience et d'appui aux élus et aux techniciens pour améliorer les stratégies d'aménagement, et préfigurer ce que la métropole et la ville souhaiteraient mettre en place à l'avenir.

5.4.1. Les sites ciblés

5.4.1.1. La place Mazelle

La place Mazelle située dans le quartier de l'ancienne ville, est au croisement de la rue Haute Seille et de l'avenue Jean XXIII (**Figure 89**). Elle joue un rôle important en tant que point d'articulation entre le centre historique et les quartiers les plus récents au sud du centre-ville, dont le quartier de l'Amphithéâtre. Le nom de la place témoigne de son caractère stratégique : du latin « *Macellum* », qui signifie littéralement « marché ». C'est là où se tenaient les marchés aux bestiaux.

Figure 89 : Vue aérienne de la place Mazelle (source : *Google Satellite).*

Entre 2011 et 2012, la Ville a rénové cette place afin d'en faire un nouvel espace de vie dédié aux citadins, en prenant en compte les contraintes de circulation, notamment les usages piétonniers et festifs, les circulations automobiles et douces, ainsi que le stationnement. Ce projet de rénovation s'articule autour de trois thèmes : la nature, l'eau et l'art. Trois éléments mis en avant dans l'objectif de créer un espace minéral ouvert agrémenté de jardins d'art et de points d'eau pour établir une continuité avec la promenade de la Seille. Les bancs sont disposés en rangées autour de plaques minérales où des lames d'eau coulent pour rafraîchir les journées d'été. Dans cette optique, la surface de l'espace piétonnier a été multipliée par dix pour offrir plus de confort et de sécurité aux visiteurs. La place Mazelle est alors devenue un lieu de promenade prisé des habitants de Metz surtout en été.

Le projet a également intégré une dimension écologique avec l'installation d'un bassin de rétention d'eau sous la place (**Figure 90**), pour stocker l'eau drainée et éviter qu'elle ne se déverse dans la Seille pour préserver son écosystème. La place a été choisie dans le cadre de notre étude en raison de son potentiel à concentrer plusieurs enjeux et types de revêtements sur un seul site. Les résultats fournissent un retour d'expérience sur les apports des différents aménagements réalisés.

Figure 90 : Etat de la place Mazelle au moment de la construction du réservoir d'eau (2010) (source batiactu.com).

5.4.1.2. La cour de l'école Saint-Eucaire

Le deuxième site étudié est la cour de l'école Saint-Eucaire (**Figure 91**), située en plein centre-ville de Metz (quartier ancienne ville - Outre Seille -). Il s'agit d'une école élémentaire accueillant des enfants entre 6 et 11 ans, public vulnérable au stress thermique.

Figure 91 : Vue aérienne de la cour de l'école Saint-Eucaire avant travaux (Source : *Google Earth*).

Avant réaménagement, cette cour d'environ 1800m² était fortement imperméabilisée, avec quelques grands arbres (érables sycomores et tilleuls à petites feuilles) situés dans sa partie ouest, apportant de l'ombre en fin d'après-midi sur les espaces de jeu. Elle intégrait également un espace de jardinage pédagogique, composé de bacs à compost et de cultures. L'étude de Hassani et Drogue (2020), a montré que cette cour était située dans la zone de la ville la plus sensible à l'ICU.

Entre l'été 2021 et l'été 2022, cette cour a fait l'objet d'une rénovation écologique visant à améliorer le confort thermique des enfants en cas de fortes chaleurs en apportant de la fraîcheur et de l'ombre. Cette rénovation a consisté en la désimperméabilisation d'une partie de la cour, notamment autour des pieds d'arbres, et en la création d'une strate végétale intermédiaire (arbustes et buissons) (**Figure 92**). Parmi les arbres déjà existants, seul l'un des érables a été retiré car en mauvaise santé. Il a également été décidé d'intégrer des pentes pour un meilleur écoulement

Figure 92 : Plan de masse au 1/200 des futurs aménagements de la cour Saint-Eucaire (Source : ville de Metz).

des eaux de pluie. Cette rénovation a aussi été imaginée comme une manière de sensibiliser les enfants au développement durable.

Ce site nous a paru être une bonne opportunité pour observer les effets microclimatiques des nouveaux aménagements en effectuant une étude diachronique avec en parallèle, un suivi continu de la température et de l'humidité relative. Cette expérimentation est menée conjointement par le laboratoire LOTERR et l'équipe *Team* du Cerema de Nancy. Cette dernière s'est associée au projet afin d'améliorer et valider le protocole de correction radiométrique des images IRT provenant d'une caméra non-refroidies en prenant des clichés avec une caméra thermique calibrée et refroidie qui permettent d'obtenir directement les températures de surface, tout en acquérant des données sur le confort thermique d'été. De son côté, le LOTERR a installé un capteur thermique *HOBO* sur un candélabre situé du côté nord-ouest de la cour (**Figure 91**) et a réalisé des cartographies des zones de surchauffe et de fraîcheur à l'aide d'un drone et d'une caméra thermique. Néanmoins, les travaux ont été retardés pour cause de fouilles archéologiques et n'ont pu commencer qu'en juillet 2022, ce qui fait que les résultats de cette collaboration ne pourront pas être présentés dans le cadre de cette thèse, les données étant encore en cours de traitement. Ne seront donc présentées ici que les mesures effectuées par le LOTERR durant la phase avant travaux.

5.4.1.3. Le parking 144 route de Thionville

Le troisième site étudié est un parking situé au nord de la ville dans le quartier Patrotte, au croisement de la rue de Méric et de la route de Thionville. Le parking est la propriété de la ville et est principalement utilisé par ses agents. Avant sa rénovation, cet espace était largement minéralisé, à l'exception de quelques arbres dans sa partie nord (**Figure 93**).

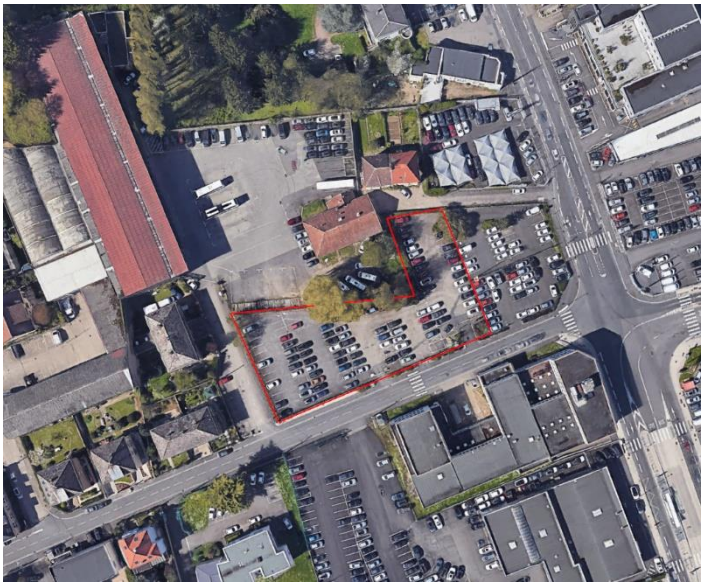


Figure 93 : Vue aérienne ante-aménagement du parking de la route de Thionville (surface d'environ de 2 km²) (source : *Google Satellite*).

Au printemps 2021, des travaux ont été entrepris pour améliorer la gestion des eaux pluviales, notamment par la mise en place de nouveaux revêtements. L'asphalte a été utilisé pour la partie dédiée à la circulation, tandis qu'un revêtement clair et poreux a été disposé au niveau des espaces de stationnement pour permettre aux eaux pluviales de s'infiltrer dans le sol. Cette opération de rénovation s'est inscrite dans le cadre du ZAN[33] (plantation d'arbres, désimperméabilisation massive, pavés infiltrants, etc.) à travers l'installation d'arbres entre chaque rangée de places de

[33] Zéro Artificialisation Nette

stationnement. Cette disposition vise à apporter de l'ombre et à limiter l'accumulation de chaleur en journée au niveau du sol.

Notre objectif sur ce site est d'effectuer un suivi avant et après réaménagement pour évaluer l'impact des bonnes pratiques d'adaptation au changement climatique sur l'ambiance micro-climatique de cet espace. Les résultats obtenus pourraient contribuer à l'élaboration de stratégies de rénovation des parkings visant à réduire l'effet accumulateur de chaleur de ce type d'espace.

5.4.2. La conception d'un protocole de mesure

5.4.2.1. Le matériel utilisé

a) La caméra thermique

Pour l'acquisition des images thermiques, nous utilisons une caméra IRT ***FLIR Vue Pro*** (caméra dite à ondes longues) non calibrée et non refroidie « *low cost* » (~ 2500 € TTC) conçue spécialement pour être embarquée sur un drone (*Vue Pro 336, 35° FOV, 9 Hz*) (**Figure 94a**). Elle est dotée d'un objectif de 9 mm produisant un champ de vision de 25° et une résolution de capteur de 336 × 256 pixels. Elle utilise un microbolomètre *VOx FPA* non refroidi avec une plage spectrale de 7,5 à 13,5 µm et une plage de températures de fonctionnement de -20 à +50°C. Les données brutes ont été capturées sous forme d'images *Tiff* 14 bits sans post-traitement.

Nous avons sélectionné la **marque *FLIR*** en raison de son coût compétitif et de sa capacité à répondre à nos exigences de travail, notamment en matière de légèreté, de stabilité et de taille. La caméra est dotée d'une batterie, d'un enregistreur et d'une mini station permettant la transmission des données et des commandes depuis le poste de pilotage. Tous ces équipements sont fixés sur le drone à l'aide d'un support nacelle fabriqué par *Dronavia* (**Figure 94b**). Dans une expérimentation antérieure, documentée par l'étude de Drogue *et al.* (2020), la caméra thermique n'était pas équipée d'un GPS, ce qui nous imposait de récupérer les métadata des images optiques (coordonnées *oméga*, *phi*, *kappa* et altitude) afin de les prescrire aux images thermiques. Cette étape étant très chronophage, nous avons alors décidé d'équiper notre caméra thermique d'un kit GPS.

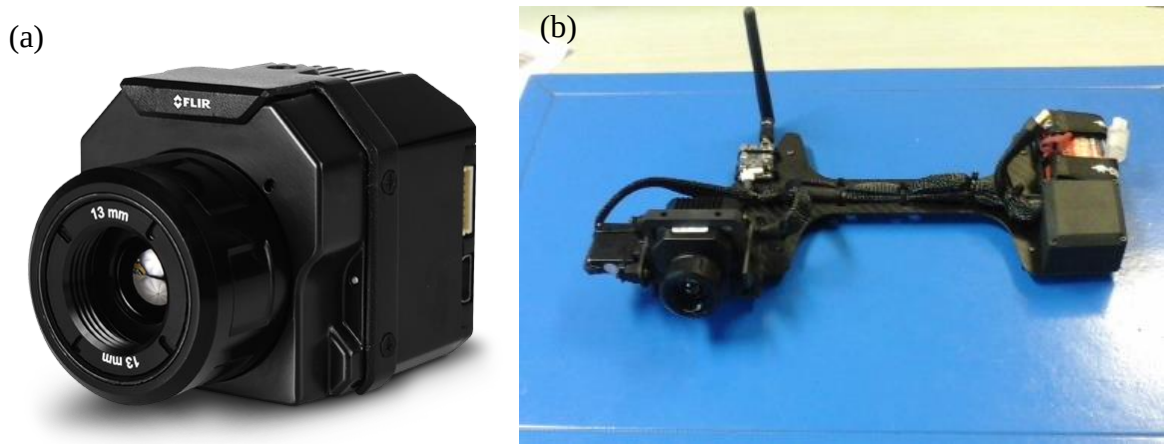


Figure 94 : (a) Caméra thermique infrarouge *Flir Pro* et (b) nacelle sur laquelle elle est installée.

b) Le drone

Le drone utilisé est de type ***DJI Phantom 4 Pro*** aéronef quadricoptère, servant généralement à des applications en imagerie optique (**Figure 95**). Il se caractérise par une masse de 1388 g et d'une envergure de 35 cm (sans les hélices). Il peut atteindre une vitesse maximale de 6 m/s au lancement et de 4 m/s en descente. En vol horizontal, sa vitesse maximale est de 20 m/s, ce qui lui permet de résister à un vent modéré inférieur à 10 m/s. Ce drone est équipé de quatre batteries professionnelles, chacune d'une capacité d'environ 6000mAh et offrant jusqu'à 30 minutes d'autonomie. Néanmoins, afin de préserver les batteries au lithium, il est peu recommandé de les pousser à leur maximum. Il est aussi conseillé de les conserver à des températures ambiantes autour de 20 °C[34]. Par ailleurs, pour se conformer à la réglementation en vigueur, l'appareil doit être posé dès lors que l'autonomie des batteries tombe en dessous des 33 %. Le drone est également équipé d'une centrale inertielle et d'un capteur GNSS réceptionnant uniquement les données issues des constellations de satellites *GLONASS* et GPS. Ce capteur permet au drone de se positionner en trois dimensions avec une précision d'environ 1,5 m.

Figure 95 : Photographie du drone *DJI Phantom 4 Pro* utilisé pour cette étude.

Enfin, le dispositif comprend également une caméra optique dotée d'un objectif grand-angle avec un champ de vision élargi (84° FOV, 8,8 mm/24 mm) et d'un capteur CMOS 1 permettant de prendre des clichés avec un effectif de 5472 x 3648 pixels. La caméra est montée sur une nacelle stabilisée (appelée aussi « *Gimbal* » en anglais) permettant d'amortir les mouvements éventuels en supprimant les effets de vibrations du drone en vue de limiter le flou sur les images capturées.

En cours de vol, le drone est contrôlé par une console radiocommandée connectée à une tablette tactile.

c) Les cibles de calibrage radiométrique

Nos références de terrain sont des cibles construites au LOTERR, constituées de cadres en bois de 1 m × 1 m × 0,01 m de manière à être facilement détectables sur les images IRT et couvrir un nombre de pixels suffisant (Drogue *et al.*, 2020). Sur ces cadres, sont posées des plaques isolantes en polystyrène expansé d'une épaisseur de 60 mm afin de limiter les fluctuations de température à court terme dans les cibles.

[34] Reichelt.com

En tout, trois cibles aux températures contrastées sont utilisées : deux cibles de températures extrêmes, qui représentent la température la plus chaude (cible noire) et la plus froide (cible banche), ainsi qu'une cible de température intermédiaire (cible grise). Il est à noter que durant les missions de 2021, les cibles étaient recouvertes de feuilles de papier canson de trois couleurs différentes (blanches, noires et grises) (**Figure 96a**), mais lors du vol de l'été 2022, nous avons remplacé ces feuilles de papier par des feuilles d'aluminium adhésives revêtues d'une peinture mate (**Figure 96b**) dans le but de renforcer la fiabilité des données recueillies.

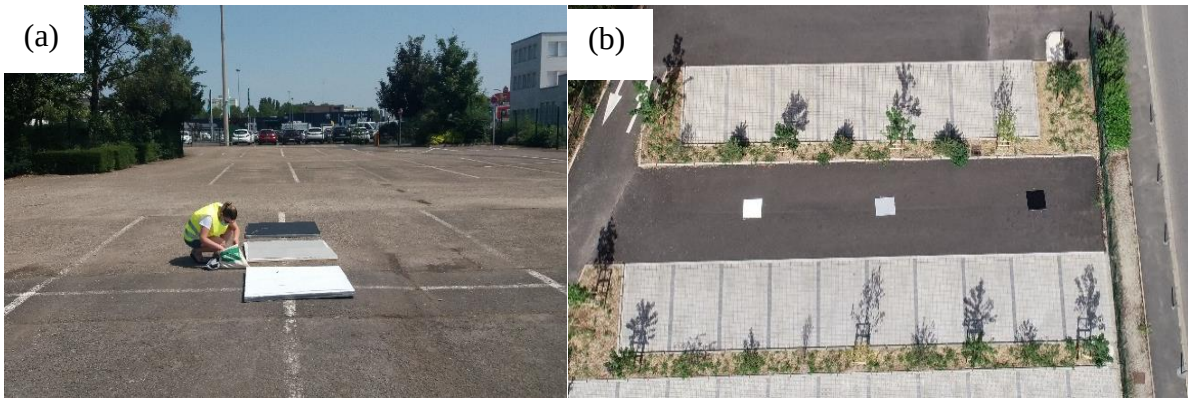


Figure 96 : (a) Les cibles thermiques revêtues de feuilles de canson blanches, noires et grises (parking avant travaux) et (b) les cibles thermiques revêtues de feuilles d'aluminium adhésives couvertes d'une peinture mate (parking après travaux).

d) Les capteurs thermiques et la station météorologique

Les capteurs thermiques utilisés pour enregistrer les données de températures au sol sont des sondes de température équipées d'un enregistreur de la **marque *Germini***, de **modèle *Tinytag Talk 2* (TK64023)**. Le choix de ces capteurs se justifie par la possibilité de les fixer aux cibles thermiques ainsi que par leur coût modéré permettant d'équiper chaque cible de deux sondes. De plus, ce modèle de capteur a déjà été utilisé avec succès pour l'observation du climat urbain (Foissard, 2015) ainsi que pour l'analyse des parcelles viticoles (Quénol et Beltrando, 2008).

Ces capteurs se composent de deux parties distinctes, à savoir un enregistreur et une sonde de thermistance (**Figure 97**). Selon le constructeur, la précision des mesures est de ±0,4 °C pour une plage de températures allant de 0 à 70 °C. En-dehors de cette plage, la précision diminue, passant de ±0,4 à ±0,8 °C.

Figure 97 : Le capteur thermique *Tinytag Talk 2*.

Les perles des capteurs ont été fixées sous les feuilles de chaque cible à l'aide d'un ruban adhésif afin de n'avoir aucune entrée d'air susceptible de fausser les données. Chaque cible étant équipée de deux sondes : l'une au centre et l'autre à l'extrémité de la cible pour couvrir deux zones différentes, paramétrées à l'aide du logiciel dédié *TinyTag Explorer* pour relever la température toutes les minutes.

e) La station météorologique automatique Vantage Pro 2 Plus

L'une des difficultés pour l'acquisition des données aéroportées est d'effectuer la prise d'images dans des conditions météorologiques stables et si possible similaires entre les vols. En effet, des conditions météorologiques très différentes pourraient limiter l'intercomparaison des Ts des objets ciblés (variations du rayonnement solaire dues aux passages de nuages, rafales de vent, etc.) (Kelly *et al.*, 2019). Aussi, afin de surveiller les conditions météorologiques pendant les missions, et pour évaluer les différences d'ambiance entre les deux vols avant/après travaux, nous avons eu recours à une station météorologique ***Vantage Pro 2 Plus*** installée sur un trépied de 2,5 m (**Figure 98**).

Figure 98 : La station *Vantage Pro 2 Plus* nstallée au niveau de la cour de l'école Saint-Eucaire.

Cette station est équipée de plusieurs capteurs qui permettent d'enregistrer la température, l'humidité relative, le vent (vitesse et direction), les précipitations et la pression atmosphérique, ainsi que le rayonnement solaire. La précision des capteurs est de ±0,5 °C pour la température, et de ±3% pour l'humidité (**Tableau 21**). Toutes les données acquises sont ensuite gardées en mémoire dans une console puis téléchargées à l'aide d'un ordinateur portable.

Tableau 21 : portée, résolution, précision des capteurs de la station Vantages2 Pro +

Paramètre	Gamme	Résolution	Précision
Température	40 à 65 °C	0,1 °C	±0,3 °C
Humidité relative	1 à 100 %	1 %	±2 %
Précipitation	/	0.2 mm	± (4 % + 0,2) mm
Direction du vent	1 – 360 °	1 °	±3 °
Vitesse du vent	0 – 322 km/h	1 km/h	±3,2 km/h
Rayonnement solaire	0 à 1800 W/m2	1 W/m²	±5 %

5.4.2.2. Le protocole de correction radiométrique à l'aide des données de terrain

Etant donné que notre caméra thermique n'est pas calibrée, elle ne fournit pas directement une image radiométrique en température de surface (***cf.* 5.3.2.3**). Aussi, un protocole s'inspirant des travaux de Jolivot et *al.* (2014) et des recommandations de Kelly et *al.* (2019) a été mis en place pour la correction radiométrique des images IRT. Il s'agit d'étudier la relation entre le compte numérique des cibles présentes sur l'image et les températures relevées au sol. L'équation de cette relation est ensuite utilisée pour convertir les CN en Ts.

5.4.3. L’acquisition des données aéroportées

5.4.3.1. La planification des vols

a) Les démarches administratives

Avant chaque vol, une phase de préparation est nécessaire. Cette phase commence par les demandes d'autorisation de vol, conformément aux exigences décrites dans la **partie 5.2.2**. Une fois que les autorisations ont été délivrées par la préfecture pour un vol de type S3 (portant sur une plage d'un mois (**Annexe 13**)), la ville et l’Eurométropole de Metz sont prévenues préalablement au vol pour informer les habitants via un arrêté municipal ou un article de presse (**Annexe 14**).

Après cela, une date de vol est choisie dans le mois d’autorisation en s’appuyant sur les prévisions météorologiques afin d’avoir des conditions atmosphériques favorables (journée ensoleillée avec peu de vent). Ensuite, tous les équipements nécessaires pour la réalisation de la mission sont préparés, avec notamment une mise à jour DJI du drone afin de débloquer les *No fly-zones*. Le drone est, en effet, équipé d'un système d'interdiction de vol dans certaines zones telles que dans les alentours des terrains militaires, des zones aéroportuaires ou des centres pénitentiaires.

b) La mise en place du protocole de sécurité

Conformément à la réglementation en vigueur, chaque site de vol est soigneusement délimité avec une emprise de 100 m x 100 m pour garantir la sécurité des usagers de l’espace public et de tous les intervenants impliqués dans les vols. Par ailleurs, étant donné que les sites survolés relèvent du scénario S3 (zone peuplée), il est impératif de mettre en place une zone d'exclusion des tiers de 30 mètres de côté, afin de minimiser les risques de dommages matériels ou physiques (comme l'illustre la **Figure 99**). Il convient dès lors de déployer des vigiles de chaque côté dans le but d’empêcher les passants de s’approcher. Ainsi, dans le cas de la Place Mazelle, nous avons demandé l'assistance de la police municipale pour garantir la sécurité du site et le service de voirie de la ville a été mobilisé pour réguler la circulation routière et minimiser les risques pour le public. En revanche, la cour de l’école Saint-Eucaire et le parking de la Route de Thionville sont des cas particuliers puisqu’ils sont déjà pourvus de clôtures. Nous avons donc estimé qu'il n'était pas nécessaire d'affecter un vigile supplémentaire.

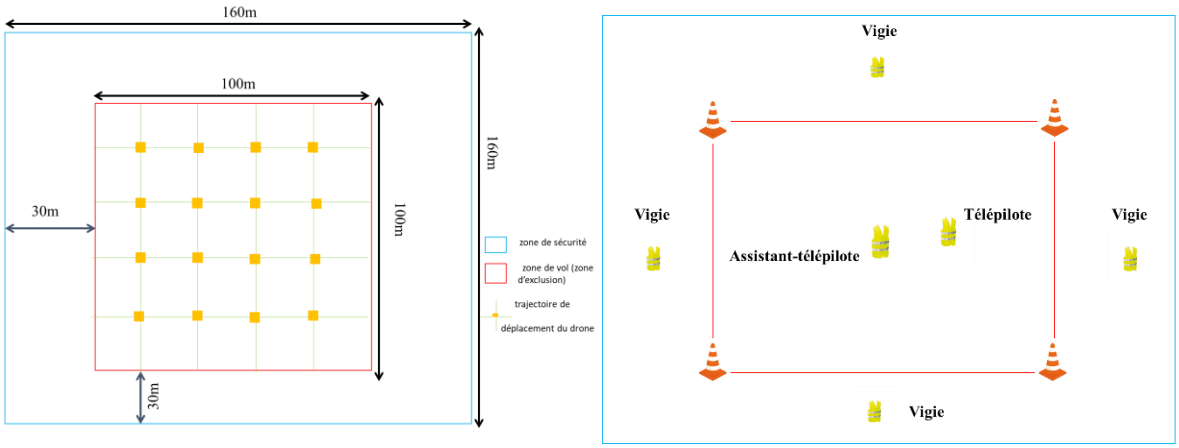


Figure 99 : Délimitation de la zone de vol pour chaque site étudié.

La ville de Metz a édicté des arrêtés municipaux et a installé des panneaux de signalisation sur la place Mazelle et le parking. Pour ce dernier, les véhicules ont été interdits de stationner au cours de l'après-midi de la mission, soit de 13h00 à 18h00 (**Annexe 14**). La ville de Metz a été prévenue une semaine avant l'opération afin de fournir une information préalable aux usagers du parking. Concernant l'école Saint-Eucaire, la mission a été conduite en période de vacances scolaires afin de ne pas gêner l'activité scolaire, et le service de voirie a déployé des plans de déviation à l'attention des piétons et des automobilistes sur toute la durée de l'intervention.

c) L'acquisition des données météorologiques

Le jour du vol, nous avons commencé par poser les cibles thermiques qui servent de référence de terrain, afin qu'elles soient exposées au soleil suffisamment longtemps pour que les données soient fiables. Nous avons ensuite installé les sondes thermiques *Tinytag* pour relever les données de températures avant et pendant le vol, puis monté la station météorologique *Vantage Pro 2+* pour caractériser les conditions atmosphériques au niveau de la couche d'air proche du sol.

d) Le relevé des points de contrôle

Des relevés topographiques ont été menés à l'aide d'une station Total GPS différentiel (**Figure 100a**) et d'une station *Trimble Série S5* (**Figure 100b**) car le relief du terrain a une influence sur la reconstruction en 2D et 3D du modèle issu des clichés acquis lors de la prise de vue, et le dispositif GPS dont est équipé le drone n'est pas assez précis en Z. Ces relevés topographiques permettent des créer un réseau de points de contrôle au sol pour chaque site étudié avant de lancer l'acquisition des données de terrain par drone. Ces points de contrôle sont répartis de manière uniforme (**Annexe 15**) et permettent de caler les images optiques et thermiques lors de leur traitement en vue de créer des orthomosaïques.

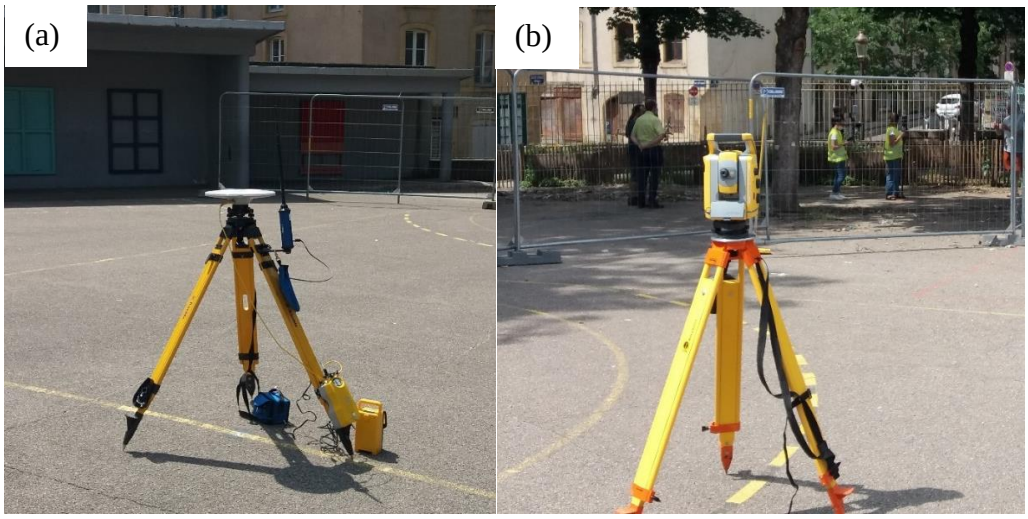


Figure 100 : (a) Mise en place du GPS différentiel *Trimble* sur le repère géodésique local (clou de géomètre) et (b) mise en place de la Station Totale *Timble Série S5*.

Nous avons donc préalablement aux vols, disposé un clou de géomètre sur chaque site étudié que nous avons ensuite géoréférencé par rapport à une borne du réseau géodésique français (située sur la commune Scy-Chazelles) (**Tableau 22**, **Annexe 16**). Ce point a servi de point de référence pour les réseaux de points de contrôle élaborés sur chaque site (**Annexe 17**). Les points identifiés comme points de contrôle sont facilement reconnaissables à l'intérieur et à l'extérieur du site étudié.

Tableau 22 : Coordonnées de la borne de Scy-Chazelles (Système : RGF93 v2b)

Point	e (m)	n (m)	Précision planimétrique	Altitude (m)	Précision altimétrique
a	928022.295	6894206.322	<1 cm	167.163	5 mm

e) La préparation de la caméra IR

La caméra IR utilisée au cours de nos vols étant non-refroidie, les microbolomètres du capteur ne se maintiennent pas à une température constante et sont donc très sensibles aux changements de température de la caméra. Plusieurs expériences ont alors été menées dans le cadre du stage de Litifu (2021), en intérieur et en extérieur pour détecter les dérives de la caméra IR sur les images acquises. Les essais en intérieur consistent principalement à observer le fonctionnement du capteur thermique dans un environnement à température relativement constante. Les expériences en extérieur servent, quant à elles, à observer le fonctionnement de la caméra thermique en conditions réelles, ainsi qu'à détecter et résoudre les éventuels problèmes liés aux interférences des facteurs naturels sur la caméra thermique.

Les études antérieures qui ont utilisé les mêmes dispositifs de mesure, ont montré que les instruments infrarouges thermiques connaissent une période de préchauffage pendant laquelle les mesures sont incohérentes (Grgić et Pušnik, 2011 ; Aragon *et al.*, 2020) [35]. Le résultat de l'une de nos expériences reproduites dans le graphique ci-dessous confirme ce constat : la température de cette dernière augmente avec le temps et n'atteint une température stable qu'au bout de 35 minutes environ. En parallèle, le compte numérique enregistré par la caméra thermique diminue progressivement au cours de la phase d'enregistrement (**Figure 101**). C'est un résultat très important qui ne peut être ignoré. En effet, avant que la caméra thermique n'atteigne une température stable, elle ne peut pas enregistrer de compte numérique avec précision. Nous devons donc l'allumer et la laisser chauffer au moins 30 minutes avant de commencer les mesures.

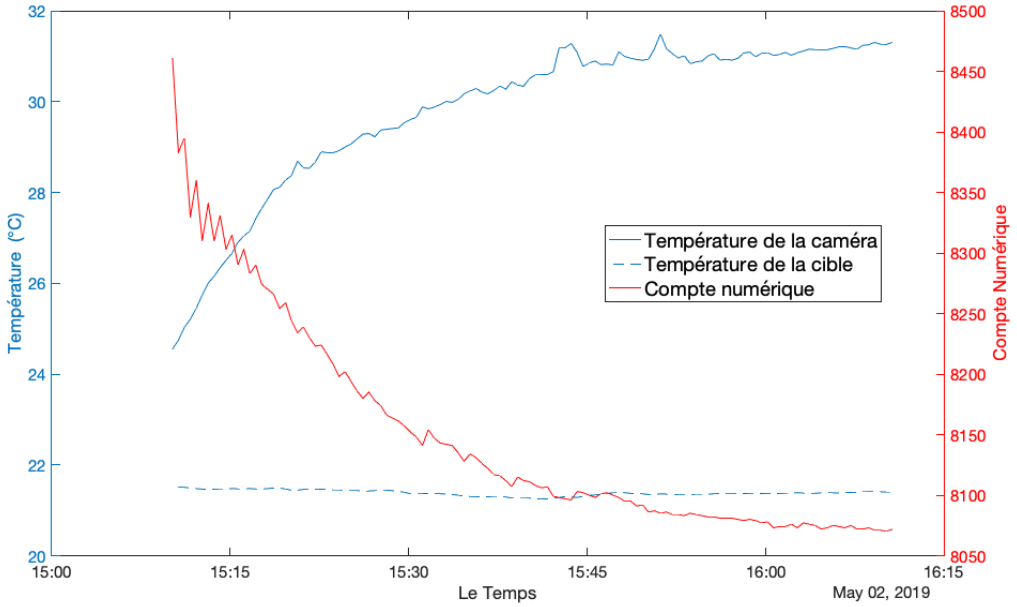


Figure 101 : Résultat du premier test effectué au laboratoire, le 2 mai 2019 à 15h00.

La période d'attente après allumage permet ainsi à la caméra d'atteindre une température à l'équilibre avec l'ambiance thermique extérieure, puisque les micobolomètres sont également sensibles aux variations de la température extérieure.

Après la période d'attente, la caméra est recouverte d'un boîtier en polystyrène (**Figure 102**) pour la protéger des conditions météorologiques extérieures. Il s'agit ainsi de limiter au maximum la dérive découlant de l'instabilité de la température du capteur sous l'effet des conditions de vol sur les données radiométriques enregistrées (effet de refroidissement éolien, radiation solaire) (Drogue *et al.*, 2020). La caméra thermique est installée sur une nacelle équipée d'un système de positionnement global (GPS), d'une batterie, d'un émetteur et d'un récepteur de signal. La configuration de la caméra thermique est effectuée à l'aide du logiciel *FLIR UAS* pour prendre des photos toutes les deux secondes.

[35] Tout matériel électronique, par effet Joule, produit de la chaleur. Celle-ci finit par se stabiliser au bout de *n* minutes.

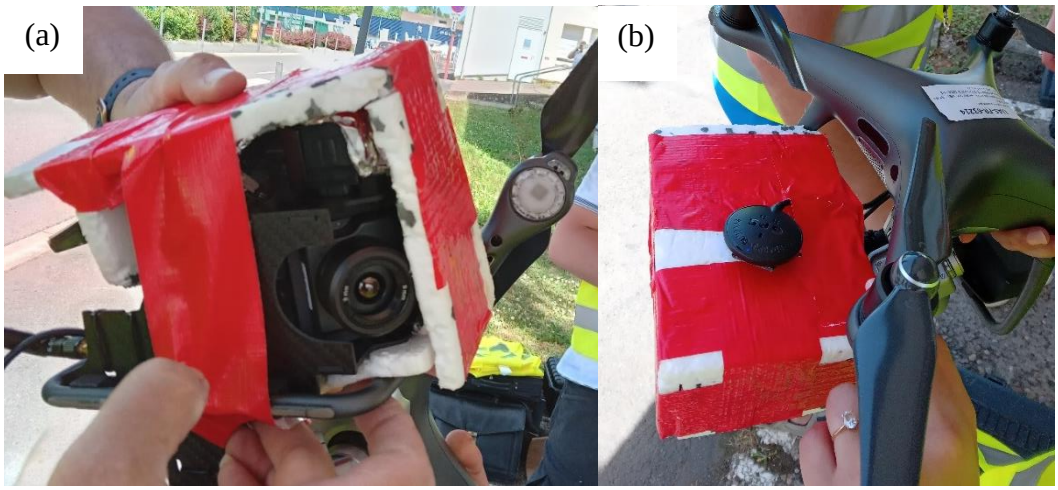


Figure 102 : (a) Boitier en polystyrène protégeant la caméra pendant le vol du drone et (b) kit GPS de la caméra.

f) La gestion et le paramétrage du plan de vol

Le plan de vol est préparé et programmé à l'aide de l'application *Pix4D* sur la tablette *iPad*®, notamment en ce qui concerne l'altitude de vol, l'emprise de la zone survolée, le taux de chevauchement, etc. Sur ce logiciel, l'emprise est paramétrée en fixant sa largeur et sa longueur (**Figure 103** - voir les plans de vol de chaque site en **Annexe 17**).

Figure 103 : Vue du plan de vol de la cour Saint-Eucaire via l'interface de l'application *Pix4D* sur l'*iPad*®.

Le plan de vol du drone pour chaque site a été paramétré de façon à ce que les images soient prises sous des angles variant de 30° à 45° avec un taux de recouvrement de 80 %. Il s'agit d'une recommandation intégrée dans la notice du logiciel *Pix4D* qui permet de s'assurer que tous les angles du site étudié soient capturés (toitures, façades, arbres…), permettant ainsi la construction d'un modèle 3D. A cet égard, les images capturées en oblique à un angle de 45°, selon les résultats visibles, démontrent que l'orientation photographique et la précision de localisation des points du modèle 3D obtenus sont supérieures à celles obtenues à partir de prises de vues aériennes verticales. Cette amélioration de la qualité du modèle 3D est due à une intersection plus nette et précise des rayons perspectifs, selon les observations présentées par Tournadre (2015).

g) La vérification des conditions de vol

La vitesse du drone exerce une influence significative sur la qualité du nuage de points généré puisque la vitesse et la hauteur de vol peuvent créer un flou sur les images capturées. En effet, les pixels extraits des images sont utilisés lors de l'étape d'alignement des photographies pour la reconstruction du modèle 3D. Or, dans le cas où une image présenterait un flou, la qualité de l'alignement des photographies peut être altérée ou même impossible. Il est donc impératif de veiller à éviter tout flou lors de la capture des images. Pour cela, nous avons sélectionné la vitesse de vol la plus lente dans la plate-forme de la gestion de vol (3 m/s).

Préalablement à tout vol, le site internet *UAV Forcast*[36] est consulté pour s'assurer que les conditions météorologiques sont favorables (**Annexe 18**). Par exemple, si la vitesse du vent dépasse 10 m/s, le décollage du drone est interdit, car celui-ci ne pourra maintenir sa trajectoire et potentiellement s'écraser. D'autres paramètres météorologiques tels que la couverture nuageuse, la température et la visibilité ont également été vérifiés. Enfin, nous avons veillé à ce que l'indice Kp renseignant au sujet de l'activité des orages géomagnétiques liée à l'activité solaire, affiche bien le message « bon pour voler ». Ce paramètre pourrait en effet altérer la qualité de la réception des satellites qu'utilisent les drones comme aide au pilotage.

5.4.3.2. Le déroulement des vols

Chaque mission a commencé sur site vers 13h00 pour s'achever vers 18h00. Le vol du drone a eu lieu généralement après 16h30 de manière à être sur le pic de chaleur. Le tableau 23 résume les conditions de chaque vol.

Tableau 23 : Informations sur les vols en fonction des sites étudiés.

Site	Date et heure du vol (durée du vol)	Conditions météorologiques
Place Mazelle	14 juin 2021 à 16h50 (3 min)	T : 28,2 – 30 °C VV : 1,6 – 6,4 m/s (petite brise)
Cour de l'école Saint-Eucaire (état 0)	21 juillet 2021 à 16h40 (7 min)	T : 26,6 - 28,7 °C VV : 1,6 – 6 m/s (petite brise)
Parking route de Thionville (état 0)	23 juillet 2021 à 17h30 (8 min)	T : 28 – 29 °C VV : 2 – 13 m/s (petite à jolie brise)
Parking route de Thionville (état 1)	17 juin 2022 à 17h30 (4 min)	T : 29,5 – 31 °C VV : 0 - 9 m/s (petite à jolie brise)

En figues de 104 à 107 quelques photographies illustrent le déroulement des missions. On peut y voir un aperçu de chaque site et le matériel utilisé.

[36] https://www.uavforecast.com/

Figure 104 : Prises de vue au sol lors de la mission sur la place Mazelle (crédits photo : Gilles Drogue et Dominique Brion, légende des photos en **Annexe 19**).

Figure 105 : Prises de vue au sol lors de la mission sur la cour de l'école Saint-Eucaire (crédits photo : Gilles Drogue et l'auteure, légende des photos en **Annexe 20**).

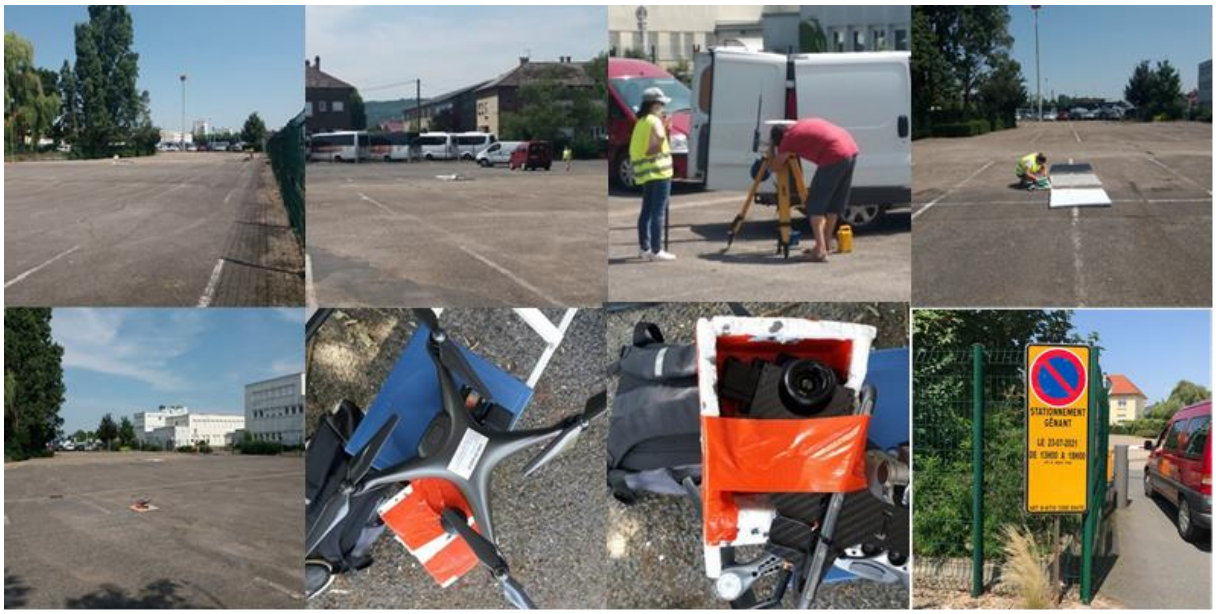


Figure 106 : Prises de vue au sol lors de la mission sur le parking de la route de Thionville avant travaux (crédits photo : Gilles Drogue et l'auteure, légende des photos en **Annexe 21**).

Figure 107 : Prises de vue au sol lors de la mission sur le parking de la route de Thionville après travaux (crédits photo : Gilles Drogue et l'auteure, légende des photos en **Annexe 22**).

5.5. Traitement photogrammétrique des données et production des thermographies

Dans cette section, nous expliquons les étapes suivies et les manipulations effectuées sur le logiciel *PhotoScan* pour construire les orthomosaïques optiques et thermiques. Ce logiciel utilise des algorithmes robustes et toutes les opérations sont presque entièrement automatisées : l'opérateur peut régler certains paramètres, liés à la qualité des résultats souhaités, tels que la précision de l'estimation des positions approximatives de la caméra et certains paramètres de

reconstruction pour la création du maillage final. Pour chaque vol, nous acquérons les données suivantes :

Tableau 24 : Nombre d'images optiques et thermiques recueillies pour chaque site (Etat 0 : avant travaux/Etat ; 1 : après travaux).

Site étudié	Nombre d'images optiques	Nombre d'images thermiques
Place Mazelle	58	64
Cour Saint-Eucaire (état 0)	52	122
Parking route de Thionville (état 0)	54	249
Parking route de Thionville (état 1)	60	119

5.5.1. La création des orthomosaïques optiques

5.5.1.1. L'alignement des images et l'extraction du nuage de points

Pour traiter les données récoltées, la première étape consiste à importer l'ensemble des images optiques dans le logiciel *Metashape*. Cet outil analyse toutes les images (**Tableau 25**) et procède à leur alignement, étape clé dans la reconstruction en photogrammétrie. Cette opération consiste à retrouver la position de la caméra pour chaque prise de vue, ainsi que l'orientation de toutes les images pour identifier les points de similitudes entre elles afin de créer une seule image de l'ensemble du site.

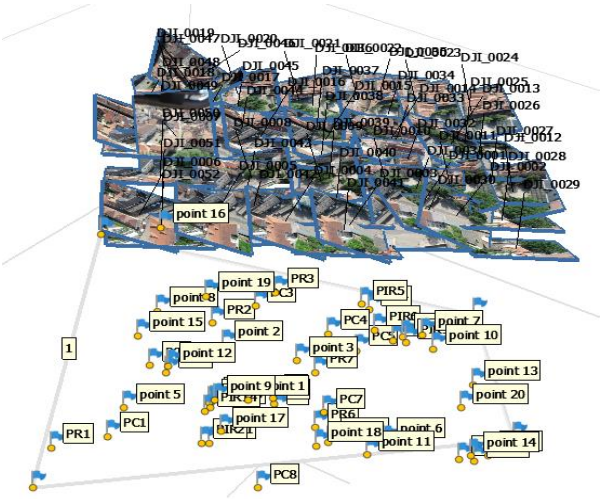


Figure 108 : Alignement des images optiques de la cour de l'école Saint-Eucaire à l'aide des points de contrôle dans *Metashape.*

Afin d'assurer une précision maximale dans le processus d'alignement, nous procédons à un géoréférencement des images. Pour cela, nous utilisons les points de contrôle issus des levés topographiques pour corriger la position des images présentant des écarts, permettant ainsi d'obtenir un modèle 3D exhaustif du site en question (**Figure 108**). Il s'agit d'identifier manuellement chaque point de contrôle sur les images pour l'associer avec les coordonnées obtenues par les levés topographiques. La durée d'alignement des images peut varier en fonction de la puissance et de la configuration de l'ordinateur.

A noter qu'il est crucial de configurer précisément les paramètres relatifs à la précision de la position des images et aux limites des points à extraire. La précision doit être réglée sur une valeur élevée, tandis que la limite de points doit être fixée à 60 000. Par ailleurs, la "limite de

points de liaison" a été paramétrée à 4 000, valeur par défaut recommandée par *Agisoft*, l'éditeur du logiciel.

Tableau 25 : Nombre d'images optiques et de points de contrôle utilisés pour l'alignement des images (Etat 0 : avant travaux/Etat 1 : après travaux).

Site étudié	Nombre d'images optiques	Nombres de points de contrôle
Place Mazelle	56	10
Ecole Saint-Eucaire (état 0)	52	52
Parking route de Thionville (état 0)	169	53
Parking route de Thionville (état 1)	60	77

5.5.1.2. La création du nuage de points denses

Une fois les images alignées, la deuxième étape consiste à construire deux nuages de points, le second étant plus dense que le premier. Ce travail est nécessaire pour produire une image stéréoscopique qui servira à la création d'un modèle numérique d'élévation (MNE). La résolution des images utilisées est directement proportionnelle à la densité du nuage de points généré, et conditionne dès lors la précision de la modélisation 3D. Chaque point faisant partie du nuage de points est défini par un sa position spatiale dans les coordonnées (*x*, *y* et *z*) par rapport aux points de contrôle (**Tableau 26**). Les densités de points -qui sont calculées à l'aide d'algorithmes de corrélation et de triangulation pour chaque image- sont ensuite combinées pour créer un nuage de points global, également appelé nuage de points denses, qui représente le site étudié en 3D (**Figure 109**). Il convient de préciser qu'après avoir testé chaque niveau de reconstruction, nous avons finalement opté pour celui qui nous a semblé fournir une quantité de détails adaptée à notre projet.

Tableau 26 : Nombre de points dans les nuages fins et denses générés à partir des images optiques servant à construire la modélisation 3D (Etat 0 : avant travaux/Etat 1 : après travaux).

Site étudié	Nombres de points dans les nuages de points fins	Nombres de points dans les nuages de points denses
Place Mazelle	42 503	8 131 430
Ecole Saint-Eucaire (état 0)	39 525	42 300 012
Parking route de Thionville (état 0)	34 750	1 962 474
Parking route de Thionville (état 1)	56 746	109 096 799

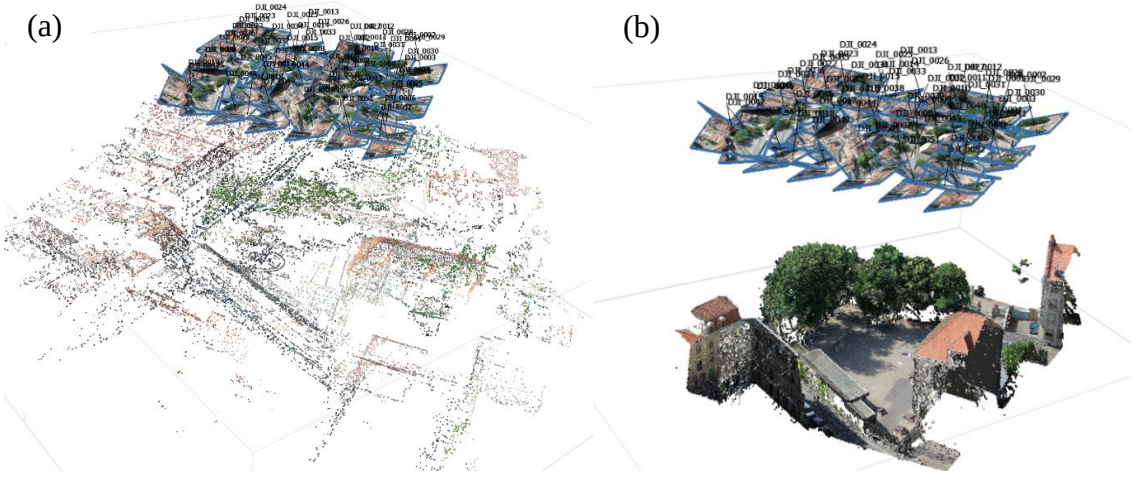


Figure 109 : (a) Construction d'un premier nuage de points et (b) construction d'un nuage de points denses.

5.5.1.3. La construction du maillage

Le maillage, également appelé « *mesh* » en anglais, est une structure de données géométriques qui permet de décrire la surface d'un objet en utilisant un ensemble de polygones (Poux *et al.*, 2017). L'élaboration du maillage surfacique comme modèle géométrique sur un nuage de points est courante dans la photogrammétrie utilisant ce genre de données.

À partir du nuage de points dense, il est possible de créer un maillage en reliant les points voisins pour former des polygones (généralement des triangles ou des quadrangles) et constituer une représentation géométrique de l'objet (**Figure 110a**). Le logiciel crée le maillage par le biais d'algorithmes de triangulation dont le principe général peut être expliqué, bien que leur fonctionnement détaillé ne soit pas visible. Ces algorithmes calculent la courbure des surfaces du maillage et déterminent les valeurs minimales et maximales de celle-ci. En fonction de ces valeurs, une ligne de rupture de pente est dessinée. Les paramètres de cet outil sont configurables en fonction de la qualité du maillage, de la pertinence des lignes, ainsi que de leur longueur (Authie, 2020). Nous avons dès lors opté pour une densité de maillage élevée pour nous permettre, entre autres, d'apporter des modifications plus précises aux surfaces obtenues ultérieurement, même si cela implique de réduire le nombre de mailles.

Après cela, vient l'étape de lissage du maillage qui s'effectue en supprimant les points isolés, en lissant les surfaces et en bouchant les trous afin d'aboutir à un autre modèle 3D composé de surfaces lisses (**Figure 110b**). Des options de lissage et de simplification du maillage sont disponibles pour aider à réduire le nombre de triangles sans compromettre la précision de la surface. Le maillage obtenu est alors prêt pour y appliquer des textures sur ses surfaces afin de lui donner une apparence réaliste (**Figure 111**).

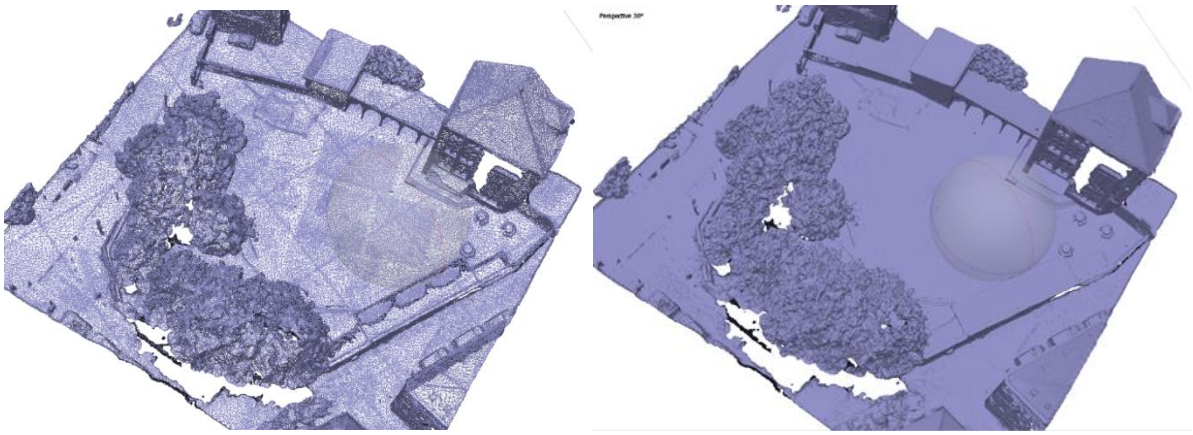


Figure 110 : (a) Construction d'un maillage 3D par triangulation et (b) Création du maillage 3D par texturage.

Les textures sont ajoutées à partir des prises de vue réelles en utilisant des algorithmes de projection et de mappage (**Figure 111**).

Enfin, il convient de noter que la création d'un maillage précis dépend de la qualité et de la densité du nuage de points. Par conséquent, il est essentiel de veiller à ce que les images soient de haute qualité et qu'elles couvrent tous les angles de l'objet ou de la zone à modéliser.

Figure 111 : Habillage du modèle 3D à partir des images originales de la cour Saint-Eucaire.

5.5.1.4. Les orthomosaïques optiques des trois sites survolés

Les traitements photogrammétriques des images optiques ont permis de réaliser les vues 3D suivantes :

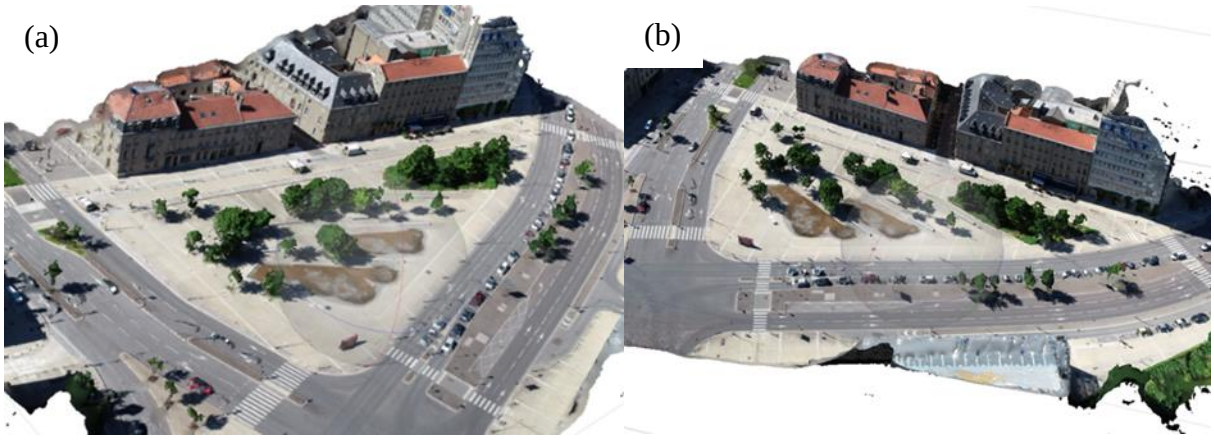


Figure 112 : (a) Vue vers le nord-est et (b) vue vers le nord de la place Mazelle.

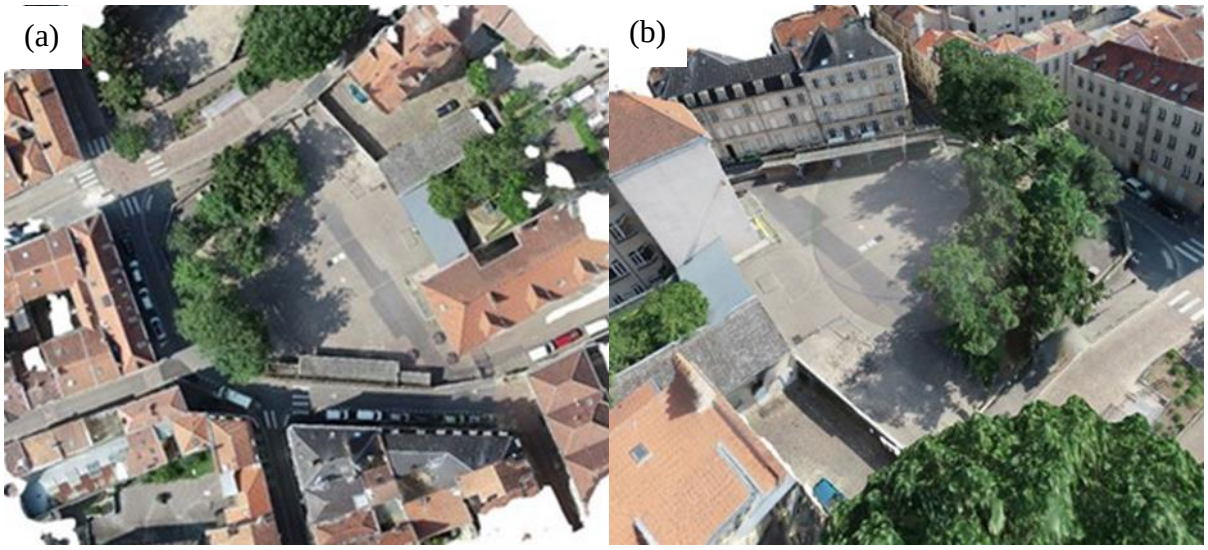


Figure 113 : (a) Vue zénithale et (b) vue vers le sud-ouest de la cour de l'école Saint-Eucaire.

Figure 114 : a) Vue zénithale et (b) vue vers l'ouest du parking de la route de Thionville avant réaménagement.

Figure 115 : a) Vue vers le nord et (b) vue vers l'ouest du parking route de Thionville après réaménagement.

5.5.2. La création des orthomosaïques thermiques

Avant de procéder à la création de l'orthomosaïque thermique, les images IRT sont triées et filtrées à l'aide du logiciel *FLIR Tools* pour ne conserver que les images nettes. Cette étape est cruciale pour assurer la qualité de la modélisation 3D ultérieure. Les images sont ensuite importées dans le logiciel *Metashape* pour générer une orthomosaïque thermique.

Le processus de génération des orthomosaïques thermiques suit les mêmes étapes que celui utilisé pour les images optiques. Toutefois, les images thermiques sont moins riches en métadonnées puisqu'elles ne disposent que des coordonnées X et Y (issues du dispositif GPS rajouté à la caméra thermique), ce qui limite la capacité de modélisation des images thermiques.

La modélisation des images spectrales (RVB) est également un élément clé du processus de création d'orthomosaïques thermiques. Elle permet d'alimenter le calage des images thermiques, sans quoi l'opération serait impossible. L'opération de calage des images thermiques s'effectue en utilisant des points de contrôle qui sont créés sur les images optiques (**Figure 116**). Ces points permettent de copier les métadonnées telles que les coordonnées *oméga*, *phi*, *kappa* et l'altitude des images optiques pour ensuite les injecter dans les images thermiques afin de bien les géoréférencer et de construire le nuage de points denses. Cette étape a été effectuée pour chaque image, ce qui rend l'opération chronophage. Une fois le nuage de points généré, il est alors superposé sur le MNE[37] (**Figure 117a**) issu des images optiques afin de corriger les alignements de points défectueux et construire des modélisations thermiques en 2D et en 3D précises (**Figure 117b**).

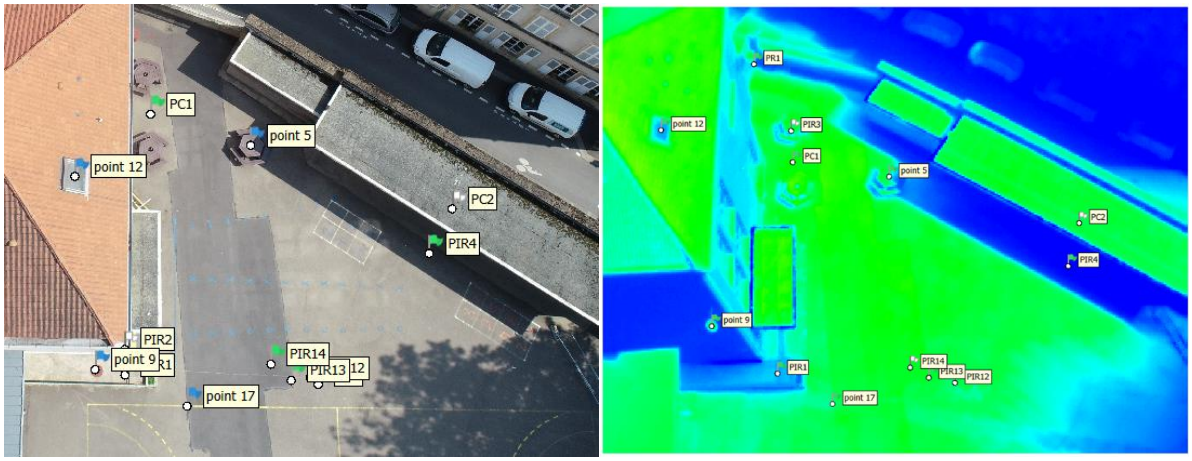


Figure 116 : A gauche l'image optique accompagnée des points de contrôle utilisés pour l'alignement de l'image thermique située à droite (site : cour de l'école Saint-Eucaire).

[37] Modèle Numérique d'Elévation ou sursol.

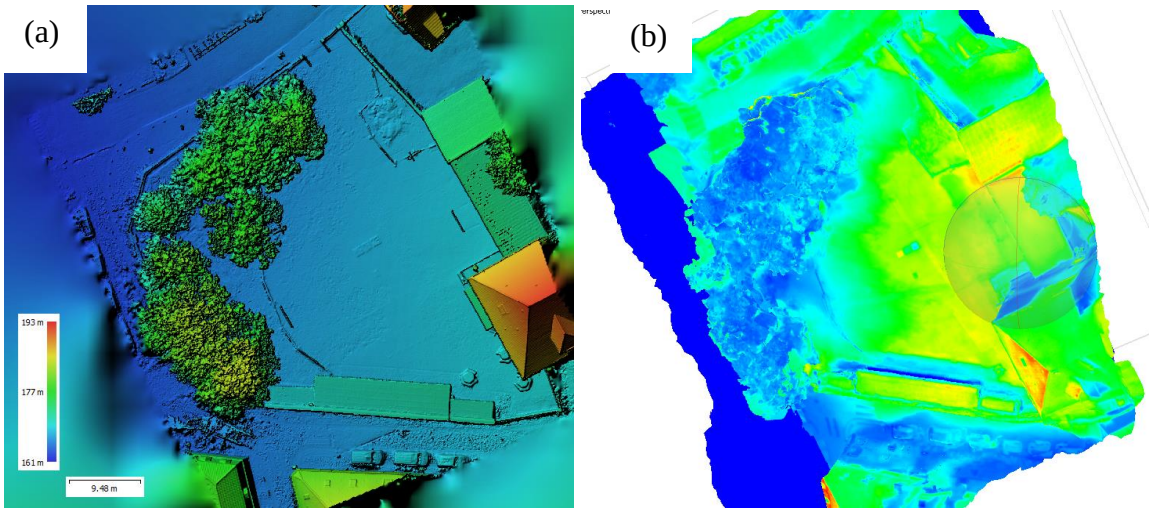


Figure 117 : (a) MNE généré par les images optiques pour la cour Saint-Eucaire et (b) modélisation thermique 3D de la cour Saint-Eucaire.

5.5.3. La correction radiométrique des images IRT

5.5.3.1. Les cas de la place mazelle et de la cour Saint-Eucaire

Une fois l'orthomosaïque thermique générée (en niveaux de gris), comme l'indiquent les figures 118a et 118b, les cibles thermiques y apparaissent de manière claire et homogène sur les images. En effet, elles sont facilement identifiables à la fois dans le visible et dans l'infrarouge thermique. Cette qualité permet de sélectionner des signatures thermiques en CN afin de calculer la valeur moyenne par cible à partir de l'image brute de chaque site étudié. Pour cela, la moyenne de chaque cible a été calculée en sélectionnant plusieurs pixels sur toute l'étendue de chaque cible (**Annexe 23**, **Annexe 24**, **Annexe 25** et **Annexe 26**) En parallèle, la moyenne des températures de contact des deux *Tinytag* par cible a été calculée en s'intéressant uniquement aux données relevées lors du vol (**Annexe 27**, **Annexe 28** et **Annexe 29**). Ensuite, les valeurs moyennes des signatures thermiques sont comparées aux moyennes de température par cible (la figure 119 pour le cas de la cour Saint-Eucaire et la figure 120 pour le cas de la place Mazelle).

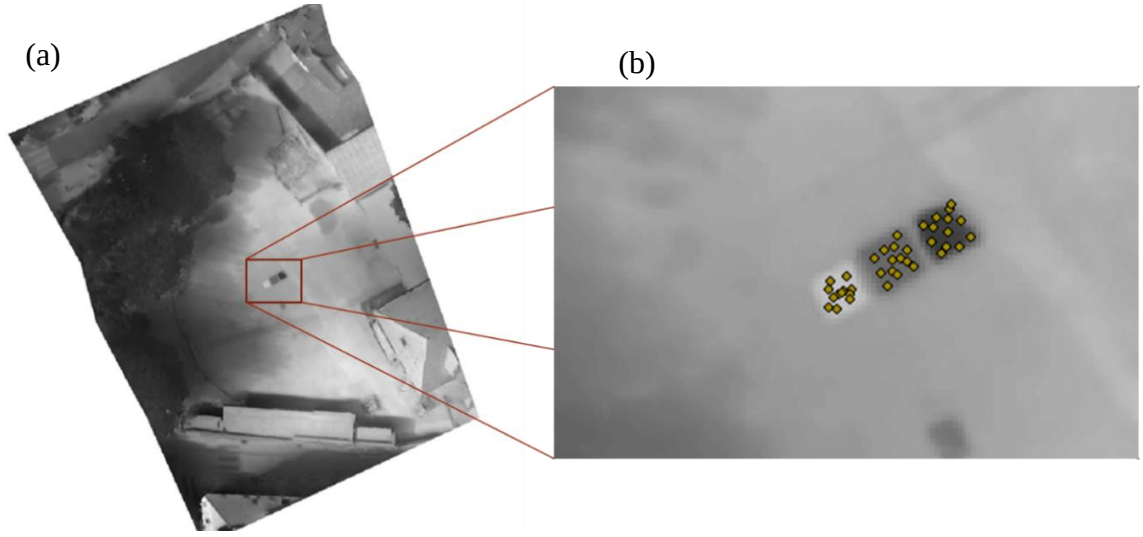


Figure 118 : Echantillonnage ponctuel sur les cibles de la signature numérique (cas de la cour Saint-Eucaire).

Les graphiques des figures 119 et 120 montrent que les droites de régression s'ajustent très bien entre les trois cibles. Ainsi, l'équation d'étalonnage de chaque mission de vol a été utilisée pour convertir les CN en température absolue. Ce géotraitement a été réalisé dans l'environnement du logiciel *ArcGIS Pro* grâce à l'outil « *calculatrice raster* ».

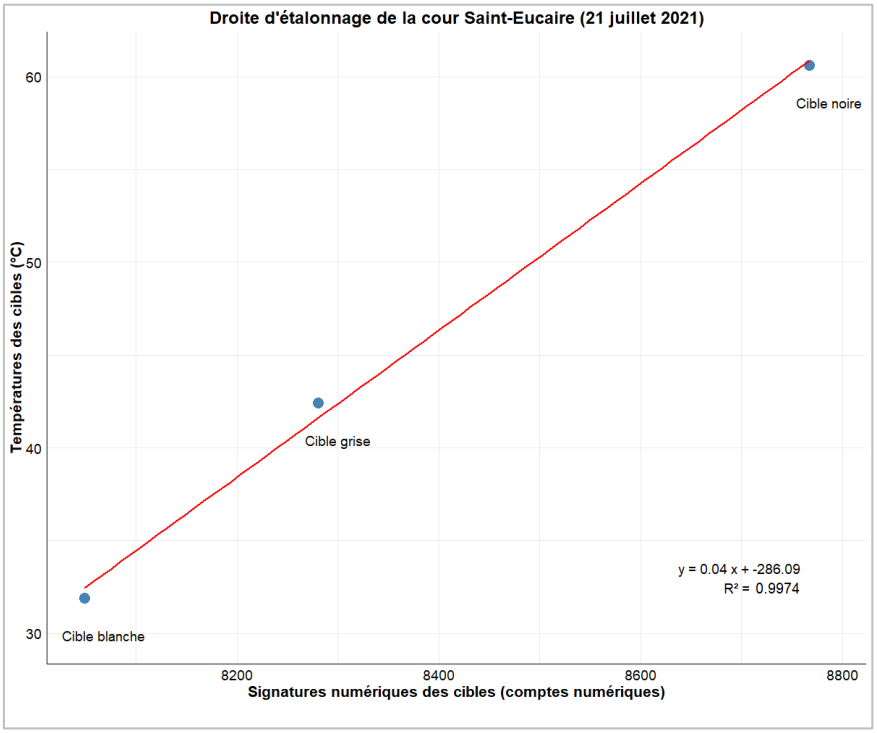


Figure 119 : Relation entre CN et Ts au niveau des trois cibles thermiques pour la cour Saint-Eucaire.

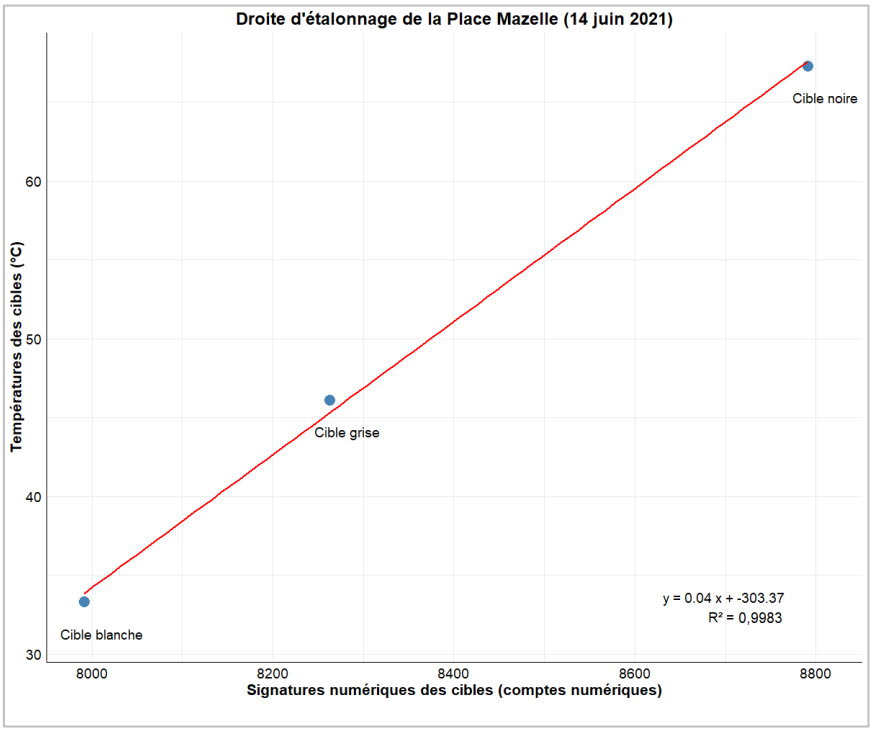


Figure 120 : Relation entre CN et Ts au niveau des trois cibles thermiques pour la place Mazelle.

5.5.3.2. Le cas du parking route de Thionville

Le même processus d'étalonnage appliqué à la cour Saint-Eucaire et à la place Mazelle a été appliqué aux orthomosaïques avant et après travaux du parking de la route de Thionville pour convertir les CN en Ts. La figure 121 met en évidence la relation entre les données de températures des cibles et les CN pour les deux missions de vol et relève que les deux équations d'étalonnage présentent une allure linéaire et une certaine affinité en dépit du changement de revêtement effectué (***cf.* c)**. Ceci montre que la calibration est assez peu affectée par ce changement. Ces équations sont ensuite utilisées pour calculer la valeur de température de surface de la scène grâce à l'outil « *calculatrice raster* » du logiciel *ArcGIS* en convertissant les CN en température absolue.

Il est à noter que l'une des sondes de la cible noire a chauffé pendant la mission de la phase après réaménagement (**Annexe 29**). Étant donné que l'équation d'étalonnage utilisée est basée sur la moyenne des températures des deux sondes, l'auto-échauffement de cette sonde aurait pu entraîner des valeurs de température systématiquement supérieures de plusieurs degrés à celles obtenues avec une caméra radiométrique.

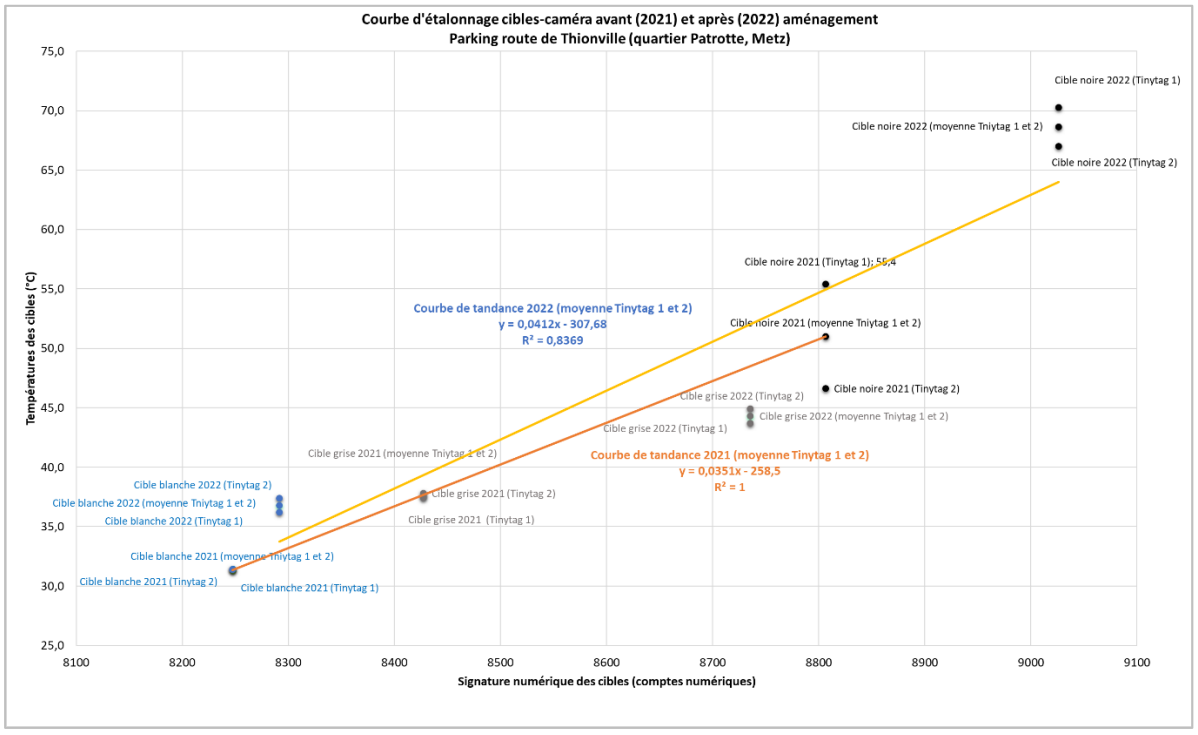


Figure 121 : Relation entre CN et Ts au niveau des trois cibles thermiques pour chacune des deux missions au parking de la route de Thionville.

5.5.3.3. Synthèse méthodologique

Toutes les étapes suivies pour produire des thermographies de surface à l'aide d'une caméra IRT embarquée sur drone sont détaillées sur la figure 122.

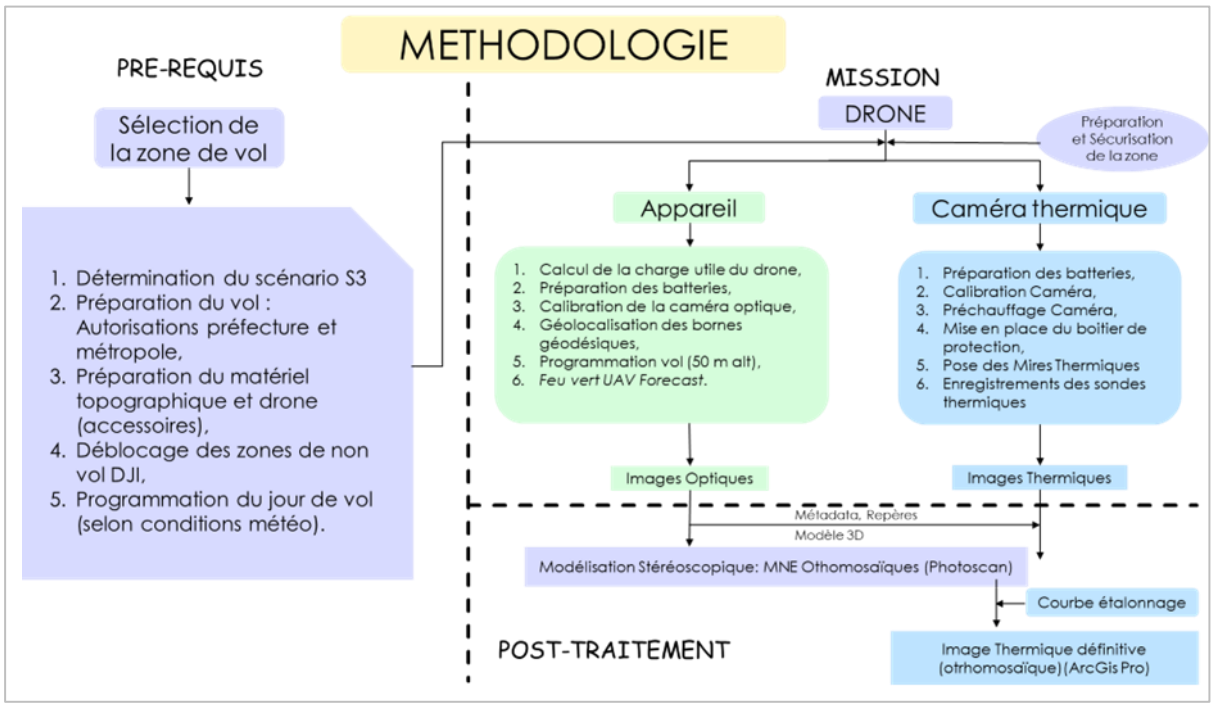


Figure 122 : Méthodologie suivie pour produire les images IRT (source : télépilote Luc Manceau).

5.6. Analyse des thermographies

Les thermographies obtenues sont juxtaposées aux orthomosaïques optiques de chaque site étudié dans le but de détecter les surfaces accumulatrices de chaleur et les zones de relative fraîcheur (**Figure 123** , **Figure 125** et **Figure 127**).

5.6.1. La place Mazelle

La place Mazelle telle qu'observée sur la thermographie aéroportée (**Figure 123**) se présente sous la forme d'une étendue triangulaire aux Ts moyennes ponctuée d'îlots frais et ceinturée par une épaisse bande aux Ts très élevées. Ainsi, le premier constat est que la place Mazelle *stricto sensu*, composée d'un mélange de surfaces imperméables, d'eau et de végétation, présente des Ts allant de faibles à modérées, nettement inférieures à celles de la voie de circulation environnante. Les zones arborées et les points d'eau affichent les Ts les plus basses (22 - 40 °C).

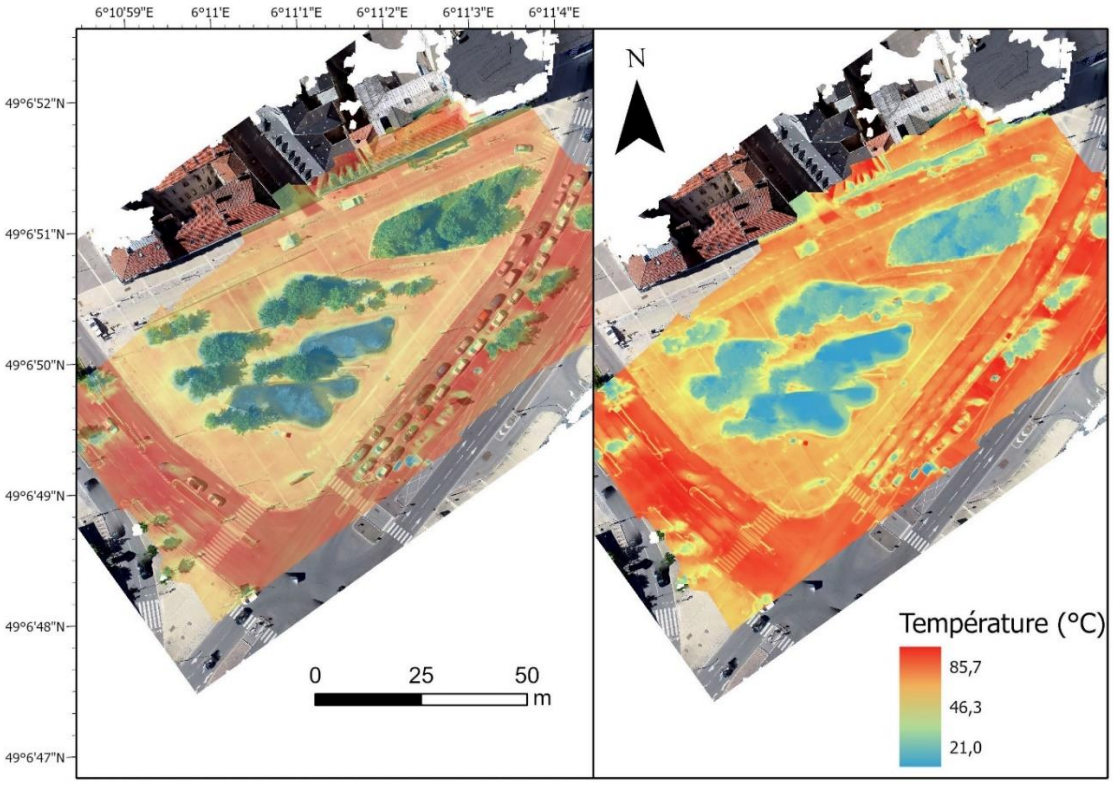


Figure 123 : Thermographies de la place Mazelle superposées sur l'orthomosaïque optique (14 juin 2021 à 16h50).

Les boîtes à moustache confirment ce constat puisqu'elles mettent en évidence le fait que les Ts des surfaces imperméables de la place sont moins élevées que celles des voies environnantes. Ce contraste est le résultat du choix qui a été fait d'appliquer des couleurs claires aux revêtements de la place. Du fait de leur albédo plus élevé, ces surfaces absorbent moins la chaleur que les voies de circulation asphaltées environnantes.

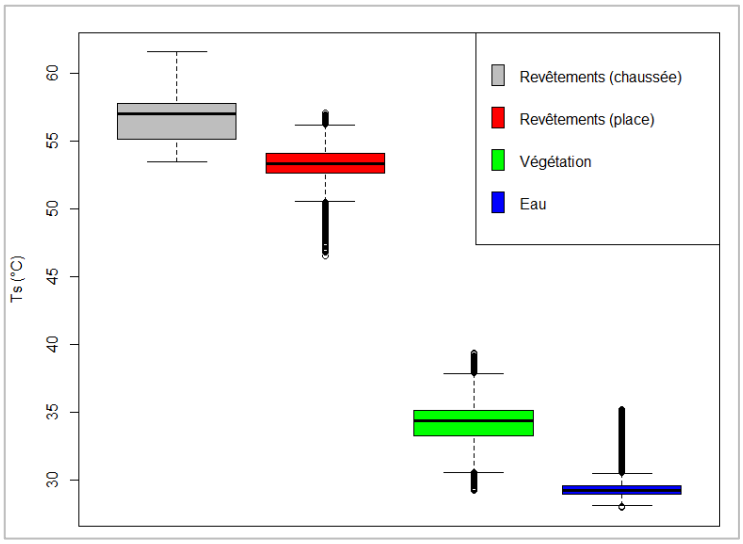


Figure 124 : Boîtes à moustaches des Ts par état de surface sur la place Mazelle.

Par ailleurs, on peut également relever que les Ts les plus basses sont localisées sur les surfaces en eau plutôt que sur les zones végétalisées (**Figure 124**). Cette observation corrobore les résultats obtenus à partir des images issues de la télédétection satellitaire et des données de température de l'air, indiquant que la végétation a un pouvoir rafraîchissant important pendant la nuit, alors que dans le cas de l'eau, l'effet rafraîchissant se manifeste davantage en journée grâce à la convection (Hassani et Drogue, 2020).

Ce résultat met en évidence l'influence des différents facteurs environnementaux sur la distribution des températures, et souligne l'importance de prendre en compte la couleur des matériaux dans l'aménagement urbain pour réduire les îlots de chaleur. Ainsi, pour améliorer le confort thermique en ville, une stratégie d'aménagement efficace doit savoir combiner l'effet réfléchissant de l'eau et de la végétation avec des surfaces imperméables à albédo élevé.

5.6.2. La cour de l'école Saint-Eucaire

La thermographie issue du survol de la cour de l'école Saint-Eucaire révèle une nette division sur un axe est/ouest entre une zone aux Ts très élevées contrastant avec une zone beaucoup plus fraîche. La partie ouest de la cour, constituée d'un espace arboré et ombragé présente des Ts inférieures à 20 °C, tandis que la partie est, constituée de pans de toitures et d'étendues imperméables, affiche des Ts dépassant les 45 °C et atteignant même les 70 °C dans les zones les plus sombres et les plus exposées au soleil.

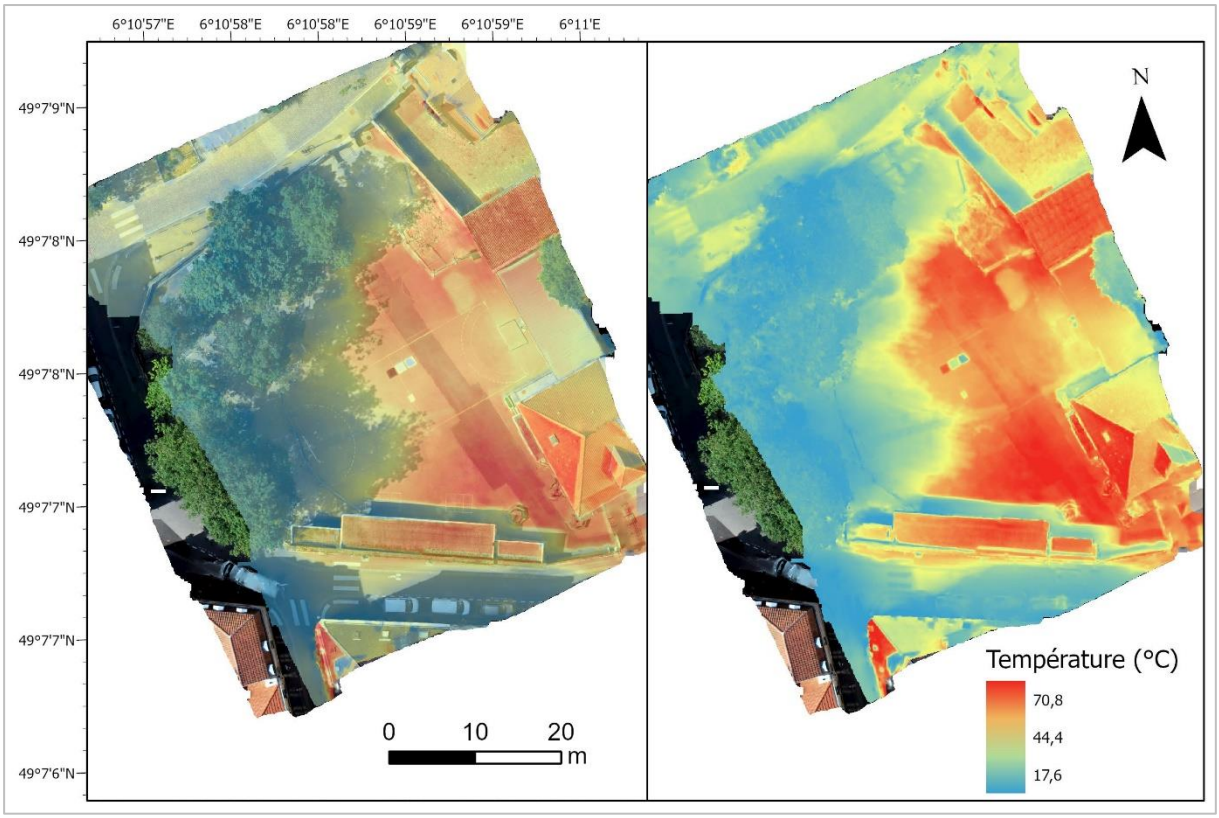


Figure 125 : Thermographies de la cour Saint-Eucaire superposées sur l'orthomosaïque optique (21 juillet 2021 à 16h40).

L'histogramme de la figure 126 met en évidence la répartition des Ts au sein de la cour en fonction des températures relevées. On peut remarquer que la fourchette de Ts comprises entre 25 et 35 °C est celle qui domine sur le site étudié.

Ce résultat montre que, dans cet espace principalement fréquenté en journée par un public vulnérable, la végétation, en particulier la végétation haute, offre un service climatique non négligeable. Plus que l'évapotranspiration, ce sont avant tout les ombres projetées qui assurent

l’essentiel du rafraîchissement diurne. Néanmoins, d’autres paramètres peuvent affecter le ressenti thermique des enfants et du personnel de l’école tels que le vent et l’humidité. Par conséquent, les mesures effectuées par le Cerema seront utiles pour renforcer l’interprétations de cette thermographie. De surcroît, l’étude en phase après travaux fournira des informations complémentaires sur l'efficacité des nouveaux aménagements en termes de confort thermique. Ces données ne sont pas traitées dans cette thèse pour les raisons expliquées dans la **partie 5.4.1.2**.

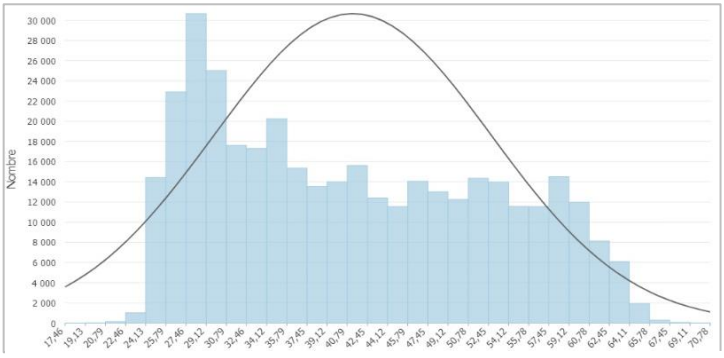


Figure 126 : Histogramme des Ts de la cour Saint-Eucaire.

5.6.3. Le parking route de Thionville avant et après réaménagement

La figure 127 représente les orthomosaïques thermiques du parking avant et après réaménagement (Hassani *et al.*, 2023a). L’orthomosaïque thermique a et b (avant travaux) met en évidence des Ts très élevées sur toute l'étendue du parking, surtout dans les zones asphaltées. Seules les zones arborées et ombragées affichent des Ts modérées (22 - 30 °C). En revanche, sur l'orthomosaïque thermique c et d (après travaux), les Ts apparaissent plus hétérogènes. En particulier, une organisation en « bandes » est mise en évidence en fonction de la couleur et des matériaux constitutifs des surfaces.

Pour limiter l’effet induit par le changement de conditions météorologiques entre les deux survols nous avons calculé les écarts de température entre le parking et la rue de Méric (partie de la scène non modifiée par les travaux et servant de référence commune). Ainsi, la figure 128 représente les profils thermiques des transects tracés sur la figure 127. La rue est plus chaude d’environ 1 °C le 17 juin 2022 par rapport au 21 juillet 2021 ce qui est cohérent avec les conditions météorologiques même si l’on aurait pu s’attendre à un écart plus important.

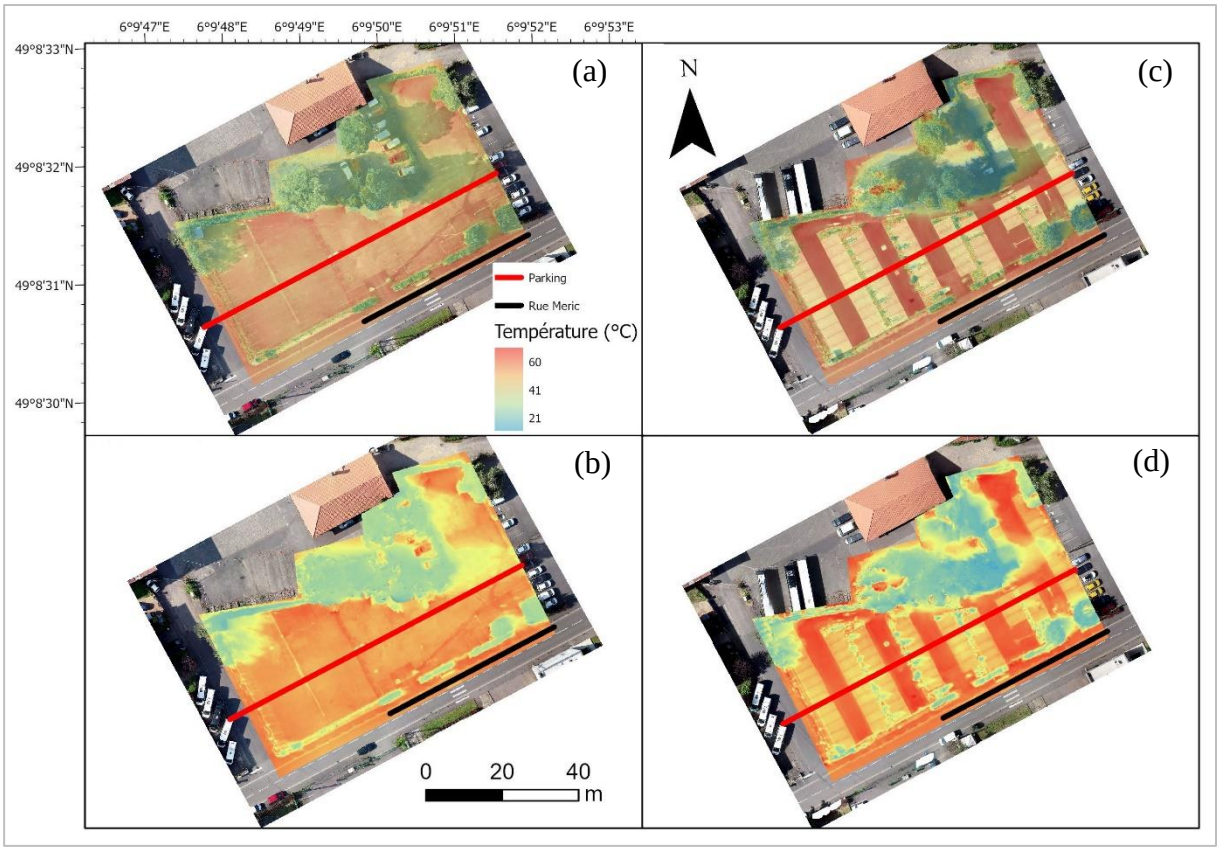


Figure 127 : A gauche (a et b), l'orthomosaïque IR superposée sur l'orthomosaïque optique lors de la phase avant travaux (23 juillet 2021 à 17h30) : à droite (c et d), l'ortho-mosaïque IR superposée sur l'ortho-mosaïque optique lors de la phase après travaux (17 juin 2022 à 16h40).

Dans le parking, les Ts avant travaux sont relativement stables sur l'ensemble du transect avec un écart de -2 à -5 °C par rapport à la rue de Méric. À l'inverse, après travaux, on constate des fluctuations importantes : les Ts relevées au niveau des surfaces pavées et des alignements d'arbres sont les plus basses (22 et 38 °C, soit un écart de -15 °C par rapport à la rue), tandis que les Ts restent très élevées dans les espaces asphaltés, avec parfois des valeurs plus élevées dans la thermographie d'après travaux du fait notamment d'un asphalte neuf plus sombre.

Cette variation des Ts est d'abord liée à la mise en place de surfaces poreuses et claires (**Figure 128**). La diminution des Ts constatée sur la thermographie après travaux est également liée aux alignements d'arbres présents entre les rangées de places de stationnement (effet d'ombrage). Mais il s'agit encore d'individus jeunes, souffrant de stress hydrique au moment de la prise de vue et qui n'ont donc pas atteint leur plein potentiel en termes d'effet « climatisant » (Hassani *et al.*, 2023a).

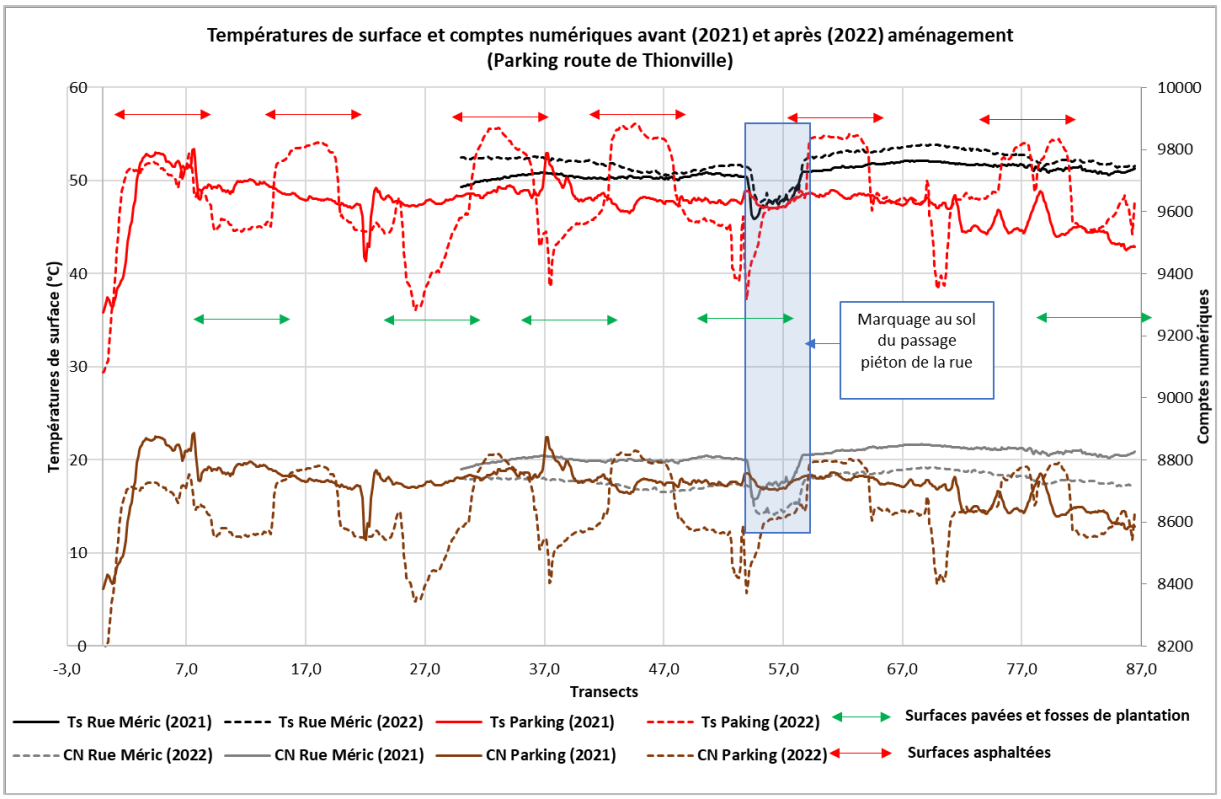


Figure 128 : Profils de TS et de CN avant et après réaménagement des transects au niveau du parking et de la rue adjacente (rue de Méric) (Hassani *et al.*, 2023a).

Synthèse

Ce chapitre a présenté l'étude que nous avons conduite au cours de journées radiatives estivales sur trois sites de l'agglomération messine ayant fait l'objet d'une réhabilitation urbaine récente. En utilisant une caméra IRT *low cost* embarquée sur un drone de loisir, nous avons pu acquérir plusieurs thermographies en valeurs relatives, mais de bonne qualité. À des fins d'analyse inter-dates et inter-sites nécessitant des valeurs absolues de Ts, ces valeurs relatives ont ensuite fait l'objet d'un étalonnage par régression linéaire sur la base de données thermiques obtenues sur trois cibles stables implantées sur chaque site (une cible froide, une cible chaude, une cible intermédiaire). Les valeurs de Ts absolues ainsi calculées ont permis de poursuivre notre objectif d'évaluer l'impact des opérations d'aménagement sur la distribution des températures de surface et, par extension, sur les ambiances microclimatiques de ces sites.

Mis à part dans le cas de l'école Saint-Eucaire dans laquelle l'acquisition des données après aménagement n'a pas pu être réalisée à cause du report des travaux, nous avons pu constater un bénéfice thermique notable puisque, grâce aux nouveaux aménagements, les Ts sont *a priori* beaucoup plus hétérogènes. En particulier, au niveau du parking de la route de Thionville où nous avons pu établir une étude diachronique, nous constatons que les Ts baissent, par endroit, de 10 °C par rapport à celles observées dans la thermographie décrivant l'état initial. Outre les changements d'état de surface, les écarts observés entre les deux dates sont à mettre en relation avec les différences d'énergie radiative incidente et de température de l'air. Ces observations sont cohérentes avec celles de Naughton et McDonald (2019) par exemple. Ces résultats démontrent qu'une stratégie d'aménagement efficace sur le plan environnemental passe nécessairement par la conjugaison de la végétation et des surfaces en eaux avec des matériaux poreux et des revêtements à albédo élevé.

Enfin, en termes de méthodologie, le protocole de correction radiométrique suivi semble efficace et restitue des gradients thermiques cohérents sur les orthomosaïques thermiques. Notre chaîne d'acquisition des Ts comporte néanmoins plusieurs faiblesses qui en limitent la portée opérationnelle et incitent à la prudence quant à la précision de nos résultats. Par exemple, dans la mission post-aménagement du parking, des tests d'intercomparaison avec une caméra radiométrique ***Flir A655sc*** ont montré qu'il y avait un auto-échauffement des sondes *Tinytag* et que la méthode de calibration linéaire adoptée dans notre protocole était susceptible d'entraîner des valeurs de Ts systématiquement supérieures de plusieurs degrés à celles que l'on aurait obtenues avec une caméra radiométrique[38]. Pour ce qui est de la caméra utilisée, le fabriquant estime sa sensibilité thermique à ±5 °C puisque les microbolomètres la composant ne sont pas refroidis (Kelly et al., 2019). Malgré le respect des bonnes pratiques d'utilisation, cette incertitude est irréductible. La non prise en compte de l'émissivité des matériaux présents dans la scène ajoute aussi de l'incertitude dans l'estimation des Ts. Par ailleurs, en dépit de l'attention portée sur le fait d'intervenir dans des conditions météorologiques stables et

[38] Dans ce cas (caméra FLIR Vue Pro R par exemple) la relation entre CN et Ts est une approximation de la loi de Planck.

similaires, de légères variations peuvent compliquer l'interprétation des mesures avant/après aménagement.

Nonobstant ces limites, notre étude de la variabilité des Ts à l'aide de la télédétection par drone nous semble concluante. Cette approche nous apparaît être, en climatologie urbaine, un bon complément à la télédétection satellitaire dans la mesure où cette technologie s'applique préférentiellement aux échelles fines (de la rue à l'îlot urbain) du fait de sa résolution spatiale plus précise. Notre association avec le Cerema apparaît ainsi d'autant plus prometteuse avec en perspective le perfectionnement et la validation du protocole d'étalonnage radiométrique. Au final, les données en 3D produites ici fournissement des informations précieuses sur la morphologie urbaine des sites étudiés. Elles pourraient être utilisées comme données d'entrée pour de la modélisation numérique. Notons pour finir que ces mesures n'ont pas été répliquées sur le territoire du GC pour des raisons de non-faisabilité.

Chapitre 6 : L'îlot de chaleur nocturne à l'échelle de l'agglomération

Bien que la télédétection satellitaire offre des résultats intéressants pour l'étude de la surchauffe urbaine, elle présente plusieurs limites irréductibles. D'une part, l'échelle spatiale ne correspond pas souvent aux dimensions des villes moyennes ou petites, qui dépendent entièrement du nombre de pixels couvrant la zone urbaine. L'hétérogénéité de leurs différents espaces urbains est relativement floue. De plus, cette méthode se concentre sur la température de surface des matériaux et non sur celle de l'air. Or, c'est la température de l'air dans la canopée urbaine qui exerce une influence immédiate sur le ressenti et le confort thermique extérieur des citadins notamment la nuit (van Hove *et al.*, 2015) -même si « la surface du sol pilote en grande partie la température de l'air en l'absence d'advection » (Kastendeuch, 2022). Enfin, le manque d'informations continues dans le temps avec des temps de retour et des images plus ou moins espacées, ainsi que le manque de données sur le cycle quotidien et saisonnier, constituent une réelle insuffisance. Il y a alors besoin de disposer de points de mesure pouvant récolter des données au sujet de la température de l'air afin de documenter l'ICU.

Pour cette raison, nous avons procédé, dans le cadre de cette recherche visant à dresser un diagnostic climatologique de l'ICU sur nos territoires, à l'installation sur notre terrain-pivot (EMM) d'un réseau de stations de mesures opérationnelles. L'objectif est de quantifier l'ICU de l'agglomération de Metz et d'analyser sa variabilité spatio-temporelle. C'est ce que nous proposons d'expliciter dans ce chapitre (voir aussi Hassani et Drogue, 2020). Là encore, la transposition de l'expérimentation sur notre terrain-miroir du GC n'a pas été possible pour des raisons techniques et financières. Nous présentons dans un premier temps le protocole suivi pour la mise en place du réseau de mesure thermo-hygrométrique de l'agglomération de Metz (REMTHAM). Les critères utilisés pour définir les emplacements sont détaillés. Ensuite, sur la base des données recueillies par ce réseau, nous nous intéresserons à la dynamique journalière, saisonnière et à l'intensité de l'ICU messin. Enfin, une modélisation statistique multicritère est appliquée pour cartographier et réaliser une analyse spatiale du phénomène de l'îlot de chaleur nocturne.

6.1. L'observation de la température de l'air dans la canopée urbaine 181

6.2. Spatialisation et cartographie de l'ICU à l'aide de mesures fixes 187

6.3. Mise en place du réseau REMTHAM..... 187

6.4. Traitements et analyse des données 195

Synthèse 220

6.1. L'observation de la température de l'air dans la canopée urbaine

Il est d'usage de citer Luke Howard comme le « découvreur » de l'ICU. A partir d'une série de relevés météorologiques sur une période de neuf ans, le pharmacien britannique constate que la ville de Londres présente des températures plus chaudes que la campagne environnante. Il mesure un gradient thermique nocturne de 2,1 °C entre le centre de Londres et sa périphérie qu'il attribue alors à la concentration de *smog* en ville (Howard, 1818). Par cette méthode, il découvre les principales caractéristiques de l'ICU, bien qu'il n'en décèle pas à l'époque, l'intégralité des causes. Aujourd'hui encore, l'étude des températures de l'air passe le plus souvent par le traitement de données de terrain inédites, issues d'expérimentations en milieu urbain. La récolte des données peut alors prendre plusieurs formes, des relevés de terrains classiques, jusqu'aux méthodes plus originales de *crowdsourcing* qui font appel au grand public dans la mesure des température de l'air grâce aux mini-stations individuelles ou encore, aux véhicules connectés (Madelin et Dupuis, 2020 ; Marques, 2023).

Néanmoins, nous nous bornerons dans ce chapitre, aux relevés des températures de l'air provenant des stations météorologiques, méthode la plus couramment utilisée pour détecter l'occurrence et le profil de l'ICU.

6.1.1. Les réseaux de stations météorologiques urbaines

L'approche *in situ* pour l'observation de l'ICU de la canopée urbaine présente de nombreux avantages pour la recherche, puisqu'elle permet une mesure directe, précise et instantanée des grandeurs physiques telles que la température de l'air, l'hygrométrie, la vitesse et la direction du vent ainsi que de plusieurs des flux présents dans l'équation énergétique de la surface urbaine (Grimmond *et al.*, 2010 ; Leconte, 2014). Cette approche nécessite l'exploitation de réseaux de mesures (permanents ou temporaires), ce qui n'est pas sans poser des difficultés.

En premier lieu, les réseaux météorologiques appartenant aux organismes publics tels que Météo-France ne couvrent que rarement le milieu urbain. Si elles existent, les stations urbaines sont parfois trop récentes ou mal situées (aéroport), leurs données sont bien souvent incomplètes ou ne couvrant qu'une courte période de temps (Kastendeuch, 2022). Or, pour révéler l'intensité, la distribution spatiale et la dynamique temporelle de l'ICU, il est nécessaire de disposer d'une profondeur historique suffisante. De plus, le milieu urbain présente une hétérogénéité élevée, ce qui oblige à disposer d'une couverture spatiale relativement dense. Pour pallier ces insuffisances, il est indispensable d'étoffer les réseaux d'observation existants ou d'en créer de nouveaux.

Cela est devenu possible depuis les années 2000 avec les progrès technologiques réalisés en matière de capteurs (miniaturisation, gamme plus large de types de capteurs), des canaux de transmission des données, et l'arrivée sur le marché de stations météorologiques à prix abordable, voire *low cost*. Cela a permis aux équipes de recherche et aux collectivités publiques de s'équiper de réseaux d'observation denses pour mesurer la température et conduire des observations sur des échelles spatiales beaucoup plus fines, sur une gamme d'échelles temporelles plus large qu'auparavant (Muller *et al.*, 2013a). De nombreuses campagnes de

mesures fixes ont alors vu le jour (**Tableau 27**). C'est le cas par exemple à Dijon ou à Rennes (Foissard, 2015 ; Richard *et al.*, 2018 ; Dubreuil et Brabant, 2023), à Marseille (Mestayer *et al.*, 2005), ou Toulouse (Masson *et al.*, 2008), mais aussi à Minneapolis (Etats-Unis) (Smoliak *et al.*, 2015), à Birmingham (Royaume-Uni) (Chapman *et al.*, 2015 ; Warren *et al.*, 2016), à Szeged (Hongrie) (Skarbit *et al.*, 2017), dans les villes de la région polaire arctique (Konstantinov *et al.*, 2018), à Tainan (Taïwan) (Chen *et al.*, 2018) ou à Bâle (Suisse) (Rotach *et al.*, 2004). Du point de vue institutionnel, on notera qu'en France, ces réseaux commencent à se structurer et à être reconnus nationalement (voir le SNO Observil dédié à l'observation des environnements urbains et labellisé par le CNRS et la communauté scientifique des climats urbains qui se structure en Groupes de travail thématiques). A l'échelle européenne, l'action COST FAIRNESS en cours (2021-2025) vise à créer un réseau de réseaux et une plateforme de partage de connaissances sur les micro-climats (https://www.fairness-ca20108.eu/).

Tableau 27 : Exemples de réseaux d'observation urbains déployés depuis le début des années 2000 en Europe et aux Etats-Unis.

Nom	Ville	Période	Taille du réseau	Types de stations/capteurs	Publications
Basle Urban Boundary Layer Experiment (BUBBLE)	Bâle (Suisse)	2001	15	Vaisala WXT520, HMP45C-L Thygan VTP37	(Wicki *et al.*, 2018)
CAPITOUL	Toulouse (France)	2004-2005	21	Hilomast NX30 et PT1000 Ohm	(Hidalgo *et al.*, 2008)
Rennes Urban Network (RUN)	Rennes (France)	2004-présent	127	Davis Weather Monitor II, Vantage Pro 2 et RisongHF/LoRa Wan	(Dubreuil *et al.*, 2020, 2022)
The Oklahoma City Micronet (OKCNET)	Oklahoma (USA)	2008-présent	36	Vaisala WXT520	(Basara *et al.*, 2011)
Urban Meteorological Network (UMN)	Minneapolis - Saint Paul (USA)	2011-présent	170	HOBO Pro V2	(Smoliak *et al.*, 2015)
Birmingham Urban Climate Laboratory (BUCL)	Birmingham (Royaume-Uni)	2012	25	Vaisala WXT520	(Bassett *et al.*, 2016)
/	Szeged (Hongrie)	2014-2018	24	Sensirion SHT25	(Skarbit *et al.*, 2018)
MUSTARDijon	Dijon (France)	2014-présent	67	HOBO Pro V2 et HOBO RX2102	(Richard *et al.*, 2021b ; Marquès *et al.*, 2022)
/	Toulouse (France)	2019-présent	78	Davis Vantage Pro 2	(Dumas, 2021)
ASTI-Network	Rome (Italie)	2019-présent	34	Davis Vantage Pro 2	(Cecilia *et al.*, 2023)
/	Grenoble (France)	2020-présent	69	Davis Vantage Pro 2 et Tinytag TK-4014	(Foissard *et al.*, 2022 ; Rome *et al.*, 2023)

Outre le nombre de capteurs installés, la disposition physique des capteurs affecte significativement la qualité des observations. Le réseau lui-même peut être déployé sous diverses formes ou stratégies d'échantillonnage (Robinson, 2010 ; Muller *et al.*, 2013b ; Dumas, 2021). Les principales approches en matière de conception de réseaux incluent (**Figure 129**) :

• Les réseaux de type systématique dans lesquels un point d'observation est implanté dans chaque carré d'une grille prédéfinie. Ces réseaux peuvent être intéressants pour les villes ayant de grandes zones urbaines identiques, comme c'est le cas dans certaines aires urbaines en Amérique du Nord ou dans des villes récemment créées, mais ils ne sont pas pertinents s'il existe une forte variabilité des formes urbaines.

• Les réseaux de type radial correspondent à une forme d'étoile avec des échantillons le long des transects de chaque branche de l'étoile. De tels réseaux sont utiles pour déterminer le gradient de température d'une ville à partir du centre-ville et s'étendant jusqu'aux zones périphériques. Cependant, le caractère arbitraire de la démarche laisse des « trous » dans les espaces observés.

• Les réseaux de type aléatoire ou semi-aléatoire avec des échantillons aléatoires, peuvent exister lorsque les sites à surveiller sont imposés (n'implanter que certains types de lieux tels que les cours d'école par exemple). Ici, tout dépend du nombre de sites pouvant être équipés et de leur densité spatiale. Par exemple, s'il y a un effectif de 10 stations à déployer et qu'elles ne peuvent être placées que dans les 10 écoles de la ville, le réseau est entièrement aléatoire, tandis que s'il y a 5 stations pour 15 écoles, alors le réseau est semi-aléatoire.

• Les réseaux de types politiques sont ceux dans lesquels les frontières politiques ont un impact sur les positions de l'échantillon. Par exemple, une station est positionnée sur chaque commune d'une collectivité, ou dans chaque quartier d'une ville.

• Les réseaux de type gradient/transect ont des échantillons à différentes densités ou le long de lignes. Ici, chaque emplacement correspond à un choix spécifique, souvent thématisé. De tels réseaux peuvent par exemple, suivre un cours d'eau ou une succession de zones industrielles ou résidentielles de plus en plus denses. Le principe porté par cette approche est de ne pas délaisser de territoires et de rendre compte de toutes les spécificités notables. Cette approche sous-entend une connaissance poussée du territoire étudié (Dumas, 2021).

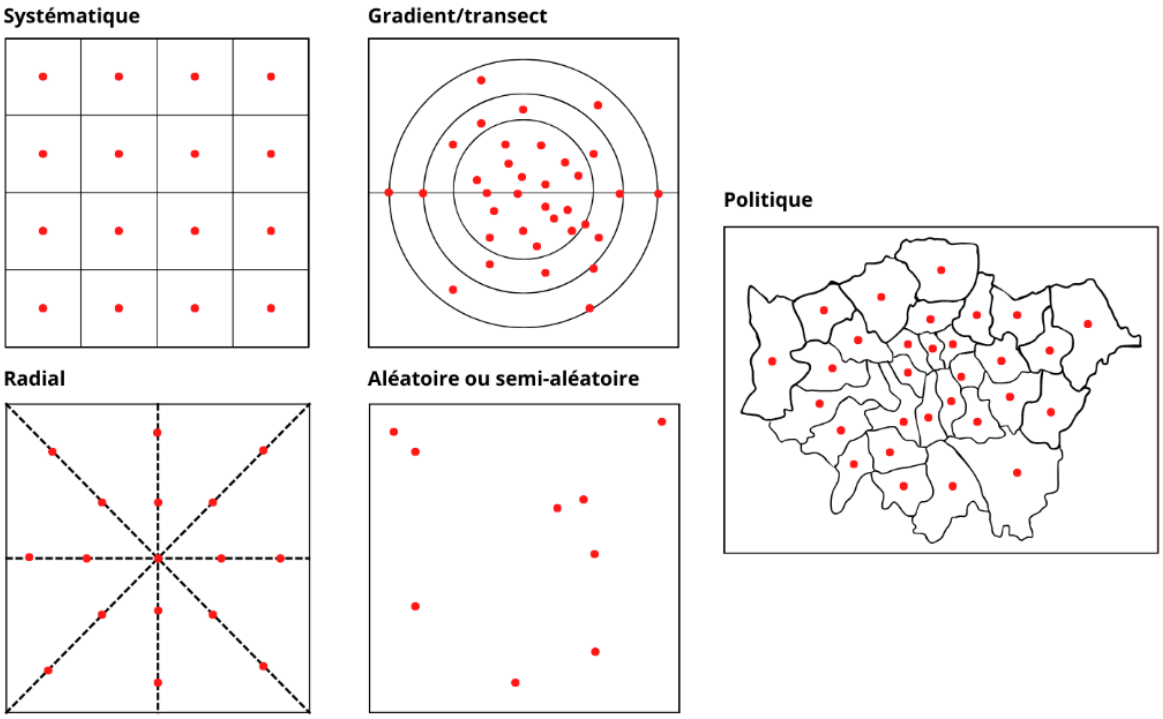


Figure 129 : Principales approches adoptées pour la conception de réseaux de mesure (adapté de Robinson, 2010).

6.1.2. Les campagnes de mesure fixes

De nombreuses études, au cours de la dernière décennie, ont proposé une analyse de l'ICU à l'aide de réseaux de capteurs de température de l'air. En général, l'intensité de l'ICU est établie sur la base de la différence entre les températures enregistrées dans les zones urbaines et une ou plusieurs valeurs de référence rurales. À cette fin, les relevés des températures minimales et maximales diurnes et nocturnes sont surveillés et comparés à des moments spécifiques de la journée sur une période déterminée (jour, mois ou saison). Les relevés sont ensuite comparés à l'historique des températures et à leurs tendances pour identifier des schémas climatiques inhabituels et tout impact associé à l'ICU (Dubreuil et Brabant, 2023).

Par exemple, l'étude menée par Foissard *et al.* (2022) à Grenoble a relevé un ICU de +4,2°C d'intensité moyenne au cours de 44 nuits d'observation. À Thessalonique, en Grèce, Giannaros et Melas (2012) ont relevé un ICU de +3 °C pendant la moitié chaude de l'année. Une analyse similaire a été réalisée à Hong Kong sur une période de 4 ans de mesure par Siu et Hart, (2013), relevant un ICU moyen d'environ +2,5 °C. De même, Hardin *et al.* (2018) ont entrepris une étude de l'ICU dans quatre villes américaines (Boston, Baltimore, Philadelphie et New York) couvrant la période de 2006 à 2013. Ils ont analysé l'ICU en fonction des conditions météorologiques et des types de temps et ont constaté des valeurs moyennes d'environ +2,5 °C par temps sec, à l'exception de la ville de New York, où l'ICU a atteint une valeur de +3,5 °C. Certaines de ces campagnes ne se focalisent d'ailleurs pas uniquement sur la température de l'air dans la canopée urbaine. Elles peuvent également traiter d'autres problématiques comme celle de la pollution atmosphérique (Mestayer *et al.*, 2005 ; Masson *et al.*, 2008 ; Salamanca *et al.*, 2012).

Néanmoins, bien que les études sur le climat urbain se soient considérablement améliorées, la fourniture de données atmosphériques provenant de réseaux d'observation à haute résolution spatiale et sur de longues périodes de temps reste un défi de recherche en raison de la difficulté de maintenir des réseaux étendus au fil du temps et de la diversité des environnements urbains qui conditionnent les mesures. L'étude de l'îlot de chaleur par l'expérimentation de terrain atteint ainsi très vite ses limites, étant donné qu'il est impossible d'installer des capteurs partout en ville. L'acquisition et l'entretien du matériel, en plus d'être très onéreuse, et très chronophage (préparation, installation, suivi), et requiert un savoir-faire important. Ces limites font qu'il est souvent nécessaire de compléter les mesures réalisées par d'autres méthodes d'observation.

6.1.3. Guides et recommandations d'installation d'un réseau de mesure

La qualité des mesures de l'amplitude de l'ICU est directement affectée par le protocole de mesure suivi. Or, il semble qu'une part importante des études publiées présente des défauts méthodologiques importants, mettant en question la fiabilité de leurs résultats. I. D. Stewart, dans sa revue systématique de la littérature (Stewart, 2011a), a examiné la qualité méthodologique de 190 études publiées entre 1990 et 2007 s'intéressant à l'ICU en s'appuyant sur neuf critères expérimentaux objectifs. Il rapporte que la moitié des études examinées présente des défauts méthodologiques. Parmi les faiblesses courantes, il relève une mauvaise sélection des sites (défaut de représentativité), l'absence de métadonnées, ou encore une taille d'échantillon trop faible (**Figure 130**).

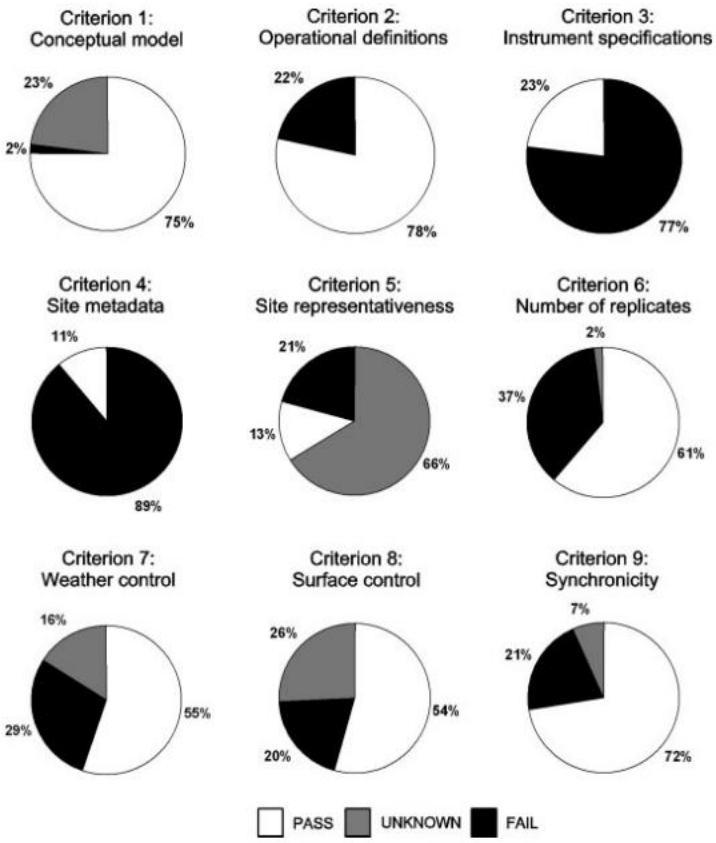


Figure 130 : Répartition des études analysées par I. D. Stewart selon neuf critères de qualité méthodologique (Stewart, 2011a).

Une bonne partie de ces défaillances pourrait être évitée en portant une attention particulière au contexte urbain, c'est-à-dire aux différentes échelles (verticales et horizontales) constituant le milieu urbain (Foissard, 2015 ; Oke *et al.*, 2017). A cette fin, Aguilar *et al.* (2003) et Oke (2004) ont publié des recommandations comprenant des modèles descriptifs pour rendre compte des paramètres micro-locaux et méso-échelle des mesures de température dans les environnements urbains et ruraux. Selon Stewart (2011), les informations contenues dans ces modèles sont essentielles à toute étude sur les îlots de chaleur, ainsi qu'à l'interprétation et à la comparaison correctes de l'ampleur des ICU rapportés. Par exemple, l'emplacement des stations météorologiques est soigneusement réglementé afin de minimiser l'impact des caractéristiques spécifiques au site telles que les pentes, les bâtiments ou la végétation à proximité (OMM, 2018). Cette procédure vise à réduire les impacts non-climatiques ainsi qu'à représenter le climat régional plutôt que celui spécifique au site.

Sur la base de ces recommandations, le choix du site d'installation d'une station en ville doit être le fruit d'un compromis entre le site idéal pour la mesure et l'emplacement pratique (Foissard, 2015). Le principe directeur en est que le capteur doit être disposé de manière à être représentatif de l'ambiance thermique rencontrée au niveau micro-local (OMM, 2018). Les principaux points d'attention comprennent :

- La hauteur du capteur au-dessus du sol : Oke, (2006) mentionne dans son guide de l'OMM que lorsqu'un capteur est installé à 3 m du sol, l'aire d'influence sur un détecteur de température ou d'humidité est généralement égal à environ 500 m de rayon, mais cela dépend sans doute de la densité du bâti. L'installation à cette hauteur permettrait également de protéger les capteurs du vandalisme.

- L'effet de masque des bâtiments et des arbres : les capteurs doivent être installés à bonne distance des obstacles tels que les bâtiments, les murs et les arbres, afin d'éviter l'effet de masque qui engendre une augmentation des écarts de températures par l'insolation moins importante localement. Il est alors recommandé de choisir des espaces relativement ouverts, présentant un rapport d'aspect représentatif de la zone. Cela signifie que, pour une zone densément bâtie, le capteur sera situé à 5 ou 10 m de bâtiments de 20 à 30 m de hauteur. En termes d'exposition, il est préférable de choisir des rues orientées selon un axe nord-sud plutôt qu'un axe est-ouest afin de réduire la distorsion quotidienne du signal thermique en début et en fin de jour.

  Les types de surfaces : Il convient de veiller à ce que les effets microclimatiques induits par les surfaces ne viennent pas fausser les résultats des mesures à l'échelle locale. Pour cela, il est recommandé d'éviter d'installer les capteurs sur les toits des bâtiments, car ils sont souvent constitués de matériaux tels que le béton qui peuvent devenir très chauds la journée et froids la nuit. Par ailleurs, les bâtiments à toit plat peuvent générer des flux d'air différents de l'écoulement principal de l'air, ce qui peut influencer les mesures.

6.2. Spatialisation et cartographie de l'ICU à l'aide de mesures fixes

Le nombre de stations disponibles dans le cadre d'un réseau d'observation étant fini, l'approche par mesures fixes ne fournit d'information que pour quelques points précis de la ville. Elle n'offre pas d'information détaillée concernant la distribution spatiale de la température de l'air dans l'ensemble de l'agglomération. Ces limites, inhérentes aux réseaux de mesures, font que les relevés de terrain doivent souvent être complétés par des techniques de modélisation plus ou moins sophistiquées. Ces techniques incluent les méthodes d'interpolation statistique et la modélisation numérique.

6.2.1. L'interpolation spatiale

La méthode de spatialisation la plus utilisée consiste à interpoler les valeurs entre les différents points de mesure pour construire un modèle statistique à partir d'un échantillonnage de données de terrain. Cette méthode consiste à placer des isothermes afin d'établir les valeurs et la distribution des Ta par interpolation spatiale sur la base des données relevées par les points d'observation. Il s'agit ainsi de créer un « champ continu » à partir d'un « champ discret » (Foissard, 2015).

Il peut s'agir d'une interpolation de type géostatistique s'appuyant sur le principe de l'autocorrélation spatiale. Ce principe permet de mettre en évidence les sites qui présentent des relations entre eux -sur la base de la ressemblance maximale d'un point avec ses voisins- par rapport à deux critères simultanés : la proximité spatiale et la similitude entre les valeurs d'une même variable en différents endroits de la région d'étude (Flahaut, 2001). Par conséquent, la proximité spatiale avec le point mesuré implique une proximité avec la valeur (Foissard, 2015). Souvent, cela se fait par la méthode du krigeage. Il s'agit d'une méthode stochastique d'interpolation spatiale qui a pour but de prévoir des Ta au niveau des sites non échantillonnés en s'appuyant sur une combinaison linéaire sans biais des observations effectuées sur des sites voisins (Krige, 2015). Elle est construite à partir d'un variogramme dont la fonction doit minimiser la variance (Gratton, 2023).

Il peut également s'agir d'une interpolation spatiale multicritère qui consiste à identifier les meilleurs descripteurs de l'environnement des stations météorologiques en analysant la topographie et les données sur l'occupation du sol. Il s'agit ainsi de mettre en évidence, à l'aide d'une analyse statistique, le degré de corrélation et l'apport d'explication réelle de chaque variable explicative (Cerrega, 1992).

En revanche, la méthode de spatialisation par interpolation spatiale requiert de disposer d'une densité suffisante de points de mesures : selon le nombre de points de mesures disponibles, les cartes produites peuvent être très peu détaillées. On y distinguera uniquement un noyau chaud urbain et une certaine dissymétrie entre les différentes parties de l'aire urbaine (Kastendeuch, 2022).

6.2.2. Les modèles de simulation numérique

En partant du constat qu'il est impossible d'observer les effets de toutes les combinaisons des paramètres urbains, les observations de terrain peuvent, dans certaines circonstances, être complétées par des modèles de simulation numérique. La modélisation numérique peut en effet permettre d'examiner et de mettre à l'épreuve notre compréhension de la manière dont les villes influencent le climat et inversement (Oke *et al.*, 2017). Les modèles produits simulent l'ICU en utilisant un ensemble d'équations qui relient les variables atmosphériques (en l'occurrence la température de l'air) aux paramètres et processus rencontrés dans la réalité (comme la densité de flux de chaleur sensible). Ils peuvent être utilisés pour mener des expériences qui permettent de simplifier la complexité du monde réel pour isoler et examiner les effets de la modification d'une partie du système. Selon le type de modèle (et son application), certains termes dans les équations individuelles (ou même des équations entières) peuvent être simplifiés, voire omis. Cela peut être fait pour mettre l'accent sur des aspects spécifiques du système ou pour rendre une solution possible, plus facile ou plus rapide.

Une variété de modèles de différentes complexités a été employée pour comprendre les échanges d'énergie, de masse et de quantité de mouvement au sein de la canopée ou à la surface urbaine. Ils ont connu une évolution fulgurante car ils bénéficient aussi bien des connaissances obtenues sur les processus atmosphériques fondamentaux que des progrès réalisés au niveau des outils et ressources numériques (matériels et logiciels) (Kastendeuch, 2022). Les modèles existants pourraient ainsi être catégorisés en fonction de la taille du domaine de modélisation et du degré de simplification qu'elle entraîne. Certains d'entre eux peuvent couvrir l'intégralité d'une aire urbaine et offrir des informations territorialisées jusqu'à l'échelle de la commune[39] pour un large panel de variables (*Town Energy Balance* (TEB), *MESO-NH, Weather Research and Forecasting (WRF), etc.*). D'autres peuvent simuler des mailles territoriales très fines comme l'îlot ou le quartier (*SOLENE, ENVI-met, LASER/F, etc.*). Dûment évalués, ces modèles sont des outils importants pour la planification et la conception urbaine (Kastendeuch, 2022), mais ils nécessitent de disposer des interfaces informatiques adéquates et d'importantes puissances de calcul.

6.3. Mise en place du réseau REMTHAM

Le diagnostic spatio-temporel de l'ICU nécessite de disposer de plusieurs points de surveillance de nature à assurer un monitoring continu de la température de l'air. Or, au lancement de notre étude, aucun réseau préexistant n'était disponible (Hassani et Drogue, 2020). L'Eurométropole de Metz ne comptait alors que deux stations météorologiques -la station synoptique de Météo-France située à sur l'aérodrome de Metz Frescaty et une station appartenant au réseau ATMO Grand-Est[40]-, ce qui ne permet pas de refléter les différentes ambiances thermiques rencontrées dans l'aire urbaine de Metz. Aussi, pour les besoins de cette

[39] Voir le service ICU de Météo-France sur https://services.meteofrance.com/changement-climatique/ilot-de-chaleur-urbain

[40] ATMO Grand-Est est un organisme d'intérêt général chargé de la surveillance de la qualité de l'air et la mise en œuvre d'actions conduisant à son amélioration.

thèse, nous avons procédé les 13 et 14 juin 2019, au maillage du territoire de l'EMM par un réseau de mesure géré par le LOTERR comportant 21 stations météorologiques *Bluetooth*, renforcé durant l'été 2020 par 5 points de mesures supplémentaires (soit une densité spatiale de 1 station pour 12 km²).

Nous détaillons dans ce qui suit, le protocole suivi pour la mise en place du réseau REMTHAM, conçu à la fois pour répondre aux contraintes propres à l'installation de stations météorologiques en milieu urbain, mais aussi et surtout, pour optimiser la représentativité des points de mesure. Sur ce point, il nous a paru pertinent de suivre les recommandations d'Aguilar *et al.*, 2003 et de Oke (2004) afin d'éviter les biais précédemment évoqués.

6.3.1. Bilan de l'existant

6.3.1.1. La station de Metz-Frescaty

Installée en 1929 sur le plateau de Frescaty dans la commune d'Augny (49°04' N, 6°07' E), la station de Météo-France assure l'observation du temps qu'il fait (**Tableau 28**). La **station de marque *Mercury,*** est constituée d'une **sonde de température *PT100*** sous abri à coupelle. Les données de cette station sont disponibles sur la Publithèque[41] en temps réel.

Tableau 28 : Caractéristiques de la station météorologique de Metz-Frescaty.

Site	Commune	Période de service	Paramètres observés
Plateau de Frescaty	Augny	Décembre 1929-aujourd'hui	Température, humidité relative, rayonnement, vitesse et direction du vent, etc.

6.3.1.2. La station d'ATMO Grand-Est

Mise en service en juin 2001, la station d'ATMO Grand-Est est située dans la commune de Saint-Julien-lès-Metz (49°,07'N, 6°12'E). Elle a enregistré les paramètres météorologiques (température et l'humidité relative ainsi que la concentration des polluants dans l'air) jusqu'en mars 2020, date de sa fermeture (**Tableau 29**).

Tableau 29 : Caractéristiques de la station d'ATMO Grand-Est (www.atmo-grandest.eu/donnees-par-station).

Site	Commune	Période de service	Paramètres observés
Saint-Julien-lès-Metz	Saint-Julien-lès-Metz	Juin 2001-mars 2020	Température, humidité relative, vitesse et direction du vent.

[41] Publithèque est une interface du portail des données publiques qui permet de commander via internet les données de Météo-France (https://publitheque.meteo.fr).

6.3.2. Instruments de mesure

Avant l'achat de l'équipement nécessaire à la constitution de notre réseau d'observation, des contacts ont été pris avec des membres de l'Association Internationale de Climatologie (AIC) (S. Bigot (IGE Grenoble) et X. Foissard (LETG-Rennes-COSTEL), Y. Richard et Mario Rega (CRC laboratoire Biogéosciences Dijon)) pour avoir leurs retours d'expérience et échanger au sujet des équipements les plus adaptés pour le suivi de l'ICU. Nous présentons ici les instruments achetés sur des crédits du LOTERR.

6.3.2.1. Les sondes HOBO

Dans le cadre de la mise en place du réseau REMTHAM, nous avons eu recours aux **sondes thermiques *MX2301A* de la marque *HOBO*** (**Figure 131**) qui enregistrent les données de température et d'humidité relative. D'après le constructeur, la précision des mesures est de ±0,25 °C pour une plage de température allant de -40 à 0 °C et ±0,2 °C de 0 à 70 °C.

Figure 131 : Sonde thermique HOBO.

Outre leur prix abordable qui permet l'achat d'un nombre d'unités suffisant, le choix de ces sondes se justifie par la facilité de récupération de données qui s'effectue en quelques minutes à l'aide d'une simple liaison *Bluetooth* (BT 4.0) via un smartphone, ce qui évite de devoir démonter l'abri pour télécharger les données. Ces sondes présentent aussi une capacité de stockage de données intéressante de l'ordre de 85 000 mesures.

6.3.2.2. Les abris anti-radiations

Pour héberger les sondes, nous avons utilisé des **abris anti-radiations de marque *DAVIS* (modèle 7714)**. Ces abris ont été conçus en multi-coupelles, ce qui optimise la circulation de l'air et améliore la réactivité de la mesure. Ils ont ensuite été fixés sur des candélabres ou des poteaux électriques à 3 m du sol orientés au sud. Lorsque ces supports ne sont pas disponibles du fait des contraintes urbaines, notamment au centre-ville, nous avons implanté un mât spécialement pour cet usage.

En outre, pour limiter l'influence du candélabre ou du poteau électrique, l'abri anti-radiations a été déporté de plus de 30 cm. En revanche, le système de fixation des abris fourni par le fabricant s'est révélé inadapté, car il ne permet pas de garder la distance nécessaire avec le support de l'abri. Et, comme aucun matériel de remplacement n'a pu être trouvé dans les points de vente, nous avons dû fabriquer nous-même un moyen de fixation (**Figure 132**). Celui-ci s'inspire d'un retour d'expérience des climatologues du CRC qui ont également fabriqué un système de fixation pour la mise en place du réseau MUSTARDijon (équerre en aluminium).

Au total, 25 équerres ont été montées « en régie », sur lesquelles les abris ont ensuite été attachés à l'aide d'un collier de serrage.

Figure 132 : À gauche station météorologique du réseau REMTHAM (rue de Saint-Paul, Montigny-lès-Metz). À droite : système de fixation de l'abri.

6.3.2.3. La station météorologique

Le réseau de mesure intègre également une **station météorologique *Vantage Pro 2 plus*** (***Cf.*** **e)** afin de compléter nos données par la mesure des paramètres météorologiques non pris en compte par les sondes HOBO (rayonnement solaire, direction, vitesse du vent et pluviométrie).

Cette station a été montée sur un mât et installée au sein de la cour de l'école maternelle Saint-Martin au centre-ville de Metz (**Figure 133**). L'idée par le choix de ce site est d'intégrer la dimension de la vulnérabilité dans le déploiement du réseau de mesure, les enfants faisant partie de la population sensible aux risques liés à la chaleur intense. Par ailleurs, cette école étant un site fermé, cela permet de préserver l'intégrité de la station.

Figure 133 : la station *Vantage Pro 2 plus* implantée dans la cour de l'école maternelle Saint-Martin.

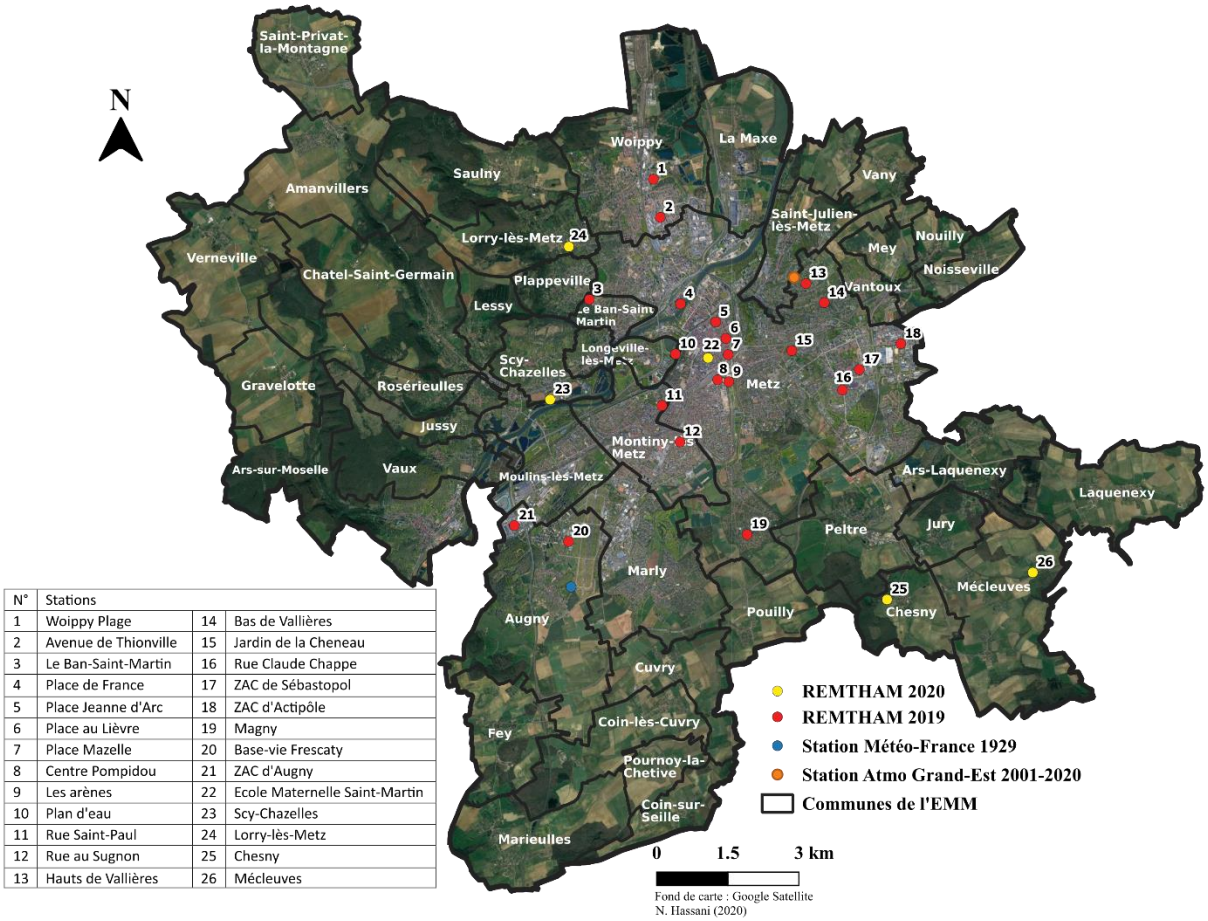
6.3.3. Déploiement du réseau REMTHAM

6.3.3.1. Choix des sites d'implantation

Toutes les stations ont été installées dans des sites ouverts, peu sujets à des ombres portées (arbres ou bâtiments) de manière à être représentatifs de l'ambiance thermique du quartier environnant (Oke *et al.*, 2017). Le choix des sites de mesure a été déterminé par la variété des paysages urbains (**Figure 134**). Les mesures de l'ICU doivent en effet tenir compte du contexte et être représentatives de l'ambiance thermique rencontrée dans un périmètre de 400-500 m environ (Stewart et Oke, 2012 ; Foissard, 2015). Aussi, les sites équipés ont été sélectionnés selon les quatre critères suivants (Hassani et Drogue, 2020) :

- Les six typologies urbaines identifiées dans le schéma de cohérence territoriale de l'agglomération messine (SCoTAM) (AGURAM, 2017) : habitat individuel continu, habitat individuel discontinu, habitat individuel groupé, habitat collectif continu, habitat collectif discontinu et habitat intermédiaire/mixte.
- La présence d'éléments « naturels » susceptibles d'influencer les ambiances climatiques locales (relief, plan d'eau, parcs urbains, etc.).
- Les zones climatiques locales (d'après la carte LCZ présentée dans la section **07.4.3.4**),
- La proximité de lieux accueillant des personnes vulnérables aux fortes chaleurs (EHPAD et écoles primaires et maternelles principalement).

La figure 134 illustre la distribution spatiale des points de mesure (**Annexe 30** à **55**). Ceux-ci sont implantés dans le territoire de 11 communes de la métropole (**Figure 35**), la commune de Metz regroupant à elle seule 14 points de mesure.



N°	Stations		
1	Woippy Plage	14	Bas de Vallières
2	Avenue de Thionville	15	Jardin de la Cheneau
3	Le Ban-Saint-Martin	16	Rue Claude Chappe
4	Place de France	17	ZAC de Sébastopol
5	Place Jeanne d'Arc	18	ZAC d'Actipôle
6	Place au Lièvre	19	Magny
7	Place Mazelle	20	Base-vie Frescaty
8	Centre Pompidou	21	ZAC d'Augny
9	Les arènes	22	Ecole Maternelle Saint-Martin
10	Plan d'eau	23	Scy-Chazelles
11	Rue Saint-Paul	24	Lorry-lès-Metz
12	Rue au Sugnon	25	Chesny
13	Hauts de Vallières	26	Mécleuves

Figure 134 : Localisation des sondes du réseau REMTHAM et des stations météorologiques de Météo-France et d'ATMO Grand-Est.

6.3.3.2. Choix des stations de référence

Avant toute comparaison entre les mesures, nous avons d'abord classé les points d'observation selon trois types de sites en fonction de leur localisation : urbain, périurbain et rural. Cette distinction se base sur les fractions d'occupation du sol (part de surfaces imperméables par exemple) issues de la BD TOPO® (2019) dans un rayon de 500 m autour des stations. Cependant, il n'y a pas de fraction précise qui permette de distinguer un espace urbain d'un espace périurbain ou rural. Nous avons donc, sur la base de nos recherches bibliographiques (Pellissier *et al.*, 2008 ; Quénol *et al.*, 2010 ; Foissard, 2015), adopté la classification suivante (**Figure 135**) :

- Les stations urbaines sont celles situées au sein d'espaces caractérisés par un fort recouvrement en voirie et bâti (fraction de surfaces imperméables ou bâties >45 %). La fraction de surfaces végétalisées (végétation haute et basse) y est relativement faible.
- Les stations périurbaines sont celles installées dans des espaces généralement situés en périphérie du centre urbain dense. En termes de fractions d'occupation du sol, ils correspondent à des environnements intermédiaires entre les espaces urbains et les espaces ruraux, avec une fraction de surfaces imperméabilisées comprise entre 15 et

45%. Dans ce cadre, les zones d'activités (ZAC), bien qu'elles présentent des fractions de surfaces imperméables proches des sites urbains, constituent des sites périurbains, car elles sont localisées en périphérie de la ville et présentent une faible densité du bâti.

- Les stations rurales sont celles installées dans des espaces essentiellement agricoles ou boisés. La fraction de surfaces imperméables n'excède pas 15 % de leur environnement, pour une fraction de surfaces végétalisées supérieure à 85 %.

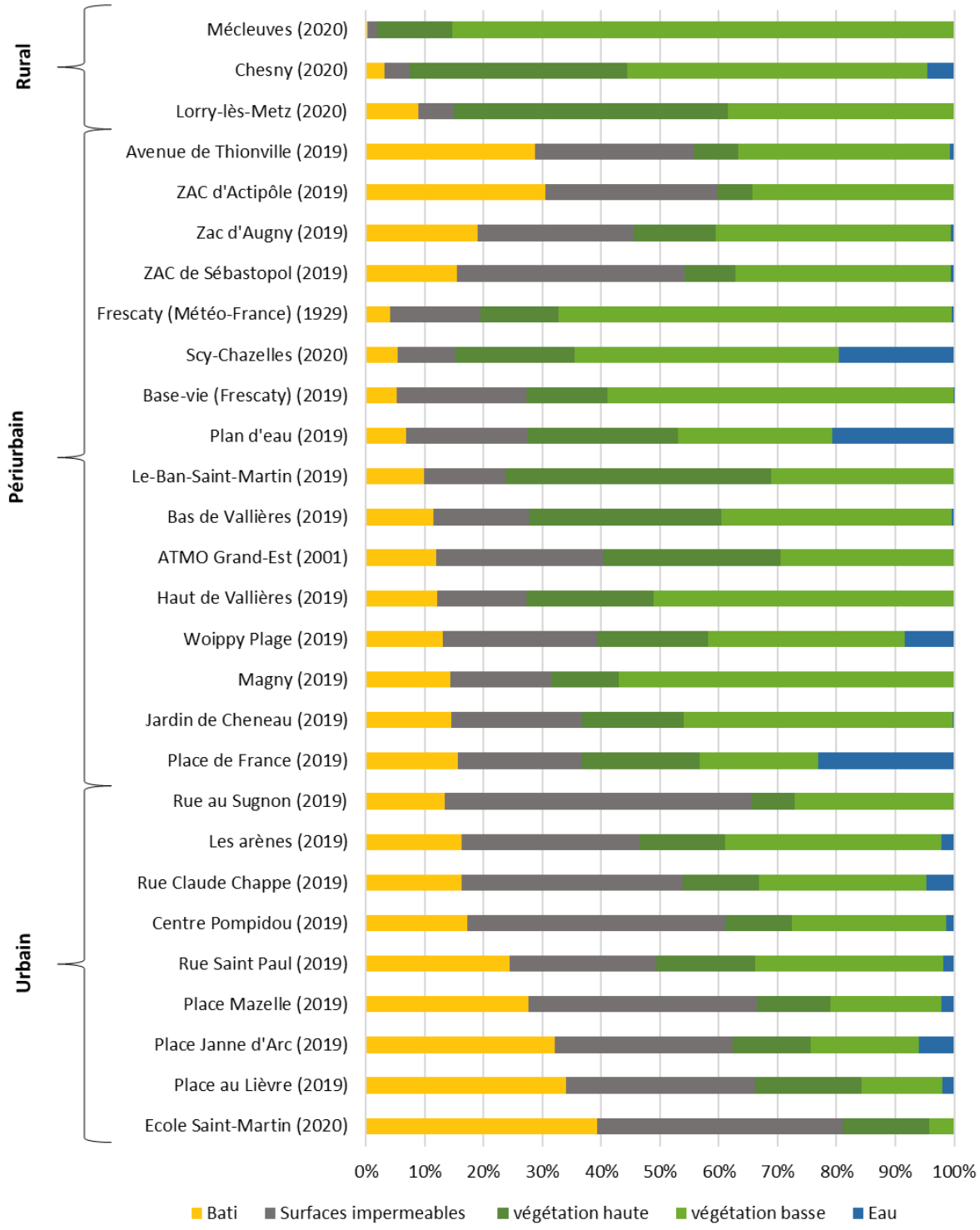


Figure 135 : Typologie des stations météorologiques du réseau REMTHAM et part d'occupation du sol dans un rayon de 500 m.

Afin d'observer les variations thermiques entre les différents milieux au sein de l'agglomération pour l'été 2019, nous avons sélectionné des stations de référence pour chacun des trois milieux. Pour cela, le site de ces stations de référence doit être représentatif de leurs environnements respectifs :

- Pour le milieu urbain, bien que ce soit la station *Ecole Saint-Martin* qui présente la fraction la plus élevée de surfaces bâties (~39 %) et la fraction la plus faible de surfaces végétalisées (~19 %), celle-ci n'a pas été choisie comme station de référence car elle a été installée en 2020 et le dispositif installé dans l'école Saint-Martin a subi des coupures de courant, ce qui a créé des lacunes dans les données récoltées. Aussi, c'est la station *Place au Lièvre* qui a été choisie comme station de référence urbaine, car son site d'implantation est celui qui présente la fraction de surfaces bâties la plus élevée (~34 %) et la fraction de surfaces végétalisées la plus basse (~32 %) parmi les stations restantes.
- Pour le milieu péri-urbain, c'est la station *Base-vie* qui a été sélectionnée pour servir de station de référence.
- Pour le milieu rural, la station *Mécleuves* a été choisie comme référence du fait des caractéristiques de son environnement (fraction de surfaces végétalisées >98 %). Précisons toutefois que cela ne concerne que les données collectées à partir de 2020 car en 2019, aucune station n'avait été implantée en milieu rural. Nous avions préféré alors concentrer les points de mesure dans la partie la plus urbanisée de la métropole.

6.4. Traitements et analyse des données

6.4.1. Profil de l'ICU messin

6.4.1.1. Intensité de l'ICU messin

Si l'on considère que l'intensité de l'ICU s'exprime par l'écart de température (noté ΔTa) relevé entre la station de référence urbaine (en l'espèce, la station *Place au Lièvre*) et la station de référence rurale (*Mécleuves*), les données collectées par le réseau REMTHAM au cours de l'été 2020 ont mis en évidence un excédent thermique de l'ordre de +3,7 °C en moyenne sur le territoire de l'EMM pour les valeurs nocturnes, avec des valeurs maximales atteignant +7,6°C (**Figure 136**). Ce résultat n'est pas forcément définitif puisqu'il est basé sur une période d'observation de quelques mois seulement. Cependant, il est proche de la valeur estimée par le modèle prédictif de Oke (1973) qui établit, à partir de jeux de données déjà anciens collectés dans des métropoles européennes, une relation statistique entre le nombre d'habitants d'une agglomération et l'intensité maximale de l'îlot de chaleur observé (**Figure 136**). Appliqué à notre cas d'étude, il s'écrit :

$$\Delta Ta_{max} = 2{,}01 \times \log(P) - 4{,}06 \qquad (24)$$

où *P* est le nombre d'habitants de la métropole de Metz (soit 220 000).

D'où l'on tire que :

$$\Delta Ta_{max} \approx 6{,}7\ °C \qquad (25)$$

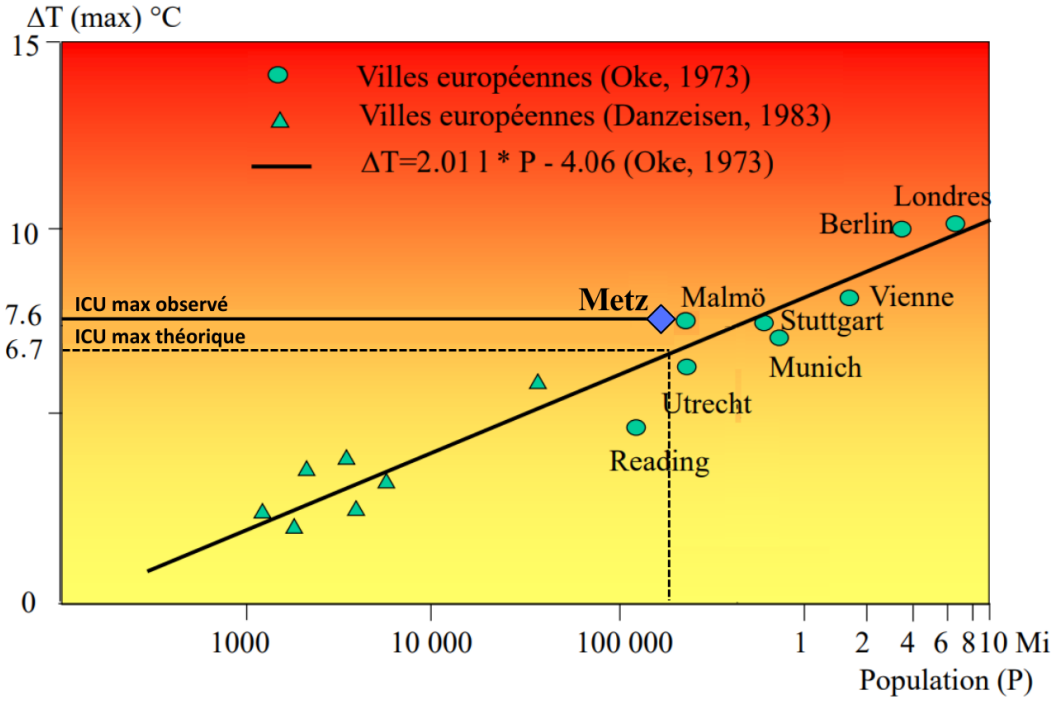


Figure 136 : ΔTa_{max} estimé à l'aide du modèle prédictif de Oke (1973) et le ΔTa_{max} relevé par la différence entre les stations *Place au Lièvre* et *Mécleuves* (adapté de Schwab et Zachenbacher (2009))

Nos résultats sont également cohérents avec les monitorings de température réalisés dans d'autres aires urbaines françaises de taille moyenne (Rennes, Nancy, et Dijon par exemple) ou de taille plus importante (Grenoble, Strasbourg et Toulouse par exemple). L'étude menée par Fischer au cours de l'été 1999 (Fischer, 2005) sur la métropole de Strasbourg a relevé un ICU similaire à celui relevé dans la métropole de Metz et qui, là encore, est en adéquation avec le modèle de (Oke, 1973). A Rennes, les travaux de Foissard (2015) et Dubreuil *et al.* (2020) se sont également appuyés sur un réseau de mesure fixe et ont détecté un ICU moyen de +3 °C. Enfin, les relevés effectués à Nancy sont similaires aux nôtres alors que la méthode employée est celle des mesures itinérantes (Leconte, 2014). En revanche, l'ICU moyen messin est inférieur à celui relevé l'été dans les métropoles plus importantes telles que Toulouse dont l'ICU moyen est de +4 °C (Soubeyroux et Masson, 2017 ; Dumas, 2021) et Grenoble dont l'ICU varie entre +4,2 et +6,2 °C (Bigot *et al.*, 2017). Ces écarts sont liés à une pluralité de facteurs qui touchent aussi bien au mode opératoire suivi pour la mesure de l'ICU (type de stations utilisées, marge d'erreur, etc.), qu'aux caractéristiques propres à chaque terrain d'étude (profil climatique, topographie, population et densité urbaine, forme et superficie des aires urbaines, etc.).

Nos résultats montrent aussi que l'ICU moyen estival de l'EMM est globalement plus modéré que celui d'autres agglomérations de taille moyenne dans le monde. Ainsi, dans la zone chaude, la ville de Florianópolis au Brésil, a enregistré un ICU variant entre +4 à +5 °C en période chaude avec un pic de +6 °C pendant l'été 2018 (Da Rocha *et al.*, 2019). La ville de Sfax en Tunisie présente un ICU moyen compris entre +4 à +7 °C (Dahech, 2012). La ville d'Augsbourg en Allemagne, située dans un contexte climatique proche de celui de notre région d'étude, présente quant à elle, un ICU moyen de l'ordre de +5 °C (Straub *et al.*, 2019).

6.4.1.2. Dynamique journalière

Afin d'avoir un aperçu de l'amplitude totale de l'ICU messin au cours du cycle diurne, nous avons sélectionné deux journées au cours des étés 2019 et 2020, pour lesquelles nous avons comparé les températures enregistrées par la station urbaine *Place au Lièvre* à celles enregistrées par la station péri-urbaine *Base-vie* (2019) située près de l'aérodrome de *Metz-Frescaty* et la station rurale *Mécleuves* (2020). Les mesures correspondent aux journées du 5 et 6 juillet 2019 et du 12 et 13 juillet 2020 au cours desquelles les conditions atmosphériques étaient très proches avec un temps anticyclonique : le ciel est clair avec un vent faible (environ 2,5 m/s orienté sud-ouest pour 2019 et 2 m/s orienté nord pour 2020) pour une température maximale supérieure à 27 °C.

L'opposition entre le comportement diurne et nocturne de l'anomalie thermique apparaît clairement à travers les courbes du ΔTa reproduites dans les figures 137 et 138, quel que soit le couple de stations considéré :

- Pour le couple de stations *Place au lièvre*/*Base*-vie, les mesures indiquent une amplitude thermique comprise entre -0,3 et +4,5 °C (**Figure 137**). Les températures maximales enregistrées par ces deux stations sont de 32,6 °C et 31,4 °C respectivement, pour des températures minimales de 15,1 °C et de 12,5 °C. La différence de température entre ces deux points de mesure, modérée en journée, devient marquée dès le coucher du soleil (à 21h42) avec un écart de +2,7 °C pour atteindre le maximum de +4,5 °C à 04h30.

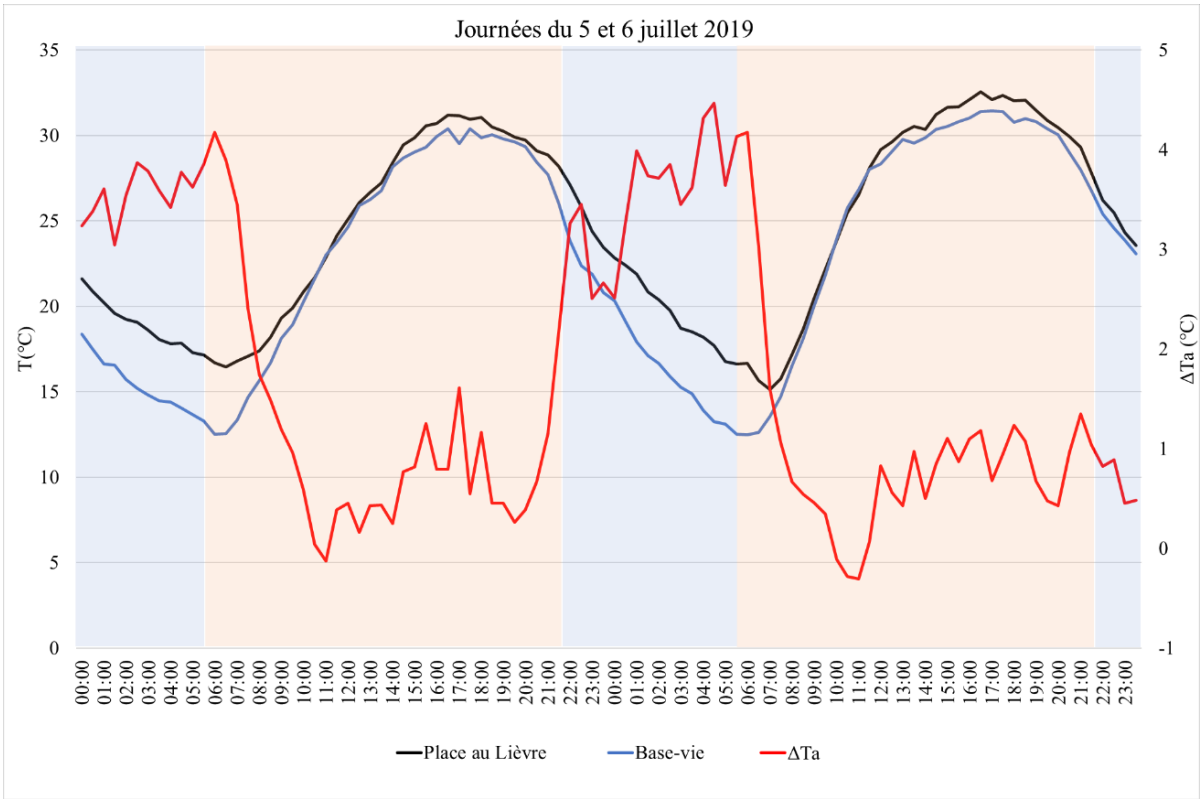


Figure 137 : Températures relevées par les stations *Place au Lièvre* et *Base-vie* et les ΔTa du 5 au 6 juillet 2019.

- Pour les journées du 12 et 13 juillet 2020, l'amplitude thermique entre la station de *Place au Lièvre* et la station de référence rurale *Mécleuves* est comprise entre 0 et +7,6 °C (**Figure 138**). Les températures maximales enregistrées par ces deux stations sont de 27,6 °C et 26,5°C respectivement, pour des températures minimales de 12,7 °C et de 7,3 °C. Ici aussi, ce n'est qu'après le coucher de soleil (à 21h37) que la différence de température entre ces deux points de mesure devient significative avec un écart de +4,8 °C pour atteindre la valeur maximale de +7,6 °C à 23h30. L'écart thermique urbain/rural est ainsi beaucoup plus net que l'écart thermique urbain/péri-urbain.

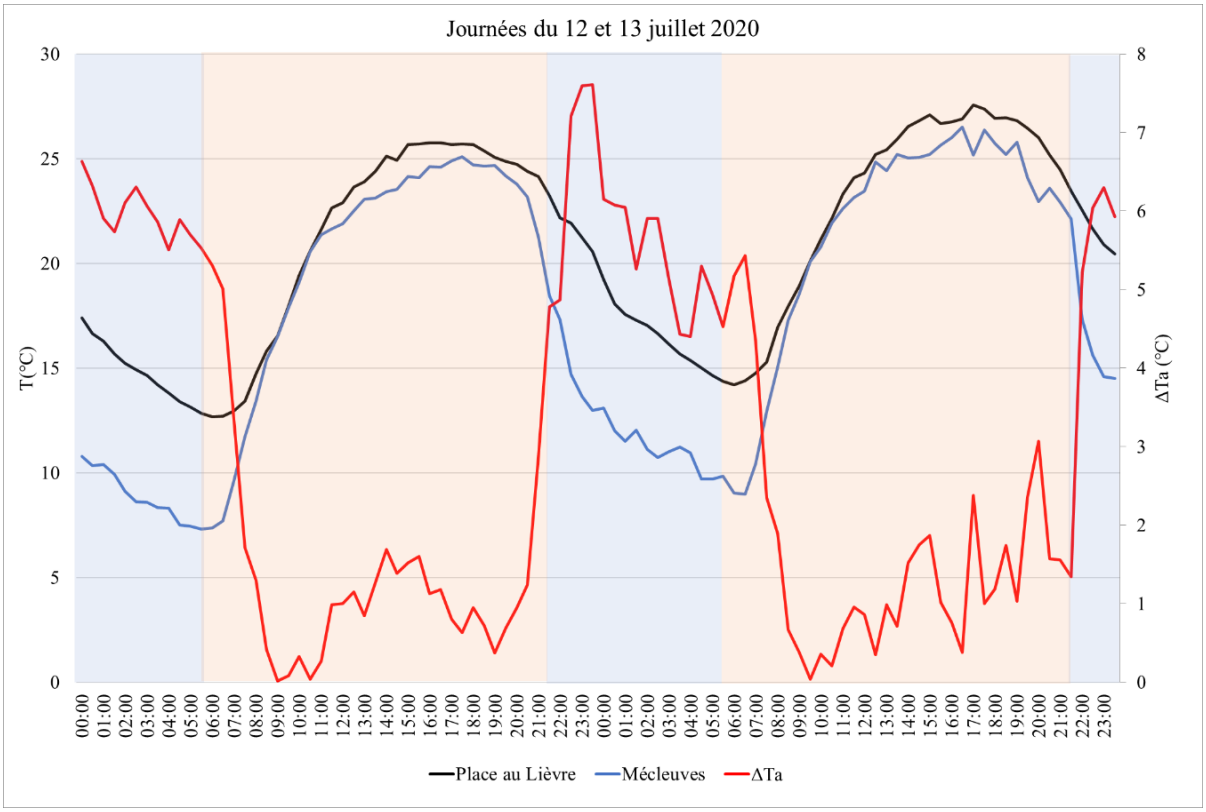


Figure 138 : Températures relevées par les stations *Place au Lièvre* et *Mécleuves* et ΔTa du 12 au 13 juillet 2020.

Ces résultats mettent en évidence deux traits de l'ICU messin : d'une part, c'est en début de nuit que ce phénomène est le plus marqué (environ deux heures après le coucher de soleil). Il voit ensuite son intensité décroître progressivement avec le temps. Il y a ainsi une corrélation entre l'ICU de la canopée urbaine et l'ICU de surface : les deux phénomènes suivent la même courbe de progression (***cf.* 4.4.5.2**). Par ailleurs, nous pouvons relever que le milieu urbain n'est pas toujours plus chaud que le milieu rural : en journée les ΔTa diminuent systématiquement à tel point qu'ils deviennent parfois négatifs en milieu de matinée, ce qui se traduit par des températures en ville plus fraîches qu'à la campagne (on parle alors d'IFU ***cf.* 1.2.1**). Effectivement, l'espace urbain tend à se réchauffer moins vite que le milieu rural grâce à la plus grande inertie thermique des revêtements urbains et à l'effet d'ombrage qui est maximal juste après le lever du soleil, ce qui réduit l'écart de température ville/campagne.

6.4.1.3. Dynamique saisonnière

Dans le but de compléter l'observation en journalier, nous avons voulu vérifier si la dynamique journalière de l'ICU messin variait en fonction des saisons (**Figure 139**). L'amplitude thermique journalière entre les stations de référence est ainsi observée au cours des journées de saison estivale (du 15 juin au 31 août 2019 pour la station *Base-vie*, et du 7 juillet au 31 août 2020 pour la station *Mécleuves*) et hivernale (du 1er décembre 2019 au 29 février 2020 pour la station *Base-vie* et du 31 décembre 2020 au 28 février 2021 pour la station *Mécleuves*).

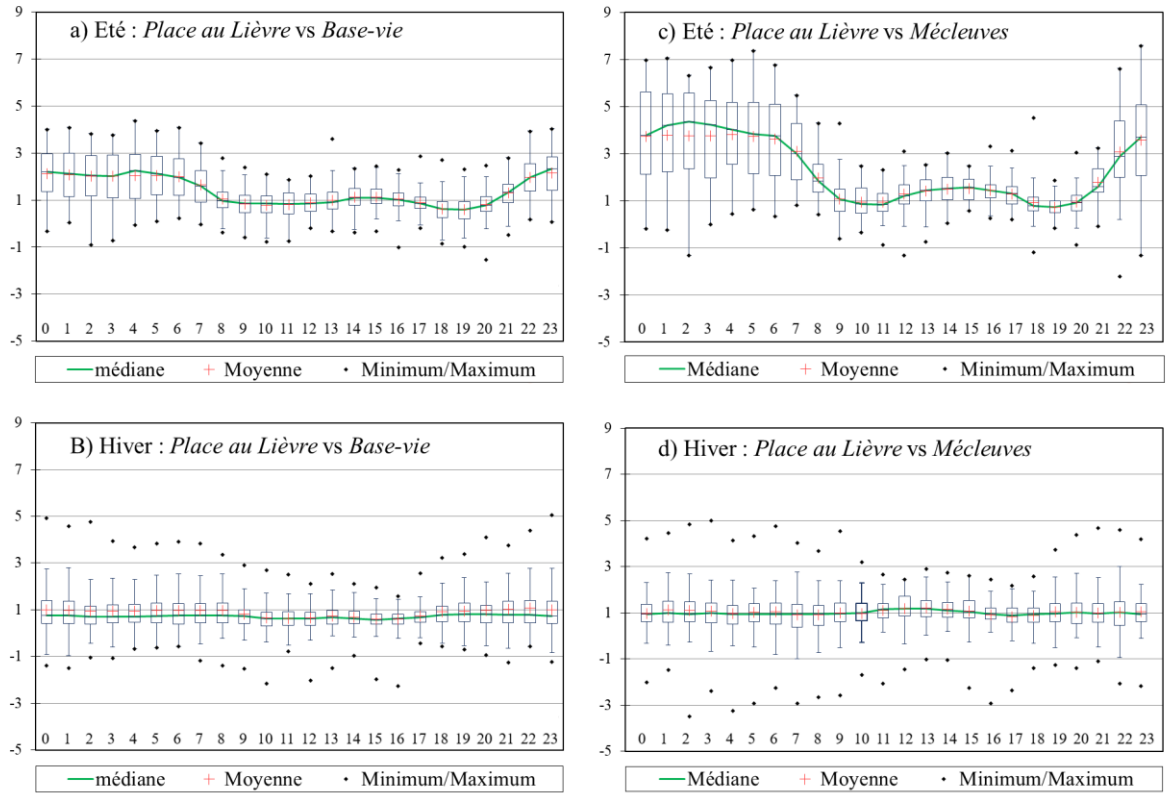


Figure 139 : ΔTa horaires toutes journées confondues, quel que soit le type de temps pour les deux saisons extrêmes : été JJA (a, c), hiver DJF (b, d).

Les boites à moustaches présentées en figure 139 montrent que certaines constantes se dégagent quelle que soit la saison considérée : d'une part, l'écart thermique de la station de référence urbaine (*Place au lièvre*) avec la station de référence rurale (*Mécleuves*) est toujours plus marqué qu'avec la station péri-urbaine (*Base-vie*). Par ailleurs, le ΔTa est systématiquement plus élevé en période nocturne qu'en période diurne, bien que son amplitude s'amenuise considérablement en hiver, passant d'une moyenne de +3,7 °C (été) à une moyenne de +1,1 °C (hiver) (**Tableau 30**). Cela met en évidence la dynamique journalière typique de l'ICU messin, et montre que le phénomène est essentiellement nocturne.

Tableau 30 : Les ΔTa moyens diurnes et nocturnes relevés en été et en hiver.

ΔTa	Eté		Hiver	
	Jour	Nuit	Jour	Nuit
Place au Lièvre/Base-vie	0,9	2,1	0,6	1
Place au Lièvre/Mécleuves	1,5	3,7	1	1,1

Si l'on s'intéresse plus particulièrement aux variations saisonnières de l'ICU messin, définit comme la différence de température entre la station urbaine *Place au Lièvre* et la station rurale *Mécleuves*, on peut relever que l'amplitude des ΔTa est beaucoup plus marquée en été qu'en hiver : sur la figure 140, les valeurs du quartile supérieur et de la médiane sont nettement plus importantes qu'en période hivernale. D'ailleurs au cours de la période de mesure, l'ICU a dépassé sept fois la valeur de +7 °C et a atteint la valeur maximale de +7,6 °C à deux reprises dans la plage horaire 22h00-00h00, alors que ces valeurs ne sont jamais atteintes en hiver (**Figure 140**).

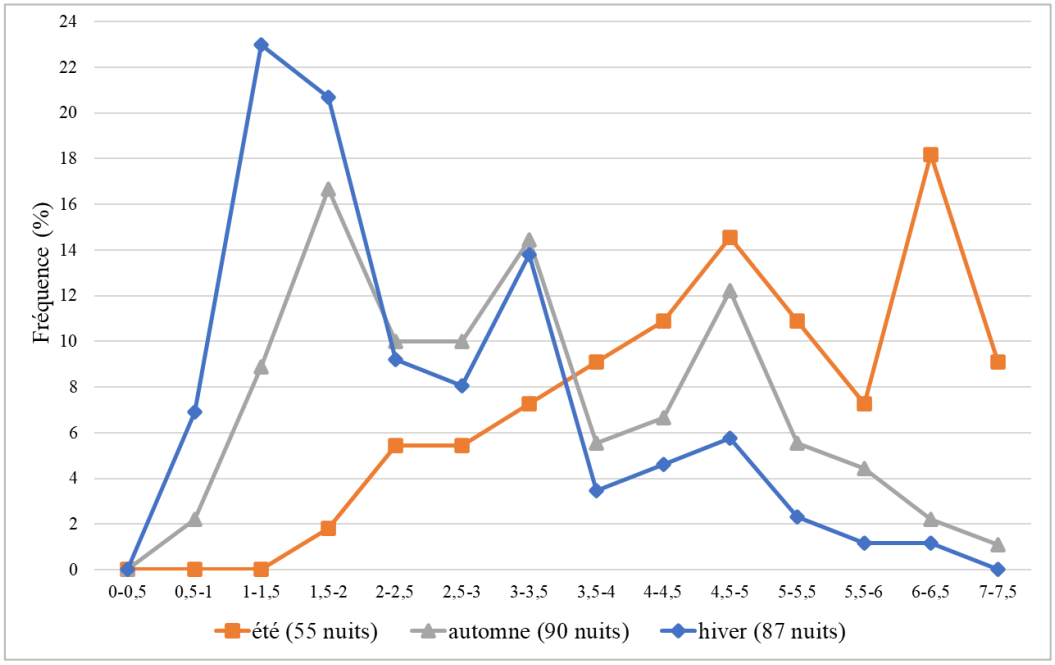


Figure 140 : Fréquences saisonnières des ΔTa max calculées entre les stations *Place au Lièvre* et *Mécleuves*.

La figure 140 et le tableau 31 représentent les fréquences d'occurrence de l'ICU maximal observé de nuit au cours des saisons estivale, automnale et hivernale. Le printemps n'a pas été pris en compte, car le confinement instauré en mars 2020 à la suite de la crise du COVID-19 nous a empêchés d'assurer le suivi de nos stations, ce qui a occasionné des pertes de données, car certaines sondes se sont éteintes faute de batterie. On peut relever que les valeurs les plus élevées se retrouvent essentiellement en été (60 % de valeurs > +5 °C) alors que les valeurs les plus faibles dominent en hiver (53 % des valeurs < +3 °C) (**Tableau 31**). En automne, l'ICU suit une tendance similaire à celle observée en hiver (**Figure 140**). Cela montre que c'est en été que l'ICU messin atteint son intensité maximale. Cette saisonnalité s'explique par l'intensité du rayonnement solaire qui est maximale en été. L'hiver, les nuits sont plus longues, ce qui fait que l'ICU, bien que moins intense, dure plus longtemps (Kastendeuch, 2022).

Tableau 31 : Fréquence des classes d'intensité de l'ICU messin selon les saisons (ΔTa maximal *Place au Lièvre-Mécleuves*).

ΔTa max	Eté	Automne	Hiver
<3 °C	10 %	37 %	53 %
3-5 °C	31 %	37 %	32 %
>5 °C	60 %	27 %	13 %

6.4.1.4. Test d'une modélisation simple de l'îlot de chaleur nocturne

Pour étudier la sensibilité de l'ICU aux conditions météorologiques et formuler un premier modèle prédictif, nous avons essayé de prévoir son intensité maximale quotidienne (ICU_{max}) en testant le modèle statistique de Theeuwes *et al.* (2017) (équation 26). Ce modèle a été calibré à partir de données collectées par 11 binômes de stations météorologiques situées en Europe de l'Ouest. Le modèle se présente sous la forme d'une équation faisant intervenir des déterminants statiques de l'ICU_{max} comme le SVF, la fraction de végétation dans un rayon de 500 m autour du site et des déterminants dynamiques comme l'amplitude thermique diurne, le rayonnement solaire global ou encore la vitesse du vent. Mathématiquement, le modèle de l'ICU_{max} s'écrit :

$$ICU_{max} = (2 - SVF - f_{veg})\sqrt[4]{\frac{S^{\downarrow} DTR^3}{U}} \qquad (26)$$

Pour un ICU_{max} prévu dans la nuit de J à J+1, les données d'entrée du modèle sont les suivantes :

- Rayonnement solaire incident (*S*) cumulé sur 24h à J.

- Amplitude thermique diurne (*DTR*) de 8h J à 7h J+1 en temps local.

- La vitesse du vent (*U*) de 8h J à 7h J+1 à 10 m en temps local.

Le modèle est testé sur la période du 15 juin au 20 août 2019 (67 nuits) à partir des données météorologiques fournies par Météo-France issues des stations de *Metz-Frescaty* et de *Metz-Nancy-Lorraine* où le paramètre rayonnement solaire global (GLOT) est mesuré. L'écart de température nocturne maximal que l'on cherche à modéliser est celui de la paire *Place au Lièvre*/*Base-vie*. Pour le site de la station *Place au Lièvre*, les paramètres SVF et f_{veg} valent respectivement 0,68 (algorithme *SAGA GIS*) et 0,328 (BD TOPO® 3.0).

Le spectre d'intensité et de conditions météorologiques est large, ce qui donne de la robustesse aux résultats obtenus. Le nuage de point montre une certaine dispersion (**Figure 141**). Le modèle de Theeuwes *et al.* (2017) peine à reproduire avec efficacité la variabilité des valeurs d'ICU_{max} dérivées des observations de terrain. Les valeurs observées sont légèrement sous estimées (biais de -0,2 °C en moyenne). Le RMSE vaut 0,87 °C, ce qui est conforme à l'état de l'art de 0,9 °C obtenu par Theeuwes *et al.* (2017) sur leur échantillon de 11 villes du nord-ouest de l'Europe. Dans le contexte messin, l'apport radiatif du jour, l'amplitude thermique diurne et la vitesse du vent semblent donc bien être des paramètres discriminants dans l'intensité de l'îlot de chaleur nocturne.

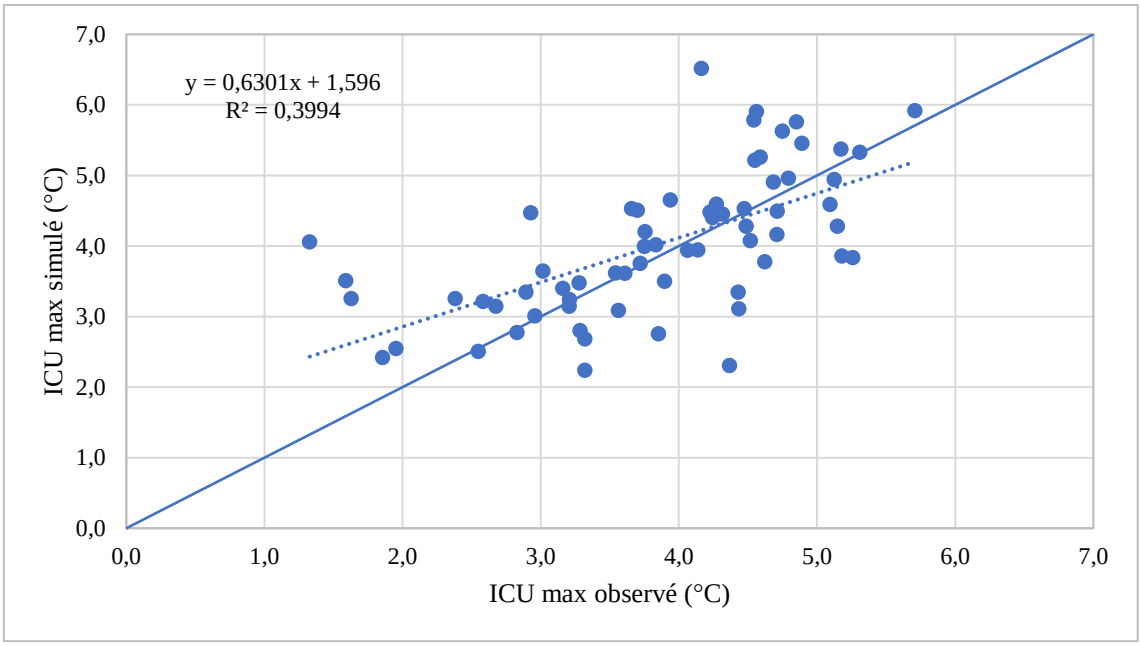


Figure 141 : Comparaison entre l'écart de température maximal nocturne (*Place au Lièvre* vs *Base-vie*) observé et calculé (modèle de Theeuwes *et al.* (2017)). Période du 15 juin au 20 août 2019 (67 nuits).

Pour illustrer l'effet du vent sur l'intensité de l'ICU, nous montrons la dynamique du gradient mesuré par le binôme de stations *Place au Lièvre*/*Base-Vie* en fonction de la vitesse du vent sur une période allant du 25 juin au 1er juillet 2019 (**Figure 142**). Un effet de seuil est clairement identifiable sur cette séquence. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à 3 m/s pendant une partie de la nuit, l'ICU tend à disparaître (nuit des 27 et 28 juin) ; inversement, par nuit claire et situation calme (ff <3 m/s), l'ICU est intense (voir les nuits des 26, 29 et 30 juin) avec un excédent thermique pouvant atteindre +5,7 °C. Cela rejoint les conclusions de Cantat (2004) et Najjar (2006, 2007).

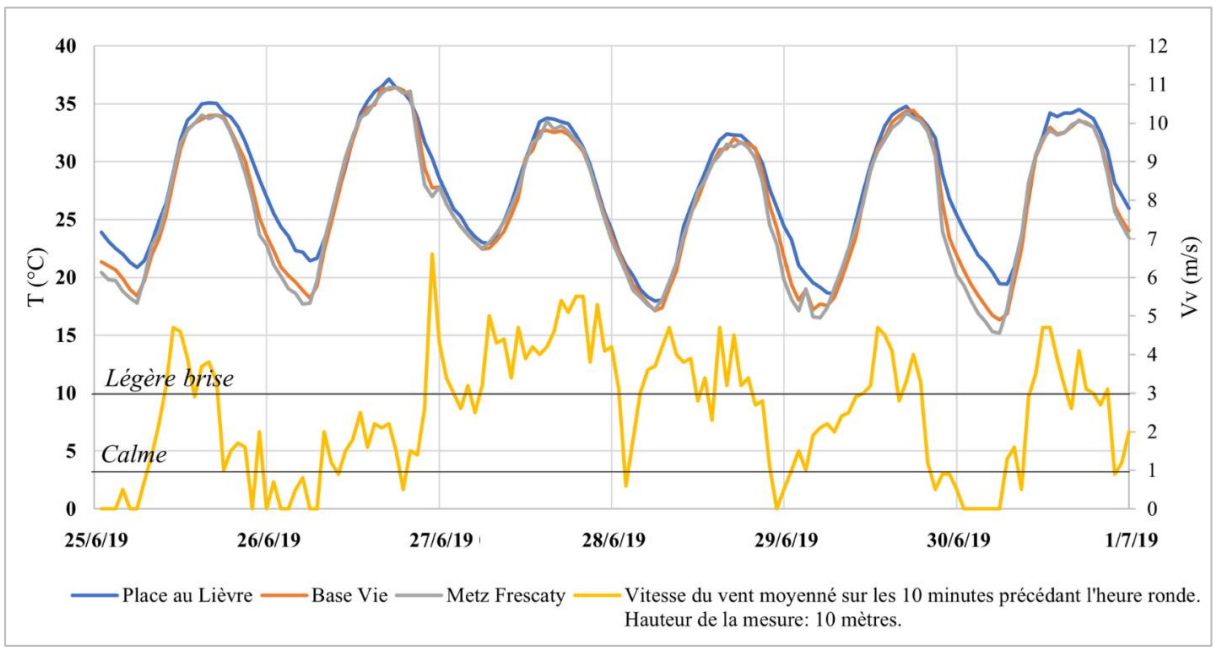


Figure 142 : Dynamique journalière des Ta des stations *Place Mazelle*, *Base-Vie* et *Metz-Frescaty*, et de la vitesse et de la direction du vent (*Metz-Frescaty*) du 25 juin au 1er juillet 2019.

6.4.1.5. Effet de site sur le rafraîchissement urbain : l'exemple de l'arbre en ville

Dans le but d'étudier la modulation spatiale du rafraîchissement urbain produite par des espaces arborés en plein centre-ville, nous avons équipé, au mois de juillet 2021, l'un des arbres situés sur la place Jeanne d'Arc (micocoulier occidental, en latin *celtis occidentalis*) d'un capteur thermique (H2) identique à ceux du réseau REMTHAM (sonde HOBO placée dans un abri anti-radiation) (**Figure 143**). L'objectif était de mesurer l'effet des branches et des feuilles de l'arbre sur les deux paramètres météorologiques intervenant dans le confort thermique ressenti par les citadins : la température de l'air et l'humidité. La place Jeanne d'Arc a été choisie en raison de sa situation et du faible trafic automobile (le flux de chaleur issu des moteurs thermiques aurait pu fausser nos résultats). Une seconde sonde HOBO, issue du réseau REMTHAM (sonde H1 ; **Figure 134**) est utilisée comme sonde témoin. Elle est fixée sur un candélabre à 25 m de la première. Les caractéristiques de l'environnement local de chaque sonde sont décrites dans le tableau 32.

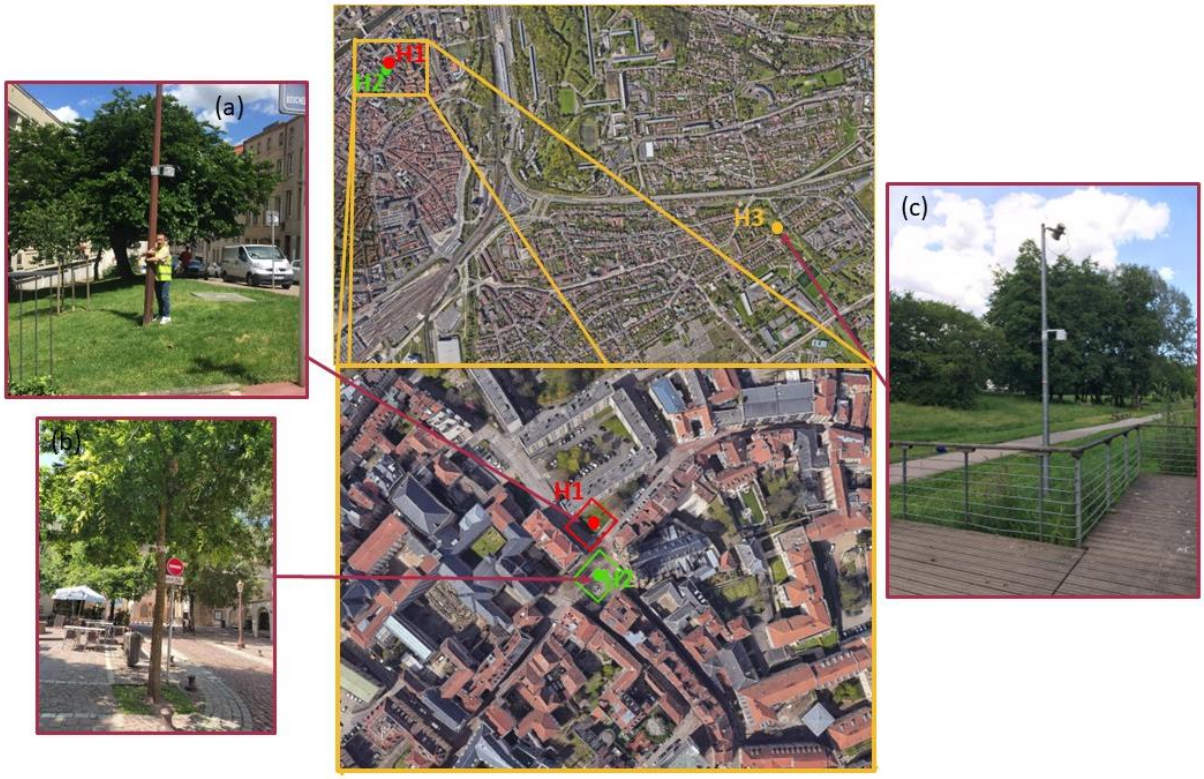


Figure 143 : (a) sonde H1 sur candélabre, rue Marchant ; (b) sonde H2 sous houppier ; (c) sonde H3 du parc de la Cheneau.

Tableau 32 : Environnement des deux sondes Ha et H2.

	Sonde H1 (rue Marchant)	Sonde H2 (place Jeanne d'Arc)
Indice de canopée[42]	≈ 1 %	≈ 30 %
Revêtement au sol	Terre végétale engazonnée	Pavé de granit « à l'ancienne »
Présence d'eau dans un rayon de 10 m	non	oui (fontaine)
Hauteur/Altitude/Orientation	3m/185 m/sud	3m/183 m/sud

a) Dynamique de la température de l'air

La figure 144 retrace les écarts de température en fonction de l'heure locale, toutes journées confondues, quel que soit le type de temps, sur la période allant du 21 juillet au 31 août 2021. On observe que la nuit, les écarts de température sont très faibles et homogènes. 75 % des écarts H1-H2 sont inférieurs à +0,4 °C : sur la place, en général, il n'y a donc pas de rafraîchissement sensible la nuit par rapport à la rue Marchant. En journée, la variabilité des écarts augmente. Le site H1 est légèrement plus frais entre 8h00 et 11h00 (îlot de fraîcheur urbain plus intense rue Marchant à mettre en relation avec l'éclairement solaire), tandis que le site H2 est légèrement plus frais au moment le plus chaud de la journée (entre 16h00 et 18h00). A ce moment-là, la sonde est à l'ombre du fait de l'interception du rayonnement solaire direct par le houppier. Le rafraîchissement moyen de -0,5 °C produit par l'arbre est observé pour la tranche horaire entre17h00 et18h00 (Drogue *et al.*, 2023).

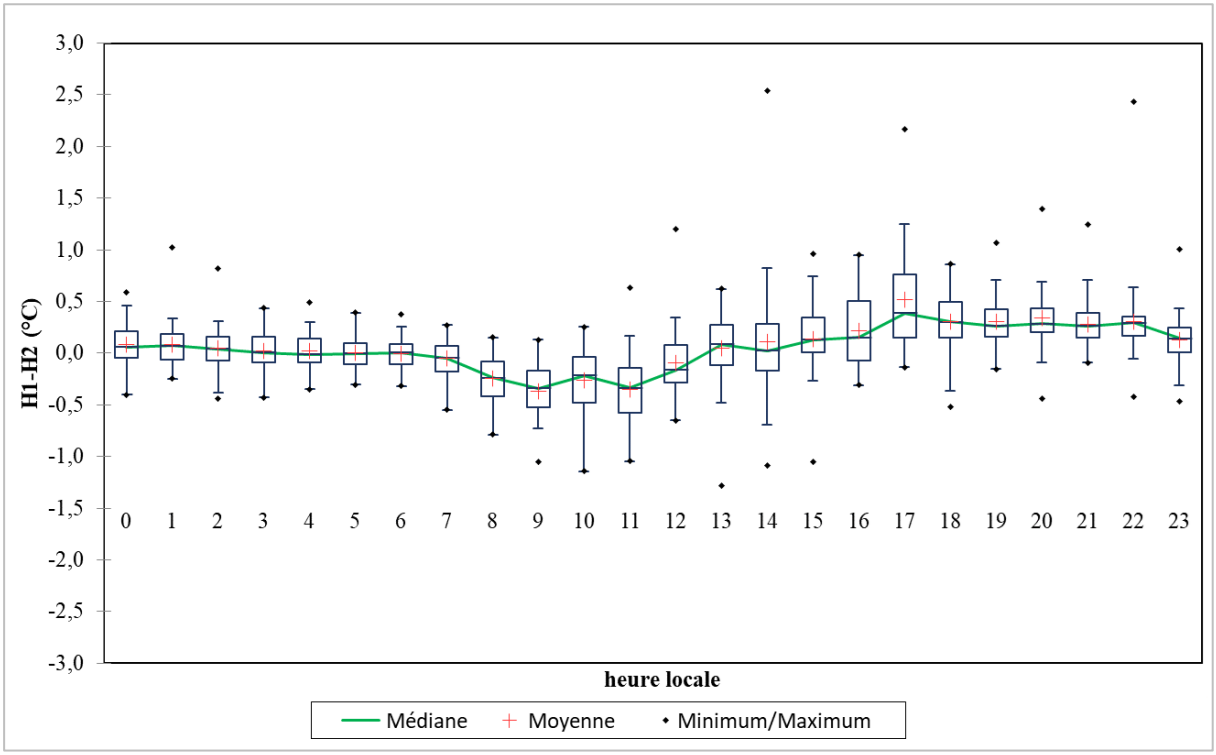


Figure 144 : ΔTa horaire établies pour la période allant du 21 juillet au 31 août 2021 entre la sonde H1 (candélabre, rue Marchant) et la sonde H2 (houppier d'un arbre), sur la place Jeanne d'Arc.

[42] Indice de canopée : ratio de la surface projetée au sol des couronnes d'arbre/400 m². La surface de 400 m² correspond *grosso modo* à la superficie de la place Jeanne d'Arc.

Les données représentées sur la figure 145 montrent que la température maximale de l'environnement du houppier est toujours inférieure (-1,1 °C au maximum) à celle prise sur un candélabre à environ 25 m de l'arbre. Ces observations sont cohérentes avec l'étude Cerema réalisée dans le cadre de la requalification de la rue Garibaldi à Lyon (Segur, 2019).

Les données permettent également de distinguer *grosso modo* deux séquences sur un cycle de 24 heures :

(1) entre midi et minuit, l'ambiance est plus fraiche sous l'arbre de la place (jusqu'à -1,2 °C).
(2) entre minuit et midi, l'ambiance est plus chaude sous l'arbre de la place (jusqu'à +1,3 °C).

Ce résultat est similaire à celui obtenu par l'étude de Souch et Souch, (1993) qui relève que l'effet rafraîchissant des arbres est plus intense (de 0,7 à 1,3 °C) en début d'après-midi. Dans le même ordre d'idées, Streiling et Matzarakis (2003) ont constaté un écart de température de l'air d'environ 1 °C entre les zones avec arborées et celles qui en sont dépourvues.

La séquence 2 peut s'expliquer i) la nuit, par le fait que l'arbre s'interpose entre le sol et le ciel (le feuillage capte et réémet une partie de l'IR reçu) et ii) en matinée par un effet de masque différencié sur les 2 sites (plus d'éclairement solaire en H2 qu'en H1 en raison de l'ombre projetée de l'église Sainte-Ségolène situé au sud-est et à proximité de la sonde H1). La séquence 1 se poursuit parfois jusqu'au petit matin (nuits du 14 au 15 et du 15 au 16).

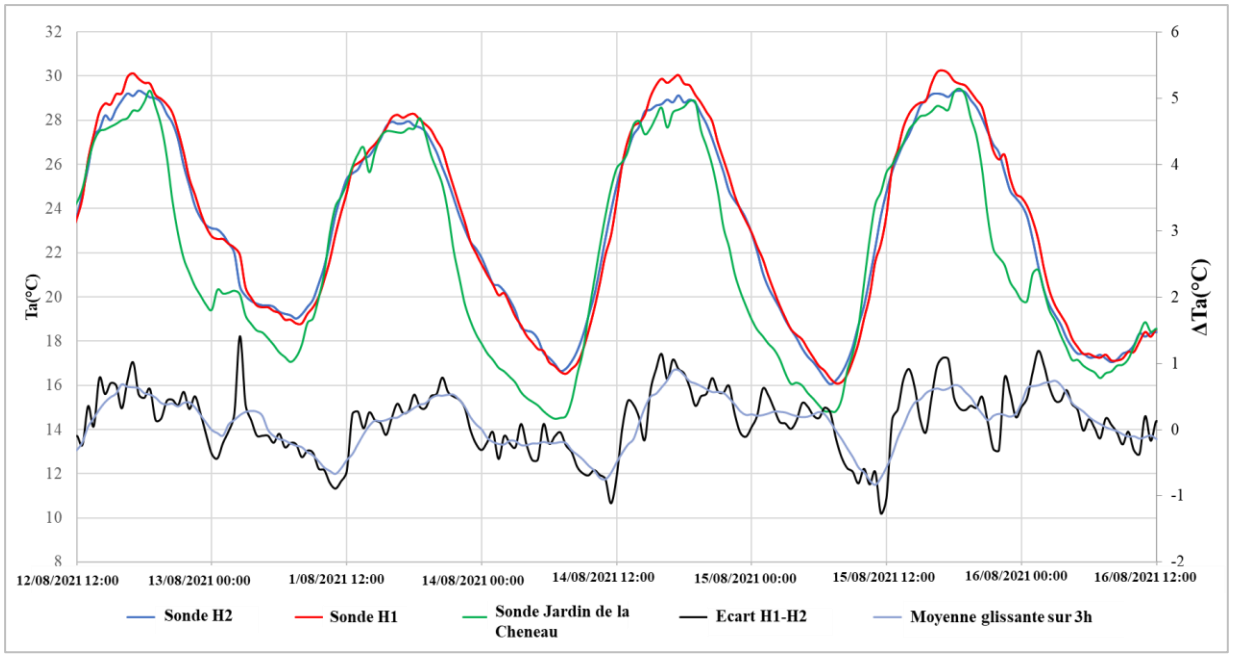


Figure 145 : Courbes de température des sondes H1 (candélabre, rue Marchant), H2 (houppier d'un arbre), H3 (candélabre, jardin de la Cheneau) et d'écart H1-H2 du 12 août au 16 août 2021.

La courbe verte représentant les données de la station *Jardin de la Cheneau* située à ≈2 km de la place (**Figure 145**) montre un refroidissement nocturne de l'air plus rapide dans le jardin que sur la place Jeanne d'Arc conduisant, par exemple dans la nuit du 12 au 13, à un écart

maximal à minuit de -3,7 °C entre le parc (19,4 °C) et la place (23,1 °C). Cet écart de température, très sensible, est la signature d'un ICU centré sur le quartier Ancienne-ville et sur lequel quelques arbres isolés n'ont aucun effet rafraîchissant. Cet ICU s'explique par le stockage de chaleur dans le sol en journée place Jeanne d'Arc et rue Marchant et le piégeage radiatif de l'IR nocturne par les parois des immeubles la nuit. Le plateau, commun aux trois sondes, observé de 00h30 à 02h00 du matin (+0,5 °C) (précédé d'un rebond dans le jardin de la Cheneau) est probablement dû à de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air (dépôt de rosée libérant de la chaleur latente en surface qui se propage dans l'air sus-jacent par conduction).

b) L'humidité de l'air

Les données représentées sur la figure 146 montrent que l'humidité relative a varié entre 45 (air sec) et 90 % (air humide) au cours de la période étudiée, et que la masse d'air s'assèche progressivement (baisse de la tension de vapeur). L'évolution de l'humidité relative est cohérente avec celle de la température (les deux paramètres évoluent en sens inverse).

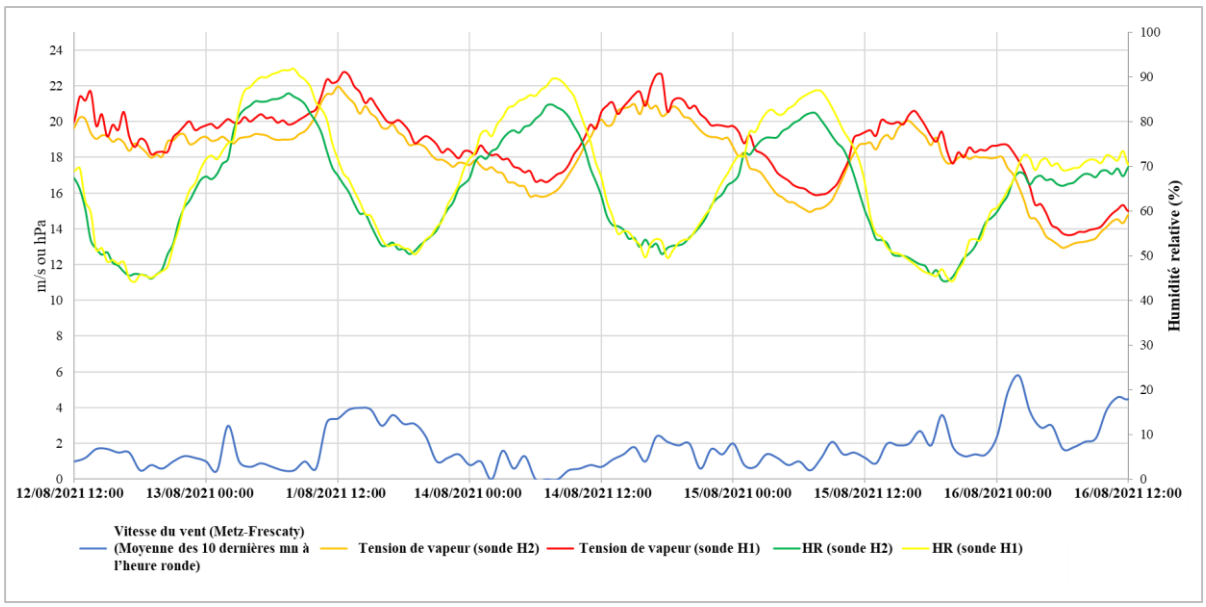


Figure 146 : Courbes d'humidité relative, de tension de vapeur[43] des sondes H1 (rue Marchant), H2 (houppier d'un arbre) et vitesse du vent horaire à la station *Metz-Frescaty* du 12 août au 16 août 2021.

De minuit à midi, l'air est plus frais (et donc plus proche de la saturation) et plus stable rue Marchant que sur la place Jeanne d'Arc. En matinée, celle-ci est mieux éclairée par le soleil. Par conséquent, la vapeur d'eau se diffuse à partir du lever du jour sous l'effet de la turbulence/convection générées par l'instabilité verticale de l'air ce qui appauvrit l'air en vapeur d'eau : la tension de vapeur observée en H1 (eH1) est donc supérieure à celle observée en H2 (eH2). La présence d'un couvert herbacé sous H1 contribue aussi à enrichir l'air par évapotranspiration. Dans le même temps, la tension de vapeur saturante en H1 (esH1) est inférieure à celle en H2 (esH2) puisqu'il fait plus chaud sur la place. Il en résulte que l'humidité

[43] Aussi appelée pression partielle de vapeur d'eau (unité : hPa).

relative (ratio e/es) en H1 (HRH1) est supérieure à celle en H2 (HRH2). De midi à minuit : HRH1 ≈ HRH2, l'écart en tension de vapeur se réduit avec toujours eH1> eH2 mais ceci est compensé par le fait que la place soit légèrement plus fraîche donc esH2 < esH1.

Par ailleurs, on ne constate pas d'effet visible de la transpiration de l'arbre (ni de la fontaine) l'après-midi (eH1> eH2) ce qui est probablement lié au fait que le sonde est située à la base du houppier. On note aussi que pour les deux sites, le maximum de tension de vapeur est enregistré entre 13h00 et 17h00 ce qui est cohérent avec le fait qu'à ce moment de la journée, à l'échelle de l'îlot, l'émission de vapeur d'eau par les surfaces foliaires et le couvert herbacé est maximale.

Le 13 août après-midi, une légère brise contribue peut-être à renouveler l'air, ce qui se traduit par un appauvrissement en vapeur d'eau. On note que le pic d'écart de +1 °C observé dans la nuit du 12 au 13 à 02h30 correspond à une augmentation ponctuelle de la vitesse du vent à la station *Metz Frescaty* (légère brise nocturne). En fin de période d'observation (matinée du 16), le renforcement du vent et la présence probable d'une couverture nuageuse, limitant la convection en matinée, contribuent à stabiliser l'humidité relative (Drogue *et al.*, 2023).

6.4.1.6. Relation entre ICU et canicule

Comme vu précédemment, les îlots de chaleur se manifestent préférentiellement en période de chaleur lorsque l'énergie solaire est fortement excédentaire. On peut toutefois s'interroger sur leur dynamique spatio-temporelle en période caniculaire dans la mesure où les épisodes caniculaires seront amenés à s'intensifier dans les prochaines décennies. La littérature scientifique ne dégage pas de consensus quant aux effets de la canicule sur l'ICU.

Une majorité des études réalisées relève une amplification de l'ICU en période de vague de chaleur : Li et Bou-Zeid (2013), s'appuyant sur une combinaison d'analyses d'observations et de modélisations, relèvent des synergies entre les ICU et les vagues de chaleur. Plus spécifiquement, De Ridder *et al.* (2017) observent une intensification de l'ICU de l'agglomération parisienne en période de canicule. De même, Founda *et al.* (2015) constatent que la corrélation entre les vagues de chaleur et l'ICU à Athènes (Grèce) entraîne une amplification prononcée de l'intensité de ce dernier par temps exceptionnellement chaud. Ce résultat est confirmé par Founda et Santamouris (2017) dans la même ville en établissant une rétroaction positive ICU/vague de chaleur, avec une intensification de l'amplitude moyenne de l'ICU atteignant +3,5 °C en période d'extrême chaud, par rapport aux conditions normales. Dans un contexte similaire, Pyrgou *et al.* (2020) observent une intensification de l'ICU de Nicosie (Chypre) comprise entre +0,9 et +1,3 °C. Ailleurs, les résultats de Rizvi *et al.* (2019) ont montré que l'ICU a augmenté de manière significative pendant la vague de chaleur de 2015 à Karachi (Pakistan). Ghobadi *et al.* (2018) ont constaté que pendant une vague de chaleur, le gradient thermique ville/campagne était d'environ +1 °C le jour et de +2,5 °C la nuit. Enfin, les études menées aux États-Unis montrent qu'au cours d'épisodes d'extrême chaud, les villes de Chicago et de Saint-Louis se sont avérées disproportionnellement plus chaudes que leur environnement rural, l'intensité de l'ICU dans ces villes était donc supérieure à la moyenne

(Stone, 2012). Des résultats similaires ont été obtenus à Baltimore (Li et Bou-Zeid, 2013), Madison (Schatz et Kucharik, 2015) et dans 50 villes des Etats-Unis (Zhao *et al.*, 2018).

A l'inverse, certaines études ne relèvent pas de corrélation ICU/canicule et observent un ICU inchangé, voire amoindri lors d'épisodes d'extrême chaud (Basara *et al.*, 2010 ; Scott *et al.*, 2018 ; Fenner *et al.*, 2019). Les résultats de Ramamurthy et Bou-Zeid (2016) suggèrent que des villes de tailles comparables pourraient interagir différemment avec les vagues de chaleur. En France, Marques *et al.* (2022) à Toulouse et Richard *et al.* (2021) à Dijon ne relèvent pas de corrélation entre l'intensification de la chaleur et celle de l'lCU. Ils observent que l'ICU atteint son intensité maximale juste avant la mise en place des épisodes caniculaires ou pendant les premiers jours, pour ensuite décroître en intensité à mesure que les températures nocturnes augmentent sous l'effet probable de l'assèchement des sols en milieu rural.

Dans ce contexte, nous avons souhaité profiter de la survenance d'un épisode caniculaire au cours de l'été 2020 pour observer le comportement de l'ICU messin. Cet épisode, signalé par une vigilance rouge pour une bonne partie du nord de la France par Météo-France, a duré sept jours, du 6 au 13 août. Il s'agit alors de comparer les ΔTa mesurés par les stations *Place au Lièvre* et *Mécleuves* au cours de cet épisode de forte chaleur avec ceux mesurés au cours d'une période de cinq jours précédant l'événement et de cinq jours suivant l'événement.

En partant de la définition de la canicule établie par Météo-France, nous relevons que le seuil diurne de 34 °C a été dépassé 7 fois en milieu urbain contre 5 fois en milieu rural, tandis que le seuil nocturne de 19 °C a été dépassé sur un total de 12 nuits en milieu urbain contre 5 nuits en milieu rural. Les journées de mesure sont alors triées et codées en 3 classes (**Tableau 33**) :

- La classe A, qui correspond aux journées non-caniculaires présentant une situation anticyclonique.
- La classe B, qui représente les journées au cours desquelles un seul des deux seuils a été atteint ou dépassé.
- La classe C, qui représente les journées au cours desquelles les deux seuils ont été atteints ou dépassés.

Tableau 33 : Nombre de jours par classe d'ICU (°C) en fonction du dépassement ou non des seuils de canicule.

Types de journée		ICU max ⩽ 3	3 > ICU max ⩽ 5	ICU max > 5	Total
« A »	Journées non-caniculaires	1	3	2	6
« B »	Dépassement d'un des 2 seuils	0	4	1	5
« C »	Journées caniculaires	0	1	6	7
Total		1	8	9	18

D'après les données récoltées, les valeurs de l'ICUmax modéré (comprises entre +3 et +5°C) sont sur-représentées dans les journées de type A et de type B (7 nuits), tandis que les valeurs d'ICUmax intense (supérieures à +5 °C) sont sur-représentées dans les journées de type C (6

nuits). Il semble que la canicule d'août 2020 a eu une influence positive sur l'ICU. Ce constat est confirmé par la figure 147 qui représente les données de températures minimales et maximales relevées par les stations *Place au Lièvre* et *Mécleuves.* On relève que lors de la période qui a précédé l'épisode caniculaire le ΔTa_{max} augmente progressivement de +3,1 à +5,6°C pour atteindre son intensité maximale de +6,5 °C la nuit du 5 au 6 août, ce qui coïncide avec le début de l'épisode caniculaire. Ensuite, l'intensité des ΔTa_{max} se stabilise, mais reste élevée (entre +5,1 et +5,9 °C) du 7 au 11 août, avant de décroître au cours des derniers jours de l'épisode caniculaire. Les jours suivants, les ΔTa_{max} sont très variables et l'on peut retrouver un niveau d'ICU comparable à celui de la période caniculaire (le 16 août).

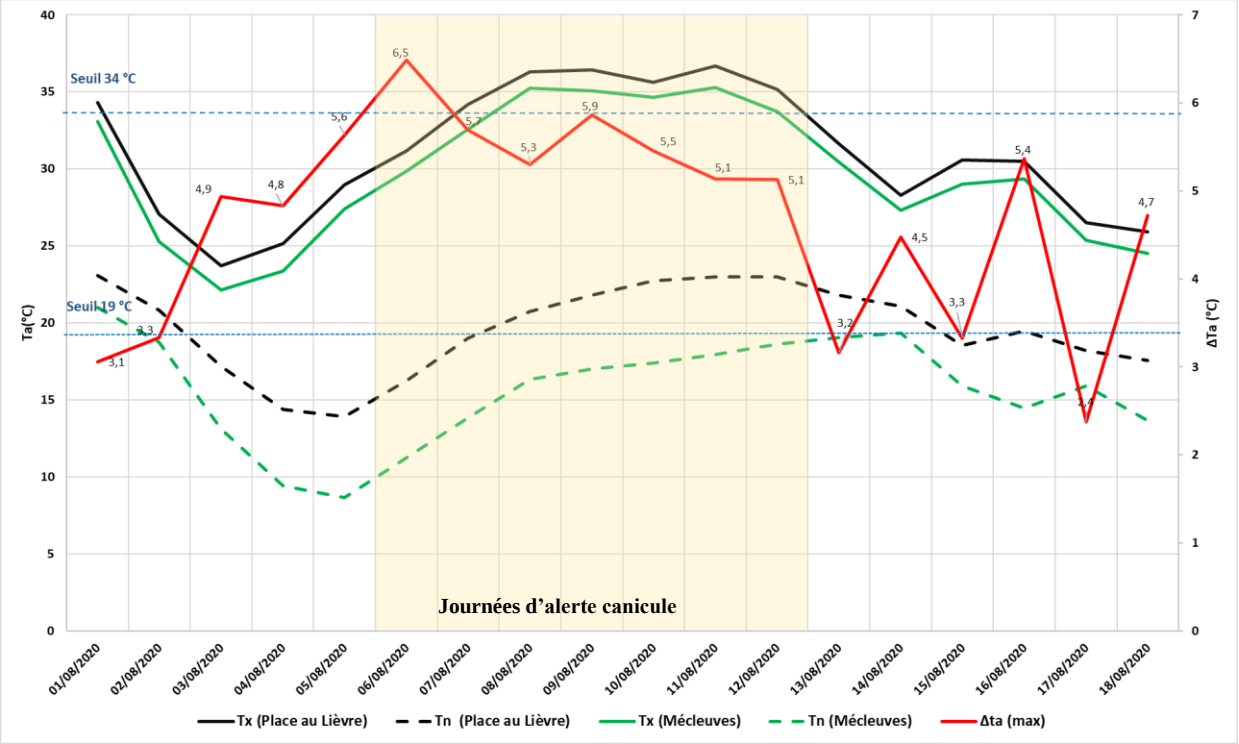


Figure 147 : Valeurs des températures maximales (Tx) et minimales (Tn) relevées par les stations *Place au Lièvre* et *Mécleuves* du 1er au 18 août 2020.

Ce résultat met ainsi en évidence une légère amplification de l'ICU messin en début de canicule, puis le maintien sur un plateau élevé. Nos observations semblent se rapprocher de celles obtenues à Dijon et Toulouse. Un travail de consolidation est nécessaire à la fois en intégrant davantage de sondes et en étendant l'analyse à l'ensemble des épisodes caniculaires qui se sont produits depuis la mise en service du réseau REMTHAM.

6.4.2. Spatialisation de l'ICU par régression multicritère sur le territoire de l'EMM

Si l'existence d'un ICU sur le territoire de l'EMM est bien établie, les données brutes issues des mesures effectuées renseignent peu sur la structure spatiale de ce dernier. Il y a dès lors besoin d'une méthodologie pour spatialiser l'ICU grâce au réseau REMTHAM dans son

ensemble. L'objectif dans cette section est ainsi de produire, au moyen de la modélisation statistique multivariée, une cartographie de l'ICU messin afin de pouvoir observer son hétérogénéité spatiale. Celle-ci a déjà été employée avec succès dans de nombreux travaux en climatologie pour diverses applications (agricoles, urbaines, forestières...) et variables (précipitations, température, ensoleillement...) (Foissard, 2015 ; Straub *et al.*, 2019). Cette modélisation statistique multicritère est testée ici dans une approche de régression multiple pour identifier les co-variables les plus significatives (Hassani *et al.*, 2022).

6.4.2.1. Prétraitement des données

a) Calcul de la variable à expliquer (ΔTa)

Notre point de départ est le calcul des $\Delta Tu - r_{max}$ durant les périodes étudiées. Pour chaque point de mesure, sa valeur s'établit comme suit :

$$\Delta Tu - r_{max,i} = \frac{1}{n}\sum_{n}^{j=1} \Delta Ta_{max}\,(T°_{air\ sonde,i} - T°_{station\ référence}) \qquad (27)$$

Où,

$T°_{air\ sonde,i}$: représente la température de l'air mesurée par une sonde *i* du réseau REMTHAM ,

$T°_{air\ référence}$: représente la température de l'air mesurée par la station de référence,

$\Delta Tu\text{-}r_{,max,i}$: représente la moyenne des écarts entre les $T°_{air\ sonde,i}$ et les $T°_{air\ station\ référence}$ observées entre le coucher et le lever du soleil pour *n* nuits consécutives.

L'analyse spatiale de l'ICU est réalisée dans un premier temps, sur la base des données recueillies durant les trois vagues de chaleur qui ont affecté l'EMM lors des étés 2019 (25-30 juin et 21-26 juillet) et 2020 (6 août - 13 août). Au cours de ces épisodes, les températures ont été d'une intensité exceptionnelle au point de dépasser par endroit les 40 °C[44], ce qui nous offre l'opportunité d'observer le comportement thermique de l'ICU local en période caniculaire. Pour cela, nous avons d'abord calculé la moyenne des écarts maximum horaires entre les stations du réseau REMTHAM et la station de référence périurbaine *Base-vie*. Ensuite, nous avons retenu les nuits où l'ensemble des stations ont été opérationnelles avec un ICU marqué voir intense au cours des étés 2019 et 2020. Sur ces nuits, nous n'avons retenu que celles pour lesquelles le ΔTa_{min} entre la station *Place au Lièvre* et la station *Base-vie* était égal ou supérieur à +1,5 °C, ce qui a donné un total de 22 nuits pour lesquelles nous avons calculé la moyenne des écarts maximum (**Figure 148**). Pour mieux caractériser l'intensité de l'ICU et son extension spatiale, nous avons scindé ces nuits en deux phases : la première phase allant du coucher de soleil jusqu'à 01h00 (phase 1), et la seconde allant de 01h00 au lever du soleil (phase 2).

[44] Le nouveau record de température de la station de *Metz-Frescaty* (1929-) a été établi le 25 juillet 2019 avec 39,7 °C sous abri.

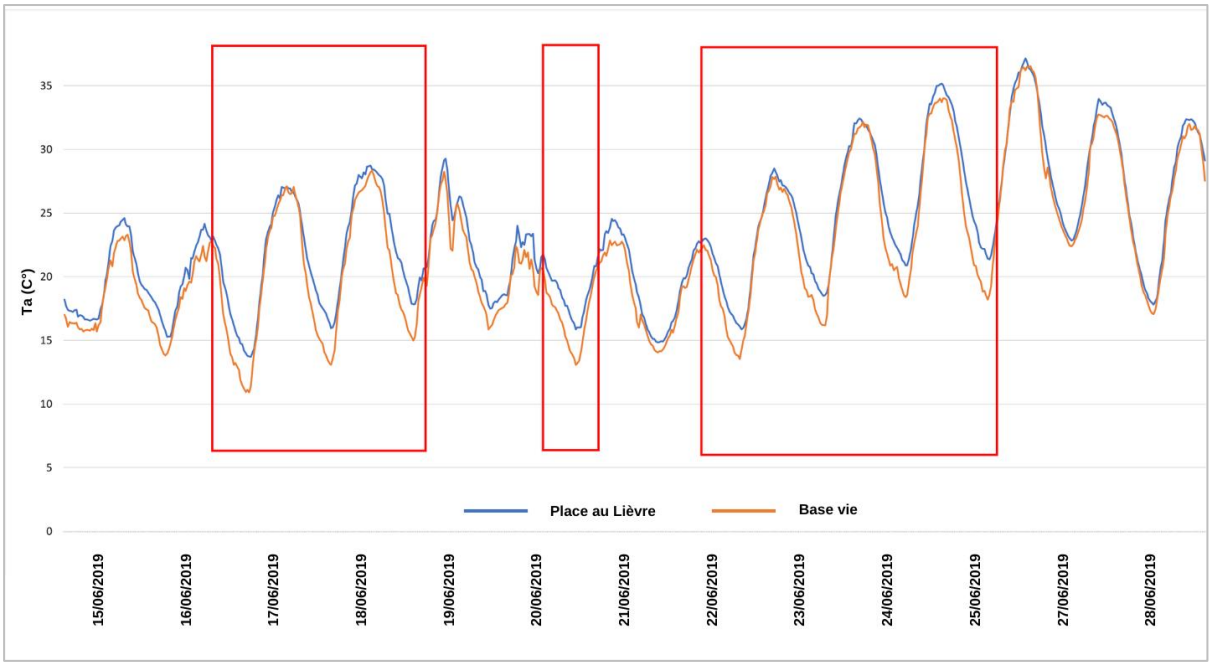


Figure 148 : Extrait des séquences de nuits choisies pour étudier la variabilité spatiale de l'ICU.

b) Construction de la base de données des variables explicatives

Pour appliquer la méthode de modélisation spatiale multicritère, une base de données comprenant 183 paramètres décrivant la topographie, l'occupation du sol et la morphologie urbaine a été établie. Le recours à ces descripteurs permet d'expliquer la distribution spatiale de l'ICU en analysant les caractéristiques paysagères du territoire étudié. Il peut s'agir, par exemple, d'établir la relation entre les données relatives à la température de l'air et la répartition du bâti ou des espaces végétalisés.

- Descripteurs relatifs à la topographie : nous avons téléchargé un modèle numérique de terrain (MNT) d'une résolution de 5 m à partir de la plate-forme de l'IGN. Ensuite, nous avons extrait les descripteurs à l'aide d'un SIG (*QGIS*). Parmi les divers descripteurs extraits figurent l'altitude, la pente, l'orientation, l'exposition et l'encaissement (différence entre le pixel considéré et l'altitude maximale dans le voisinage).

- Descripteurs relatifs à la couverture du sol : nous avons eu recours à la BD TOPO® 3.0 datant de 2019 fournie par l'IGN pour le territoire du département de la Moselle. Cette base de données nous renseigne de manière détaillée sur la superficie et la hauteur des bâtiments, la voirie, les étendues d'eau ainsi que les espaces recouverts de végétation. Néanmoins, cette base de données reste incomplète, car certaines données concernant la végétation (surfaces arborées et surfaces agricoles) et les surfaces imperméables sont manquantes. Pour combler ces lacunes, la base de données a dû être complétée manuellement dans un SIG à l'aide du logiciel *ArcGis* en s'appuyant sur une image *Landsat* datée de novembre 2020. Pour cela, nous avons élaboré une carte de l'occupation du sol à partir de cette image à l'aide de la méthode supervisée en identifiant les espaces agricoles, les zones herbacées, les surfaces gazonnées, les parkings, etc. Pour valider les données ainsi produites, nous avons fait appel à l'indice *Kappa*, dont le résultat s'est établi à plus de 0,9, attestant ainsi de la qualité et de la

fiabilité de ces données. Une fois ces données réunies, six classes de descripteurs ont été définies : emprise des bâtiments, hauteur des bâtiments, emprise des surfaces imperméables (routes et parkings), emprise des surfaces en eau, ainsi que deux classes de végétations : la végétation haute pour les surfaces arborées et la végétation basse pour les surfaces agricoles et gazonnées.

- Descripteur relatif à la morphologie urbaine : pour intégrer l'effet de canyon urbain dans la base de données, nous avons pris en compte le facteur SVF que nous avons calculé sur le territoire de l'EMM.

Chaque descripteur a été déterminé sur des grilles de 5 m dans neuf zones tampons autour de chaque point de mesure (50 m à 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m, 700 m, 800 m, 900m) (**Figure 149**) à l'aide du logiciel *Matlab* dans le but d'identifier sa dimension optimale du point de vue statistique (Amorim *et al.*, 2015 ; Foissard *et al.*, 2019).

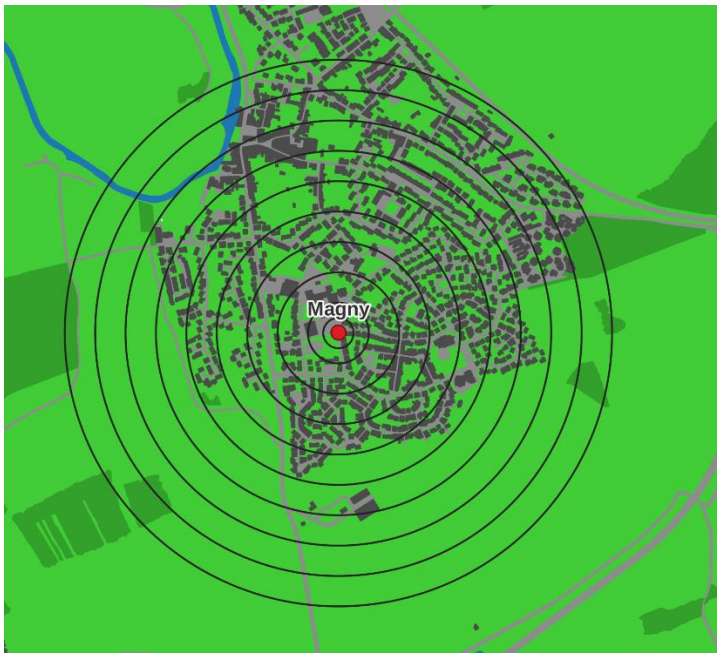


Figure 149 : Emprise des buffers concentriques servant à déterminer les parts d'occupation du sol sont calculées (station *Magny*).

6.4.2.2. Construction des modèles de régression

La méthode de régression linéaire multiple consiste à établir une relation entre des variables explicatives (géographiques, topographique, etc.) utilisées comme descripteurs et la variable à modéliser (températures, écarts de température, etc.). Elle s'exprime comme suit (Foissard, 2015) :

$$Y = a_1 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \cdots + a_n x_n + \mathrm{b} \quad (28)$$

avec,

Y : représente la variable à expliquer,

x_n : symbolise les variables explicatives utilisées comme prédicteurs,

a_n et b : sont les paramètres à déterminer dans le modèle.

La mise en place d'une régression linéaire multiple impose des précautions méthodologiques (prétraitement des données) et des contrôles statistiques pour garantir la validité des résultats (Cerrega, 1992 ; Madelin, 2004 ; Bonnefoy, 2013 ; Foissard, 2015; Hassani et al., 2022).

- Les données de la variable à expliquer doivent suivre une loi normale.
- Les variables explicatives doivent également suivre une loi normale. Dans le cas où cette condition ne serait pas respectée, une transformation doit être appliquée (exponentielle, logarithmique…). Les variables explicatives de notre base de données des descripteurs ont été vérifiées à l'aide du test de *Shapiro-Wilk*. Nous avons choisi d'utiliser le test de Shapiro, car il est plus adapté à un échantillon avec effectifs restreint ($n \leq 50$) (Mishra *et al.*, 2019).
- Afin de ne pas inclure dans la base de données les variables redondantes, il convient de s'assurer de leur indépendance. Pour cela, nous leur avons appliqué une analyse de multi-colinéarité à l'aide d'une matrice de corrélation de *Pearson*. L'une des deux variables pour lesquelles la paire présente un $R > 0,7$ ou $> -0,7$ dans la matrice ainsi a été supprimée pour ne conserver que les variables indépendantes.
- Le nombre optimal de variables pertinentes à conserver dans la régression est déterminant pour expliquer la variabilité. Foissard *et al.* (2019) et Brabant *et al.* (2023) ont conclu dans leurs études que les modèles avec trois co-variables représentent mieux l'ICU dans l'interpolation. En effet, la part de variabilité expliquée augmente jusqu'à un certain seuil au-delà duquel, chaque nouvelle variable n'apporte qu'une augmentation minime. De plus, les variables doivent être dans le même ordre de grandeur. Dans le cas contraire, une normalisation s'impose.
- Afin de détecter les éventuels biais du modèle, les résidus ont été analysés pour vérifier leur normalité, leur homoscédasticité et leur structuration dans l'espace.

Ensuite, nous avons automatisé la méthode de construction de la régression linéaire multiple (RLM) en utilisant l'outil *Regsubsets* (package *Leaps*) du logiciel *R* qui explore toutes les combinaisons possibles de descripteurs et les compare pour ensuite les classer selon des critères prédéfinis (Miller, 2002 ; Foissard *et al.*, 2019). Ensuite, nous avons eu recours au critère *Bayesian Information Criterion* (BIC) pour sélectionner le meilleur modèle de régression (au sens de la minimisation des erreurs). Ce critère consiste à comparer les modèles entre eux et à conserver celui avec la plus petite somme de carrés résiduels en maximisant la vraisemblance (Miller, 2002 ; Cornillon *et al.*, 2019).

La qualité des modèles de régression a été vérifiée sur la base de métriques d'erreur classiques (R^2 et $R^2aj > 0,80$) et d'erreurs quadratiques moyennes (RMSE <0,6 °C). Raj^2 tient compte de l'inflation de la variance liée au nombre de descripteurs. Ainsi, un Raj^2 plus faible indique généralement un modèle plus parcimonieux et potentiellement plus robuste (**Figure 150**). Enfin, les meilleurs modèles sont sélectionnés pour la réalisation de l'interpolation.

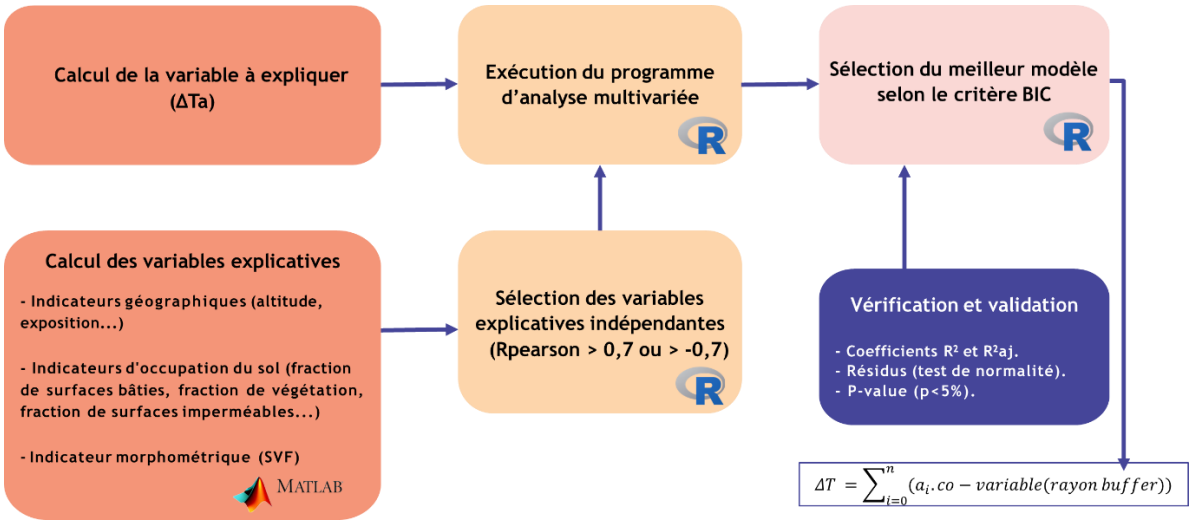


Figure 150 : Chaîne de traitement décrivant la méthodologie suivie pour établir le modèle de régression linéaire multiple (Hassani *et al.*, 2022).

6.4.2.3. Validation des modèles établis

Pour tester la stabilité de la paramétrisation des modèles statistiques et leur niveau de performance, une technique de rééchantillonnage a été appliquée. La méthode de validation croisée utilisée est celle des échantillons fractionnés ou *split-sample test*. Comme son nom l'indique, cette technique consiste à évaluer les performances d'un modèle en divisant l'ensemble du jeu de données en deux sous-ensembles : l'un sert à l'apprentissage et au calage du modèle, l'autre à sa validation.

Le partitionnement utilisé est du type 80/20 : 80 % des données sont utilisées pour la phase d'apprentissage, 20 % pour la phase de validation. À chaque itération, les données d'apprentissage et les données de validation sont tirées au hasard (**Figure 151**). Grâce à cette technique, un grand nombre de modèles a été ajusté (440 pour les modèles de 2019 et 1000 pour ceux de 2020). Les modèles sont évalués en calculant trois métriques : R^2, RMSE et MAE (biais de l'erreur).

Les résultats de la validation croisée indiquent que les variables explicatives ou co-variables qui composent les modèles « globaux » sont les co-variables les plus fréquentes dans les modèles ajustés sur les sous-ensembles d'apprentissage. Cela démontre une certaine stabilité des paramétrisations.

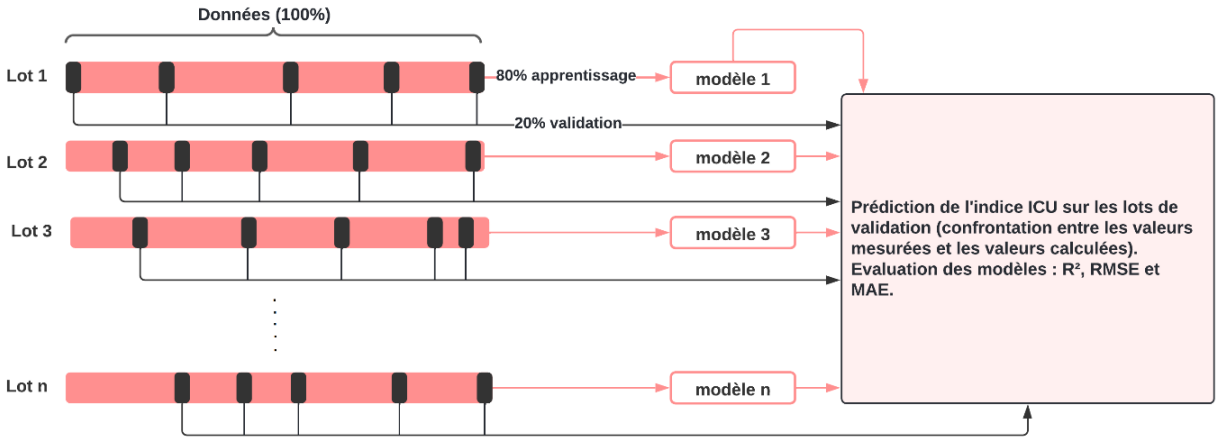


Figure 151 : Chaîne de traitement décrivant la méthodologie suivie pour le calage et la validation croisée du modèle d'interpolation spatiale (Hassani *et al.*, 2022).

Les modèles de régression finaux validés ont été implémentés à l'aide du module d'analyse spatiale d'*ArcGIS* afin de produire les cartes des ΔTa en utilisant les rasters des co-variables.

6.4.2.4. Cartographie de l'ICU

a) En période caniculaire

Les résultats des régressions multiples appliquées aux trois périodes caniculaires sont présentés dans le tableau 34. Dans les trois cas, le pourcentage de variance expliquée excède 80 %, ce qui est conforme à l'état de l'art (voir Foissard, 2015 ; Straub *et al.*, 2019 par exemple).

Tableau 34 : Synthèse des statistiques des modèles de régression linéaire multiple (Hassani *et al.*, 2022).

Type d'épisode	Modèles de régression		
	R²	**R² ajusté**	**RMSE (°C)**
Canicule juin 2019	0,82	0,80	0,42
	$\Delta Tu - r_{max,i}$ = -1,60+ 0,08*Bat_900+0,80*log (Sim_50)		
Canicule juillet 2019	0,85	0,82	0,54
	$\Delta Tu - r_{max,i}$ = -13,11 + 0,14* Bat_900+ 0,81*Altitude+ 1,16*log (Sim_50)		
Canicule août 2020	0,89	0,88	0,45
	$\Delta Tu - r_{max,i}$ = -6.43+ 0.14* Bat_900 + 0.08* Eau_800+ 0.03*Altitude		

Sans surprise, plusieurs co-variables se rapportant à l'environnement bâti (Bat_900 : fraction bâtie dans un rayon de 900 m et Sim_50 : surfaces imperméables dans un rayon de 50 m), à la présence d'eau (Eau_800 : surfaces en eau dans un rayon de 800 m) et à la topographie (Altitude) sont identifiées. La fraction bâtie dans une zone tampon de 900 m est commune aux trois modèles d'interpolation et traduit l'effet réchauffant (par rugosité et piégeage infrarouge) des parties de l'agglomération les plus densément bâties. La co-variable Sim_50 traduit un effet réchauffant plus localisé, lié au stockage d'énergie dans les surfaces artificialisées (routes, parkings et squares publics). Le signe de la corrélation est cohérent pour ces deux co-variables. En revanche pour les deux autres co-variables (Eau_800 et Altitude), le signe de la corrélation est contre-intuitif même si concernant l'eau, on sait que son effet rafraîchissant est faible en raison de son inertie thermique.

Les cartes produites (**Figure 152**) fournissent les principales tendances de l'ICU. La carte de la canicule de juin 2019 se démarque des deux autres : l'ICU en cœur de ville est inférieur à +3 °C et l'altitude n'est pas un déterminant de l'ICU, contrairement aux deux autres canicules. Sur les cartes de juillet 2019 et d'août 2020, l'ICU augmente au niveau des zones d'activités (situées au nord, à l'est et au sud-ouest de la carte) et sur les coteaux de la Moselle, ce qui se traduit par l'apparition de petits îlots de chaleur. L'influence de l'altitude est prégnante surtout sur la carte d'août 2020 : les écarts de température « ville-campagne » sont plus élevés lorsque l'altitude augmente et l'on voit apparaître des noyaux de chaleur en milieu forestier sur des points hauts (Mont Saint-Quentin par exemple). De petites poches de fraîcheur se dessinent dans les parcs et points d'eau, ainsi que dans les creux topographiques.

Notons que sur la carte de juin 2019, le résidu le plus important est celui de la sonde « *Bas de Vallières* » avec une valeur de -1,2 °C (**Figure 152**). Cette sonde est située au fond d'un vallon où coule le ruisseau de Vallières et se démarque des autres sondes puisque son écart n'est que de -0,4 °C avec la sonde de référence, soit 2 à 2,5 °C de moins que les sondes urbaines. Elle restitue donc une ambiance typiquement « rurale » en milieu suburbain. Nous supposons que durant la nuit, sur les versants du vallon, l'air au contact du sol se refroidit par conduction, devient plus dense et s'écoule gravitairement vers les points « bas » ou creux topographiques alimentant une légère brise de versant. Le modèle a du mal à détecter ces axes de fraîcheur provoqués par la topographie en creux, sans doute en raison d'une sous-représentation de ce phénomène dans les mesures. Cela se vérifie également pour juillet 2019 malgré l'intégration de la co-variable Altitude. En 2020, ce résidu « rentre dans la norme » grâce à un *pattern* qui est davantage structuré par la topographie. Pour les trois modèles, les résidus inférieurs à ±0,5°C concernent de 65 % des stations tandis que les résidus supérieurs à ±1,0 °C portent sur 4 % des stations (**Tableau 35**).

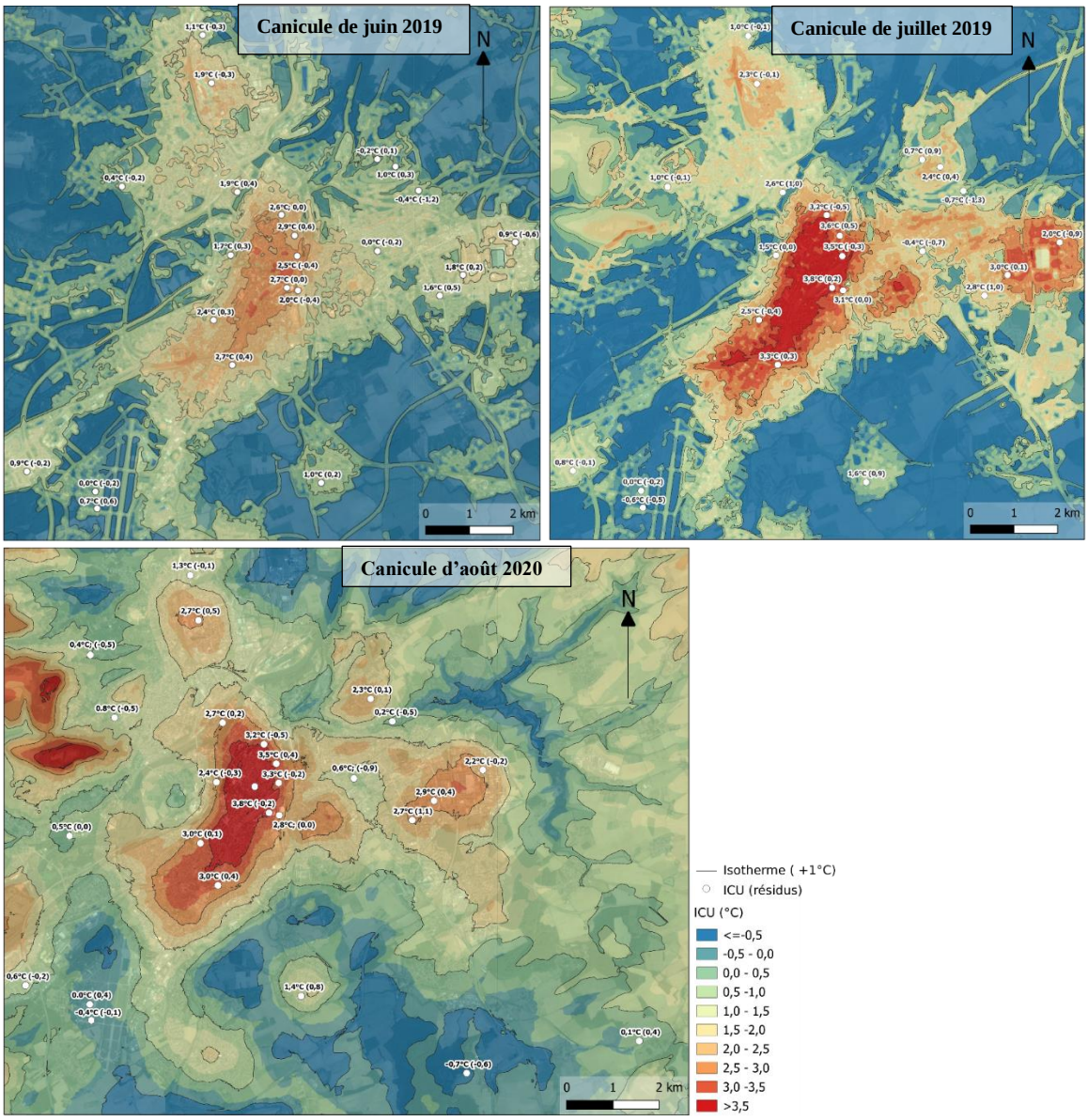


Figure 152 : Distribution des écarts de température lors des canicules de juin et juillet 2019 et de la canicule d'août 2020 (maille 5 x 5 m).

Tableau 35 : Fréquence des classes de valeurs des résidus observés par les stations au cours des périodes caniculaires étudiées.

Valeur de résidus (°C)	< ±0,5 °C	±0,5 °C - ±1 °C	> ±1 °C
Canicule juin	83%	13 %	4 %
Canicule juillet	65 %	30 %	4 %
Canicule août	70 %	26 %	4 %

b) En période de beau temps non-caniculaire

Les résultats des régressions multiples appliquées à la moyenne des écarts maximum observés au cours des deux phases de la nuit, sont présentés dans le tableau 36. Le pourcentage de variance expliquée des quatre modèles excède 75 % avec une RMSE < 0,8.

Tableau 36 : Synthèse des statistiques des modèles de régression linéaire multiple.

	Modèles de régression		
	R^2	**R^2 ajusté**	**RMSE (°C)**
Moyen des ΔTa_{max} (phase 1)	0,79	0,77	0,81
	$\Delta Tu - r_{moy\ max,i}$ = -1,6 + Bat_200 * 1,24e-3 + Eau_200 * 1,42e-3 + Sim_500 * 1,76e-4		
Moyen des ΔTa_{max} (phase 2)	0,78	0,75	0,65
	$\Delta Tu - r_{max,i}$ = -5,4 + Altitude * 2,19e-2 + Bat_800 * 1,58e-4 + Eau_400 * 2,86e-4		

Les co-variables qui composent les deux modèles sont de la même nature que celles des modèles établis pour les trois périodes caniculaires (altitude, faction du bâti, fraction de surfaces imperméables et fraction de surfaces en eau). Les variables présentes dans les deux modèles sont la fraction du bâti pour des zones tampons dans des rayons de 200 m et 800 m et la fraction de surfaces en eau pour des zones tampons de 200 m et 400 m. Les variables Altitude et fraction de surfaces imperméables (zone tampon de 500 m) sont présentes chacune dans un modèle.

c) Par phase de rafraîchissement nocturne

Les cartes de la figure 153 représentent la moyenne des écarts maximum, avec les écarts observés lors de la phase 1 à gauche (du coucher de soleil à 01h00), et les écarts observés lors de la phase 2 (de 01h00 au lever du soleil) à droite. Les résultats mettent en évidence la variabilité spatiale de l'ICU selon ces phases. La moyenne des écarts pendant la phase 1 varie de -2 à +5,4 °C, valeurs établies respectivement par les stations *Chesny* et *Place au Lièvre*. En revanche, pendant la phase 2, les écarts varient de -1,7 à +4,3 °C pour les mêmes stations. Il y a donc, entre les deux phases, un ΔTa de +1,1 °C pour la station *Place au Lièvre*. De même, les autres stations du réseau ont également enregistré des écarts plus importants lors de la phase 1.

L'analyse des résidus révèle que, pendant la phase 1, 37 % des stations présentent un écart entre la température observée et la température modélisée inférieur à ±0,5 °C, tandis que ce pourcentage s'élève à 52 % pendant la phase 2 (**Tableau 37**).

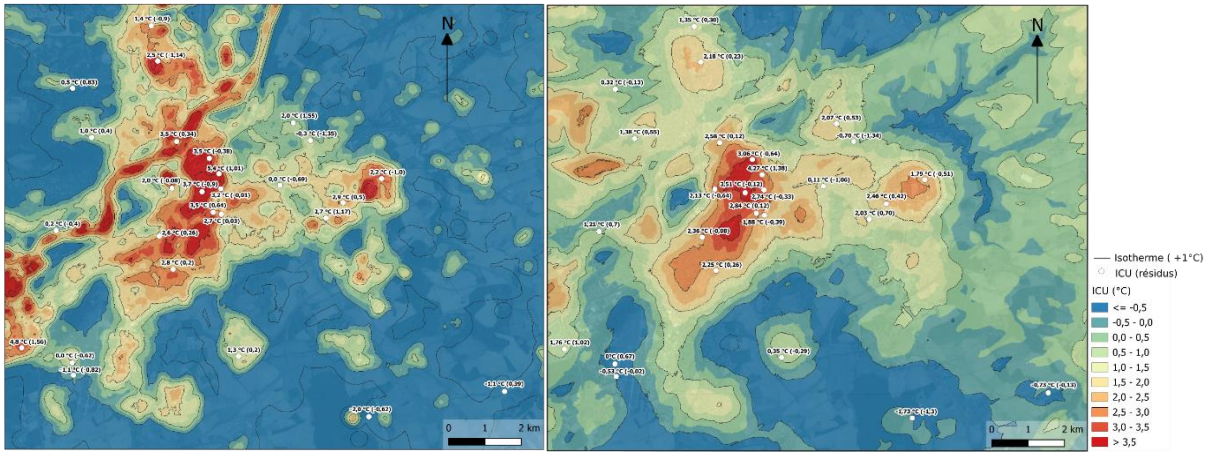


Figure 153 : Distribution de la moyenne des écarts maximum lors des deux phases (maille 5 x 5 m). Phase 1 à gauche et phase 2 à droite.

Tableau 37 : Fréquence des classes de valeurs des résidus observés par les stations au cours des deux phases.

Valeurs de résidus (°C)	< ±0,5 °C	±0,5 °C- ±1 °C	> ±1 °C
Phase 1	37 %	41 %	22 %
Phase 2	52 %	37 %	11 %

Ces cartes permettent d'identifier un îlot de chaleur intense couvrant la totalité des centres-villes de Metz et de Montigny-lès-Metz. On distingue également de petits noyaux de chaleur couvrant les quartiers limitrophes ainsi que les zones d'activités périphériques. Une différence notable entre les deux phases de la nuit réside dans le fait que, lors de la phase 1, les surfaces en eau présentent des températures encore élevées, mettant ainsi en évidence l'effet adoucissant de l'eau sur l'air lié à l'inertie thermique de l'eau. Ces résultats corroborent les observations effectuées concernant les températures de surface sur la base des cartes *ECOSTRESS*, comme évoqué dans la section **4.4.5.2.**

Par ailleurs, la distribution spatiale des écarts de température lors de la phase 2 est similaire à celle observée au cours de la période caniculaire d'août 2020. On observe d'ailleurs la même erreur au niveau du Mont Saint-Quentin.

Synthèse

Le déploiement du réseau REMTHAM a permis, pour la première fois dans l'agglomération messine, d'évaluer les gradients de température nocturne dans la canopée urbaine à différents pas de temps. En dépit d'un échantillonnage de données assez limité, nous avons pu mettre en évidence un excédent thermique nocturne de l'ordre de +3,7 °C en moyenne sur le territoire de l'EMM en été, atteignant un maximum de +7,6 °C. L'ICU messin ainsi identifié est un phénomène typiquement estival, observé préférentiellement les nuits calmes succédant à des journées radiatives. Il semble légèrement s'intensifier en début de période caniculaire puis stagner, mais cela demande à être confirmé.

En outre, nous avons pu établir, à l'aide d'une approche multicritère, des relations statistiquement robustes entre les ΔTa calculés à partir de données de température et des descripteurs physiques de l'environnement à l'échelle de l'agglomération messine. Celles-ci sont principalement liées aux caractéristiques de l'environnement bâti à l'échelle locale (la densité du bâti et la présence de surfaces imperméables). Cette paramétrisation est cohérente pour une agglomération de taille moyenne. Dans tous les cas testés, la régression sur des sous-ensembles de sondes permet d'expliquer plus de 75 % de la variabilité spatiale des ΔTa et les niveaux d'erreur en validation fractionnée sont conformes à l'état de l'art. La paramétrisation des modèles de régression est assez stable, ce qui prouve que les sites de mesure ont été bien choisis et que l'information apportée par les sondes reste pertinente même lorsque le réseau de mesure est dégradé. Si les relations entre les ΔTa et les co-variables se rapportant au milieu urbain paraissent réalistes (i.e. physiquement interprétables), en revanche, lorsque l'altitude est détectée dans les modèles, son effet parait contre-intuitif. La modélisation permet de restituer l'effet d'une inversion thermique dans les vallons, mais tend probablement à surestimer les ΔTa sur certains points hauts de la topographie (dépassant 250 m) a fortiori lorsque ceux-ci sont boisés. L'absence de points de mesure dans ces sites ne nous permet pas à ce stade de nos travaux de formuler un avis définitif. Ceux-ci montrent la difficulté de modéliser statistiquement l'ICU lorsque le terrain n'est pas plat et que des effets topo-climatiques sont à prendre en compte. Les cartes des ΔTa produites grâce à l'automatisation des calculs montrent toutes des structures spatiales communes : le cœur de ville où le phénomène d'ICU est le plus sensible, les zones d'activités et les surfaces en eau qui restent chaudes en début de nuit et l'armature urbaine (petites villes périphériques). Ces différences mettent en évidence le fait que la cartographie de l'ICU n'est pas figée dans le temps (influence des conditions atmosphériques et des écoulements d'air locaux) et dépend de la stratégie d'échantillonnage.

Les limites de l'échantillonnage des données (seulement 28 points d'observation) incitent à la prudence vis-à-vis des résultats qui rappelons-le, n'ont pas la prétention d'estimer avec précision la valeur exacte de l'ICU en tout point du territoire, mais plutôt d'esquisser les grands traits du phénomène. Il serait ainsi pertinent, dans la perspective d'améliorer et de renforcer l'analyse de l'ICU messin, de densifier le réseau de mesure dans certains quartiers qui ne sont pas encore échantillonnés voire de prendre en compte des données satellitaires de Ts dans les variables explicatives. Une première tentative a été présentée à la 11e conférence ICUC (Hassani *et al.*, 2023b).

Un projet symétrique sur le territoire du GC aurait été trop ambitieux dans le cadre de cette thèse. Nous espérons toutefois que notre expérience sur le terrain-pivot de l'EMM constituera une source d'inspiration pour le GC.

Chapitre 7 : L'îlot de chaleur nocturne à l'échelle du quartier

Si l'intérêt des réseaux de capteurs fixes est indéniable pour l'observation du cycle journalier et des variations hebdomadaires, saisonnières et pluriannuelles de l'ICU, les données recueillies ne couvrent que quelques points localisés. Elles ne renseignent pas de manière détaillée sur la distribution spatiale des Ta dans l'ensemble de l'aire urbaine étudiée. Des données complémentaires sont alors nécessaires pour des analyses précises à l'échelle micro qui est l'échelle spatiale la plus pertinente pour identifier les principaux foyers de vulnérabilité (Romero Rodríguez *et al.*, 2020). Pour cette raison, des méthodes de mesures embarquées ont été proposées pour l'observation de variables climatiques dans des espaces de petite taille. Le principe est de planifier puis d'effectuer un itinéraire à l'intérieur et aux abords d'une agglomération à pied ou en utilisant une plateforme terrestre en mouvement instrumentée de capteurs mesurant les variables climatiques tout au long du trajet -nommé « transect »- à intervalle de temps régulier (Gartland, 2008 ; Heusinkveld *et al.*, 2014 ; Leconte, 2014).

Aussi, afin de d'approfondir notre diagnostic de l'ICU messin et de combler le déficit de données sur notre terrain casablancais -qui ne dispose pas d'un réseau de capteurs fixes-, tout en obtenant un aperçu de l'amplitude de l'ICU à grande échelle, nous avons recours, dans ce chapitre, à l'approche basée sur des campagnes de mesures itinérantes le long de transects urbains prédéterminés. Cependant, pour que de telles mesures soient représentatives des conditions rencontrées en ville, il convient de caractériser la diversité morphologique de nos terrains d'étude pour mettre en relation les températures mesurées et les typologies urbaines. Ainsi, dans une première partie, l'amplitude de l'ICU et l'influence du tissu urbain sur le climat local seront examinées. Ensuite, nous procéderons au découpage de nos deux terrains d'étude en zones climatiques, qui serviront de patron pour l'analyse des distributions de températures au sein de la couche de canopée urbaine.

7.1. Principe de la méthode de mesure par transects mobiles **223**

7.2. Protocole d'acquisition des données **224**

7.3. Acquisition des données **228**

7.4. Analyse des résultats **232**

Synthèse **254**

7.1. Principe de la méthode de mesure par transects mobiles

Grâce à son faible coût par rapport à d'autres alternatives telles que l'installation de stations météorologiques et sa facilité de réalisation, de nombreuses études ont eu recours à la méthode des mesures mobiles pour évaluer l'ICU à l'échelle d'une aire urbaine. Foissard (2015) rapporte que dès 1927, une première campagne avait été réalisée à Vienne en Autriche par Wilhelm Schmidt à l'aide d'une voiture équipée d'un thermomètre à mercure. Un peu plus tard, en 1929, Albert Peppler a reproduit la même démarche à Karlsruhe en Allemagne. Après cela, d'autres études ont utilisé et amélioré cette méthode pour étudier l'ICU dans les villes d'Europe et au Canada. Toutefois, ce n'est qu'à partir des années 1950, que les études de ce phénomène à l'aide de mesures mobiles par transects ont fait l'objet de publications scientifiques (Sundborg, 1951 ; Chandler, 1962 ; Oke, 1973).

Les capteurs thermiques sont généralement fixés sur le toit de plateformes en mouvement. La différence de température de base entre la zone urbaine et sa zone périurbaine ou rurale environnante est ensuite calculée. Par exemple, une étude par mesures mobiles, menée à Tokyo en 1996 à l'aide de tramways électriques, a révélé l'existence de trois « falaises » (c'est-à-dire un gradient de température abrupt à la frontière milieu urbain/milieu rural) dans l'îlot de chaleur de la métropole de Tokyo (Yamashita, 1996). Néanmoins, la plupart des études fondées sur des mesures mobiles ont été réalisées au moyen de voitures instrumentées ou en utilisant des vélos, par exemple à Nancy (France) (Leconte, 2014), à Dijon (France) (Emery *et al.*, 2021), à Hong Kong (Fung *et al.*, 2009), à Brno (République Tchèque) (Dobrovolný et Krahula, 2015), à Sfax (Tunisie) (Charfi et Dahech, 2018), à Rotterdam (Pays-Bas) (Heusinkveld *et al.*, 2010), à Shenzhen (Chine) (Liu *et al.*, 2017a) ou encore, dans l'Ohio (Etats-Unis) (Rajkovich et Larsen, 2016).

Les mesures mobiles présentent l'avantage de pouvoir être réalisées à tout moment du jour et de la nuit, et peuvent atteindre une haute densité spatiale en termes de points de mesure. Il est alors possible de mener une étude fine de la distribution spatiale et de la variabilité des Ta au sein de la canopée urbaine à l'échelle de quelques dizaines de mètres. La quasi-totalité des rues de l'agglomération peut théoriquement être parcourue, ce qui permet de couvrir une très grande partie de l'aire urbaine en plusieurs passages si c'est à vélo ou à pied. De plus, cette approche présente un coût financier plus modeste et requiert des investissements beaucoup plus faibles que pour les mesures fixes.

Néanmoins, cette méthode connaît également certains écueils. D'une part, l'usage d'une voiture présente le risque d'obtenir des mesures de température erronées à cause des émissions thermiques issues du moteur et du pot d'échappement ; et les voitures ne sont pas capables de rouler partout en ville (par exemple, elles ne peuvent pas accéder aux rues piétonnes ou étroites). À cela, il faut ajouter le fait que les mesures se déroulent systématiquement au-dessus d'une surface imperméable, ce qui dans certains cas, n'est pas représentatif du milieu à l'échelle locale (par exemple les zones non urbanisées). Les vélos représentent alors une alternative faisable et peu coûteuse, mais ne sont pas adaptés pour des agglomérations de taille importante. Par ailleurs, en utilisant un seul véhicule ou capteur, il n'est pas possible de relever les Ta de

façon synchrone en différents points de l'agglomération. En effet, les trajets ayant une durée moyenne supérieure à 1 heure, cela engendre une variabilité temporelle qui ne peut pas être négligée, puisque la température de l'air locale peut varier de quelques degrés entre le début et la fin du trajet (Leconte, 2014).

7.2. Protocole d'acquisition des données

7.2.1. Dispositif de mesure utilisé

7.2.1.1. Capteur météorologique

Pour l'acquisition des données, comme nous disposions d'un budget limité et que nous souhaitions réaliser nos mesures sur les deux terrains d'étude, nous avons utilisé une mini-station météorologique ***Kestrel 5500*** (**Figure 154**) dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau en **Annexe 56**. Cette station est équipée de plusieurs capteurs enregistrant la température, l'humidité relative, le vent (vitesse et direction) et la pression atmosphérique. La précision de ces capteurs est de ±2 % pour l'humidité, et va de 0,5 à 0,9 °C pour la température. Les données acquises sont ensuite gardées en mémoire puis téléchargées à l'aide de l'application ***Kestrel LINK.***

Cette station a été choisie car compacte, robuste et légère, elle est transportable et peut être facilement fixée sur un mât. De plus, son prix d'acquisition est relativement modéré (~600 € TTC). Elle fournit un affichage en temps réel des paramètres météorologiques sur écran et sur smartphone par liaison *bluetooth*. Notons que les capteurs de cette station ne sont pas abrités (sonde externe) à la différence des sondes *HOBO* constituant le réseau REMTHAM.

Par ailleurs, nous avons également ajouté un système de positionnement global (GPS) à notre équipement afin de géolocaliser précisément chacun des points de mesure météorologique. L'appareil utilisé est un récepteur GPS ***Oregon™ 600*** de marque *Garmin* (**Figure 154**) doté d'une capacité de mémoire de 1,5 Go. Il enregistre la trace GPX, la distance parcourue et la vitesse de déplacement.

Les deux appareils (mini-station météorologique et récepteur GPS) ont été synchronisés afin d'effectuer une mesure toutes les 5 secondes : pendant que la station *Kestrel* mesure les paramètres météorologiques, le récepteur GPS enregistre la géolocalisation de chacun des points de mesure. Ce dispositif a été fixé sur un mât à environ 2 mètres du sol afin de limiter les perturbations thermiques.

Figure 154 : à gauche la station *Kestrel 5500* et à droite le GPS *Oregon*^{TM} *600*.

7.2.1.2. Vecteurs mobiles

Pour recueillir les données, nous avons utilisé des vecteurs différents dans nos deux terrains d'étude pour tenir compte de la configuration locale. Les campagnes de mesure au sein de l'EMM ont été effectuées à l'aide d'un vélo doté de racks avant et arrière. Le mât (monopode) instrumenté est installé au niveau de la roue arrière du vélo (**Figure 155**). En revanche, du fait de la taille beaucoup plus importante de la métropole casablancaise, les campagnes de mesures y ont été menées à l'aide d'une voiture avec laquelle nous avons roulé à des vitesses modérées pour que les données enregistrées par la mini-station météorologique soient représentatives de chaque point enregistré par le GPS. Toutefois, l'accès à certaines zones n'était pas possible avec un véhicule (rues piétonnes ou étroites, parcs, jardins publics et cours intérieures des lotissements, *etc*.). Dans ces endroits, les mesures ont dû être effectuées à pied.

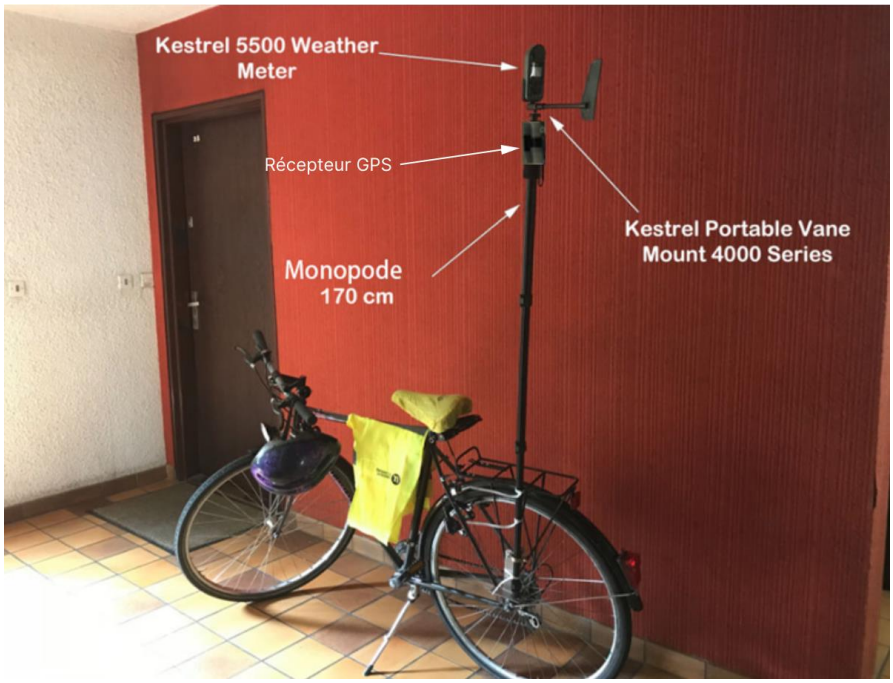


Figure 155 : Vélo équipé de la mini-station météorologique *Kestrel 5500* utilisé pour les mesures mobiles sur le territoire de l'Eurométropole de Metz.

7.2.2. Définition des itinéraires

Bien qu'un nombre important de travaux ont étudié l'ICU de la canopée urbaine par le biais de mesures mobiles, les études ont retenu des critères différents pour concevoir les itinéraires à suivre (**Tableau 38**). En effet, comme énoncé dans le chapitre 1, la formation de l'ICU dépend de nombreux paramètres qui sont parfois antinomiques, ce qui signifie que concevoir l'itinéraire en fonction uniquement de certaines variables pourrait empêcher de traverser les espaces réellement représentatifs du terrain d'étude. La définition du transect optimal ne doit donc pas reposer uniquement sur la conduite à travers des espaces aux caractéristiques différentes.

Tableau 38 : Méthodes utilisées pour concevoir les transects mobiles dans des études ayant recours à cette méthode de mesure.

Méthodes	Références
Les itinéraires ont été choisis de manière à traverser divers types d'occupation du sol, en suivant approximativement une ligne droite et en passant à une distance raisonnable des stations météorologiques locales.	(Sun *et al.*, 2009)
Différents itinéraires ont été sélectionnés pour traverser des zones urbaines, périurbaines et rurales.	(Busato *et al.*, 2014)
Les itinéraires ont été définis de façon à couvrir de nombreux types de zones climatiques.	(Leconte *et al.*, 2015a)
Trois itinéraires ont été sélectionnés pour traverser l'agglomération urbaine de la périphérie vers le centre-ville.	(Foissard, 2015)
Un itinéraire fixe a été sélectionné pour couvrir une variété de constructions et un parc urbain.	(Clay *et al.*, 2016)
Des pistes cyclables ont été sélectionnées avec une variété de couvertures terrestres, de topographies et de types de pavage.	(Rajkovich et Larsen, 2016)
Deux itinéraires différents ont été empruntés pour couvrir différents espaces urbains de l'hypercentre de Paris en passant par des environnements végétalisés et le long des berges de la Seine.	(Sakhy, 2016)
Les itinéraires ont été sélectionnés en croisant des transects horizontaux et verticaux pour couvrir les principales parties de Delhi.	(Yadav et Sharma, 2018)
Deux itinéraires est-ouest et nord-sud ont été sélectionnés dans le but de prendre en compte un large éventail de types d'utilisation et d'occupation du sol.	(Dorigon et Amorim, 2019)
Un seul itinéraire élaboré en englobant une variété de surfaces et d'espaces, allant des zones denses telles que le centre-ville aux espaces végétalisés, principalement situés en périphérie.	(Emery *et al.*, 2021)

Aussi, la conception de nos transects a été faite avec l'idée de reproduire au mieux les conditions rencontrées sur le terrain en reflétant la diversité morphologique de l'environnement urbain. Pour cette raison, nos critères de sélection des espaces à parcourir impliquaient que les relevés devaient :

- Couvrir le plus grand nombre possible de zones climatiques (LCZ) par session de mesure afin de pouvoir les comparer entre elles en termes de comportement thermique (***cf.* 7.4.3.4**).
- Emprunter différents types de voiries (boulevards, avenues, rues, ruelles…).
- Traverser une diversité d'espaces publics (canyons urbains, squares, parcs, jardins…).

Cependant, afin de ne pas augmenter significativement la durée de réalisation des sessions de mesure, toutes les zones climatiques (LCZ) -définies ci-dessous- n'ont pas été parcourues en détail. En effet, du fait de l'évolution temporelle des Ta, la mesure en début de session n'est pas identique à celle de fin de session. Il a donc été nécessaire de retenir des durées de parcours réduites afin de ne pas enregistrer un écart de température trop important entre le début et la fin de la session de mesure. En outre, le facteur topographique a été pris en considération lors de l'élaboration des parcours de mesure pour évaluer l'impact de l'altitude sur la baisse de température[45].

Pour l'EMM, cette sélection s'est basée sur nos connaissances de l'aire urbaine. À Casablanca (Hassani *et al.*, 2019), elle s'est basée sur une mission de terrain réalisée le 21 et le 22 février 2019, au cours de laquelle plusieurs quartiers ont été visités afin de sélectionner les espaces urbains à parcourir (**Figure 156**).

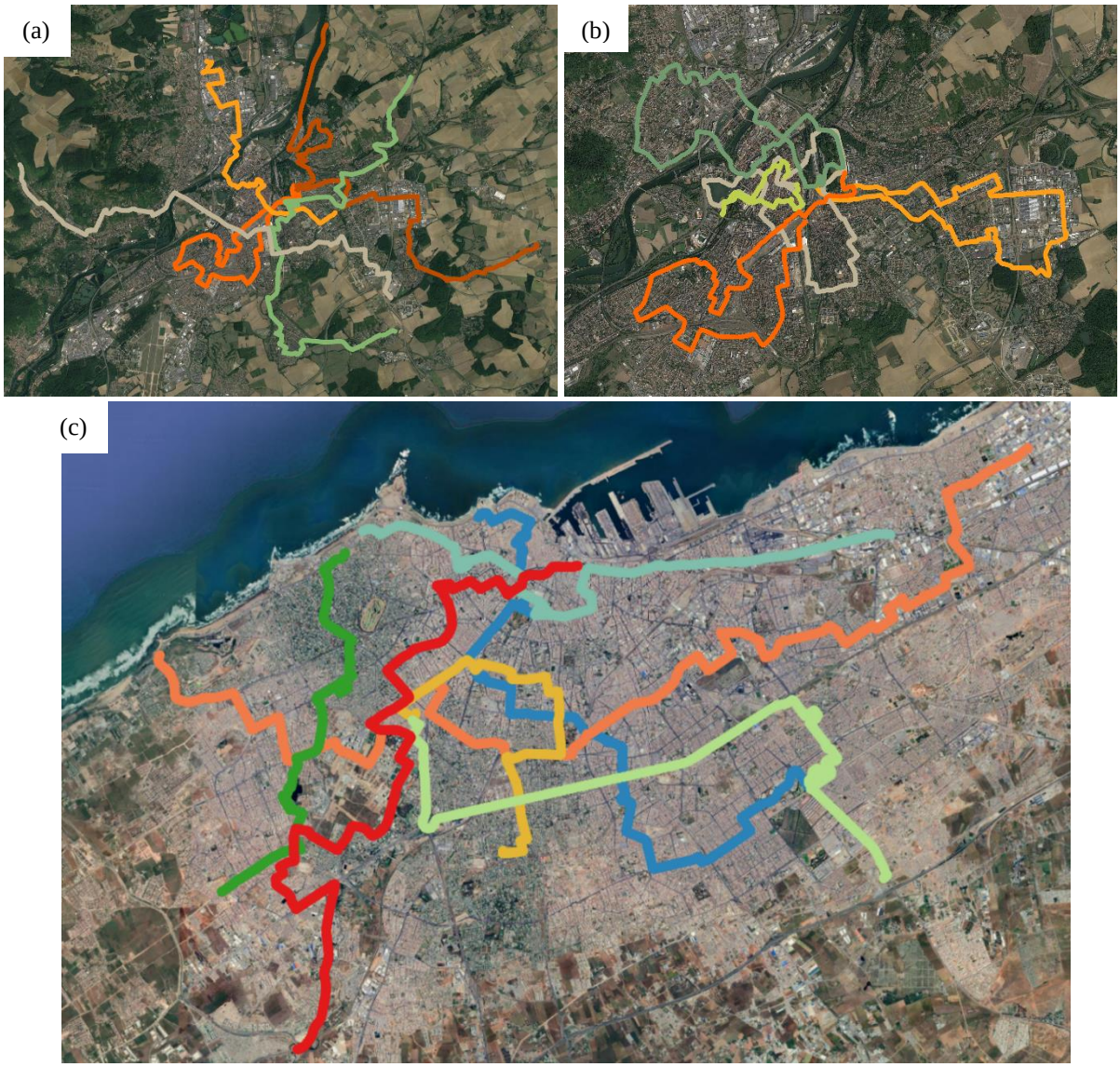


Figure 156 : (a) et (b) les itinéraires parcourus au sein de l'EMM, (c) les itinéraires parcourus à Casablanca lors des campagnes de mesures mobiles.

[45] Nous avons appliqué un gradient thermique vertical moyen de l'atmosphère est de l'ordre de -0.6 °C pour 100m de dénivelé positif.

7.3. Acquisition des données

7.3.1. Campagnes de mesure sur les deux terrains d'étude

Les sessions de mesures mobiles ont été menées en période estivale en début de nuit. Cette fenêtre d'intervention a été choisie sur la base des recherches bibliographiques effectuées durant le travail de préparation indiquant que l'ICU atteint son amplitude maximale après le coucher du soleil, soit à un moment où les bâtiments et les revêtements urbains continuent à restituer la chaleur stockée pendant la journée (Oke, 1987 ; Holmer *et al.*, 2007 ; Radfar, 2012). Au total, 12 sessions de mesure ont été menées au sein de l'EMM au cours des étés 2019 et 2020, et 7 à Casablanca au cours des étés 2019 et 2022 (**Tableau 39**). Précisons que la fermeture des frontières marocaines suite à la survenance de la pandémie de COVID-19, nous a empêchés de refaire des campagnes en 2020 et en 2021.

Les conditions météorologiques sur les cinq jours précédant chaque session de mesure sont fournies par les stations météorologiques *Metz-Frescaty* de Météo-France et *Aéroport Mohammed V* de Maroc Météo. Les mesures ont été effectuées à la faveur de conditions atmosphériques anticycloniques qui correspondent à un type de temps favorisant une forte amplitude de l'ICU (Leconte, 2014 ; Foissard, 2015a). À Casablanca, les températures ont généralement oscillé entre 20 et 24 °C avec des taux d'humidité relative allant de 50 à 80 % et des vitesses de vent entre 3 et 8,5 m/s ; tandis qu'à Metz, les températures ont oscillé entre 27 et 35 °C avec des taux d'humidité relative allant de 25 et 60 % et des vitesses de vent entre 1 et 4 m/s.

Avant chaque session, nous avons commencé par exposer les instruments de mesure environ 10 minutes aux conditions extérieures pour assurer la mise en équilibre des capteurs avec l'air ambiant. La distance parcourue dans chaque itinéraire variait de 9,7 à 32,3 km pour le GC ; et de 5,1 à 25 km pour l'EMM. Étant donné que les données ont été recueillies toutes les 5 secondes, la distance moyenne entre les points de mesure était de 89 à 133 m.

Enfin, certaines sessions ont dû être abandonnées en cours de route soit à cause de dysfonctionnements des instruments avec par exemple, une panne du récepteur GPS, soit à cause de problèmes techniques tels qu'une crevaison d'un pneu de vélo. Les relevés effectués lors de ces sessions ont été écartés de la base de données traitées dans le cadre de ce travail.

Tableau 39 : Récapitulatif des sessions de mesures mobiles réalisées dans les deux terrains étudiés.

Date	Terrain d'étude	Coucher de soleil	Début de session	Fin de session	Durée de la session (min)	Longueur de l'itinéraire (km)
26/06/2019	EMM	21h44	22h20	23h47	87	5,1
12/07/2019	Casablanca	20h42	22h23	23h52	89	32,3
13/07/2019	Casablanca	20h42	22h10	22h56	38	11,3
16/07/2019	Casablanca	20h41	22h18	23h10	52	16,4
17/07/2019	Casablanca	20h40	21h20	22h40	80	18,6
23/07/2019	EMM	21h27	21h30	22h45	75	9 ,8
24/07/2019	EMM	21h26	21h30	23h15	105	13,4
25/07/2019	EMM	21h25	21h30	23h06	96	13,4
26/07/2019	EMM	21h24	21h30	23h30	120	13,8
01/08/2020	EMM	21h15	21h41	22h15	34	6
06/08/2020	EMM	21h07	21h13	22h09	56	13
07/08/2020	EMM	21h05	21h10	22h35	85	13,8
08/08/2020	EMM	21h03	21h13	22h47	94	13,4
09/08/2020	EMM	21h01	21h11	22h14	63	21,7
10/08/2020	EMM	21h00	21h10	22h14	64	19,9
11/08/2020	EMM	20h58	21h25	22h31	66	25
22/06/2022	Casablanca	20h44	22h19	23h14	55	20,1
23/06/2022	Casablanca	20h44	21h10	21h45	95	18
24/06/2022	Casablanca	20h44	21h30	22h05	35	9,7

Tableau 40 : Conditions météorologiques lors des campagnes de mesure mobiles (stations Metz Frescaty et Aéroport Mohammed V).

Date	Terrain d'étude	Température (°C)	Humidité relative (%)	Vitesse du vent (m/s)	Pression (hPa)
26/06/2019	EMM	27,5	62	1,5	1020,0
12/07/2019	Casablanca	21	67	7	1017,0
13/07/2019	Casablanca	24	80	4,7	1017,0
16/07/2019	Casablanca	20	72	8,5	1016, 0
17/07/2019	Casablanca	21	60	7	1017,0
23/07/2019	EMM	28,7	38	2,5	1015,7
24/07/2019	EMM	32,0	37	2,5	1013,7
25/07/2019	EMM	32,0	31,3	1	1010,8
26/07/2019	EMM	28,5	49	1,5	1010,8
01/08/2020	EMM	29,4	44	4	1007,1
06/08/2020	EMM	30	35	3,8	1018,0
07/08/2020	EMM	32,9	32	3	1016,8
08/08/2020	EMM	35,3	26	2,2	1016,5
09/08/2020	EMM	35,1	25	3	1013,0
10/08/2020	EMM	34,5	25	3,6	1011,8
11/08/2020	EMM	33,5	35	2,5	1012,6
22/06/2022	Casablanca	22	48	5,5	1016,0
23/06/2022	Casablanca	22	55	3	1019,0
24/06/2022	Casablanca	22	56	3	1017,0

7.3.2. Traitement des données recueillies

7.3.2.1. Correction des points de mesures

Pour éviter que les dégagements de chaleur issus du trafic routier influencent les Ta enregistrées par notre capteur et faussent les mesures, seules les mesures effectuées lorsque notre vecteur (vélo ou voiture) était en mouvement ont été retenues dans le jeu de données. En effet, les études sur le sujet montrent que c'est lorsque le vecteur est à l'arrêt que l'apport thermique du trafic routier est le plus intense (Leconte, 2014). Les relevés effectués en situation d'arrêt total (par exemple aux feux de circulation) ou en situation de ralentissement important ont donc été écartés. Sur la base des travaux de Leconte (2014), une vitesse seuil a été définie à 15 km/h, ce qui apparaît comme un bon compromis entre la suppression des pics de température ponctuels dus au trafic et la conservation d'un nombre de points de mesure élevé pour chaque session.

Par ailleurs, certaines parties des deux villes -en particulier les espaces où la densité urbaine est la plus élevée- peuvent engendrer des approximations lors de la géolocalisation des points de mesure, car les rues-canyons (faible SVF) peuvent masquer le signal GPS. La localisation de chaque point a donc été vérifiée et corrigée, au besoin, grâce à un système d'information géographique (SIG), afin de s'assurer par exemple, qu'il ne se situe pas sur un toit de bâtiment (**Figure 157**).

Figure 157 : Erreur de positionnement géographique des points de mesures en ville liée à une rue-canyon (Boulevards Ibnou Sina et Oued Laou à Casablanca).

7.3.2.2. Correction temporelle des Ta

Étant donné que les données atmosphériques ne sont pas relevées de façon synchrone sur les différents points de mesure puisqu'un seul équipement de mesure est utilisé dans notre étude, la Ta locale peut varier de quelques degrés entre le début et la fin du trajet. En effet, les trajets ayant une durée moyenne comprise entre 60 et 90 minutes, cela engendre une variabilité

temporelle qui ne peut pas être négligée. Cet effet aurait pu être évité en utilisant plusieurs vecteurs équipés pour établir des mesures en simultané à différents points de la ville, mais cela requiert l'intervention d'une équipe de plusieurs personnes pour mener les campagnes de mesures, et aurait eu un coût financier important. Par conséquent, pour pallier le problème, un recalage temporel a été effectué a posteriori en s'appuyant sur les températures de référence à l'heure du début et de la fin des transects. L'objectif de cette correction est de traiter les données de chaque point comme si elles avaient été enregistrées au même moment, afin de pouvoir établir une comparaison entre elles.

Différentes références de température sont considérées en fonction de l'étude. Par exemple, Liu *et al.* (2016), (2017b) ; Tsin *et al.* (2016) ont utilisé des données simultanées provenant de stations météorologiques rurales stationnaires pour les corrections temporelles. Cependant, du point de vue des auteurs de ces études, les transects mobiles devraient commencer et se terminer au même endroit afin de pouvoir comparer la différence de température dans le domaine d'étude aux deux moments. De cette façon, il y a une prise en compte plus précise des taux de refroidissement réels dans la zone, car ils sont plus faibles en milieu urbain par rapport au milieu rural où se trouvent les stations météorologiques. Néanmoins, afin de ne pas nous limiter dans la définition de nos transects, nous avons fait le choix de recaler nos séries de température au début des parcours en supposant une dérive linéaire négative de la température (**Figure 158**). L'équation du recalage temporelle s'exprime comme suit (Leconte, 2014) :

$$T_{air,\,corrigée} = T_{air,\,mesurée} - \tau \times (t_{début} - t_{mesure}) \qquad (29)$$

avec,

$$\tau = (T_{air,\,fin} - T_{air,\,début})/(t_{fin} - t_{début}) \qquad (30)$$

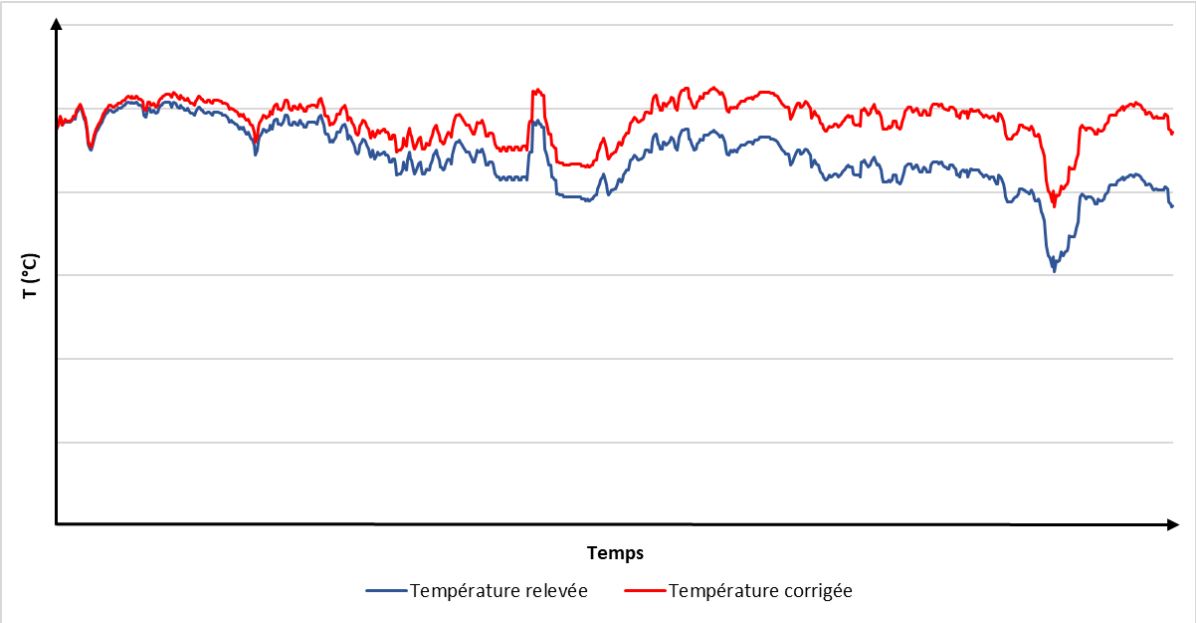


Figure 158 : Exemple de recalage des températures mesurées (mesures itinérantes effectuées le 25/7/2019 de 21h30 à 23h06).

7.4. Analyse des résultats

L'analyse des résultats des mesures par transects mobiles implique de mettre en relation des températures de l'air observées avec la diversité morphologique des deux aires urbaines étudiées. Dans un premier temps, l'ICU nocturne est évalué via la distribution spatiale des températures de l'air en fonction des typologies urbaines rencontrées le long de quelques itinéraires parcourus au cours de nos campagnes de mesures mobiles. Dans un second temps, nous présenterons la classification LCZ et son intérêt dans l'étude de l'ICU avant de l'appliquer aux deux villes étudiées. Les cartographies produites nous serviront alors de base pour l'analyse de l'impact du type de LCZ sur la dynamique des Ta, avec un focus sur la relation entre les températures de l'air et la distance au centre-ville.

7.4.1. Comparaison entre mobiles et mesures fixes

Avant toute analyse des données récoltées, nous avons voulu vérifier la fiabilité des données relevées au cours des mesures mobiles. Pour cela, les Ta mesurées ont été confrontées à celles enregistrées par les stations du réseau REMTHAM situées à proximité sur les transects. La comparaison révèle une corrélation remarquable avec un R^2 de 0,87 (**Figure 159**). Les écarts relevés, compris entre 0,1 et 2,2 °C, peuvent s'expliquer par la marge d'erreur du capteur (de 0,5 à 0,9 °C selon le fabricant), par les incertitudes des mesures mobiles liées à l'inertie de la mesure (temps de réponse de la sonde), ainsi que par la métrologie puisque notre capteur est une sonde externe située à 2 m au-dessus du sol et non 3 comme c'est le cas pour les sondes du réseau REMTHAM.

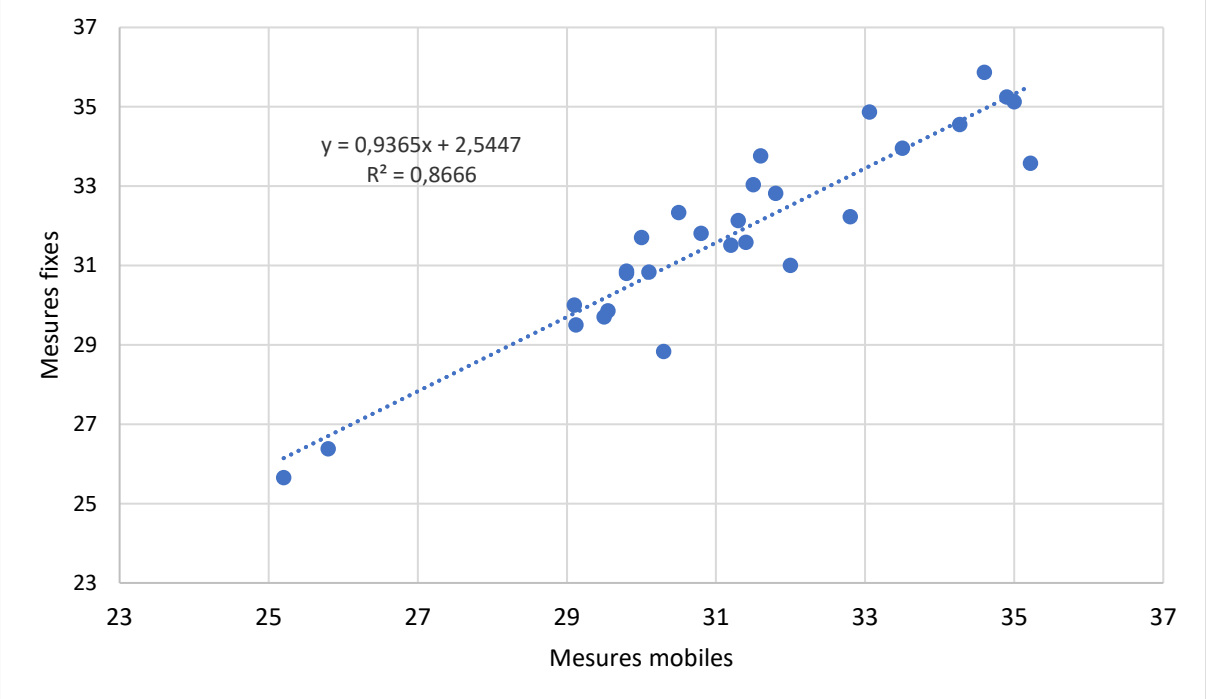


Figure 159 : Corrélation entre les données de températures relevées par les mesures mobiles (station mini-Kestrel sonde à découvert) et celles enregistrées par les sondes du réseau REMTHAM (sous abri).

7.4.2. Amplitude de l'ICU à l'échelle intra-urbaine

Pour l'analyse des relevés effectués au cours des campagnes de mesure, nous avons sélectionné quelques itinéraires que nous présentons successivement. Les ΔTa sont établis par rapport à une référence située en milieu rural qui correspond, pour l'EMM, à la station *Mécleuves* qui fait partie du réseau REMTHAM, et à la station de l'aéroport Mohammed V à Casablanca. Pour cette dernière, les données ont été obtenues via la plateforme Infoclimat[46]. L'objectif de ces transects est d'établir un aperçu de l'amplitude totale de l'ICU. La haute résolution de l'enregistrement permet la mesure de l'ensemble des sites traversés. La mise en relation avec la typologie des quartiers révèle la structure de l'ICU et met en évidence les influences locales.

7.4.2.1. Les transects de l'EMM

La figure160 reproduit trois parcours effectués dans l'EMM au cours du mois d'août 2020.

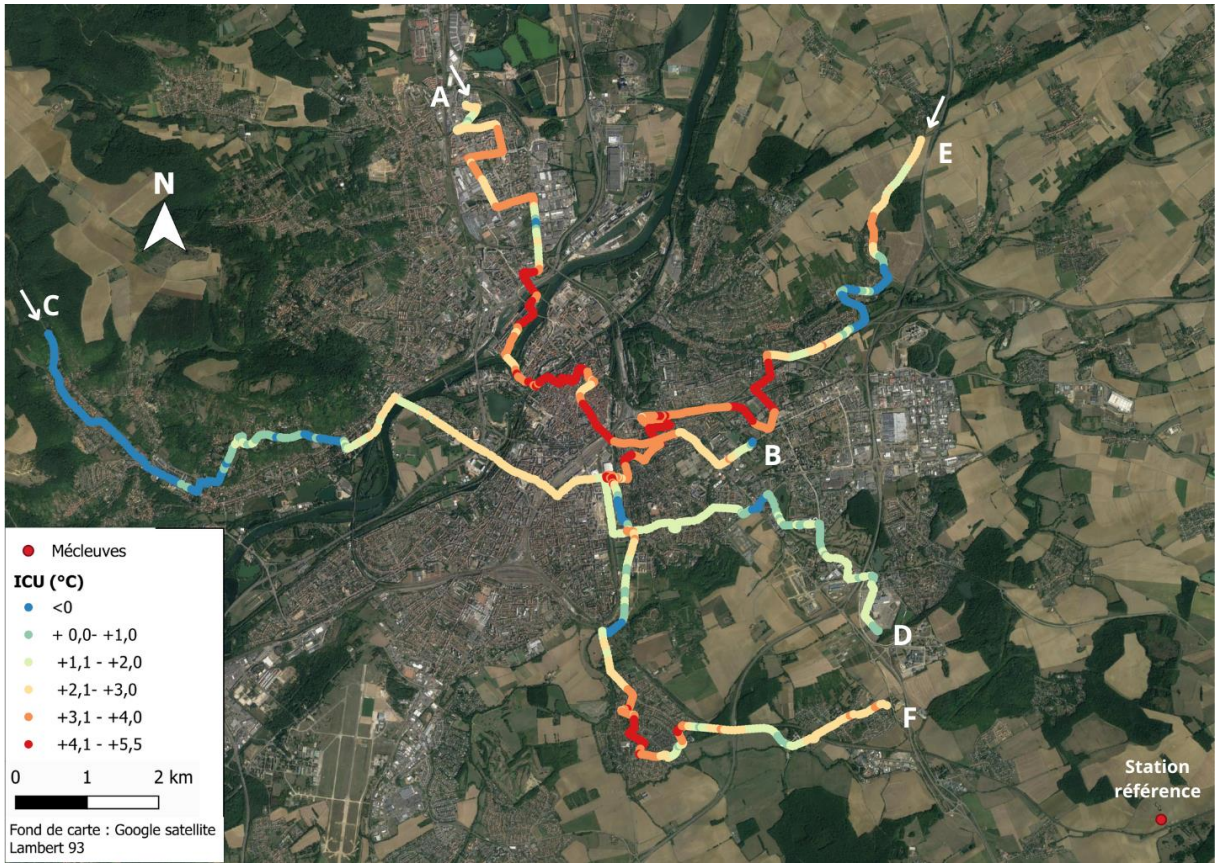


Figure 160 : Ecarts de Ta « instantanés » avec la station *Mécleuves* le long des transects urbains (Lebaut *et al.*, 2021).

[46] Infoclimat est une association qui met en ligne librement des données météorologiques.

a) Le transect A-B (Woippy-Cheneau)

La figure 161 présente les variations de Ta enregistrées tout au long du premier transect (A-B). S'étendant sur une distance d'environ 13,8 km, cet itinéraire débute à Woippy Plage, traverse la commune de Woippy et le centre-ville de Metz jusqu'au jardin de la Cheneau.

Les relevés thermiques mettent en évidence des variations significatives de la température de l'air le long de l'itinéraire en fonction des caractéristiques des espaces traversés, telles que la présence d'espaces verts, la densité urbaine et les types d'habitat. Le profil de température révèle une importante variabilité dans les ΔTa qui s'échelonnent de -0,3 à +5,1 °C.

L'ICU est ainsi modéré au début de l'itinéraire au niveau de Woippy aux abords d'un étang, avec un ΔTa compris entre +0,6 et +2,4 °C. Son intensité augmente ensuite pour atteindre une valeur d'environ +3,6 °C lorsque le capteur passe par l'avenue de Thionville, située au sein d'une zone d'activité. Ensuite, à proximité des jardins de la Houblonnière, le capteur enregistre un creux thermique qui atteint -0,3 °C, mettant en évidence l'influence de cet espace vert. Par la suite, les écarts de températures continuent d'augmenter en traversant les zones résidentielles à habitat collectif et le centre-ville densément peuplé, qui se révèlent être plus chauds (de +4 à +5,1 °C) que les zones résidentielles à habitat collectif moins denses (de +3 à +3,5 °C). Toutefois, dans les espaces végétalisés, comme au niveau du square du Luxembourg, le jardin des Tanneurs et le jardin de la Cheneau, les écarts de température sont inférieurs à ceux enregistrés dans les zones urbaines, avec un écart variant entre -0,2 et +3 °C.

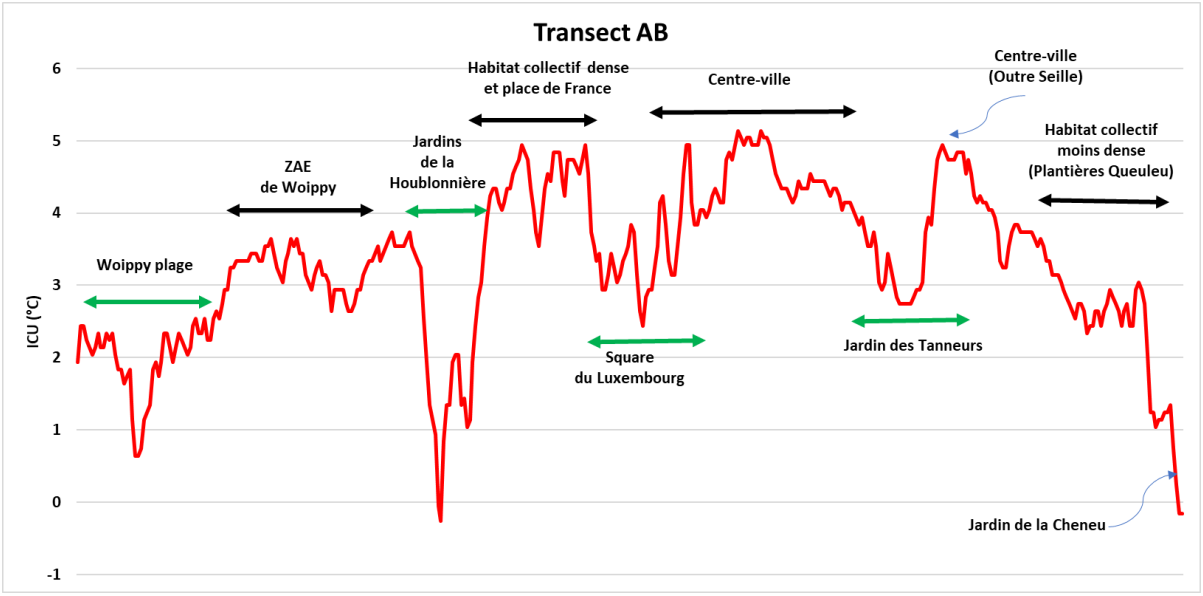


Figure 161 : Profil des écarts de Ta (°C) avec la station *Mécleuves* sur l'itinéraire AB lors de la campagne du 8 août 2020.

b) Le transect C-D

L'itinéraire C-D, d'une longueur d'environ de 25 km, traverse l'EMM d'ouest en est depuis la commune rurale de Châtel-Saint-Germain jusqu'au sud-est de Metz.

La figure 162 illustre les fluctuations des Ta enregistrées le long de l'itinéraire étudié. Le profil thermique met en évidence un delta d'environ 5 °C (compris entre de -2,2 et +2,9 °C), avec un ICU modéré au début de l'itinéraire à Châtel-Saint-Germain, principalement composé d'un habitat dispersé de type pavillonnaire accompagné de parcelles de jardins. L'écart thermique est alors compris entre -2,2 et +1 °C. Puis, l'intensité de l'ICU augmente légèrement pour atteindre une valeur d'environ +1,8 °C en passant par la commune de Scy-Chazelles. Par la suite, l'intensité de l'ICU augmente progressivement en traversant les zones résidentielles d'habitat collectif de la commune de Longeville-lès-Metz et le sud de la commune de Metz, qui se révèlent être les parties les plus chaudes de l'itinéraire (de +1,3 à +2,8 °C). Toutefois, dans les espaces végétalisés, notamment le Lac Symphonie et le Golf de Metz-Technopôle, les ΔTa sont plus faibles que ceux enregistrés dans les parties urbaines (de -1,5 à 1,4 °C).

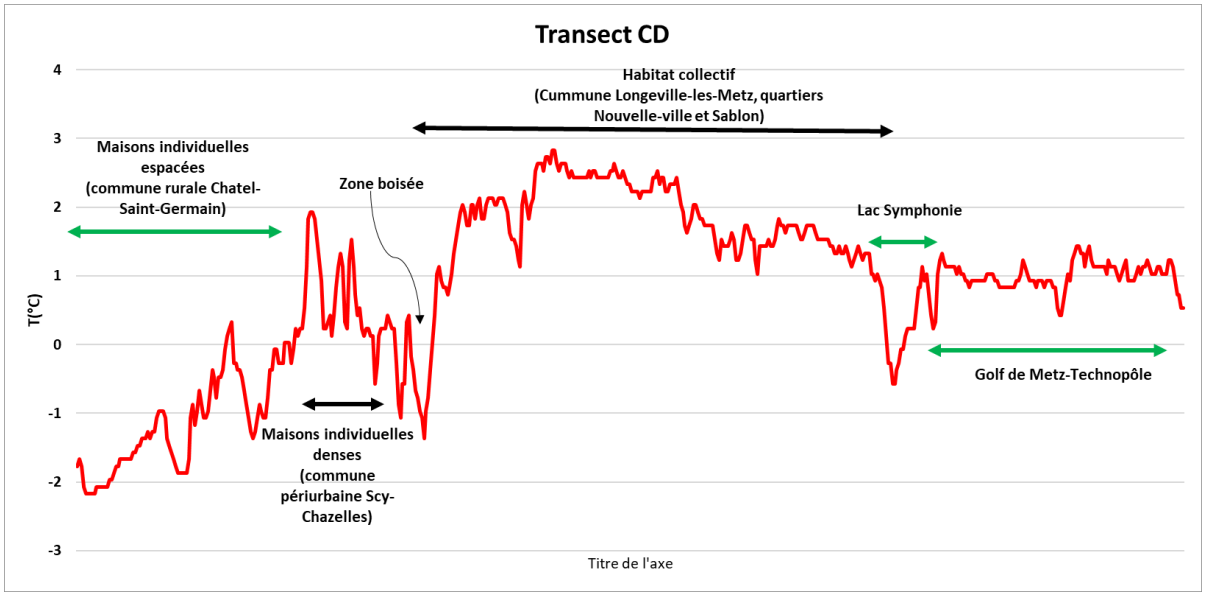


Figure 162 : Profil des écarts de Ta (°C) avec la station *Mécleuves* de l'itinéraire CD lors de la campagne du 10 août 2020.

c) Le transect E-F

Le dernier itinéraire (E-F) est d'une longueur de 19,9 km. Il traverse toute l'agglomération messine depuis le nord-est, au niveau de la commune rurale de Vany jusqu'à Peltre au sud en passant par les espaces périurbains à l'est et au sud (**Figure 160**). La figure 163 illustre les variations de température de l'air enregistrées tout au long de ce parcours.

Au cours de cette session, le profil thermique met en évidence un delta d'environ 6,7 °C. D'après les résultats présentés sur la figure 163, on observe une forte variabilité thermique en début de parcours, notamment dans les zones résidentielles denses (de +1 à +3,4 °C), la zone

boisée de la commune de Vantoux (de -1,9 à +1 °C), et la rue du Saulnois (de +2 à +4 °C). Cette variabilité est attribuable à l'altitude du terrain, car l'air frais s'écoule gravitairement le long des pentes, ainsi qu'à la présence de la végétation environnante.

En poursuivant le parcours le long de la rue Claude Bernard, la température demeure élevée (de +3 à +4 °C) en raison de la chaleur artificielle générée par le trafic routier (présence d'une voie rapide à proximité). Par la suite, au nord du quartier Plantières-Queuleu, qui est relativement diversifié au niveau de ses formes urbaines et de son habitat, la température reste élevée avec un ordre de grandeur similaire à celui de la rue Claude Bernard. Cependant, lorsque le trajet traverse le jardin Jean-Marie Pelt et le parc du Pas du Loup, la température baisse d'environ 5 °C. En empruntant la rue du Faubourg et en traversant le quartier de Magny, accueillant un habitat individuel globalement resserré, la température augmente progressivement pour atteindre +4,4 °C, mais baisse à nouveau en fin de parcours au niveau de l'environnement rural de la commune de Peltre.

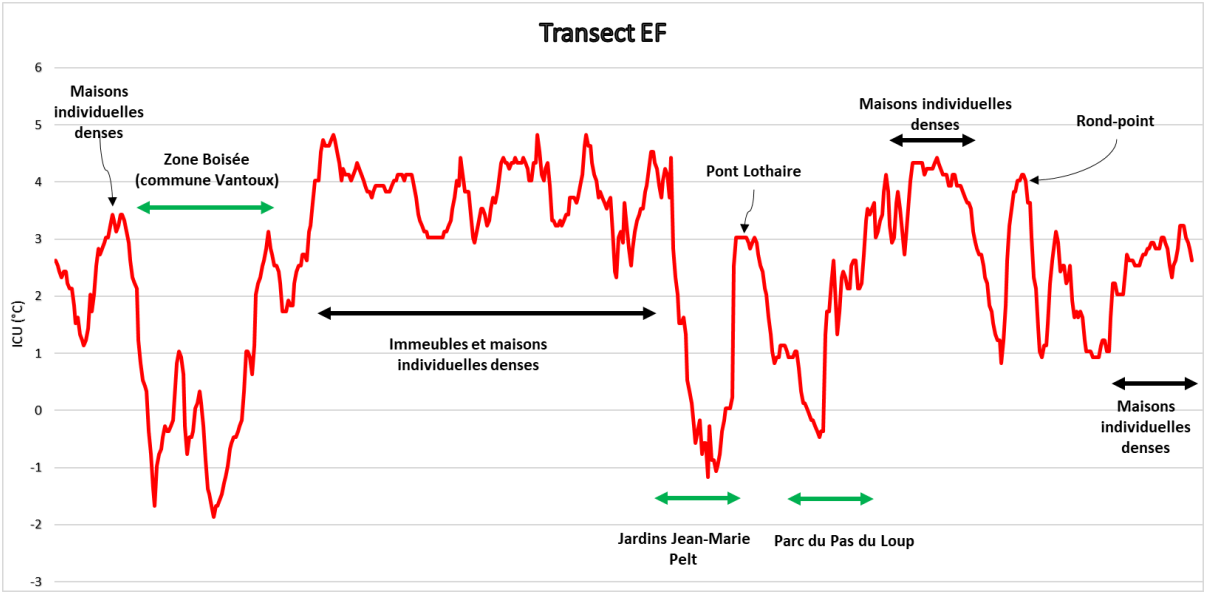


Figure 163 : Profil des écarts de Ta (°C) avec la station *Mécleuves* de l'itinéraire EF lors de la campagne du 11 août 2020.

7.4.2.2. Les transects de Casablanca

La figure164 reproduit trois parcours effectués sur le territoire de Casablanca au cours du mois de juillet 2019.

Figure 164 : Les écarts de Ta « instantanés » avec la station de l'aéroport Mohammed V le long des transects urbains.

a) Le transects transversaux A-B et C-D

Le premier transect (A-B), d'une longueur de 18,6 km, débute au niveau de la grande mosquée Hassan II sur le front de mer, puis traverse le centre-ville avant de se diriger vers la périphérie sud-est (**Figure 165**). Le deuxième transect (C-D) d'une longueur de 16,4 km traverse tout le cœur de ville d'ouest en est, depuis le nord du quartier d'habitat aisé d'Aïn Diab jusqu'à la zone industrielle d'Aïn Sebaa à l'est (**Figure 166**).

Les relevés thermiques mettent en évidence un ICU modéré au début des deux itinéraires dans la partie côtière au niveau de la corniche (transect C-D) et de l'esplanade de la mosquée Hassan II (transect A-B), avec un écart thermique compris entre +1 et +2,5 °C. L'air frais du littoral permet ainsi de maintenir des températures relativement fraîches. Le bâti ancien de la Médina, majoritairement de couleur blanche joue sans doute aussi un rôle dans le maintien de températures modérées grâce à un albédo élevé. Ensuite, l'intensité de l'ICU augmente progressivement à mesure que les itinéraires s'éloignent du littoral (**Figure 164**). Au cœur de la ville, les deux transects se croisent au niveau du parc de la Ligue Arabe, plus grand espace vert de la ville intra-muros, où le capteur enregistre un creux thermique, ce qui montre l'influence de cet espace vert sur l'ambiance thermique du centre-ville.

Après le Parc de la ligue Arabe, les deux transects se séparent. Sur le transect (C-D) qui se poursuit vers l'est, l'ICU continue à s'intensifier progressivement, les températures les plus élevées étant enregistrées au niveau de la zone portuaire de Roches Noires et de la zone industrielle d'Ain Sebaa. Sur le transect A-B, une rupture apparaît au niveau du quartier de Maarif constitué de grands ensembles avec un pic à +4,4 °C au niveau du boulevard Roudani. Les températures augmentent encore sur la dernière partie du parcours en traversant les quartiers de populaires de Ben M'sick et de Sidi Othman constitués d'habitats collectifs très denses. L'ICU atteint alors son intensité maximale de +5,4 °C. Il est intéressant de relever qu'à la toute fin du parcours, l'itinéraire traverse le jardin de la préfecture de Ben M'sick aménagé à la fin des années 2000, dans le but « d'aérer » cette partie de la ville très densément bâtie. Les mesures montrent que cet aménagement n'a pas eu d'effet rafraîchissant.

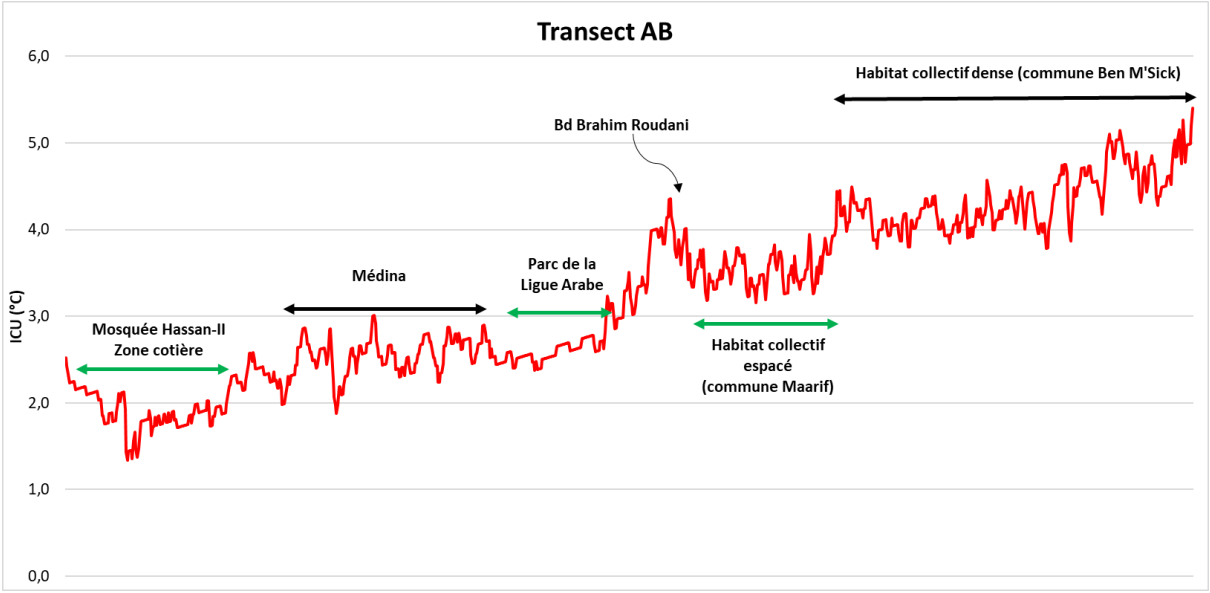


Figure 165 : Profil des écarts de Ta (°C) avec la station de l'aéroport Mohammed V sur l'itinéraire AB lors de la campagne du 17 juillet 2019.

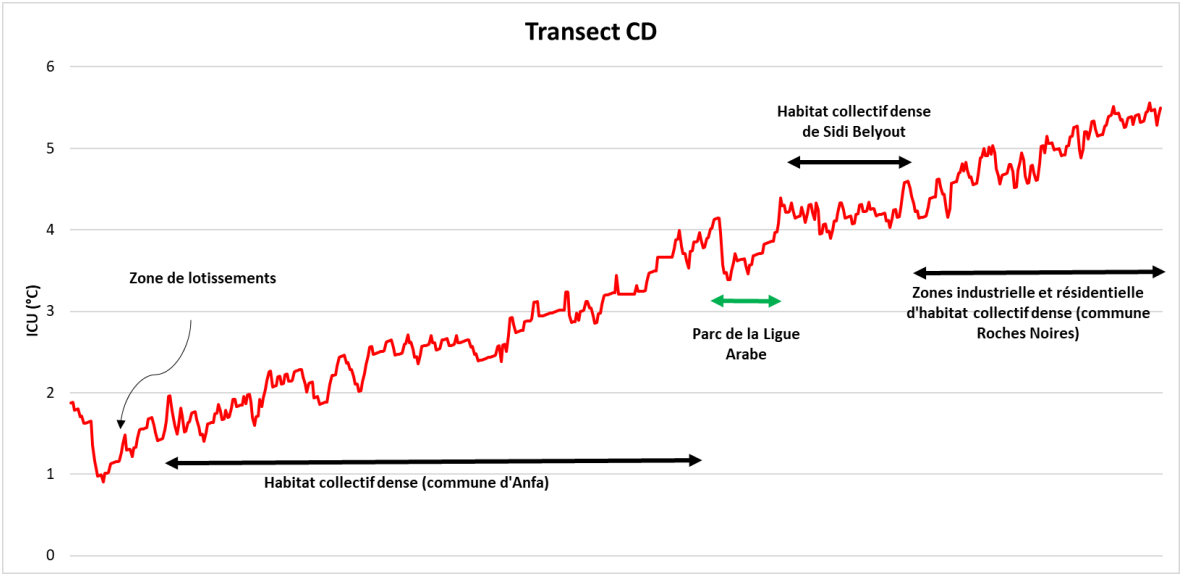


Figure 166 : Profil des écarts de Ta (°C) avec la station de l'aéroport Mohammed V sur l'itinéraire CD lors de la campagne du 16 juillet 2019.

b) Le transect EF situé en périphérie

Le transect E-F, d'une longueur de 32,3 km, transverse tout l'espace des quartiers péri-centriques depuis le nord-est jusqu'au sud-ouest (**Figure 167**). L'objectif est ici de constater une éventuelle baisse des températures dans la périphérie immédiate de la ville intramuros.

L'analyse des données recueillies met en évidence un ICU modéré avec un écart thermique situé entre +1 et + 3,3 °C. Un plateau de températures élevées est identifié au niveau des zones d'habitat collectif dense telles que les quartiers de ben M'sick, Al Fida et Beauséjour, avec des creux thermiques au niveau des parcs et jardins (parc préfectoral d'Aïn Sebaa et Anfa Parc en particulier).

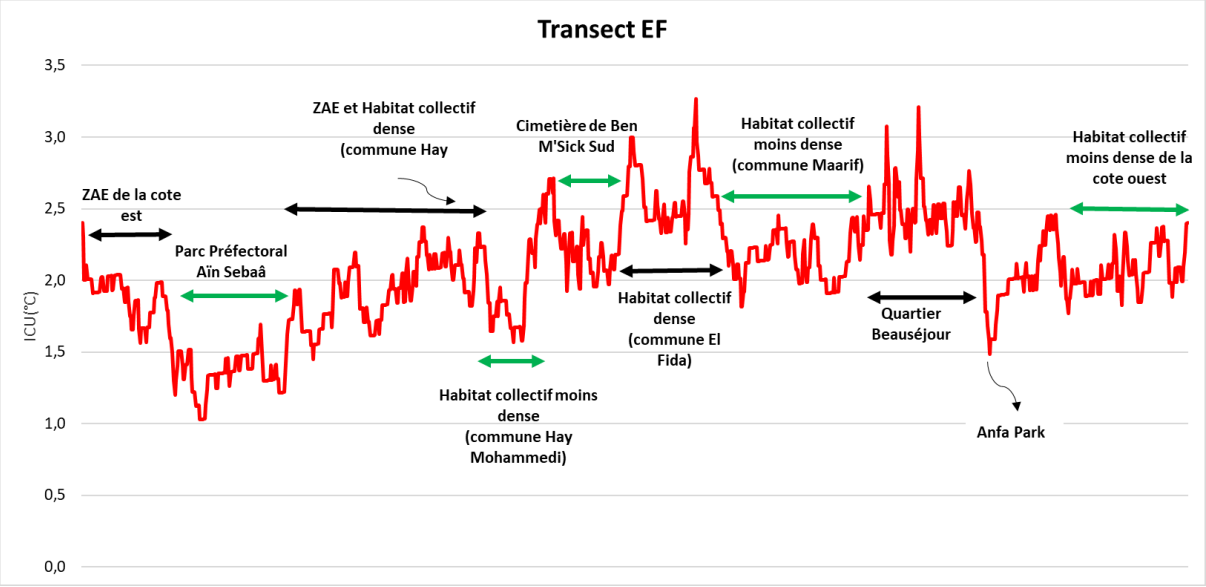


Figure 167 : Profil des écarts de Ta (°C) avec la station de l'aéroport Mohammed V sur l'itinéraire EF lors de la campagne du 12 juillet 2019.

Au total, en dépit de l'absence de données sous abri pouvant servir de point de comparaison comme ce fut le cas sur le territoire messin, les données mobiles récoltées à Casablanca semblent cohérentes avec ce qui était attendu. Il y a bien une modulation spatiale, parfois forte, de la température de l'air par la morphologie urbaine.

7.4.3. Cartographie des zones climatiques des deux aires urbaines

Dans le cadre de cette thèse, notre ambition était de comparer deux territoires géoclimatiquement contrastés. Le concept de zonage climatique nous a semblé être l'outil adéquat. Nous expliquons dans cette section, la pertinence de cette classification dans l'optique d'une démarche comparative. Nous détaillons également les différentes méthodes existantes, ainsi que l'approche que nous avons suivie.

7.4.3.1. La nécessité d'une classification climatique urbaine

La définition habituelle de l'ICU, qui décrit celui-ci comme un écart de température entre un milieu « urbain » et un milieu « rural » est souvent insuffisante, et a fait l'objet de critiques par plusieurs auteurs (Stewart et Oke, 2012 ; Leconte *et al.*, 2015) : d'une part parce que les catégories « urbain » et « rural » sont équivoques et varient beaucoup dans le monde en fonction des usages et des législations en vigueur ; d'autre part, parce que ces deux milieux présentent une pluralité de types d'occupation et des surfaces hétérogènes. De plus, comme déjà évoqué, ces deux milieux sont tous deux sujets à des évolutions du fait des activités anthropiques (impact des cycles agricoles en milieu rural). Plus problématique, Stewart (2011b) avance que les études se basant sur des mesures d'ICU adoptent des définitions différentes de ces notions, ce qui fait que les sites urbains et ruraux sélectionnés pour les études de l'ICU sont très divers. En fonction des études, le site urbain choisi peut être une rue, une place arborée, un parc, ou un parking, tandis que le site rural choisi peut être un champ, un verger ou une forêt. Des sites comme les aéroports, les cours d'école et les campus universitaires sont considérés alternativement comme sites urbains dans certaines études, et comme sites ruraux dans d'autres. Les sites choisis sont d'ailleurs parfois définis comme étant urbains ou ruraux sans plus de justifications, en considérant que ces termes sont compris de façon identique par toute la communauté scientifique.

Une simple opposition ville-campagne n'étant pas suffisamment précise pour construire une définition pertinente de l'ICU, il y a alors nécessité d'établir une classification urbaine de nature à permettre une analyse plus fine des interactions entre le milieu urbain et son microclimat. Il ne s'agit plus d'établir une comparaison entre le milieu urbain et le milieu rural dans leur ensemble, mais plutôt d'exprimer les ambiances thermiques en termes d'écarts de température entre les différentes classes prédéfinies (Stewart et Oke, 2012 ; Leconte *et al.*, 2015).

Différents types de classifications urbaines ont été proposés dans la littérature comme l'inventaire européen *CORINE land Cover* ou les *Urban Climatic Maps* (cartes UCM). Elles visent pour la plupart à standardiser les mesures de l'ICU et à faciliter leur interprétation par d'autres chercheurs, à améliorer les procédures d'installation d'équipements de mesure météorologique, ou encore, à fournir des recommandations en matière d'urbanisme durable. Néanmoins, la classification la plus répandue est celle des Zones Climatiques Urbaines, ou *Urban Climate Zone* (LCZ) que nous allons utiliser pour nos recherches.

7.4.3.2. La classification en zones climatiques locales (LCZ)

La classification en zones climatiques ou *Local Climate Zone* (LCZ) est une classification internationale mise au point par Stewart et Oke (2012). Elle vise à construire une typologie climatique urbaine pour caractériser le microclimat et définir l'amplitude de l'ICU. Cette méthode consiste à établir une segmentation logique d'un territoire donné en différentes morphologies urbaines appelées « classes », en fonction des types d'occupation du sol en se basant sur les variables thermiques et hydriques ainsi que sur la manière avec laquelle chaque type affecte l'écoulement du vent. Le résultat se présente alors sous la forme d'une carte

quadrillée de la ville et de ses environs dans laquelle chaque cellule est assimilée à une LCZ. L'intérêt de cette approche est qu'elle considère de façon équilibrée les espaces urbains et les espaces ruraux, et que, grâce à une nomenclature précise, elle permet de standardiser l'étude du climat urbain pour faciliter les comparaisons entre différentes villes ou métropoles.

Selon cette approche, chaque zone climatique locale est définie comme un espace présentant des caractéristiques uniformes en termes de morphologie urbaine, d'occupations des sols, de matériaux urbains, de forme urbaine, et de comportement climatique. La superficie de chaque zone varie d'une centaine de mètres à plusieurs kilomètres à l'échelle horizontale et se situe entre la micro-échelle et la méso-échelle (Bechtel *et al.*, 2015). L'échelle de la zone varie selon les villes. Par exemple, pour la ville de Nagano au Japon, le rayon d'une zone climatique est d'environ 100 m, alors qu'il est de 200 m pour Vancouver au Canada (Stewart *et al.*, 2014). C'est aussi le cas pour Nancy, en France (Leconte *et al.*, 2015a).

La classification LCZ est composée au total de 17 classes, dont dix sont de type bâti numérotées de LCZ 1 à LCZ 10 en fonction de la hauteur et de la densité des bâtiments, et de certaines propriétés d'occupation du sol (**Annexe 57**). Les sept autres classes nommées LCZ A à LCZ G, ont été caractérisées en fonction des types de surfaces naturelles. Elles dépendent de la hauteur de végétation (plantes basses, arbustes, arbres), de la densité de la végétation et de la nature de la couverture du sol (surfaces pavées, surfaces en sable, surfaces rocheuses) (**Annexe 57**) (Bechtel et Daneke, 2012 ; Dian *et al.*, 2020).

Aujourd'hui, la classification LCZ est devenue un standard international adopté partout dans le monde pour étudier l'ICU de la canopée urbaine (Chhetri *et al.*, 2017 ; Zhou *et al.*, 2020 ; Wu *et al.*, 2022), les études des ICU de surface (Geletič *et al.*, 2016 ; Cai *et al.*, 2018 ; Zheng *et al.*, 2022), et des études de modélisation de l'ICU (Fenner *et al.*, 2014 ; Kaloustian et Bechtel, 2016 ; Pokhrel, 2020). L'approche LCZ a permis des avancées importantes dans l'analyse thermique des aires urbaines et dans la connaissance du microclimat urbain de manière générale. Les écarts de température observés ne se limitent plus aux écarts ville/campagne, mais peuvent désormais se concentrer plus étroitement sur les variations thermiques entre les diverses parties d'une même ville (analyse intra-urbaine).

7.4.3.3. Méthodes de classification

La littérature propose essentiellement deux méthodes de classification LCZ :

- La première approche se base sur les données du SIG. Par exemple, la méthode employée par Lelovics *et al.* (2014) consiste à utiliser en entrée différents paramètres de la structure urbaine (la fraction de bâti et de végétation, la hauteur des bâtiments, le facteur de vue du ciel, l'albédo, etc.) acquis à partir d'images satellitaires ou aéroportées, de mesures sur le terrain, ou calculés à partir de bases de données topographiques (BD TOPO®). Ces jeux de données sont ensuite utilisés pour calculer les propriétés géométriques et radiatives telles que définies par Stewart et Oke (2012). La classe LCZ pour chaque polygone de zone donné est alors déterminée après le calcul automatisé des paramètres répertoriés. Enfin, un

processus d'agrégation est activé dans lequel des classes LCZ identiques ou similaires sont fusionnées en une zone de rayon supérieur ou égal à 250 m.

- Une autre approche est celle de la méthode *WUDAPT* qui est basée sur la classification d'images satellitaires en partant du principe que chaque LCZ correspond à des valeurs de luminances distinctes. Cette méthode consiste à cartographier les LCZ à partir d'algorithmes de classification semi-automatique appliqués aux images satellitaires à l'aide du logiciel *SAGA GIS* (Brousse *et al.*, 2016 ; Bechtel *et al.*, 2019). Cette classification s'appuie sur une base de zones d'entraînement définies par l'utilisateur et numérisées avec le logiciel *Google Earth* pour identifier les LCZ. Chaque zone d'entrainement correspond à une classe LCZ d'un type particulier (Bechtel et Daneke, 2012 ; Brousse *et al.*, 2016). La réalisation de la classification LCZ à l'aide de la méthode *WUDAPT* est possible à trois niveaux de détails en fonction de la précision des données d'entrée (**Tableau 41**) (Lehnert *et al.*, 2021) :

  (a) Le niveau L0 couvre l'échelle de l'agglomération (résolution de 100 à 500 m²) et aboutit à des cartes LCZ en deux dimensions, à l'aide des données satellitaires et des zones d'entraînement issues de *Google Earth*. Ainsi, les produits de niveau L0 présentent donc des informations de base sur les surfaces urbaines, mais les paramètres d'entrée des modèles de prévision météorologique restent à trouver par l'utilisateur, guidé par les fourchettes proposées dans le supplément de Stewart et Oke (2012). Les données *WUDAPT* de niveau L0 peuvent être utilisées comme données d'entrée pour la modélisation météorologique et climatique à méso-échelle (Brousse *et al.*, 2016 ; Wang *et al.*, 2018b).

  (b) Le niveau L1 couvre l'échelle du quartier (résolution 100 à 500 m²) avec une présentation en 2,5 dimensions des morphologies urbaines et des fonctions obtenues à partir des cartes LCZ (dérivées du niveau L0) et présentant les paramètres surface/objet de façon plus localisée. Au niveau L1, les données sont collectées à partir de diverses sources (images satellitaires, Google Earth, données SIG, connaissances d'experts).

  (c) Le niveau L2 présente les formes urbaines 3D et les données de construction à une résolution très fine (à l'échelle du bâtiment), à l'aide de bases de données satellitaires et SIG. Les informations fournies sur les zones urbaines sont alors beaucoup plus détaillées.

Tableau 41 : Niveaux de classification LCZ *WUDAPT* (adapté de Ching *et al.* (2019))

Produit	Niveau L0	Niveau L1	Niveau L2
Couverture	Plus de 120 villes et régions.	Méthodes de collecte de données ; et des tests pour affiner le niveau L0 sur la base des approches de *crowdsourcing* APPS et de typologie du bâti comme dans MApUCE.	N'importe quelle ville en utilisant la nouvelle technologie de cartographie 3D, DSC (*Digital Synthetic City*).
Source des données	*Landsat* + *Google Earth* + données locales et évaluation d'experts.	*Landsat* + *Google Earth* + données locales et évaluation d'experts.	Données stéréo (*World-view Stereo*) + données Terra-SAR.
Résolution	100–500 m.	100–500 m.	2 m.
Format	Fichiers de format KML, TIFF.	Fichiers de format SIG.	Fichiers de format SIG.
Applications	Consommation d'énergie, modélisation (WRF), ICU, planification urbaine.	Consommation d'énergie, temps et climat (circulation des flux d'air, rayonnement, température radiante moyenne), pollution de l'air, émissions de GES, biodiversité, aménagement urbain.	Consommation d'énergie, thermique du bâtiment, gestion des catastrophes et des risques (inondation, canicule), mobilité, confort thermique, santé publique.

7.4.3.4. Cartographie LCZ des terrains d'étude

a) Protocole suivi

Dans le cadre de cette thèse, nous avons eu recours au niveau L0 de la méthode *WUDAPT* (**Figure 168**), car elle dispense de mobiliser des données difficiles à acquérir (données en 3D), tout en produisant des résultats très similaires à l'approche basée sur les algorithmes du SIG (Gál *et al.*, 2015), voire meilleurs (Wang *et al.*, 2018b). Ce travail s'organise en trois temps :

La première étape consiste à télécharger des images satellitaires couvrant le terrain d'étude. Les données *Landsat* ou *Sentinel* sont les plus recommandées du fait de leur résolution et de leur réflectance de surface. Suivant Bechtel et *al.* (2015), nous avons utilisé les images *Landsat* issues du site de l'USGS[47]. Il est préférable d'utiliser des données précises à différentes saisons pour capturer la réponse spectrale de la végétation en raison de la saisonnalité (Bechtel et Daneke, 2012 ; Richard *et al.*, 2018). Aussi, nous avons téléchargé quatre scènes à de dates différentes pour chacune des deux zones d'étude (**Tableau 42**) que nous avons ensuite prétraitées sur *SAGA GIS* en recadrant la zone d'étude et en rééchantillonnant les données sur une grille de taille commune.

[47] Téléchargeables à partir du portail internet http://earthexplorer.usgs.gov.

La deuxième étape consiste à créer des polygones d'apprentissage au sein de la zone cible à l'aide du logiciel *Google Earth* en utilisant le fichier modèle téléchargé sur la plate-forme *WUDAPT*. Chaque polygone correspond à une classe LCZ d'un type particulier.

La troisième étape consiste à appliquer la classification semi-automatique à l'aide du logiciel *SAGA GIS*. Cette classification reste subjective, non seulement parce que chaque utilisateur définira les zones d'entraînement en fonction de ses connaissances propres, mais aussi en raison du choix des saisons utilisées pour les images satellitaires. Comme Bechtel et Daneke (2012) l'ont souligné, la cartographie LCZ dans les scènes *Landsat* est fournie en utilisant un classificateur de forêt aléatoire ou *Random forest* (RF), qui est l'algorithme de catégorisation mis en œuvre dans *SAGA GIS*. L'algorithme de classification recommandé pour *WUDAPT* est un classificateur RF, constitué d'arbres de décision intégrés qui allouent chaque pixel à un type LCZ (Bechtel *et al.*, 2019). Enfin, un filtrage complémentaire post-classification est appliqué afin d'obtenir la structure la plus homogène possible de la carte LCZ dans le cas où les LCZ s'avéreraient trop fragmentées et la carte insuffisamment lisible.

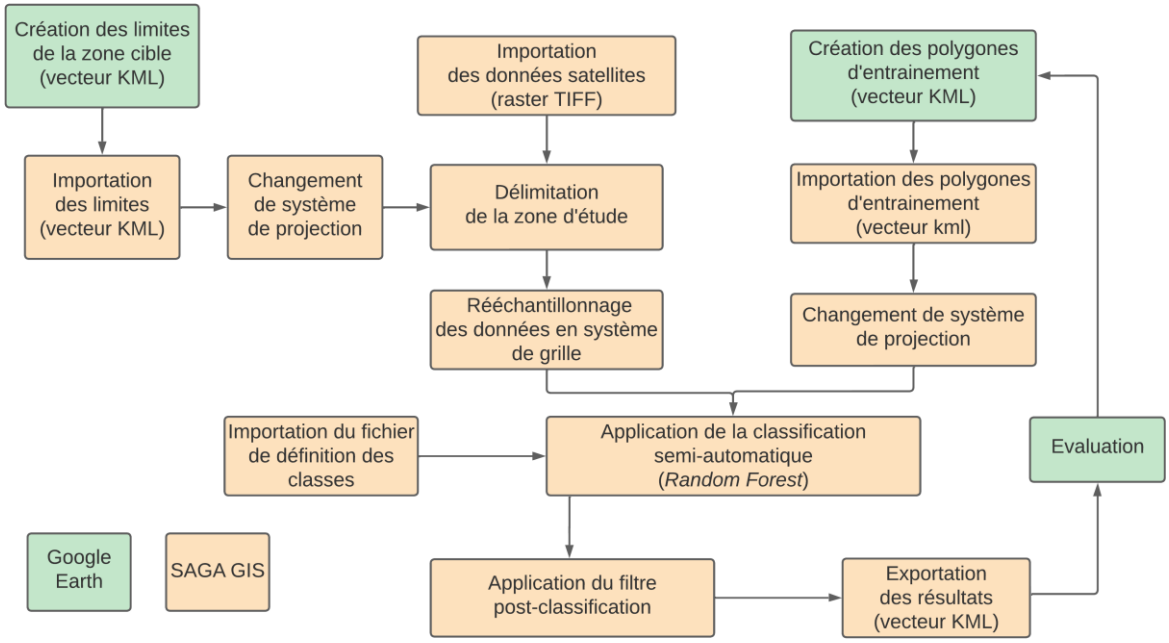


Figure 168 : Chaîne de traitements de la méthode de classification LCZ *WUDAPT* L0.

Tableau 42 : Les images *Landsat* utilisées pour produire la classification LCZ des deux terrains d'étude.

Terrains	Hiver	Printemps	Eté	Automne
EMM	07/02/2022	19/03/2022	01/07/2022	07/11/2021
GC	29/12/2019	22/04/2021	20/07/2021	24/10/2021

b) Résultats

Les cartes ci-après présentent le résultat de la classification LCZ appliquée à nos deux terrains d'étude (**Figure 169** et **Figure 170**). On constate en premier lieu, qu'un nombre important de classes LCZ existe aussi bien à l'EMM qu'au GC, mais seule ce dernier présente la totalité des classes LCZ, ce qui n'a rien de surprenant. Les LCZ 1 (bâtiments hauts et denses), LCZ 7 (bidonvilles) et LCZ 10 (industrie lourde) sont en effet, absentes du territoire messin.

En second lieu, le territoire messin présente sensiblement plus de zones arborées (LCZ A) et de zones hydriques (LCZ G) que le territoire casablancais (41 % et 4,3 % contre 2 % et 0,2%). Pour ce qui est des zones bâties, les classes dominantes sont différentes dans les deux terrains : au sein de l'EMM, c'est la classe LCZ 9 (petits bâtiments de faible hauteur avec de la végétation) qui domine avec un taux de 23 %, alors que l'aire urbaine du GC est dominée par la classe LCZ 2 (bâtiments à hauteur moyenne et denses) avec un taux de 15 %. Vient ensuite la classe LCZ 8 (bâtiments de grandes surfaces et peu élevés) représentant 11 % l'emprise au sol à Metz et 7,7 % à Casablanca.

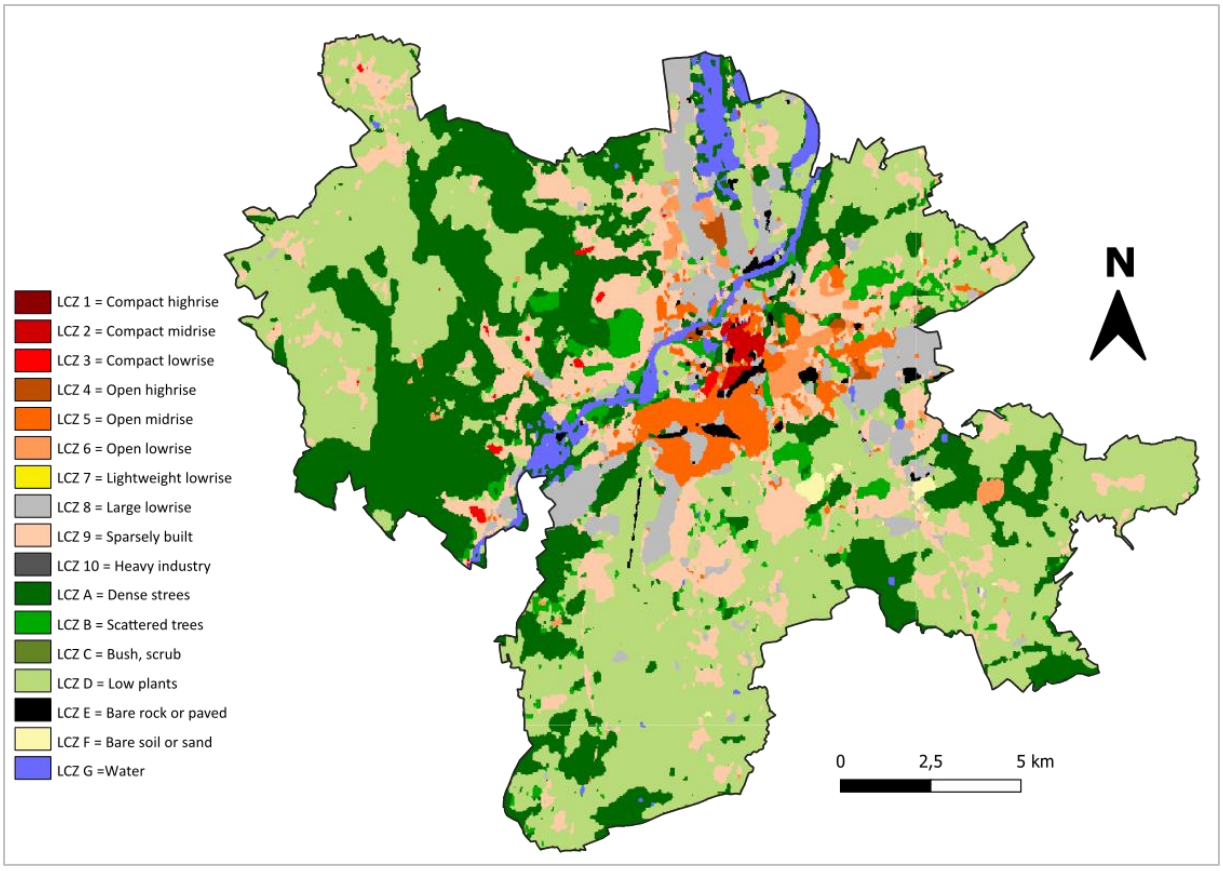


Figure 169 : Classification LCZ de l'EMM.

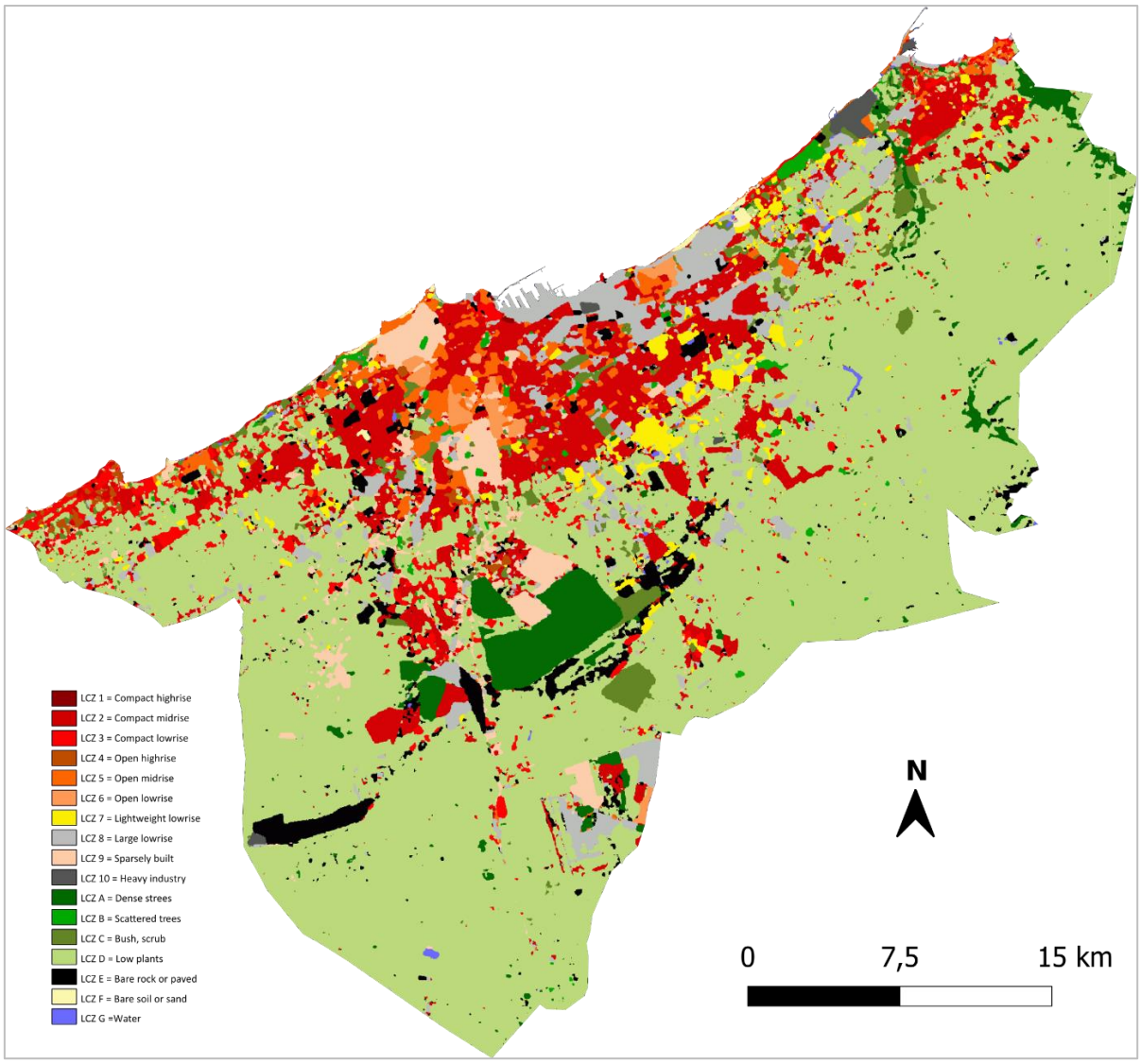


Figure 170 : Classification LCZ du GC.

7.4.4. Variabilité thermique en fonction des classes LCZ

Après avoir établi la cartographie LCZ de nos deux terrains d'étude, nous examinons, dans cette section, l'apport de la classification LCZ pour la caractérisation de l'ICU de la canopée urbaine à Casablanca et à l'EMM.

Dans un premier temps, nous nous intéressons à la dynamique de l'ICU en examinant la variabilité thermique inter-LCZ afin de comprendre l'influence que les zones climatiques exercent sur l'ambiance thermique générale. Ensuite, nous analysons la variabilité thermique intra-LCZ en observant la variabilité thermique au sein des LCZ, ce faisant, nous interrogerons la relation entre les températures de l'air et la position relative de la LCZ dans les deux aires urbaines. En effet, des variations ponctuelles dans les Ta peuvent se rencontrer à l'intérieur des classes LCZ, et une anomalie thermique positive ou négative peut se former et avoir des conséquences sur les valeurs d'amplitude relevées.

7.4.4.1. Variabilité inter-LCZ des Ta

Les figures 171 et 172 représentent la variabilité thermique au niveau de 11 classes LCZ pour chaque terrain d'étude, calculées à partir des mesures mobiles. Nous observons sur la figure 171 caractérisant les mesures effectuées dans l'EMM, que les Ta sont plus élevées pour les classes LCZ urbaines que pour les classes LCZ végétalisées confirmant l'existence d'un ICU. Des tendances similaires se dessinent pour Casablanca (**Figure 172**). En particulier, les deux figures illustrent une nette diminution des Ta nocturnes avec l'augmentation de la part de végétation. Ainsi, les classes LCZ 1, LCZ 2, LCZ 3 et LCZ 4 sont les plus chaudes au sein des deux terrains étudiés, alors que les classes LCZ 5, LCZ 6 et LCZ 9 sont les classes urbaines les plus fraîches. Cela démontre l'impact significatif de la végétation sur la variabilité spatiale de la température de l'air en milieu urbain.

Néanmoins, d'autres caractéristiques physiques telles que la rugosité affectent également la variabilité de la température, et peuvent exacerber ou contrebalancer l'influence de la forme urbaine. Par exemple, la classe LCZ 8 qui correspond aux zones d'activité se distingue en ce que, à Casablanca, elle fait partie des classes les plus chaudes, alors qu'à Metz, elle présente une température moyenne équivalente à la classe LCZ 6. Cela s'explique par le fait que les zones d'activité sont généralement plus compactes à Casablanca qu'à Metz où elles accueillent de nombreux espaces de parking ouverts, ce qui induit moins de piégeage thermique par la géométrie urbaine (***cf.* 4.4.5**).

Au total, ce résultat confirme le fait que le comportement thermique des différentes zones climatiques est avant tout dicté par la classe LCZ à laquelle elles appartiennent.

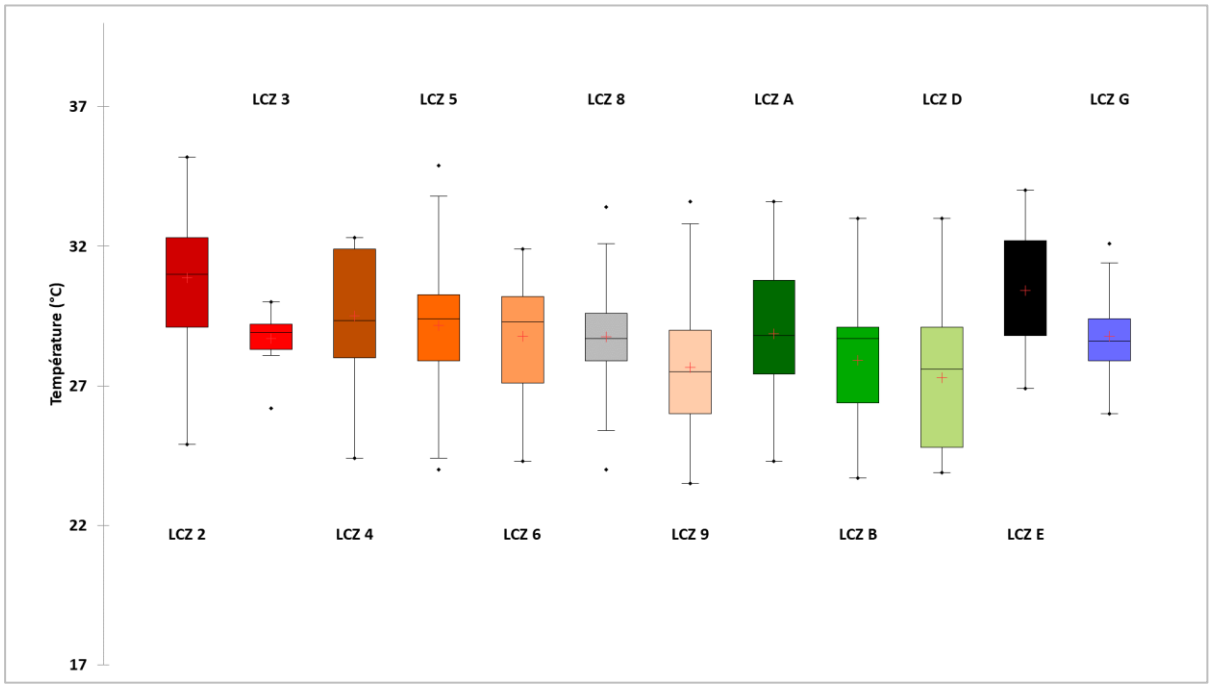


Figure 171 : Boites à moustache des Ta observées par mesure mobile par classe LCZ à l'EMM.

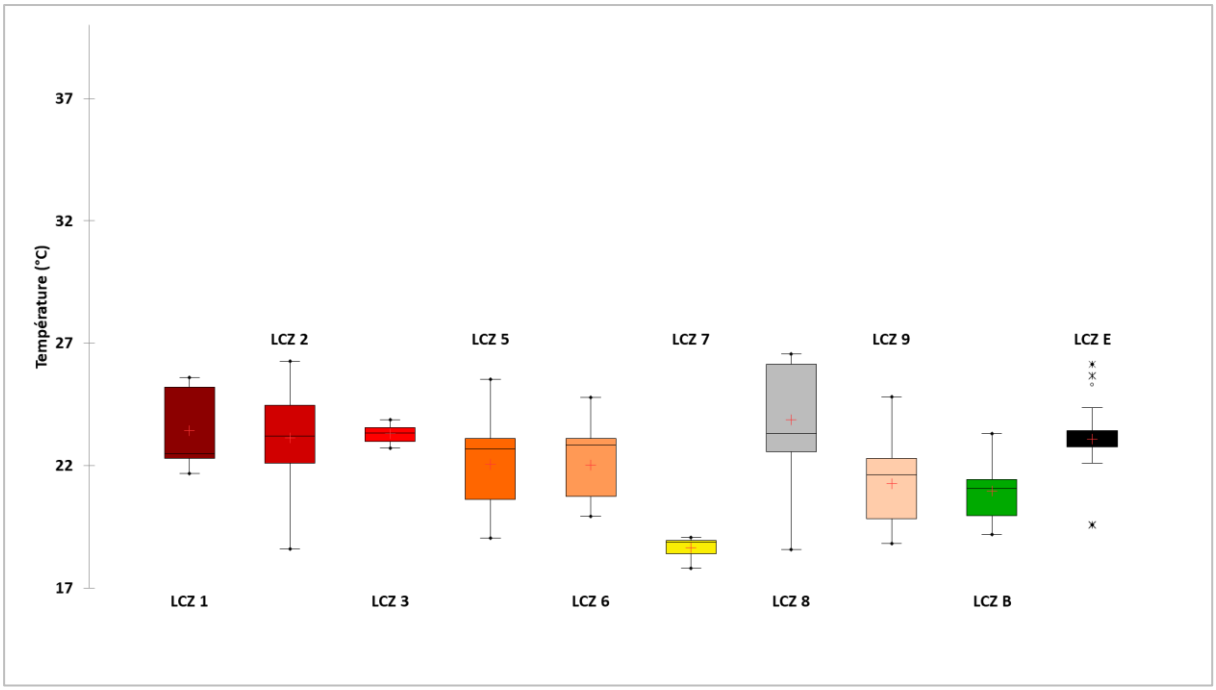


Figure 172 : Boites à moustache des Ta observées par mesure mobile par classe LCZ à Casablanca.

7.4.4.2. Influence de la position relative des LCZ

Pour l'analyse de la variabilité intra-LCZ des températures de l'air, nous avons identifié et sélectionné différents espaces urbains relevant des mêmes classes LCZ ayant été traversées par les transects mobiles. Nous partons du constat qu'au sein d'une même classe LCZ, des variations thermiques plus ou moins importantes peuvent apparaître, avec des points relativement chauds et des points relativement frais localisés dans certaines rues, en fonction de leur orientation et de l'importance du trafic routier qui les traverse. Aussi, pour faciliter la lecture, nous nous appuyons sur les Ta moyennes relevées dans quatre classes LCZ de Casablanca et cinq de l'EEM parcourues au cours de toutes les sessions de mesure (**Figure 173** et **Figure 174**).

Les résultats montrent que l'amplitude de ces fluctuations peut varier en fonction des types de classes LCZ. Ainsi par exemple, dans l'EMM, la classe LCZ 2-Sud présente des températures moins élevées que la classe LCZ 2-Centre avec des écarts de 1,3 °C en 2019 et de 2,4 °C en 2020 respectivement. Cela est sans doute lié à la proximité d'un axe urbain fortement végétalisé (arbres d'alignement de l'avenue Foch). De même, à Casablanca, la classe LCZ 2-Est présente des températures plus chaudes que la classe LCZ 2-Ouest, car située dans le cluster chaud de l'est de la conurbation (***cf.* 4.4.5.1**). Le même constat est établi concernant les classes non bâties. Par exemple, la classe LCZ C-Est (Casablanca) affiche des Ta moyennes plus élevées que la classe LCZ C-Ouest avec des amplitudes thermiques entre ces deux classes de 2,5 °C en 2019 et de 2,2 °C en 2020. Cela pourrait s'expliquer par une concentration plus importante d'espaces densément bâtis dans l'est de la ville.

On en déduit donc que, si dans sa globalité, la distribution des valeurs de Ta est principalement déterminée par le type de classe LCZ, cette distribution peut également, dans

une certaine mesure, fluctuer selon le positionnement géographique des classes LCZ. Ce phénomène pourrait s'expliquer par les circulations d'air à l'échelle intra-urbaine, qui peut conduire à ce que des LCZ fraîches, telles que les LCZ 6 et les LCZ 9, reçoivent de l'air chaud par advection depuis des LCZ plus chaudes situées à proximité (Leconte *et al.*, 2015b). Par conséquent, elles auront tendance à présenter des Ta plus élevées que les autres LCZ du même type qui sont situées dans une autre partie de l'agglomération. Des mesures complémentaires et une analyse par modélisation physique seraient nécessaires pour caractériser les interactions entre les différentes classes LCZ et mesurer l'effet de l'advection sur la variabilité des températures. Pour l'heure, nous pouvons simplement conclure que l'amplitude des fluctuations intra-LCZ est amplifiée par l'ambiance thermique générale rencontrée à l'échelle locale.

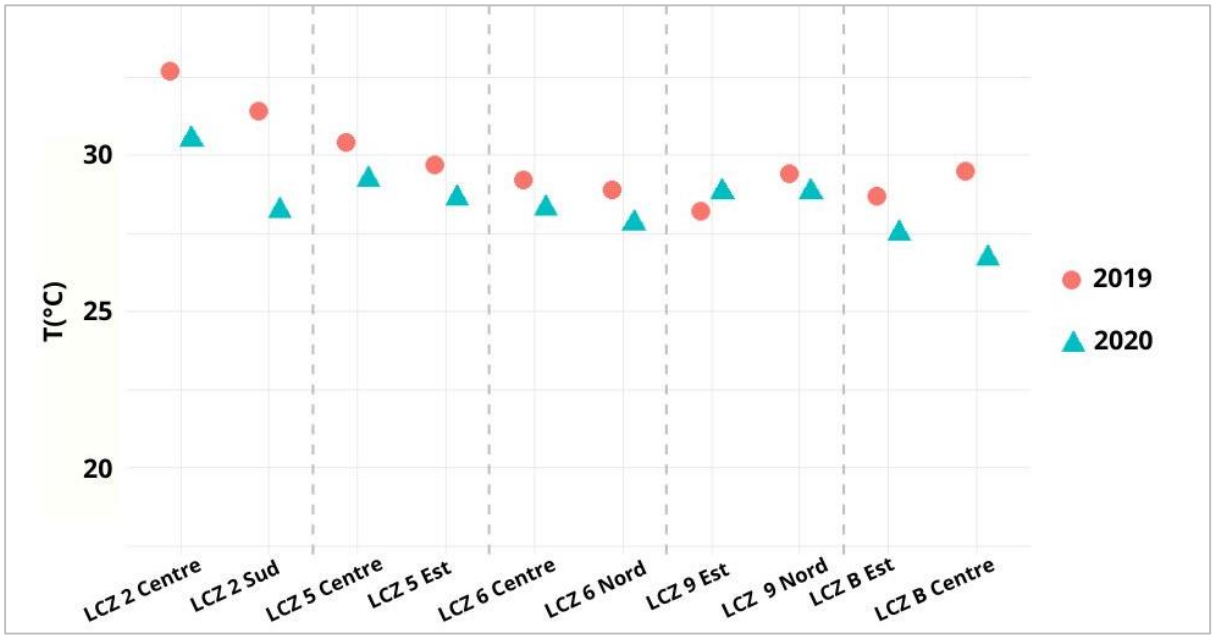


Figure 173 : Température moyenne de chaque session de mesure pour des LCZ de même type à l'EMM.

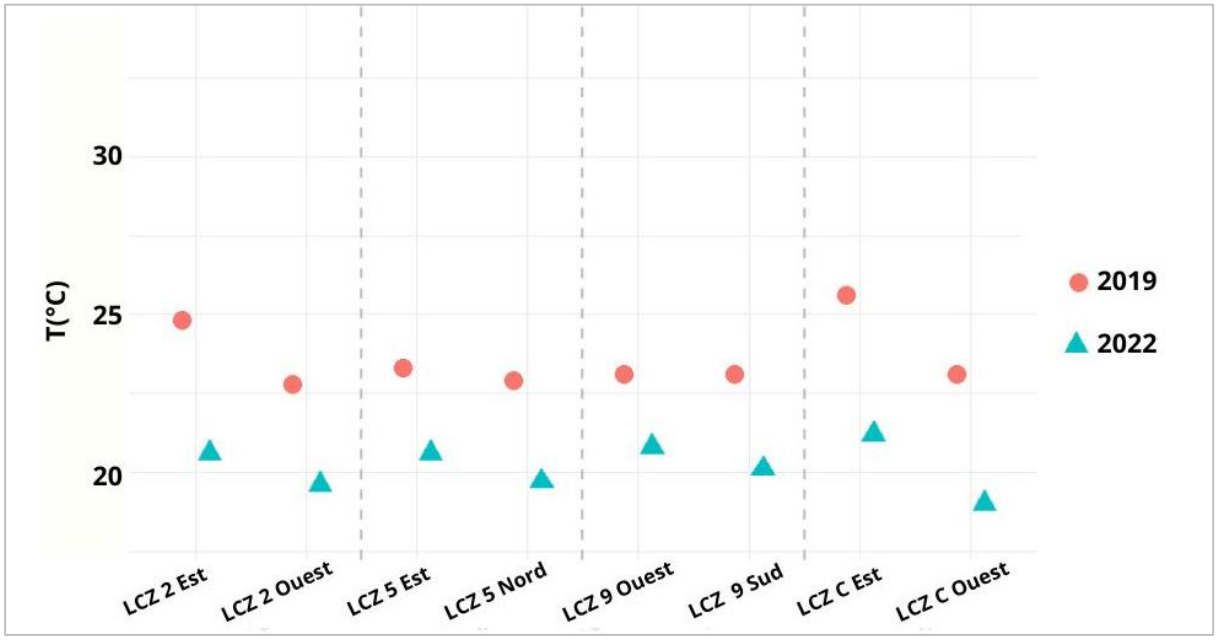


Figure 174 : Température moyenne de chaque session de mesure pour des LCZ de même type au GC.

7.4.5. Relation entre les températures de l’air et la distance au centre-ville

Si, comme nous l’avons relevé précédemment, la distribution des valeurs de Ta au sein de l’aire urbaine peut fluctuer selon le positionnement géographique des classes LCZ, il nous semble pertinent d’examiner plus en profondeur l’influence de la position géographique de nos points de mesure sur les Ta au sein des deux territoires étudiés. Pour ce faire, nous avons d'abord déterminé les coordonnées d’un point de référence au cœur de chacune des deux villes, puis calculé la distance entre chaque point de mesure et le centre correspondant. Ce point de référence constitue le centre géographique approximatif des deux conurbations. D’après notre estimation, il correspond à la Porte de Marrakech à Casablanca -située à l’entrée de la Médina, et au bas d’En Fournirue pour l’EMM. Les résultats révèlent un contraste marqué entre les deux aires urbaines :

Au sein de l’EMM, les températures, très élevées au centre, diminuent progressivement à mesure que l'on s'éloigne du centre-ville (**Figure 175**). Cette observation met en évidence une nette corrélation entre l’intensité de l’ICU et le niveau de densité du bâti, puisque l’aire urbaine de Metz, de structure grossièrement radio-concentrique, voit la densité de son bâti décroître du centre vers la périphérie.

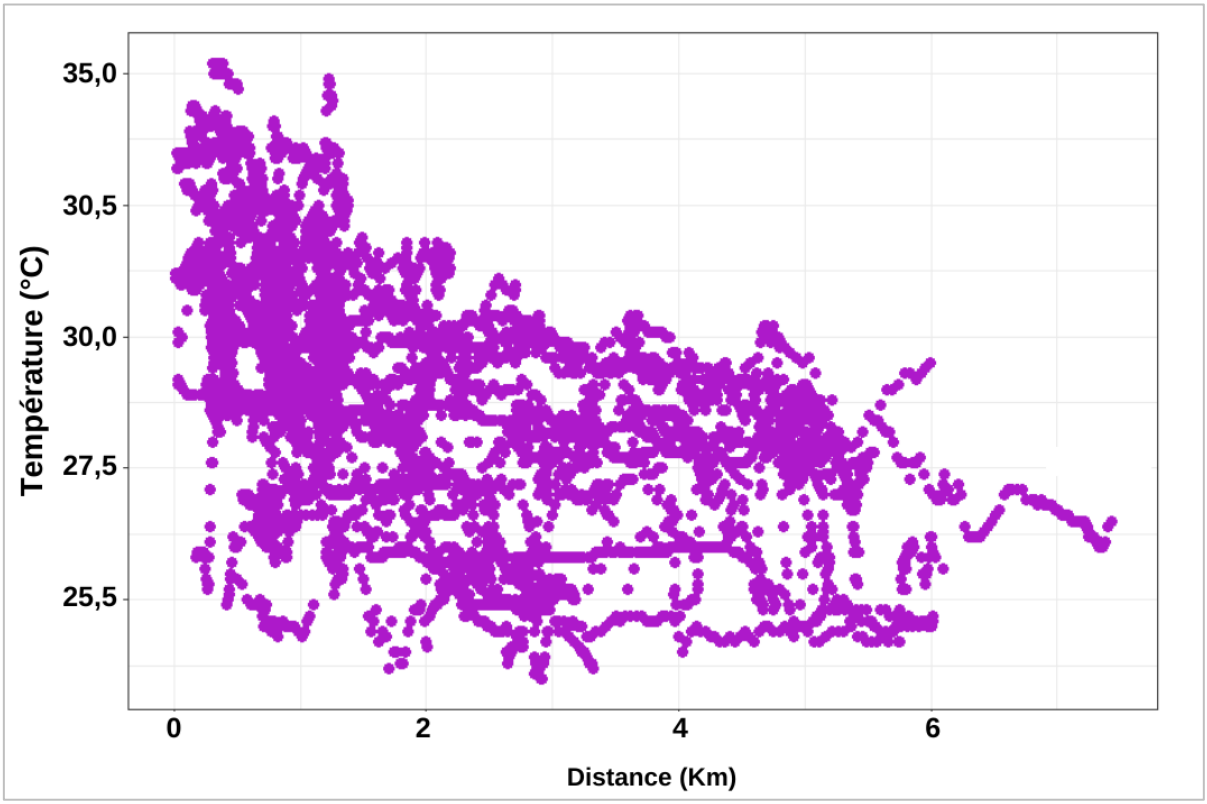


Figure 175 : Relation entre les températures l’air et la distance au centre-ville à l’EMM.

À Casablanca, en revanche, les températures demeurent élevées en s’éloignant du centre de la conurbation (**Figure 176**). Il nous semble que cela par s’expliquer pour deux facteurs géographiques :

- D'une part, à cause de l'affaiblissement de la brise marine à mesure que l'on s'éloigne du front de mer (***cf.* 1.4.2**), puisque moins de deux heures après le coucher de soleil, les surfaces terrestres sont toujours plus chaudes que les surfaces marines, le renversement du régime de brise côtier n'a pas donc pas encore eu lieu au moment de nos relevés. En effet, dans leur travaux sur la côte tunisienne, Dahech *et al.* (2012) ont relevé que la brise de mer continue à souffler à une vitesse moins importante (1 à 3 m/s) deux à trois heures après le coucher du soleil.

- D'autre part, en raison de la persistance d'espaces à forte densité en périphérie du centre-ville. La métropole casablancaise a en effet connu un étalement urbain « en tache d'huile » du fait de l'explosion démographique qu'a connu depuis l'indépendance du Maroc en 1956 (Hassani, 2017). Cet étalement souvent non maîtrisé, a conduit à la création de plusieurs centralités dans la ville, ce qui se retrouve dans la distribution spatiale de l'ICU. Cette constance spatiale des températures élevées est cohérente avec ce que nous avons relevé en ce qui concerne l'ICU de surface qui garde une structure plus ou moins constante tout au long du cycle nocturne (***cf.* 4.4.5.1**).

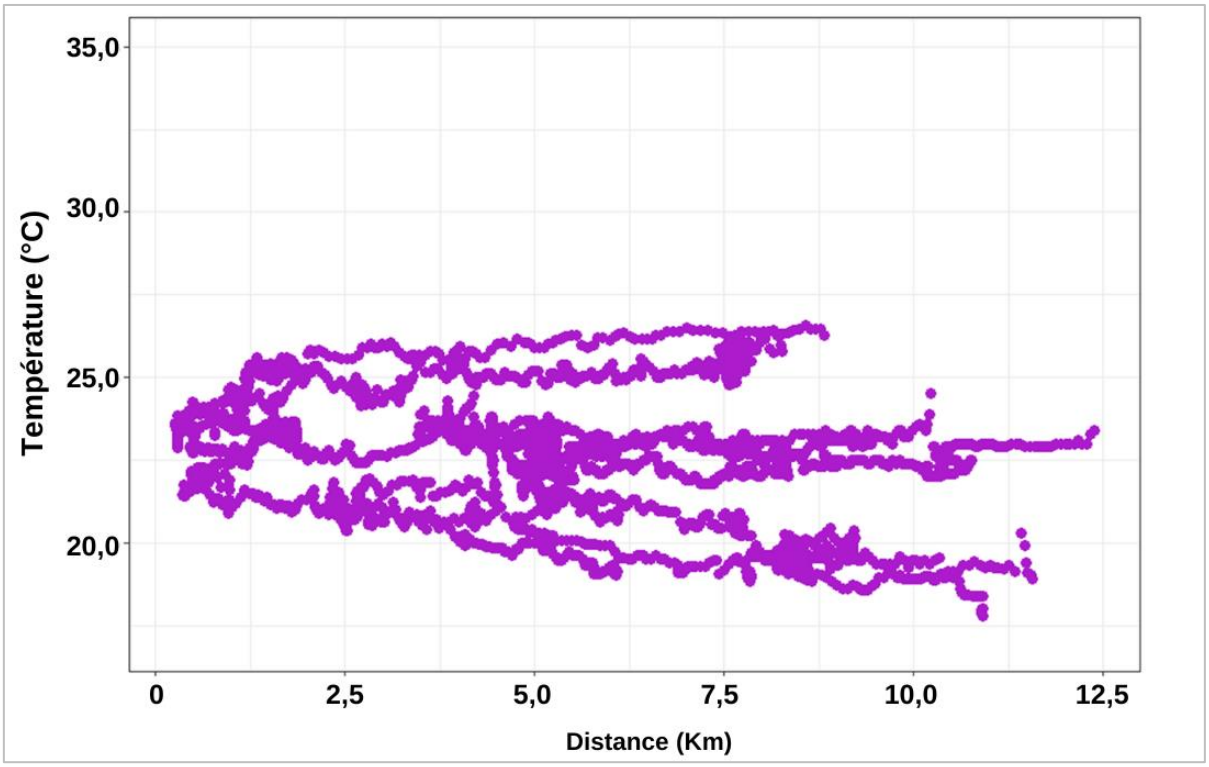


Figure 176 : Relation entre les températures l'air et la distance au centre-ville à Casablanca.

7.4.6. Relation entre les températures de l'air et la distance au centre-ville en fonction des classes LCZ

Après avoir examiné le comportement des Ta en fonction de la distance au centre des deux conurbations, nous avons voulu affiner nos analyses en classifiant les points de mesure par classe LCZ pour mettre en évidence l'influence de la position relative des LCZ au sein de l'aire urbaine.

Sur le territoire messin, la classe LCZ 2, se concentrant dans un rayon de 1,5 km du centre de l'agglomération, est caractérisée par les Ta les plus élevées. Elle est suivie par les classes LCZ 5 et LCZ 6 jusqu'à une distance de 4 km du centre, qui présentent un comportement thermique très similaire. On retrouve également des classes LCZ de type non-bâti (LCZ A, LCZ B, LCZ E, LCZ D) proche du centre-ville. En revanche, les températures au niveau de ces classes varient en fonction de la distance au centre-ville, du taux de végétation, ainsi que de l'environnement immédiat comme exposé précédemment. C'est ce qui explique que sur la figure 177, la classe LCZ D est plus fraîche que la classe LCZ A (zones densément arborées). Cela peut surprendre étant donné que les arbres ont un effet rafraîchissant plus efficace que celui de végétation basse (Bournez, 2018), mais il faut prendre en considération le fait que dans le cas présent, la classe LCZ A est constituée d'un mélange d'espaces boisés situés dans des jardins à proximité du centre-ville, et d'une forêt au sud-est de la ville. Ces deux espaces ont tous deux pour effet de faire baisser les températures, mais avec des amplitudes différentes car l'influence des classes LCZ à proximité immédiate n'est pas explicitement considérée. Dans ce cas particulier, les températures dans le parc urbain peuvent également être influencées par des températures plus élevées enregistrées autour du parc.

Le type de LCZ d'un quartier reste néanmoins le paramètre déterminant de l'ambiance thermique à l'échelle locale. Par exemple, sur la figure 177, les LCZ 8 et LCZ 9 sont toutes deux à une distance d'environ 3 à 6 km du centre de la conurbation, mais la LCZ 8 présente des Ta plus élevées que la LCZ 9.

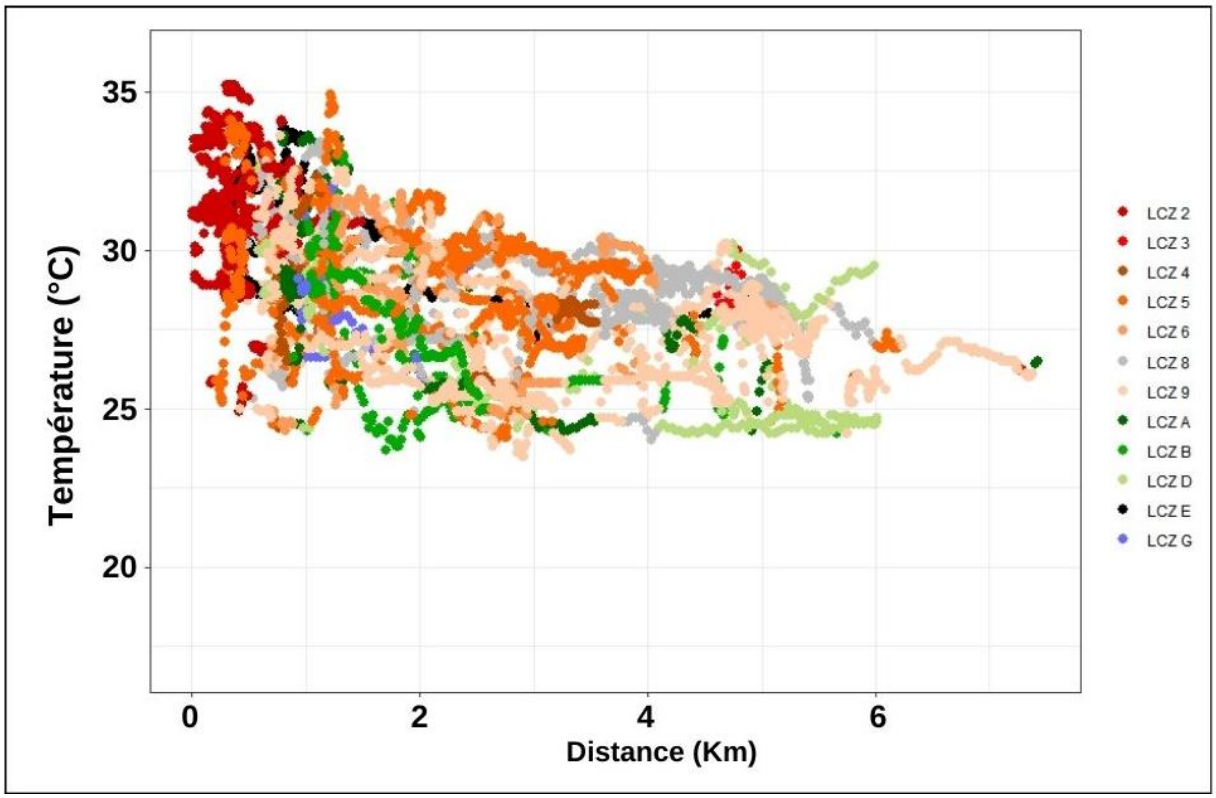


Figure 177 : Relation entre les Ta et la distance au centre-ville en fonction des classes LCZ à l'EMM.

Pour ce qui est de Casablanca, le paramètre de la distance au centre de la conurbation n'a pas d'influence significative sur le comportement thermique des LCZ de même type (**Figure 178**). En effet, les classes LCZ les plus chaudes telles que les LCZ 2 se retrouvent sur toutes l'étendue de l'aire urbaine et ne sont pas concentrées au centre-ville.

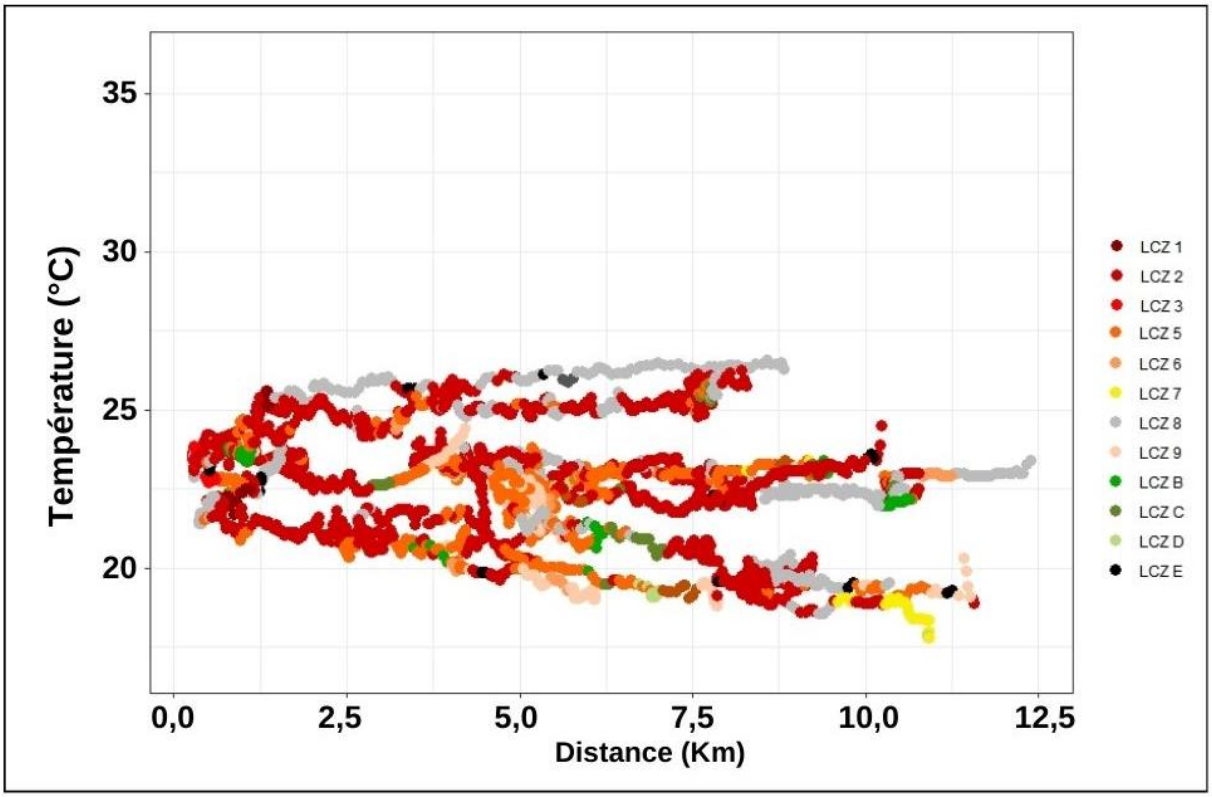


Figure 178 : Relation entre les Ta et la distance au centre-ville en fonction des classes LCZ à Casablanca.

Synthèse

Par le recours aux mesures mobiles sur des transects urbains, nous avons, dans ce chapitre, évalué la distribution spatiale des Ta et l'intensité de l'ICU à une échelle fine sur les territoires de l'EMM et de Casablanca en saison chaude par temps anticyclonique. Cela a permis de mettre en évidence l'impact des typologies rencontrées à l'échelle intra-urbaine sur l'ICU. Des écarts de température ville/campagne relativement élevés ont été constamment observés dans les deux aires urbaines, atteignant des valeurs supérieures à 5 °C. L'analyse des mesures fait cependant ressortir des contrastes thermiques importants entre le tissu urbain du centre-ville, les espaces périurbains moins denses et les espaces végétalisés. Ce sont avant tout les caractéristiques physiques des surfaces (taux de végétation) et la morphologie urbaine qui expliquent la configuration spatiale des champs thermiques. De manière générale, leur structure dépend aussi bien de la situation au sein de l'aire urbaine que du type d'aménagement de chaque quartier, s'exprimant par une morphologie urbaine spécifique et la présence ou non de surfaces végétales. Un contraste entre les deux territoires apparaît lorsque l'on considère le paramètre de l'éloignement vis-à-vis du centre de la ville du fait des différences en termes de structure urbaine. Au sein de l'EMM, la structure radioconcentrique de la ville fait que les températures, très élevées au centre, diminuent progressivement à mesure que l'on s'éloigne du centre-ville, alors qu'à Casablanca, les températures demeurent élevées en s'éloignant du centre, et ont même tendance à augmenter à cause de l'affaiblissement de la brise marine, mais aussi du fait de la persistance d'espaces densément bâtis en périphérie.

Dans un second temps, nous avons procédé à la cartographie en zones climatiques locales de la totalité de nos deux terrains d'étude à l'aide de la méthode *WUDAPT*, ce qui a révélé la présence d'un nombre important de classes LCZ aussi bien à l'EMM qu'au GC. Nous avons alors pu étudier, sur la base de cette classification, l'impact du type de LCZ sur l'intensité et la distribution des Ta. Les résultats valident notre classification puisque les relevés ont montré des niveaux élevés de correspondance avec l'arrangement logique des LCZ, confirmant que les environnements urbains compacts (LCZ 2, LCZ 3 et LCZ 4) enregistrent systématiquement des intensités d'ICU plus élevées que ceux peu construits (LCZ 6 et LCZ 9). Nous avons également constaté que le comportement thermique des LCZ est influencé par la position relative des zones dans l'agglomération : en considérant chaque type de LCZ, les LCZ se situant à proximité du centre de l'agglomération sont relativement plus chaudes que les LCZ de même type, localisées à la périphérie. Cela semble être lié à une advection d'air chaud/froid entre les classes LCZ adjacentes, mais des mesures complémentaires et une analyse par modélisation physique seraient nécessaires pour caractériser les interactions entre les différentes classes LCZ et l'effet réel de cette advection sur le champ de température.

Dans l'ensemble, les instruments utilisés, ainsi que l'approche adoptée pour les mesures itinérantes ont montré un niveau de fiabilité satisfaisant. Nos résultats appuient les études antérieures suggérant que les LCZ peuvent capturer correctement la majeure partie de la

variabilité intra-urbaine de la température nocturne et constituent de ce fait un outil pertinent pour l'aménagement et la planification urbaine. Il convient néanmoins de rappeler que les valeurs d'amplitude calculées dépendent du trajet effectué. Les deux villes n'ont pas été parcourues dans leurs « moindres recoins », les gradients thermiques présentés sont donc relatifs à l'itinéraire de mesure. De surcroît, les mesures n'ont pas été réalisées dans des conditions identiques entre les différentes sessions. Outre les incertitudes évidentes liées aux variations dans les conditions météorologiques, l'utilisation de deux véhicules différents entre l'EMM (vélo) et Casablanca (voiture) limite l'intercomparaison des données. Par ailleurs, pendant les sessions de mesures, le véhicule traverse plusieurs LCZ, et peut donc passer en l'espace de quelques mètres d'une LCZ à l'autre. Or, lorsque le capteur change de LCZ, le comportement thermique ne varie pas forcément de manière brutale. En effet, bien que chaque type de LCZ ait un comportement thermique propre, la zone de transition entre deux LCZ différentes est souvent l'objet d'une transition thermique progressive. Enfin, une autre limite de ce travail réside dans le recours à la méthode du projet *WUDAPT* pour la classification LCZ qui utilise un algorithme de classification aléatoire pour classer les zones urbaines en LCZ en se basant uniquement sur l'imagerie satellitaire multispectrale 2D.

PARTIE II - CONCLUSION

Cette partie a présenté les résultats de l'étude menée au sujet de la surchauffe urbaine dans les territoires de l'Eurométropole de Metz et du Grand Casablanca. Plusieurs méthodes complémentaires ont été employées : la télédétection satellitaire à l'échelle de la tâche urbaine, complétée par l'imagerie aéroportée par drone, les observations géostatiques, ainsi que les mesures mobiles à l'échelle du quartier. Elles mettent en évidence la distribution des champs thermique et la variabilité des températures au sein de la ville sur trois échelles spatiales.

L'analyse des données issues de la télédétection satellitaire a démontré la relation étroite liant la distribution spatio-temporelle des Ts et l'artificialisation des sols. Nous avons pu mettre en évidence la formation, dans les villes étudiées, d'un ICUs qui atteint son intensité maximale en début de nuit. En journée, les deux aires urbaines présentent une multitude de microclimats, dont les configurations spatiales sont fonction des caractéristiques physiques des surfaces et du degré de densité du bâti. L'analyse diachronique montre néanmoins que les Ts se sont globalement intensifiées au cours des dernières décennies et les surfaces chaudes en été ont eu tendance à s'étendre parallèlement à la croissance urbaine des deux agglomérations. Par ailleurs, l'attention portée aux effets climatiques des rénovations urbaines a montré que ces opérations peuvent affecter la distribution des Ts puisqu'ils induisent des changements dans la géométrie urbaine et les propriétés de surface, ce qui modifie le bilan énergétique de surface. D'ailleurs, certains secteurs qui ont été l'objet d'opérations d'aménagement théoriquement favorables à l'atténuation de la surchauffe urbaine, ne présentent pas les résultats escomptés.

Le maillage du territoire de l'EMM par le réseau REMTHAM nous a permis de mettre en évidence la formation d'un ICU de l'ordre de +3,7 °C en moyenne sur le territoire de l'EMM. Celui-ci atteint son intensité maximale l'été par temps calme et ciel clair et semble s'intensifier en période de canicule. De plus, sur la base des relevés effectués par ce réseau, nous avons pu réaliser une modélisation spatiale par régression linéaire multicritère à l'échelle intra-urbaine qui permet d'expliquer plus de 75 % de la variabilité de l'ICU local. Les mesures itinérantes effectuées le long de transects urbains ont ensuite fourni un aperçu très détaillé de la distribution spatiale des Ta et ont mis en évidence l'impact des typologies rencontrées à l'échelle intra-urbaine sur l'ICU. Nous avons pu constater que si l'ambiance thermique en un lieu particulier de l'espace urbain est directement influencée par son environnement immédiat, elle est également influencée par sa situation relative au sein de l'aire urbaine. La confrontation de nos mesures aux zones climatiques locales définies sur la base de la classification LCZ montrent que celles-ci expliquent la majeure partie de la variabilité intra-urbaine de la température nocturne.

Sur le plan méthodologique, le parti-pris expérimental consistant à recourir à une pluralité de méthodes d'observation nous semble pertinent pour poser un diagnostic multi-échelle des variations des champs de températures, ce qui renforce la robustesse des résultats. Rappelons cependant que les méthodes au service du diagnostic de la surchauffe urbaine et de la reconstruction de l'ICU ne représentent pas la panacée et ont des faiblesses liées tout autant à la qualité des données utilisées qu'aux paramètres morphologiques. Les relations statistiques qui en découlent présentent nécessairement des marges d'erreur qui peuvent être importantes.

Les analyses spatiales menées dans cette partie 2 de la thèse constituent une mesure de l'exposition à la chaleur dans l'espace urbain, et vont permettre de proposer, dans la suite de cette thèse, un indice de vulnérabilité aux risques liés à la chaleur.

PARTIE III : VULNERABILITE DE LA POPULATION ET ADAPTATION DES TERRITOIRES URBAINS AUX RISQUES LIES A LA CHALEUR

PARTIE III - INTRODUCTION

Les analyses géospatiales développées dans la partie précédente fournissent des informations importantes au sujet du phénomène de surchauffe urbaine dans nos deux terrains d'étude, et documentent de manière précise les espaces sur lesquels des mesures d'adaptation du tissu urbain devraient être prioritairement entreprises. Néanmoins, ces analyses ne renseignent pas suffisamment les décideurs des deux villes sur les populations à cibler en priorité pour réduire la vulnérabilité aux risques sanitaires liés à la chaleur intense. Or, à une époque où l'adaptation aux changements climatiques est un enjeu de premier plan, acquérir une compréhension précise de la question de la vulnérabilité des populations et des territoires revêt une importance capitale. Cela passe par une approche intégrant des données diverses, à la fois quantitatives et qualitatives, touchant à l'objectif (les mesures physiques) comme au subjectif (ce qui est perçu par les habitants d'un territoire).

Cette partie propose une étude de la vulnérabilité aux risques liés à la chaleur au sein des deux territoires étudiés en vue de compléter nos travaux en intégrant un volet sensible, celui des relations entre les individus et leur environnement. Dans un premier, nous nous appuyons sur le cadre analytique établi dans le chapitre 2 pour développer un indice de vulnérabilité, qui est ensuite spatialisé à l'échelle de l'agglomération **(chapitre 8)**. Ensuite, au moyen d'une approche à la fois ascendante et descendante (Wilhelmi et Hayden, 2010), nous conduisons une enquête de terrain auprès des habitants (approche ascendante ou *bottom-up*) **(chapitre 9)**, tout en impliquant simultanément les acteurs publics locaux (approche descendante ou *top-down*) **(chapitre 10)**.

Chapitre 8 : Spatialisation de la vulnérabilité à la chaleur intense

Depuis 2010, les études quantifiant la vulnérabilité à la chaleur ont connu un développement significatif dans le monde entier, identifiant les différents facteurs de sensibilité, que ce soit sur le plan épidémiologique ou sur celui des facteurs socio-économiques. Cela a permis de déployer et de perfectionner les systèmes d'alerte-canicule (***cf.* 2.3.**). Cependant, on s'est rendu compte que, bien que le but de ces dispositifs soit de produire de l'information sur les risques sanitaires liés à la chaleur, les alertes/avertissements associés manquent de spécificité géographique ou spatiale à l'échelle intra-urbaine (Wolf et McGregor, 2013). Ce sont les groupes vulnérables de la population, tels que les personnes âgées, qui sont généralement ciblés plutôt que des zones spécifiques qui peuvent présenter un certain nombre de caractéristiques qui contribuent à accroître leur vulnérabilité à la chaleur. Or, il est aujourd'hui reconnu que pour que les mesures de prévention soient efficaces, des informations sur la vulnérabilité à la chaleur à des résolutions spatiales plus fines que l'échelle régionale ou urbaine sont nécessaires pour aider les décideurs à allouer des ressources dans la préparation et l'intervention en cas de vague de chaleur.

Aussi, sur la base du cadre théorique établi dans le chapitre 2 (***cf.* 2.1.**), nous proposons, dans ce chapitre, de traduire les connaissances sur les déterminants de la vulnérabilité à la chaleur dans un indice d'évaluation permettant d'identifier à une échelle spatiale fine les populations résidentielles vulnérables aux risques liés à la chaleur intense. Le but de cet outil d'évaluation est d'ouvrir la voie à une meilleure compréhension de la complexité des interactions entre le contexte urbain et les déterminants de la vulnérabilité à la chaleur. Ces informations pourront ensuite être mises à profit par le gestionnaire du risque comme aide à la décision pour lui permettre de prioriser les mesures de prévention et d'action. L'indice d'évaluation est développé dans un premier temps dans le contexte français du territoire messin.

8.1. Cadre théorique **261**

8.2. Echelles et données **262**

8.3. Méthodologie **265**

8.4. Cartographie de l'indice de vulnérabilité **268**

Synthèse **270**

8.1. Cadre théorique

Avec de nombreuses variables à prendre en compte, les professionnels de la santé publique qui cherchent à traduire la recherche en programmes préventifs concrets sont confrontés à la difficulté de simplifier la relation complexe liant population, territoire, et données climatiques. Or, si la littérature publiée sur la vulnérabilité à la chaleur est importante (Chow *et al.*, 2012, 2012), les évaluations quantitatives sont relativement rares. Parmi les études publiées, certains travaux ont analysé la vulnérabilité sous le prisme de la mortalité observée, sans prendre en compte des variables explicatives sociales permettant de la contextualiser (Dousset *et al.*, 2011 ; Lemonsu *et al.*, 2015). D'autres traitent bien ces deux aspects, mais sans prendre en compte la dimension climatique (Benmarhnia *et al.*, 2017), ce qui ne permet pas de mener une analyse de la vulnérabilité en fonction des processus physiques qui l'amplifient dans un milieu urbain. En effet, comme le relève Hamstead *et al.* (2018), seule une évaluation de la vulnérabilité à une échelle spatiale fine permet d'identifier les populations résidentielles les plus à risque.

L'élaboration de ces outils d'évaluation a été amorcée depuis 2010 pour plusieurs grandes villes dans le monde, mais elle n'est pas encore fréquente sur le territoire français (Kastendeuch, 2022). À cela deux raisons : d'une part, comme exposé dans le chapitre 2, la vulnérabilité est une notion difficile à quantifier, elle ne peut être qu'estimée à l'aide d'indicateurs synthétiques basés sur des combinaisons de variables. Ensuite, les données nécessaires pour extraire ces variables ne sont pas toujours disponibles, ou si elles le sont, ce n'est pas nécessairement à une échelle suffisamment fine.

La rareté des données conditionne non seulement les terrains pouvant être traités, mais aussi les méthodes mobilisables pour la construction des modèles, particulièrement pour le choix des variables et les pondérations relatives. Par conséquent, les indices d'évaluation varient considérablement, ce qui rend difficile la comparaison des résultats. Par exemple, Reid *et al.* (2009) ont cartographié et analysé la vulnérabilité à la chaleur dans presque 40 000 secteurs de recensement aux États-Unis à l'aide de dix indicateurs, qui ont fourni un modèle pour cartographier la vulnérabilité à la chaleur à l'échelle régionale. Wolf et McGregor (2013) ont utilisé neuf variables d'exposition et de sensibilité à la chaleur dans 4 765 districts de recensement du Royaume-Uni ; Azhar *et al.* (2017) ont élaboré une carte de la vulnérabilité aux vagues de chaleur à l'aide de 17 indicateurs pour 640 districts en Inde ; Zhang *et al.* (2018) ont utilisé 13 variables environnementales et socio-démographiques pour cartographier la vulnérabilité urbaine à Sydney, en Australie. La même année, Nayak *et al.* (2018) ont également utilisé 13 variables pour cartographier la vulnérabilité dans 2700 secteurs de l'Etat de New-York (Etats-Unis) ; Zheng *et al.* (2020) ont utilisé 8 indicateurs pour cartographier les risques liés à la chaleur dans le Nord de la Chine.

8.2. Echelles et données

8.2.1. Echelle spatiale de travail

Le choix d'une échelle spatiale est une étape cruciale, car elle doit répondre à la nécessité de déterminer de manière précise les sous-ensembles territoriaux les plus vulnérables, en prenant véritablement en compte leurs caractéristiques propres. Un compromis doit alors être trouvé entre le degré de finesse de l'échelle spatiale et les données disponibles, afin d'être en mesure d'alimenter l'indice de vulnérabilité. D'emblée, deux types de mailles territoriales sont envisageables : les unités de carroyage et les Ilots Regroupés pour l'Information Statistique (IRIS). Les premiers constituent une maille faisant abstraction des frontières administratives et des découpages techniques habituels de l'INSEE. Plus précisément, l'espace est découpé selon des carreaux de 100 ou 200 m de côté, ce qui en fait une maille sensiblement plus fine avec aussi à son avantage de permettre une comparaison spatiale aisée (car tous les carreaux sont de même dimension). Néanmoins, c'est l'IRIS qui constitue la « brique de base » en matière de diffusion de données infra-communales. Cette maille, bien que moins précise spatialement, agglomère un nombre de données amplement supérieur aux unités de carroyage, tant en diversité qu'en temporalité.

Le choix de l'échelle de travail s'est donc naturellement porté sur l'IRIS pour sa précision infra-communale essentielle pour l'étude des grandes communes de l'EMM, et surtout, pour le nombre d'indicateurs disponibles à cette échelle. Ce découpage est basé sur des critères géographiques et démographiques avec des contours identifiables et stables dans le temps. Les petites communes forment un seul IRIS, tandis que celles de plus de 5 000 habitants sont généralement découpées en plusieurs IRIS[48]. Ainsi, l'Eurométropole de Metz est composée de 113 IRIS, dont 49 au sein de la seule commune de Metz.

8.2.2. Données utilisées

La première étape dans l'élaboration de l'indice porte sur la construction de la base de données des variables décrivant la vulnérabilité à la chaleur. En se référant à la littérature scientifique, plusieurs variables susceptibles d'affecter la vulnérabilité à la chaleur ont été identifiées. Au départ, nous sommes partis sur un large panel de données, mais nous avons dû nous restreindre, car certaines données n'étaient pas disponibles à l'échelle de l'IRIS (résolution spatiale de référence). Les données que nous exploitons sont principalement issues du site internet de l'Insee, ainsi que d'autres sources telles que l'IGN et *Géodata.*

Cependant, il convient de noter que certaines données essentielles liées à la sensibilité, telles que celles relatives aux antécédents médicaux, notamment les maladies cardiovasculaires, respiratoires, le diabète ou l'obésité, qui sont des facteurs de comorbidité potentiellement mortels lors de périodes de forte chaleur, n'ont pas pu être incluses dans notre étude. Malgré nos recherches approfondies, avec notamment la consultation de plusieurs bases de données en

[48] Site de l'Insee, 2018, https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1523, consulté le 9 septembre 2023.

ligne et la prise de contact avec des établissements publics tels que l'Agence Régionale de Santé (ARS), nous n'avons pas pu obtenir ces données à l'échelle de l'IRIS.

De plus, étant donné que la vulnérabilité dépend également des caractéristiques des structures qui hébergent la population -les conditions à l'intérieur des bâtiments peuvent différer notablement de celles à l'extérieur-, il nous a paru important de recueillir des données au sujet des conditions des logements. Malheureusement, nous avons également rencontré des difficultés à accéder à ces données. Par conséquent, l'indice de vulnérabilité que nous avons produit repose exclusivement sur des données sociodémographiques, dont l'âge, le niveau d'éducation, ainsi que des données socioéconomiques, telles que le taux de chômage et de pauvreté. Ces données sont plus facilement accessibles, mais elles limitent considérablement la portée de notre indice. Cette limitation doit être prise en compte lors de l'interprétation de nos résultats.

Une grande partie des données extraites de l'Insee a été fournie à l'échelle de l'IRIS pour l'année 2019. Cependant, dans le cas de certaines données, telles que la proportion de personnes appartenant aux catégories socioprofessionnelles des ouvriers et des agriculteurs, les données ont été regroupées afin de créer la variable appelée « part de personnes ayant un travail physique en extérieur ».

Les données disponibles sous forme de raster, telles que les données relatives à l'ICU, la part de surfaces végétalisées et la part d'espace bâti, ont été traitées dans un SIG à l'aide de l'outil « statistiques zonales » du logiciel *QGIS*. L'objectif de cette démarche est de calculer la valeur moyenne de ces données pour chaque IRIS.

Enfin, les données disponibles en format vecteur (ponctuelles) telles que le nombre de supermarchés, cinémas, piscines, etc. ont été sélectionnées à l'aide des requêtes attributaires pour produire la variable « nombre d'établissements/lieux climatisés ou nombre d'établissements au potentiel rafraîchissant ». Une fois cette étape terminée, les entités ponctuelles ont été comptabilisées sur chaque IRIS à l'aide de l'outil « *Intersection* ».

Les données sont ensuite triées pour constituer les variables qui représentent et contextualisent les trois facteurs qui définissent la vulnérabilité d'après le cadre conceptuel présenté dans le chapitre 2 : la sensibilité, l'exposition et la résilience (**Tableau 43**).

Tableau 43 : Variables sélectionnées pour élaborer l'indice de vulnérabilité sur le territoire de l'EMM (en jaune les variables de sensibilité, en rose les variables relatives à l'exposition et en vert les variables se rapportant à la résilience).

N°	Variable	Code	Impact sur la vulnérabilité	Références bibliographiques
1	Part de personnes au chômage	CHOM	(+)	(Cutter *et al.*, 2003 ; Alonso, 2021 ; Lagelouze, 2022)
2	Part de personnes inactives	INACT	(+)	(Cutter *et al.*, 2003 ; Alonso, 2021 ; Lagelouze, 2022)
3	Taux de pauvreté	PAUV	(+)	(Romero-Lankao et al., 2012 ; Bao et al., 2015 ; Alonso, 2021)
4	Part de personnes non scolarisées sans diplôme ou CEP	P_NS	(+)	(Rinner *et al.*, 2013 ; Benmarhnia *et al.*, 2017 ; Alonso, 2021)
5	Part de personnes de 15 ans ou plus non scolarisée	P_NS2	(+)	(Rinner *et al.*, 2013 ; Benmarhnia *et al.*, 2017 ; Alonso, 2021)
6	Part d'étrangers	ETRAN	(+)	(Rinner *et al.*, 2013 ; Benmarhnia *et al.*, 2017)
7	Part d'immigrés	IMMI	(+)	(Rinner *et al.*, 2013 ; Benmarhnia *et al.*, 2017)
8	Part de personnes ayant un travail physique d'extérieur (CSPs ouvriers et agriculteurs)	T_PE	(+)	(Ebi *et al.*, 2021 ; Lagelouze, 2022)
9	Part de retraitées	RET	(+)	(Alonso et Renard, 2020 ; Faye *et al.*, 2021)
10	Part de personnes âgées de 65 ans et plus	P_65	(+)	(Guo *et al.*, 2019 ; Alonso, 2021 ; Zhu et Yuan, 2023)
11	Part de personnes âgées de moins de 5 ans	M_5	(+)	(Johnson *et al.*, 2012 ; Lareau et Baudouin, 2015 ; Faye *et al.*, 2021)
12	Part de femmes	FEM	(+)	(Ebi *et al.*, 2006 ; Borden *et al.*, 2007 ; Alonso, 2021)
13	Nombre d'établissements sociaux	EAS	(+)	(Cutter *et al.*, 2003 ; Alonso et Renard, 2020)
14	Densité de population	DP	(+)	(Lemonsu *et al.*, 2015 ; Wolf *et al.*, 2015 ; Lagelouze, 2022)
15	Part de personnes vivant seules	SEUL	(+)	(Rinner *et al.*, 2013 ; Sakhy, 2016 ; Ebi *et al.*, 2021)
16	Part de personnes hors ménages	P_HM	(+)	(Rinner *et al.*, 2013 ; Lagelouze, 2022)
17	Part des résidences principales (hors studio de 1 personne) en suroccupation	SUROC	(+)	(Kotharkar et Ghosh, 2022 ; Lagelouze, 2022)
18	Part de personnes vivant dans un HLM comme résidence principale	HLM	(+)	(Alonso, 2021 ; Lagelouze, 2022)
19	Part de personnes locataires en résidences principales	P_L	(+)	(Ebi *et al.*, 2006 ; Benmarhnia *et al.*, 2017)
20	Part d'appartements comme résidence principale	APPART	(+)	(Alonso, 2021 ; Cheng *et al.*, 2021)
21	Part de personnes bénéficiaires de la CNAM	CNAM	(-)	(Alonso, 2021 ; Lagelouze, 2022)
22	Part des ménages disposant d'au moins un véhicule	MOTO	(-)	(Aminipouri *et al.*, 2016 ; Cheng *et al.*, 2021)
23	Nombre d'établissements de soin	ES	(-)	(Alonso, 2021 ; Lagelouze, 2022)
24	Nombre d'établissements/lieux climatisés ou au potentiel rafraîchissant	EC	(-)	(Alonso, 2021 ; Lagelouze, 2022)
25	Part de surfaces végétalisées	VEGE	(-)	(Rinner *et al.*, 2013 ; Lemonsu *et al.*, 2015)
26	Part de surfaces bâties	URB	(+)	(Rinner *et al.*, 2013 ; Lemonsu *et al.*, 2015)
27	Part de l'indice ICU	ICU	(+)	(Lagelouze, 2022)

8.2.2.1. Variables liées à la sensibilité

Les variables liées à la sensibilité fournissent des informations sur la capacité d'un individu à se prémunir et à se protéger contre les conditions de chaleur extrême. Celles prises en compte dans ce travail se rapportent tout autant à la dimension physiologique (sexe **(12)** et âge **(10)** et **(11)**) qu'à la dimension socio-économique de la sensibilité (le taux de chômage **(1)**, la population inactive **(2)**, le taux de pauvreté **(3)**, l'éducation (**(4)** et **(5)**), la part d'étrangers **(6)** et d'immigrés **(7)**, la part de personnes ayant un travail physique en extérieur **(8)**, la part de retraités **(9)**, la part de personnes sans-abris **(16),** les caractéristiques du logement (**(17)** à **(20)**).

Précisons que la variable liée aux personnes vivant seules **(15)** est utilisée pour identifier les personnes isolées. Bien que le fait de vivre seul ne reflète pas nécessairement l'isolement social, cette mesure est la seule disponible à notre échelle pour estimer l'isolement.

8.2.2.2. Variables liées à l'exposition

Les variables relatives au facteur d'exposition rendent compte des aspects liés à l'environnement physique susceptibles d'aggraver les impacts des périodes de forte chaleur. Il s'agit en premier lieu de l'intensité de l'ICU **(27)**, mais aussi de la densité du tissu urbain **(26).**

8.2.2.3. Variables liées la résilience

Les données relatives à la résilience décrivent la capacité d'une population à faire face en cas d'épisode de chaleur intense. Les variables retenues dans ce travail, recouvrent les deux aspects de la résilience, à savoir des pratiques d'adaptation observées au niveau des individus (part de ménages disposant d'au moins un véhicule **(22)**, le nombre de lieux et établissements dotés d'un potentiel rafraîchissant **(24)** où les citadins peuvent se réfugier en cas de forte chaleur) et de l'autre, les mesures relevant de la résilience collective ou institutionnelle (le nombre d'établissements de soins **(23)**, et le nombre de parcs et jardins **(25))**.

8.3. Méthodologie

Nous avons choisi l'analyse en composantes principales (ACP) pour la construction de indice de vulnérabilité à la chaleur, une approche fréquemment employée dans la littérature (Reid *et al.*, 2009 ; Harlan *et al.*, 2013). L'ACP se concentre sur l'analyse des relations entre les éléments, identifiés par leurs distributions statistiques respectives (Inostroza *et al.*, 2016 ; Alonso et Renard, 2020). Lors de la création des composantes principales, certaines variables qui les composent peuvent être privilégiées et recevoir un poids plus élevé que d'autres en fonction de la qualité de leurs relations mutuelles. Ainsi, l'ACP permet d'explorer, de réduire et d'interpréter de manière efficace les données complexes en identifiant les relations importantes entre les variables, tout en simplifiant la représentation de ces données pour une meilleure compréhension (Sakhy, 2016) .

8.3.1. Prétraitements des données

Avant de procéder aux analyses statistiques, nous avons effectué des prétraitements visant à préparer la base de données sélectionnée. Il est essentiel que les variables que nous souhaitons comparer disposent du même nombre d'observations et ne présentent pas de valeurs manquantes. Or, certaines ne sont disponibles que sur une partie des IRIS telles que le taux de pauvreté et la proportion de personnes bénéficiaires du régime général de l'Assurance Maladie (CNAM). Dès lors, nous avons exclu les variables les concernant lorsque le taux de données manquantes atteignait ou dépassait 5 %. De plus, nous avons retiré les IRIS comportant au moins une valeur manquante, ce qui a conduit à l'exclusion de deux IRIS de notre analyse.

La première étape du prétraitement des données consiste à les standardiser ou à les normaliser en utilisant la méthode *Z-score*. Cette opération vise à rendre les comparaisons plus pertinentes en atténuant l'influence potentielle des valeurs extrêmes sur la variable considérée. Elle a pour effet de rendre les données sans unité ni échelle spécifiques, tout en maintenant une moyenne nulle et un écart-type de 1 pour toutes les variables (Alonso, 2021 ; Lagelouze, 2022). Cela permet d'éviter une subjectivité supplémentaire dans le développement de l'indice (Bao *et al.*, 2015). L'équation pour calculer le *Z-score* est la suivante :

$$Z = \frac{X-\mu}{\sigma} \qquad (31)$$

avec :

X : valeur de l'observation,
μ : moyenne de la variable,
σ : écart type de la variable.

Ensuite, nous avons vérifié la dépendance des variables à l'aide d'une matrice de corrélation de Pearson. Une variable a été supprimée de toutes les paires de variables disposant d'un R supérieur à ±0,7. Pour décider de la variable à retirer, nous avons eu recours à l'indice de VIF (*Variance Inflation Factor*), nous avons alors retiré les variables présentant une valeur supérieure à 5 %. Ainsi, sur les 26 variables initiales, nous n'en avons conservé que 15 à l'issue des tests réalisés.

8.3.2. Construction de l'indice

Une ACP avec rotation *Varimax* a été appliquée, ce qui a permis de réduire l'ensemble de données d'origine en un ensemble plus restreint de nouvelles variables indépendantes, appelées composantes (Bao *et al.*, 2015 ; Alonso, 2021). Cette analyse a révélé l'existence de quatre facteurs principaux qui expliquent 73,6 % de la variance totale (**Tableau 44**).

Tableau 44 : Les poids factoriels des variables sur chaque facteur de l'ACP, avec en gras, le poids factoriel maximum par variable.

Variables	F1	F2	F3	F4
INACT	0,277	0,009	0,000	**0,448**
P_HM	0,259	0,007	0,102	**0,442**
p_NS	0,111	**0,662**	0,001	0,047
ETRAN	**0,457**	0,001	0,375	0,045
P_65	0,186	**0,449**	0,116	0,000
M_5	0,000	0,014	**0,786**	0,000
FEM	0,034	**0,801**	0,054	0,006
T_PE	0,046	0,031	**0,748**	0,000
EAS	**0,499**	0,032	0,055	0,007
SEUL	**0,498**	0,234	0,033	0,008
ES	**0,210**	0,068	0,068	0,019
EC	**0,195**	0,012	0,057	0,083
VEGE	**0,640**	0,092	0,000	0,098
ICU	**0,630**	0,106	0,001	0,131
M_MOTO	**0,481**	0,231	0,000	0,041

Chacun de ces facteurs joue un rôle dans l'augmentation ou la diminution de la vulnérabilité des populations lorsqu'elles sont exposées aux fortes chaleurs, en fonction des variables qu'ils englobent. Plus précisément, les variables ayant le poids factoriel le plus élevé dans une même dimension sont combinées par addition ou soustraction, en fonction de leur impact sur la vulnérabilité (**Tableau 44**, **Figure 179**). Les variables ayant un impact négatif sur la vulnérabilité et un poids factoriel négatif sont également combinées par addition. De plus, avant et après cette combinaison, les valeurs brutes des variables ainsi que les valeurs finales des facteurs ont été normalisées en utilisant la méthode Min-Max (équation 32). Cette normalisation garantit que chaque résultat est comparable au minimum. Enfin, la vulnérabilité globale est simplement obtenue en additionnant les contributions de tous les facteurs.

$$Min - Max = \frac{Y - min_y}{max_y - min_y} \qquad (32)$$

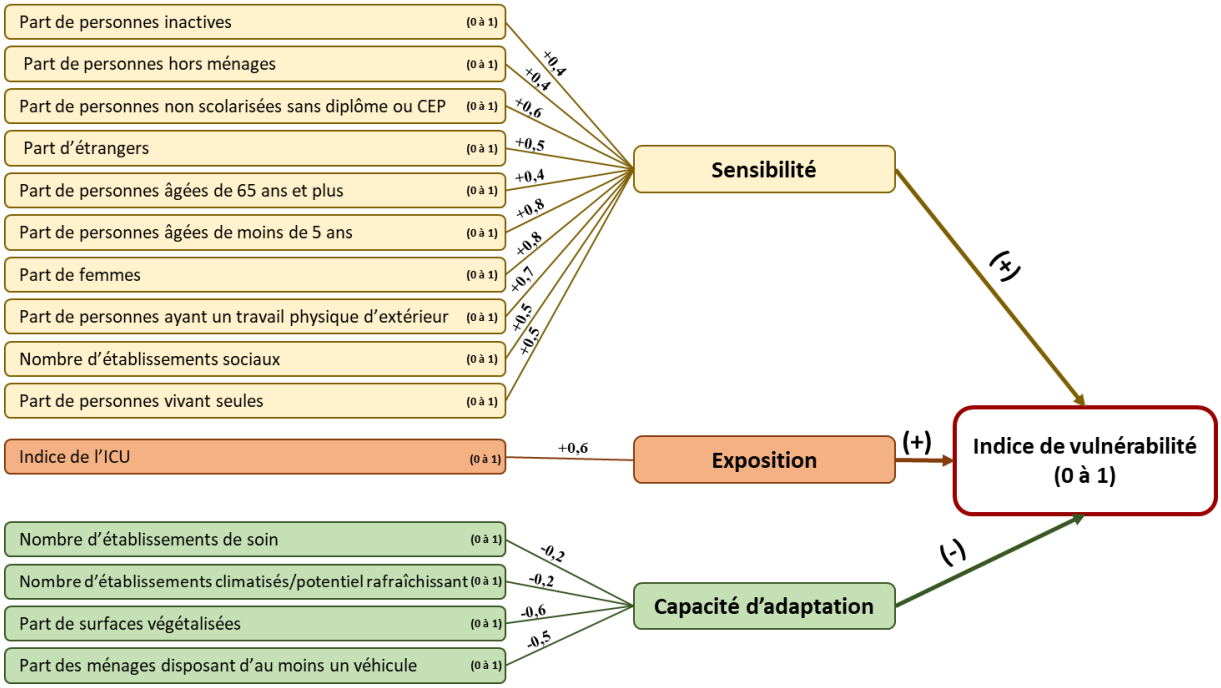


Figure 179 : Opérations appliquées sur les variables identifiées pour produire l'indice de vulnérabilité à la chaleur à l'aide de l'ACP.

8.4. Cartographie de l'indice de vulnérabilité

A l'issu des traitements statistiques, l'indice établi est cartographié sur le territoire de l'EMM à l'aide d'un SIG avec des valeurs allant de 0 (vulnérabilité nulle) à 1 (vulnérabilité maximale) en appliquant la méthode des seuils naturels de Jenks. Cette méthode consiste à créer des catégories de valeurs en prenant en considération les discontinuités au sein de la distribution des valeurs de l'indice. La figure 180 représente la distribution de la vulnérabilité à la chaleur sur le territoire de l'EMM.

Les valeurs allant de 0,4 à 0,9 sont les plus présentes et couvrent presque la totalité des IRIS urbanisés. La valeur maximale (1) n'est relevée que dans un seul IRIS correspondant à la zone de Woippy Saint-Eloi.

Ainsi, la vulnérabilité à la chaleur intense touche en premier lieu le cœur de la métropole dont le centre-ville de Metz, Woippy, Montigny-lès-Metz et Marly, et semble décroître à mesure que l'on s'éloigne du centre-ville. Plus précisément, les espaces soumis à une forte vulnérabilité s'inscrivent au sein des catégories suivantes :

- Certaines zones du centre-ville dont la densité de population est très élevée, de même que la proportion de personnes vivant seules (la partie est du centre-ville de Metz).
- Des IRIS excentrés correspondant à des quartiers défavorisés à densité élevée, caractérisés par une forte proportion d'habitat social couplée à des indicateurs de précarité élevés (quartiers de Belle-Croix, Borny, Metz Nord et Woippy par exemple).
- Les zones de proche périphérie comptant une forte proportion de personnes âgées et un faible nombre d'espaces verts (Marly et Saint-Julien-lès-Metz par exemple).

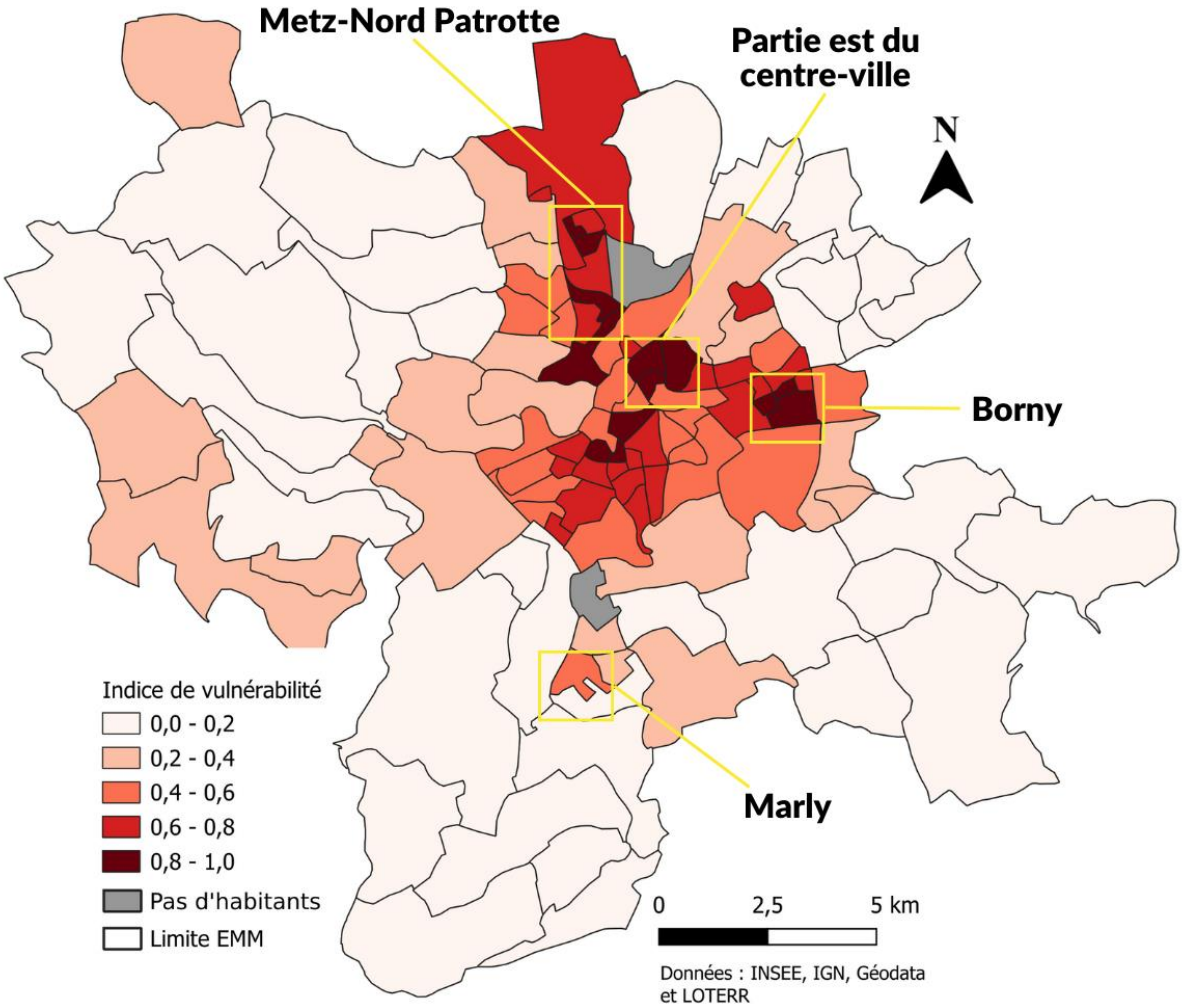


Figure 180 : Carte de vulnérabilité à la chaleur de l'Eurométropole de Metz à l'échelle des IRIS.

Synthèse

En prenant appui sur le cadre théorique établi précédemment, nous avons, dans ce chapitre, récolté des données pour constituer un panel de variables que nous avons classées selon les facteurs définissant la notion de vulnérabilité. Ensuite, après avoir intégré à ces données les résultats de notre diagnostic de l'ICU dans l'agglomération messine (en tant que facteur d'exposition), nous leur avons appliqué une analyse statistique multivariée pour produire un indice de la vulnérabilité aux risques liés à la chaleur dans le territoire de l'EMM.

La spatialisation de cet indice a abouti à une carte mettant en évidence des espaces à forte vulnérabilité concentrés au niveau du cœur de l'agglomération, des quartiers défavorisés à l'est et au nord, ainsi que dans certaines zones résidentielles en périphérie se distinguant par leur densité élevée et une proportion importante de résidents âgés. C'est donc dans ces espaces qu'il faudrait porter une attention particulière en matière de sensibilisation et de prévention des risques liés chaleur, en imaginant plusieurs types de mesures. Il peut s'agir d'actions ponctuelles en cas de vagues de chaleur, ou de mesures économiques et de politique de la ville.

Il convient néanmoins de prendre ces résultats avec prudence, car des insuffisances importantes peuvent être relevées. Elles sont liées notamment au manque de données à l'échelle de l'étude (IRIS). Il s'agit en particulier, des données liées à l'état de santé (pathologies, nombre de personnels soignants, etc.) et à la qualité des logements que nous n'avons pas pu obtenir malgré nos efforts. En termes de perspectives, en plus de renforcer la robustesse de cet indice en collectant les données manquantes, il serait également pertinent d'envisager le développement d'un indice de vulnérabilité spécifique pour le contexte urbain de Casablanca.

Chapitre 9 : L'expérience sociale de la surchauffe urbaine

Nos recherches sur la vulnérabilité à la chaleur nous ont conduits à documenter l'expérience sociale de la surchauffe urbaine afin de mieux comprendre comment celle-ci est perçue par la population urbaine.

L'évaluation de la perception du risque caniculaire et l'adaptation à la surchauffe urbaine d'une population nécessite une méthode de collecte de données adaptée, surtout lorsque cela concerne deux terrains que l'on cherche à mettre en miroir. Dans ce chapitre, nous présentons l'enquête par questionnaire que nous avons menée au sein de nos deux terrains d'étude. Nous avons opté pour cette méthode, car elle est considérée comme l'un des moyens les plus adaptés pour mesurer la perception de la chaleur et des risques qui lui sont liés par la population (Goeldner-Gianella et Humain-Lamoure, 2010 ; Verlynde, 2018). Cette méthode a pour avantage de permettre d'explorer les différents aspects d'un phénomène en ciblant une population large. Pour cela, le questionnaire doit être distribué à un nombre important d'individus afin de tester un certain nombre de facteurs qui influencent la perception, tels que les facteurs socio-démographiques, culturels et environnementaux. L'objectif est alors d'interroger : (1) la perception générale des risques, c'est-à-dire quels aléas naturels sont perçus comme problématiques, (2) la façon dont ces épisodes de fortes chaleurs sont perçus, (3) d'identifier les facteurs de perception susceptibles d'influencer leur vulnérabilité, (4) de comprendre comment cela affecte leurs comportements et stratégies d'adaptation et d'identifier leur pratique des lieux et, enfin, (5) d'identifier leur perception des stratégies d'atténuation pour lutter contre la surchauffe urbaine et améliorer le cadre de vie en ville.

L'approche comparative intervient, ensuite, pour alimenter le travail d'analyse en mettant en évidence les similitudes et les différences identifiées entre les territoires étudiés. Cette approche tient compte des « aspérités » du terrain tels que le climat, la culture, l'architecture et la chaleur qui est plus intense en milieu méditerranéen. Il s'agit donc de vérifier si la chaleur accablante et les risques qui en découlent sont perçus de la même manière au sein des deux territoires.

9.1. Méthodologie et protocole d'enquête **272**
9.2. Analyse comparative des résultats **279**
Synthèse **302**

9.1. Méthodologie et protocole d'enquête

9.1.1. Définition des hypothèses

Sur la base de nos recherches bibliographiques, nous avons formulé cinq hypothèses afin d'apporter des éléments de réflexion à la problématique (Hassani *et al.*, 2023c) :

- (1) **La première hypothèse suggère que « la perception générale des préoccupations et des risques naturels diffère entre les deux territoires en raison de leurs contrastes climatiques, culturels et sociaux** ». Cette hypothèse permet d'identifier les sujets de société qui préoccupent les habitants ayant participé à l'enquête ainsi que leur perception des risques climatiques.
- (2) **La deuxième hypothèse considère que « les facteurs de perception influençant la vulnérabilité des habitants diffèrent également entre les deux territoires** ». Cette hypothèse comprend des aspects distincts : le premier vise à détecter les personnes vulnérables à la chaleur intense et à évaluer leur niveau de vulnérabilité, et le second permet d'identifier les facteurs qui influencent la vulnérabilité de la population.
- (3) **La troisième hypothèse énonce que « les impacts de la chaleur intense diffèrent entre les deux territoires tout autant que les comportements et les stratégies d'adaptation suivies par les habitants en raison du contexte socio-culturel** ». Cette hypothèse vise à identifier les impacts de la chaleur sur les activités quotidiennes des habitants, à caractériser leurs comportements face à la chaleur intense, et à identifier les stratégies d'adaptation auxquelles ils ont recours.
- (4) **La quatrième hypothèse suggère que « les pratiques de lieux des participants des deux villes sont différentes, ce qui se traduit par des représentations distinctes des espaces de chaleur et de fraîcheur. Ces différences sont liées aux aménagements urbains propres à chaque ville** ». Il s'agit ici d'identifier, à l'aide d'une carte interactive, les sites que les habitants considèrent comme particulièrement chauds ou frais au sein de l'espace urbain.
- (5) **La cinquième hypothèse avance que « les stratégies d'adaptation à la surchauffe urbaine et d'amélioration du cadre de vie en milieu urbain varient selon les habitants des deux territoires étudiés** ». Cette hypothèse met l'accent sur les stratégies privilégiées par les résidents pour faire face aux fortes chaleurs.

9.1.2. Adaptation du questionnaire au contexte géographique et socio-culturel

Nous avons commencé par créer un questionnaire en français pour l'Eurométropole de Metz (**Annexe 58**), que nous avons ensuite adapté au contexte socio-culturel de Casablanca en créant deux versions, l'une en arabe (**Annexe 59**), l'autre en français (**Annexe 60**). Les différences entre le questionnaire messin et le questionnaire marocain portent sur la formulation de certaines questions pour prendre en compte les particularités locales (types de divisions administratives par exemple). Pour l'élaboration des cartes interactives, les points ont été sélectionnés en tenant compte des disparités géographiques entre Casablanca, située près de l'océan, et Metz, caractérisée par une pluralité d'espaces verts. Ils ont également été choisis en

fonction des différences culturelles : à Casablanca, les espaces sélectionnés sont des marchés traditionnels (souks الأسواق) et des parvis de mosquées, tandis qu'à Metz, on retrouve plutôt des espaces publics.

Par ailleurs, une question sur l'état de santé des répondants a été complètement reformulée, car cette question est apparue indiscrète dans le contexte culturel marocain : dans le questionnaire messin, il était demandé : « Souffrez-vous d'une maladie ou d'un handicap ? », tandis que dans le questionnaire marocain, en langue française, la question était : « À quel point votre santé est-elle affectée par les vagues de chaleur ? (1 : aucun d'impact, 5 : fort impact) » et sur celui en arabe : « الى اي درجة تتضرر حالتك الصحية في مو جات الحر؟ (1 :غياب الضرر, 5 :ضرر قوي).

Enfin, pour mener l'enquête dans certains quartiers de Casablanca, il était important de respecter les codes sociaux locaux en portant des tenues conformes à la culture arabo-musulmane. Nous avons également adapté notre langage en intégrant des expressions religieuses telles que « *salam alaykoum* » (السلام عليكم) afin de faciliter le contact avec les répondants.

9.1.3. Élaboration du questionnaire

Le questionnaire a été construit en respectant plusieurs règles afin qu'il soit cohérent avec la problématique. Ainsi, nous avons veillé à ce qu'il comporte des questions pertinentes, tout en étant précises et facilement compréhensibles. Nous avons également pris soin d'éviter de commencer par des questions pouvant entraîner des réponses de façade, impliquant un engagement personnel du répondant ou provoquant un effort particulier de réflexion (Verlynde, 2018) . La question de départ est ce que l'on appelle un « brise-glace » (Berthier, 2016), cité par Verlynde, 2018). Il s'agit aussi de débuter par des questions d'ordre général, tandis que les questions sensibles au sujet de l'enquête ne seront placées qu'à la fin, cela dans le but d'éviter de fausser les réponses et d'informer le répondant qu'il sera interrogé sur une thématique donnée (Javeau, 1997). Notre questionnaire n'aborde donc pas directement le risque caniculaire durant les premières questions, tout comme il n'a pas été indiqué aux habitants que le questionnaire portait sur la perception de la chaleur en périodes de vague de chaleur. Le but est en effet d'éviter que le répondant s'enferme dans une affirmation de départ et de faire en sorte que les réponses aux questions successives soient cohérentes avec les réponses précédentes.

Par ailleurs, nous avons adopté une structure « en entonnoir », c'est-à-dire que le questionnaire débute par des questions générales destinées à collecter des informations personnelles sur les répondants et leurs lieux de vie (**Tableau 45**) afin de s'assurer que les données recueillies touchent un public diversifié aussi bien du point de vue des tranches d'âge, que des catégories socio-professionnelles, ou des lieux d'habitations. Viennent ensuite des questions plus précises interrogeant les connaissances et la perception du risque caniculaire des répondants, ainsi que les comportements qu'ils adoptent en périodes de vagues de chaleur, leurs usages et pratiques des lieux (**Figure 181** et **Tableau 46**). Le questionnaire mesure aussi la perception du risque au sein de chaque territoire ainsi que les impacts sanitaires sur les habitants. D'autres éléments sont aussi mis en évidence tels que l'appréhension des habitants vis-à-vis de l'augmentation du risque et l'expérience vécue pendant les canicules passées.

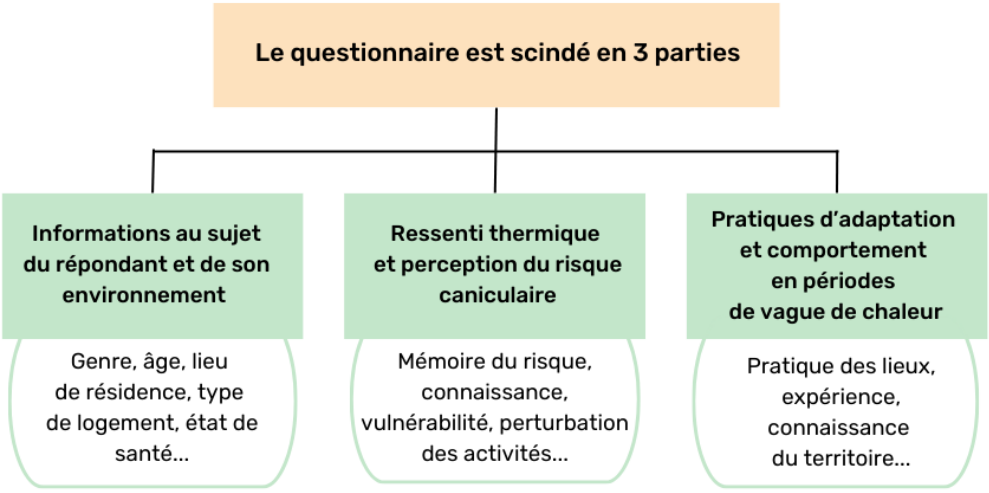


Figure 181 : Structure du questionnaire ayant servi à enquêter les habitants du GC et de l'EMM.

Le questionnaire est composé d'une série de questions ouvertes et fermées (45 questions pour une durée de passation d'environ 20 minutes), avec une majorité de questions fermées (à choix unique ou multiple, à menu déroulant, à évaluer et à classer) (**Tableau 45** et **Tableau 46**). Cela implique que la personne interrogée effectue un choix parmi les réponses proposées, afin de réduire le temps de passation et surtout le temps de traitement et d'analyse des réponses. L'intégration des questions ouvertes permet ensuite à l'individu interrogé d'exprimer son avis, de justifier ses choix de réponses ou de développer ses réflexions. Pour enquêter sur les lieux préférés des habitants pendant une vague de chaleur, nous avons également inclus à la fin du questionnaire une carte interactive permettant au répondant d'identifier les points chauds et les points frais du territoire à partir d'une série de points proposés à la sélection.

Tableau 45 : Informations au sujet du répondant et de son environnement proche. Exemple du questionnaire messin.

Caractéristiques de l'enquêté	Questions posées
Sexe	- De quel sexe êtes-vous ?
Âge	- Quelle est votre année de naissance ?
Catégorie socio-professionnelle	- Quelle est votre catégorie professionnelle ?
Etat de santé (EMM)	Souffrez-vous d'une maladie ou d'un handicap ? Si oui, Quelle est sa gravité ?
Lieu d'habitation	- Dans quelle commune et quel quartier habitez-vous ?
Type de logement et ses équipements	- Quel est votre type de logement ? - Votre logement est-il doté d'un jardin privatif ? Si non, Avez-vous un espace vert (parc ou jardin) à proximité de chez-vous ? - Votre logement est-il équipé des équipements de confort thermique suivants (climatisation, double vitrage, isolation…)
Lieu de travail	- Avant la crise sanitaire, où travailliez-vous ?

Tableau 46 : Variables recherchées et questions posées pour mesurer la perception du risque caniculaire par les habitants. Exemple du questionnaire messin.

Connaissance et perception	Questions posées
Sujets de société et aléas naturels	- Parmi les sujets suivants, quels sont les trois sujets qui vous préoccupent le plus à titre personnel ?
	- Parmi ces aléas naturels, lesquels vous inquiètent le plus autour de votre lieu de vie ?
Degré de conscience des problématique environnementales	- Ces dernières années, les étés vous ont-ils paru de plus en plus chauds là où vous habitez ?
	- Pensez-vous que dans les prochaines années, le nombre de canicules augmentera sur votre territoire ?
Mémoire du risque	- Avez-vous déjà vécu une canicule en Moselle ?
Confiance accordée aux acteurs locaux	- Pensez-vous que les autorités publiques luttent de manière suffisante contre le risque caniculaire (prévention, amélioration du cadre de vie...) ?
	- A quel point faites-vous confiance aux autorités publiques pour lutter contre les effets sanitaires des vagues de chaleur ?
	- Selon vous, quel acteur du territoire peut agir pour réduire les effets néfastes des vagues de chaleur ?
Perception	- En période de forte chaleur, souffrez-vous davantage de la chaleur le jour ou la nuit ?
	- A partir de quelle température la chaleur devient-elle insupportable pour vous durant la journée ? Durant la nuit ?
	- Selon vous, de quels facteurs dépendent les risques pour la santé liés aux épisodes de chaleur ?
Ressenti	- Que ressentez-vous lors des épisodes de forte chaleur ?
	- En période de forte chaleur, souffrez-vous davantage de la chaleur le jour ou la nuit ?
	- A quel point vous êtes-vous habitué(e) aux chaleurs excessives ?
	- Souffrez-vous davantage de la chaleur lorsque vous vous situez dans un milieu où l'air est particulièrement pollué ?
	- L'humidité de l'air ambiant a-t-elle une influence sur votre perception de la chaleur
Perturbation des activités	- Vos activités quotidiennes sont-elles affectées par la chaleur intense ?
Vulnérabilité	- A quel point vous sentez-vous vulnérable au risque caniculaire ?
Inquiétudes	- En cas de canicule, quel est votre niveau d'inquiétude à propos des sujets suivants ? 1 : pas d'inquiétude 5 : forte inquiétude • Le bouleversement de mes activités quotidiennes • Le malaise ou le décès d'un proche • Les conséquences sur ma santé (insolation, déshydratation, difficultés respiratoires, malaise, etc.) • La perturbation de mon sommeil • Le déclenchement d'incendies • La survenance d'une sécheresse (assèchement des plantes et jardins, rupture d'alimentation en eau)
Prévention et sensibilisation	- Vous informez-vous des recommandations sanitaires en cas de vague de chaleur ?
	- Vous estimez-vous suffisamment sensibilisé(e) par rapport aux risques liés aux vagues de chaleur ?
	- A quel point vous êtes-vous habitué(e) aux chaleurs excessives ?
Usage du territoire	- Lors des périodes caniculaires, où vous rendez-vous pour vous rafraîchir ?
Connaissance et pratique du territoire	- Selon vous, quels sont les atouts de Metz Métropole pour préserver les zones de fraîcheur et améliorer le cadre de vie en période de forte chaleur ?
	- En vous appuyant sur la carte suivante, pourriez-vous répondre aux questions ci-dessous ? • Indiquez au moins trois points qui vous semblent frais en période de forte chaleur (ex. : A01 B02 C03) • Indiquez au moins trois points qui vous semblent particulièrement chauds en période de forte chaleur (ex. : A01 B02 C03) • A quels endroits avez-vous l'habitude de vous rendre en période de forte chaleur ? (ex. : A01 B02 C03) • Quels sont les lieux/espaces qu'il faudrait rafraîchir selon vous ? (indiquez le nom des lieux)

9.1.4. Stratégies de passation

Avant de débuter le travail d'enquête à proprement parler, les questionnaires en français et en arabe ont été testés en ligne auprès d'une vingtaine de personnes afin de s'assurer de la pertinence des questions posées. Cette phase de test menée en ligne sur le territoire messin, couvre un effectif composé d'individus de différentes tranches d'âges sans distinction de sexe. Elle nous a permis : (1) de repérer les questions manquant de clarté afin d'en améliorer la tournure ; (2) de vérifier si l'ordre et l'enchaînement des questions sont cohérents ; (3) de s'assurer que les questions posées et les choix de réponses permettent bien de recueillir les informations recherchées ; (4) d'évaluer le temps de passation moyen du questionnaire ; (6) d'identifier les questions redondantes ; (7) d'identifier d'éventuelles questions sensibles. Cela a permis d'opérer quelques réajustements afin que les questionnaires soient plus compréhensibles lors de l'étape de passation.

Ensuite, les questionnaires ont été saisis sur la plateforme d'enquête en ligne *Limesurvey*. Nous avons opté pour une passation en ligne, car cela permet d'interroger de manière relativement rapide un échantillon de répondants conséquent, avec la possibilité d'intégrer une carte interactive.

L'enquête en ligne a ensuite été lancée le 12/05/2021 pour le territoire de Metz et le 16/06/2021 pour celui de Casablanca. Pour augmenter le nombre de répondants, les questionnaires ont été partagés sur plusieurs réseaux sociaux (*Facebook*, *Twitter* et *LinkedIn*) par les membres de l'équipe de recherche du LOTERR puis relayés par les métropoles de Metz et de Casablanca sur leurs réseaux sociaux. Aucun épisode de canicule qui aurait pu influencer les répondants n'est survenu au cours de l'année 2021, l'enquête a donc pu être diffusée pendant plusieurs mois. 245 réponses ont alors été récoltées sur le territoire de Metz et 14 réponses pour le territoire de Casablanca (6 en français et 8 en arabe).

Si la passation en ligne a été un succès pour le territoire messin, le nombre insuffisant de réponses recueillies à Casablanca nous a conduits à changer de stratégie et à réaliser l'enquête en face-à-face pour atteindre un échantillon de répondants représentatif. Elle a ainsi été menée par un groupe de 9 personnes (l'auteur, enquêteur principal, et un groupe de 8 enquêteurs-étudiants sous la responsabilité du Pr. Saïd Sghir) sur 15 lieux publics (places publiques, parcs et jardins, stations de tramway, souks…) (**Figure 182**). Le travail s'est déroulé sur un temps restreint de 10 jours consécutifs, du 5 au 14 mai 2022, dans le but de minimiser les chances d'apparition d'évènements susceptibles de biaiser les résultats (occurrence d'une vague de chaleur par exemple). Pour une meilleure comparabilité des données, nous avons également mené une enquête en face-à-face à Metz dans des lieux publics (Plan d'eau, Place de la République, Esplanade…) (**Figure 182**). Néanmoins, contrairement à Casablanca, les résultats n'ont pas été concluants, car en cinq jours, notre équipe de trois personnes n'a réussi à remplir que 10 questionnaires.

Figure 182 : Exemple de lieux de l'enquête en face-à-face à Casablanca (place Mohammed V (a) et parc de la Ligue Arabe (b)) et à l'Eurométropole de Metz (place de la République (c) et Esplanade (d)).

Etant donné que nous ne disposions pas d'une base de sondage et que notre enquête portait sur l'ensemble de la population des deux terrains d'étude, notre méthode d'échantillonnage s'apparente à un échantillonnage aléatoire. Par conséquent, nos échantillons sont considérés comme étant probabilistes, car les répondants ont été interrogés au hasard, ce qui leur donne la même probabilité de faire partie de l'échantillon, indépendamment de leur sexe, de leur âge, de leur profession ou de leur catégorie socio-professionnelle.

La taille de l'échantillon a été définie au début de l'enquête pour obtenir un degré de précision d'environ 5 % pour un niveau de confiance de 95 % selon l'indice de Yamane (Rea et al., 2016 ; Yamane, 1967). Un nombre de 385 répondants était donc nécessaire pour chaque agglomération. Si ce nombre est largement atteint pour Casablanca avec 614 répondants (600 en face-à-face vs 14 en ligne), pour le territoire messin, le nombre de répondants (249 en ligne contre 10 en face-à-face), est inférieur au nombre de répondants recommandé par la littérature scientifique (Yamane, 1967). Par conséquent, la marge d'erreur augmente légèrement et passe à 6 %.

9.1.5. Prétraitement des données recueillies

Préalablement à l'analyse de données, les réponses obtenues à partir de la plate-forme *Limesurvey* ont été versées dans un tableur Excel pour en faciliter le traitement. Dans un premier temps, les réponses ont été vérifiées, organisées, nettoyées, homogénéisées et codifiées. En fonction du type de réponses, nous avons également créé un fichier tableur pour coder les commentaires et les analyser. L'étape de nettoyage des données consiste à corriger les fautes de frappe (« energie » pour « énergie »), les abréviations (« bcp » pour « beaucoup », « + » pour « plus ») et les valeurs aberrantes (par exemple : « 0 °C » comme réponse à la question « A partir de quelle température la chaleur devient-elle insupportable pour vous durant la journée ? ») qui peuvent fausser les résultats. Nous avons également supprimé les sauts de ligne dans les commentaires afin qu'un paragraphe corresponde à un commentaire. Une fois le fichier toiletté, nous avons pu procéder à l'analyse des réponses.

Un premier niveau d'analyse des échantillons est réalisé à partir de leurs composantes principales en fonction du sexe, de l'âge et la profession ; il permet d'en déterminer la taille, la représentativité et la pertinence. Ensuite, l'analyse a porté sur les impacts du stress thermique sur différents groupes sociaux, leurs différences en termes de vulnérabilité, de sensibilité et de capacité d'adaptation à travers le prisme de leurs composantes. Enfin, sont examinées les zones à risque caniculaire et les lieux préférés en cas de fortes chaleurs. L'analyse se fait dans un premier temps par un tri à plat consistant à calculer la répartition des réponses question par question et à présenter les résultats sous forme de tableaux et de graphiques. Puis, pour préciser l'analyse, nous procédons à des tris croisés en mettant en relation les réponses aux différentes composantes de nos échantillons. Dans un troisième temps, un filtre est appliqué sur un échantillon précis pour identifier des patterns expliquant certaines réponses obtenues.

Chaque résultat présenté est vérifié statistiquement en s'appuyant sur le test de Fisher lorsque les effectifs théoriques sont inférieurs à 5, et sur le test du Khi² lorsqu'ils sont supérieurs à ce seuil. Les *p-value* correspondantes sont systématiquement fournies, de même que la valeur observée pour le test du Khi². Enfin, lorsque ce dernier établit une relation entre les variables, le degré de dépendance est vérifié à l'aide du test de Cramer.

9.2. Analyse comparative des résultats

9.2.1. Composition des échantillons

Sur les 259 réponses complètes recueillies sur le territoire de Metz (249 en ligne et 10 en face-à-face), nous comptons 137 femmes (53 %) contre 122 hommes (47 %). Cette répartition est proche des données de l'INSEE qui indiquent qu'au 1er janvier 2019, les femmes représentent 51,6 % de la population selon le bilan démographique de l'Insee (2019). À l'inverse, les données recueillies à Casablanca (600 en face-à-face vs 14 en ligne) montrent que les répondants sont des hommes à 54 % (336) pour 46 % de femmes (278 répondants) (**Figure 183**), ce qui s'écarte légèrement des données du Haut-Commissariat au Plan (HCP) qui indiquent que les femmes représentent 50,3 % de la population de Casablanca. Nous pouvons néanmoins considérer que la parité est quasiment atteinte dans les deux échantillons.

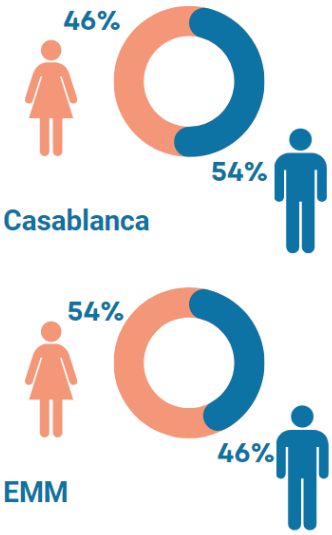


Figure 183 : Répartition des répondants selon le sexe.

En termes de tranches d'âge, la majorité des répondants a entre 18 et 49 ans. La part des personnes âgées de 65 ans et plus et celle des jeunes de moins de 18 ans est plus faible que dans la population générale dans les deux échantillons. On suppose que les moins de 18 ans sont moins intéressés par ce type d'enquête et les plus de 65 ans ont été peu atteints du fait des vecteurs utilisés pour l'enquête en ligne, mais aussi du fait qu'ils sont assez réticents à répondre à l'enquête dans les lieux publics.

Concernant les catégories socio-professionnelles, les étudiants sont surreprésentés parmi les répondants des deux enquêtes (39 % pour Metz et 28 % pour Casablanca), car ils sont probablement les plus sensibles à la question du changement climatique (**Figure 184**). La catégorie des cadres et des professions intellectuelles supérieures (33 %) est bien représentée dans le cas messin, ce qui s'explique par leur sensibilité plus élevée à notre thématique et par l'impact des vecteurs de diffusion de l'enquête en ligne. Du côté de Casablanca, c'est plutôt la catégorie des employés qui arrive en deuxième position (25 %).

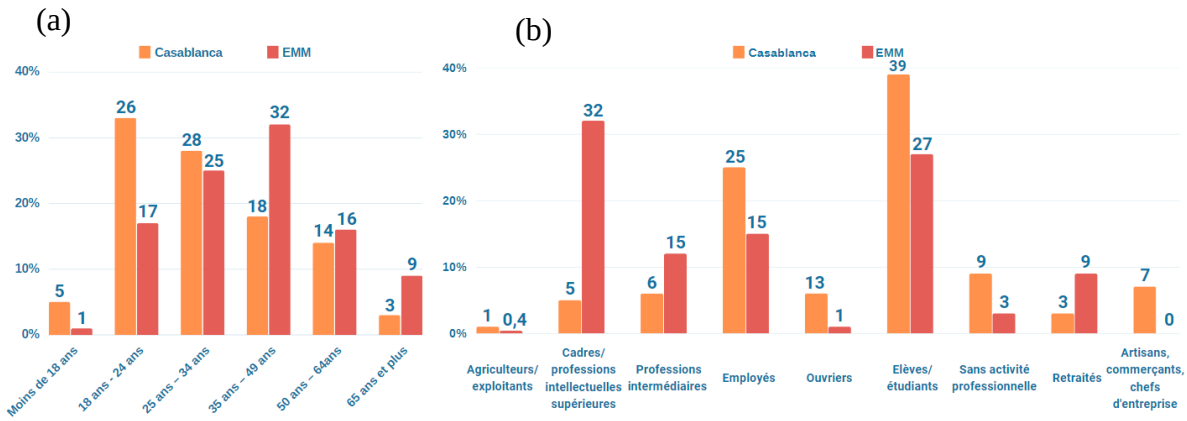


Figure 184 : (a) Répartition des répondants selon les catégories d'âge. (b) Répartition des répondants selon les catégories socio-professionnelles.

9.2.2. Informations sur l'environnement et le lieu de vie des répondants

9.2.2.1. Le logement

Que ce soit à Metz ou à Casablanca, les deux tiers des personnes ayant répondu au questionnaire habitent dans un appartement (**Figure 185a**). Il y a ainsi une majorité de citadins dans nos échantillons. En termes d'équipements de confort thermique, nous constatons que les logements des répondants messins disposent d'une meilleure isolation thermique (isolation thermique et double vitrage) que ceux des Casablancais. Ces derniers s'appuyant davantage sur les stores et la climatisation (**Figure 185b**).

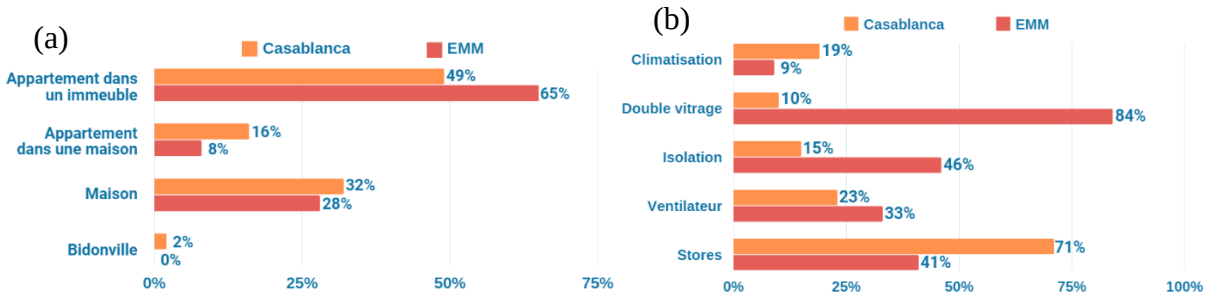


Figure 185 : (a) Réponses à la question : « Quel est votre type de logement ? » ; (b) Réponses à la question : « De quels équipements de confort thermique votre logement est-il doté ? ».

Étant donné la proportion de répondants déclarant vivre dans des appartements, c'est en toute logique qu'une bonne partie d'entre eux (87 % à Casablanca et 62 % à Metz) ne disposent pas de jardin privatif au sein de leur lieu de vie (**Figure 186a**). Nous avons alors voulu savoir combien, parmi ceux ayant répondu par la négative, disposaient d'un parc ou d'un jardin public à proximité de chez eux. Les réponses sont toujours majoritairement positives, mais la proportion est plus nette à Metz avec 84 % des répondants, contre 62 % à Casablanca (**Figure 186b**). Il y a un meilleur accès à ces espaces au sein de l'EMM, ce qui est cohérent avec le résultat de la classification LCZ (***cf.* 7.4.3.4**).

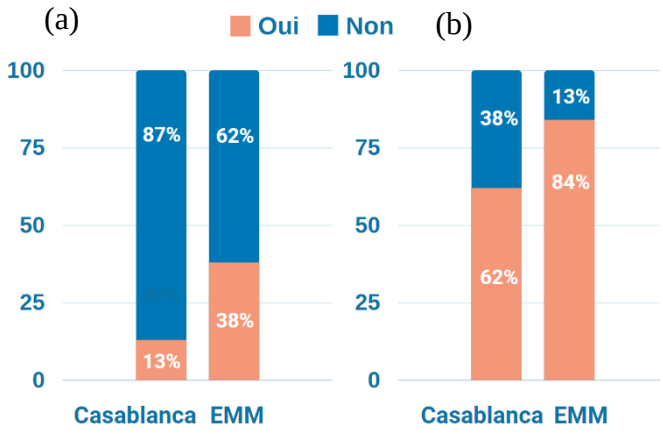


Figure 186 : (a) Réponses à la question : « Votre logement est-il doté d'un jardin privatif ? » ; (b) Réponses à la question : « Avez-vous un espace vert à proximité de chez-vous ? ».

9.2.2.2. Environnement de travail

En termes d'environnement professionnel, la majorité des répondants travaillait en intérieur (bureau, hôpital, magasin…) avant la crise sanitaire (78 % de Messins et 64 % de Casablancais), chiffre sans doute accentué par la proportion importante de la catégorie CSP (étudiants et cadres/professions intellectuelles supérieures) dans nos échantillons. Par ailleurs, si la proportion de répondants travaillant au sein de leur domicile est similaire dans les deux villes (14 % de Messins et 16 % de Casablancais), les travailleurs extérieurs sont plus présents à Casablanca avec 20 %, contre seulement 7 % à Metz (**Figure 187**).

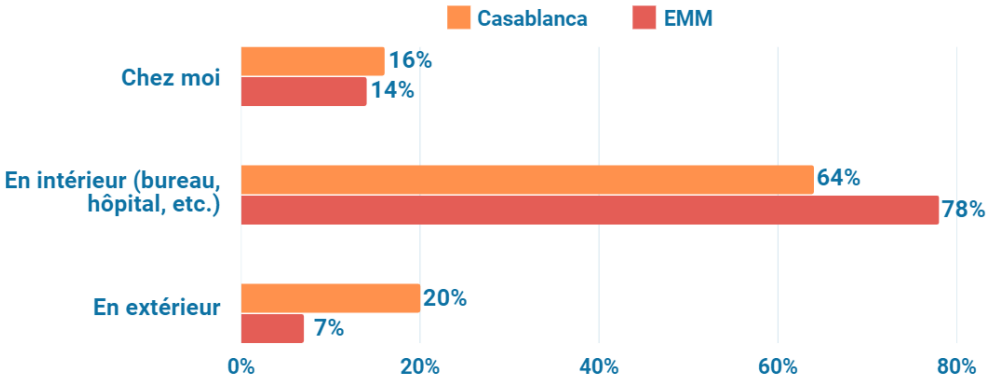


Figure 187 : Réponses à la question : « Avant la crise sanitaire, où travailliez-vous ? ».

9.2.3. Sujets de société et perception des risques d'origine climatique

9.2.3.1. Une préoccupation pour l'environnement plus forte en France

Les répondants ont été invités à choisir jusqu'à trois sujets de société parmi 13. L'objectif était d'évaluer la place occupée par les questions environnementales dans la conscience individuelle et collective. Les thématiques préoccupant les répondants diffèrent largement d'un pays à l'autre : la question du réchauffement climatique est citée deux fois plus souvent à Metz (**Figure 188**). Dans le cas de Casablanca, ce sont davantage l'emploi, l'éducation et la santé publique qui sont cités. Cependant, sur la base des échanges que nous avons eu avec les répondants, il semble que certains sujets de préoccupation soient compris différemment : par exemple dans le cas messin, la notion de « culture » est comprise comme désignant tout ce qui a trait aux « activités culturelles », tandis que dans le cas de Casablanca, la notion de culture englobe tout ce qui se réfère à la notion « d'identité culturelle », c'est-à-dire l'ensemble des traits distinctifs qui caractérisent une société donnée (Ghouati, 2016).

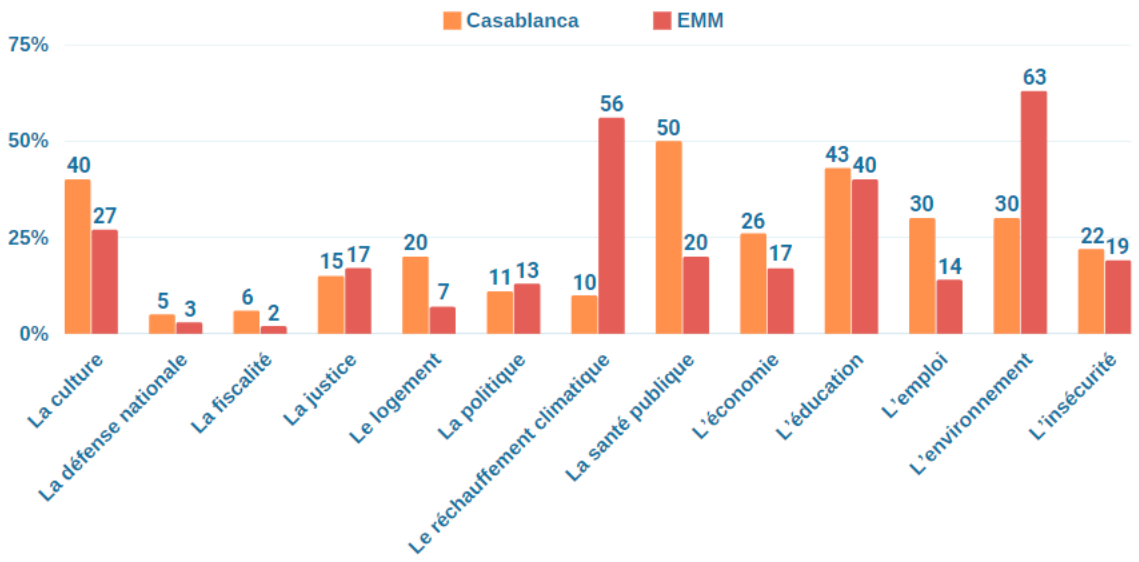


Figure 188 : Les sujets de société préoccupant le plus les répondants (3 thématiques au choix parmi 13).

9.2.3.2. Sécheresse et épisodes caniculaires aux premiers rangs des sujets d'inquiétude liés aux dangers naturels

Si l'on s'intéresse plus particulièrement aux aléas naturels, il est intéressant de relever que les aléas qui sont perçus comme les plus prégnants sont la sécheresse et les épisodes caniculaires (**Figure 189**). Dans le cas de Casablanca, les fréquences sont néanmoins plus faibles que dans le cas messin, ce qui peut en partie s'expliquer par une plus faible mémoire du risque (***cf.* 9.2.3.4**). Ce résultat est surprenant compte tenu du contraste climatique entre les deux territoires, car si la problématique de la sécheresse est une préoccupation rencontrée depuis longtemps dans les espaces méditerranéens, la retrouver à une telle fréquence dans un territoire tempéré non-méditerranéen tel que celui de Metz est inhabituel.

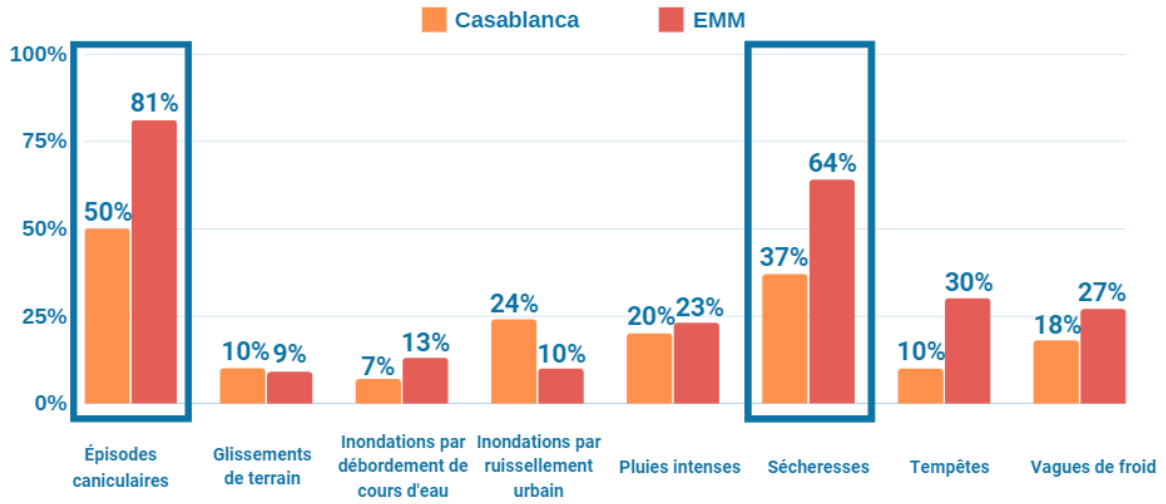


Figure 189 : Les dangers naturels inquiétant les répondants.

9.2.3.3. Une perception partagée sur l'augmentation de la chaleur en été

Les étés ont paru plus chauds, ces dernières années, à une grande majorité des individus ayant répondu aux questionnaires. Ainsi, 87 % de Messins et 81 % des Casablancais ont répondu « oui » à la question « Ces dernières années, les étés vous ont-ils paru de plus en plus chauds là où vous habitez ? ». Cette perception corrobore l'évolution constatée des températures moyennes et maximales en saison chaude dans les deux territoires comparés (***cf.* 3.2.2**) (Météo-France, 2021 ; Hammoudy *et al.*, 2022).

9.2.3.4. Une mémoire du risque plus vive côté français

Afin d'évaluer la mémoire du risque, nous avons demandé aux répondants s'ils avaient déjà fait l'expérience d'une canicule dans leur lieu de vie. Si 9 répondants messins sur 10 (87%) indiquent avoir déjà vécu une canicule en Moselle, 49 d'entre eux déclarent ne pas se souvenir de l'année en question. Pour ceux qui affirment s'en souvenir, ce sont les années les plus récentes qui sont les plus rapportées par les enquêtés, ainsi que la canicule de 2003 qui a profondément marqué la mémoire collective du fait de son ampleur inédite et de son nombre de victimes (**Figure 190**). À Casablanca, une majorité -certes moins forte qu'à Metz- des répondants indique avoir déjà vécu une canicule sur leur territoire (75%) et citent le plus souvent les années les plus récentes.

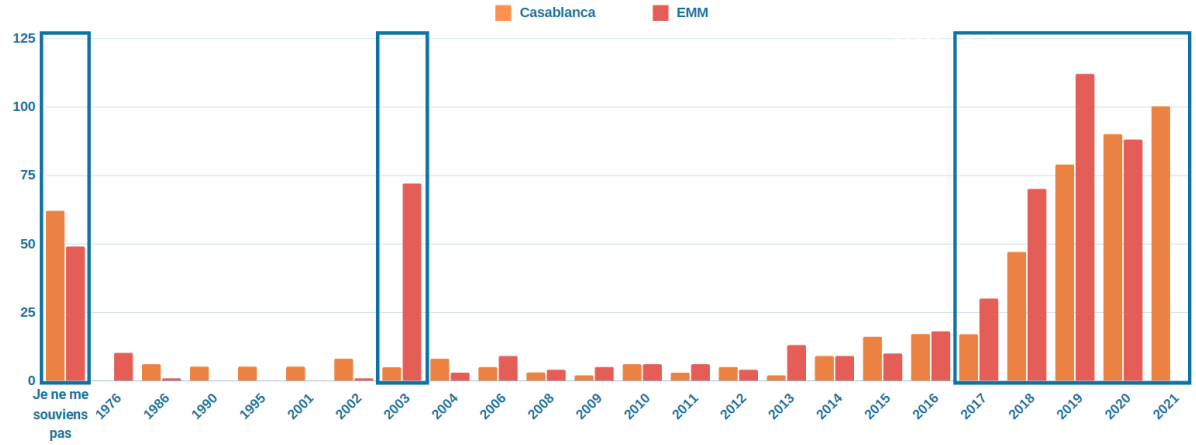


Figure 190 : Les années durant lesquelles les répondants à l'enquête affirment avoir fait l'expérience d'une canicule.

Les tests de khi² mettent en évidence un lien entre les variables « âge » et « mémoire du risque » : la mémoire du risque augmente à mesure que l'âge des répondants s'accroît (khi² : 20,740, p-value : 0,0003 (cas de Metz)/khi² : 11,547, p-value : 0,042 (cas de Casablanca)). Ces chiffres montrent que les personnes les plus âgées ont davantage tendance à garder en mémoire les épisodes caniculaires marquants, et témoignent d'une faible transmission de cette mémoire entre les générations. Par ailleurs, ce résultat explique la différence de 30 points que nous avions constatée entre les deux territoires dans la proportion de personnes citant les épisodes caniculaires parmi les aléas naturels qu'elles craignant le plus (***cf.* 9.2.3.2**). La mémoire du

risque caniculaire étant moins présente à Casablanca, relativement moins de personnes ressentent une anxiété vis-à-vis de ce phénomène.

9.2.3.5. Des positions contrastées au sujet de l'augmentation future du nombre de canicules

Une bonne partie des enquêtés messins présente un avis tranché sur cette question : le nombre de canicules va augmenter au cours des prochaines décennies (**Figure 191**). Très peu d'entre eux ont répondu défavorablement (encadré 2), se justifiant par l'inefficience supposée des projections climatiques. Un petit quart (22 %) des répondants déclare ne pas savoir si le nombre de canicules augmentera prochainement. Le reste des enquêtés anticipe une multiplication des événements caniculaires à l'avenir (encadré 1), évoquant la tendance climatique actuelle (56 % des répondants) et les projections du GIEC (6 %). En outre, 83 % des répondants qui pensent que les vagues de chaleur vont augmenter à l'avenir trouvent que les étés de ces dernières années deviennent de plus en plus chauds.

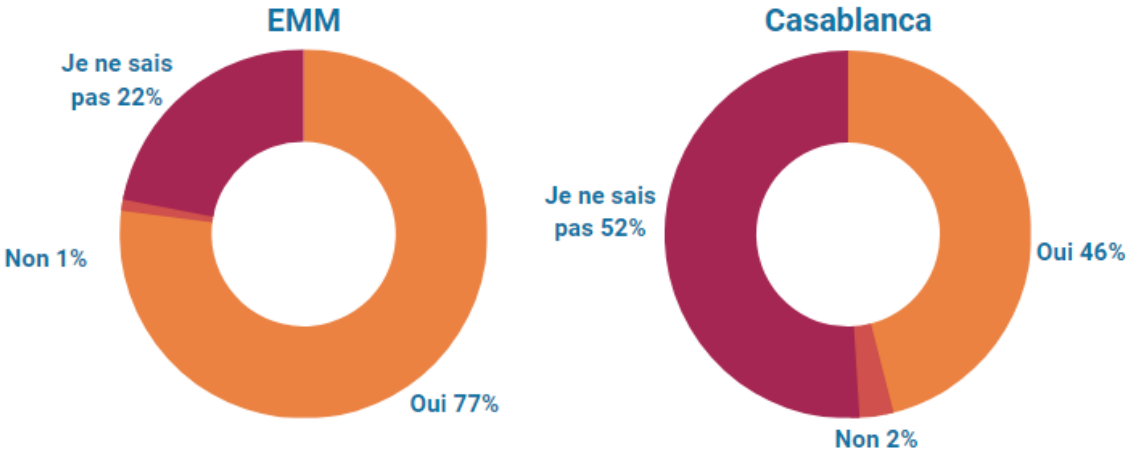


Figure 191 : Réponses à la question : « Pensez-vous que dans les prochaines années, le nombre de canicules augmentera sur votre territoire ? ».

Les Casablancais sont plus partagés sur la question de l'augmentation de la fréquence des canicules prévues dans les prochaines années, avec une petite majorité (52 %) déclarant ne pas savoir, et 2 % ne s'attendant pas à une augmentation du nombre de canicules sur leur territoire (encadré 2). 48 % des répondants considérant que les événements caniculaires vont se multiplier à l'avenir ont évoqué dans leur argumentaire le changement climatique, 6 % le trou dans la couche d'ozone et 3,5 % les épisodes de sécheresse survenus ces dernières années (encadré 1). Il y a ainsi quelques amalgames entre le réchauffement climatique et d'autres questions d'environnement comme la pollution ou l'imperméabilisation des sols (encadré 1). Ajoutons que les répondants sont souvent réticents à répondre à la question posée et beaucoup ont coché « je ne sais pas » pour mettre en commentaire la formule « Allah le sait mieux » (« الله أعلم » en arabe). On peut en conclure que la culture influence leur perception. Cela rejoint l'observation faite par François *et al.* (2016).

Encadré 1. Extraits de commentaires de quelques répondants qui pensent que le nombre de canicules augmentera sur leur territoire.

Casablanca	Territoire messin
Homme, 35 ans, profession intellectuelle supérieure : « Les effets du CC deviennent de plus en plus tangibles et de pire en pire partout dans le monde. Selon les prévisions scientifiques, cela s'aggravera si rien n'est fait ». **Femme, 19 ans, étudiante :** « Niveau de sècheresse qui augmente chaque année ». **Femme, 37 ans, employée :** « Élargissement du trou dans la couche d'ozone du fait de la pollution ».	**Femme, 24 ans, étudiante** : « Chacune des trois dernières décennies a été systématiquement plus chaude sur la planète, d'après le GIEC. Il n'y a pas de raison que la tendance s'inverse sans mesures conséquentes ». **Homme, 20 ans, étudiant :** « Dû au réchauffement climatique inévitable ». **Femme, 54 ans, profession intermédiaire :** « À cause du réchauffement climatique qui se fait déjà sentir ».

Encadré 2. Extraits de commentaires de quelques répondants qui pensent que le nombre de canicules n'augmentera pas sur leur territoire.

Casablanca	Territoire messin
Homme, 38 ans, profession intermédiaire : « Le problème de la couche d'ozone a été réglé donc le réchauffement climatique va diminuer ». **Femme, 37 ans, profession intellectuelle supérieure :** « Parce que la fonte de glaces aux niveaux des pôles a un effet refroidisseur ».	**Femme, 48 ans, profession intermédiaire :** « Les aléas climatiques sont très variables d'une année sur l'autre ». **Femme, 37 ans, cadre/profession intellectuelle supérieure :** « La canicule est un événement rare, car il faut des corrélations de chaleur importante entre le jour et la nuit. De plus, une canicule doit à mon avis avoir une durée de 2 semaines pour que l'on puisse la considérer comme tel ».

9.2.3.6. Une prise d'information importante

En cohérence avec les réponses données à la question concernant les sujets d'inquiétude liés aux aléas naturels (***cf.* 9.2.3.2**), 63 % des répondants messins s'informent des recommandations sanitaires en cas de fortes chaleurs (**Figure 192**), majoritairement via les médias traditionnels (presse, radio, télévision) (44 %) puis par le biais d'Internet (38 %) (**Figure 193**). Seuls 11 % se renseignent via des messages diffusés par les pouvoirs publics et 8 % via des affichages extérieurs. À Casablanca, c'est la moitié des répondants qui s'informent de ces recommandations (**Figure 193**), en se tournant davantage vers Internet (40 %) que vers les médias traditionnels (22 %) et les autres supports d'information (**Figure 193**).

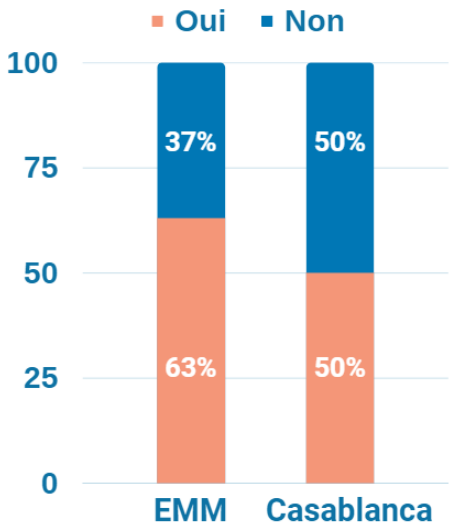


Figure 192 : Réponses à la question : « Vous informez-vous des recommandations sanitaires en cas de vague de chaleur ? ».

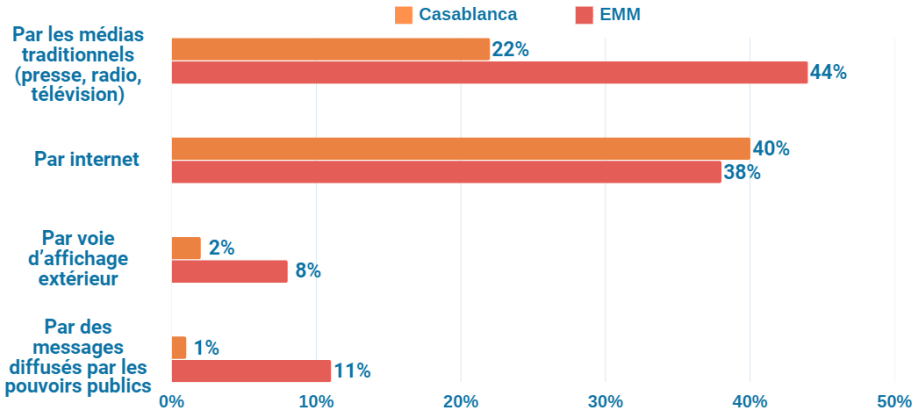


Figure 193 : Réponses à la question : « Par quels moyens ? »

La modalité « par les médias traditionnels (presse, radio, télévision) » est largement préférée par les personnes âgées de 65 ans et plus. La totalité des répondants messins et 82 % des Casablancais de plus de 65 ans déclarent s'informer principalement par ce canal (test du khi² pour Metz : 19,248, p-value : 0,002 ; test du khi² pour Casablanca : 23,378, p-value : 0,0002). En revanche, les répondants âgés de moins de 35 ans ont davantage recours à d'autres médias, notamment Internet. Néanmoins, étant donné la sur-représentation des classes d'âge entre 18 et 49 ans dans notre échantillon, la proportion de personnes qui s'informent des recommandations sanitaires avec internet est probablement plus élevée ici qu'en population générale, car ce public est souvent plus à l'aise avec les nouvelles technologies de la communication et les réseaux sociaux.

Il est à noter que les tests de khi² montrent que les femmes dans les deux contextes étudiés se considèrent plus informées que les hommes des consignes et conduites en cas de canicule (pour le cas de Metz, khi² : 4,369, p-value : 0,037 ; pour le cas de Casablanca, khi² : 8,25, p-value : 0,004). Les tests de Cramer montrent que la relation entre les deux variables est faible pour les deux échantillons étudiés (cas de Metz, v de Cramer : 0,13 ; cas de Casablanca, v de Cramer : 0,12, relation faible).

9.2.3.7. Les Messins mieux sensibilisés aux risques liés à la chaleur intense

Au sein de l'EMM, une large majorité des personnes ayant répondu au questionnaire s'estime suffisamment sensibilisée par rapport aux risques sanitaires liés aux vagues de chaleur. Seuls 19 % des individus sondés se considèrent insuffisamment sensibilisés sur cette thématique. À Casablanca en revanche, cette majorité est beaucoup plus relative et tombe à 52 %. Une part importante de la population s'estime donc insuffisamment sensibilisée sur le plan sanitaire (48 %) (**Figure 194**).

Les tests Khi² indiquent l'existence d'une corrélation significative entre le fait de se renseigner à propos des recommandations à tenir en cas de canicule et le fait de se sentir sensibilisé (cas de l'EEM : p-value < 0,038 ; Khi² : 4,288/cas de Casablanca : p-value < 0,0001 ; Khi² : 28,335).

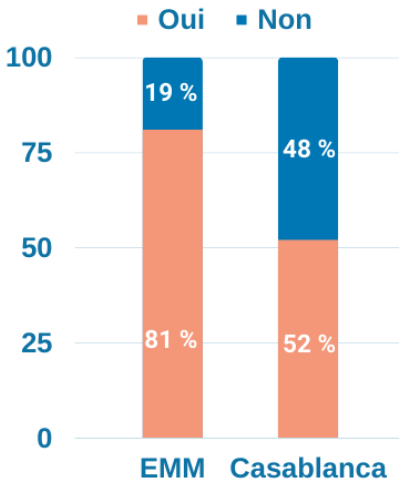


Figure 194 : Réponses à la question : « Vous estimez-vous suffisamment sensibilisé(e) par rapport aux risques sanitaires liés aux vagues de chaleur ? ».

Nous avons également constaté un lien entre l'âge des répondants et le fait de se sentir sensibilisé à ces risques : le degré de sensibilité augmente progressivement avec l'âge des répondants dans les deux sites étudiés (**Tableau 47**). Les personnes âgées se considèrent, en effet, plus sensibilisées que les répondants plus jeunes (khi² : 17,388, p-value : 0,004 (cas de Metz)/khi² : 26,793, p-value : 0,0001 (cas de Casablanca)).

Tableau 47 : Parts des personnes s'estimant sensibilisées et non sensibilisées selon les tranches d'âge.

Tranches d'âge	EMM		Casablanca	
	Non (%)	Oui (%)	Non (%)	Oui (%)
Moins de 18 ans	50	50	64	36
18 ans - 24 ans	33	67	60	40
25 ans – 34 ans	27	73	45	55
35 ans – 49 ans	13	87	36	64
50 ans – 64ans	3	97	36	64
65 ans et plus	11	89	33	67

9.2.3.8. Une confiance relative vis-à-vis des autorités publiques

Deux tiers (67 %) des personnes interrogées à Metz estiment que les autorités publiques ne luttent pas de manière suffisante contre le risque caniculaire, seul un répondant sur dix considère que les efforts déployés sont suffisants (**Figure 195**). Cela dénote un degré d'exigence fort vis-à-vis des pouvoirs publics, qui a d'ailleurs des répercussions en termes de confiance accordée. Nous recensons en effet, davantage de personnes déclarant ne pas faire confiance aux pouvoirs publics pour agir contre ce risque (39 %) que de personnes affichant leur confiance à leur égard (19 %), avec tout de même une part importante de répondants indécis (43%) (**Figure 196**).

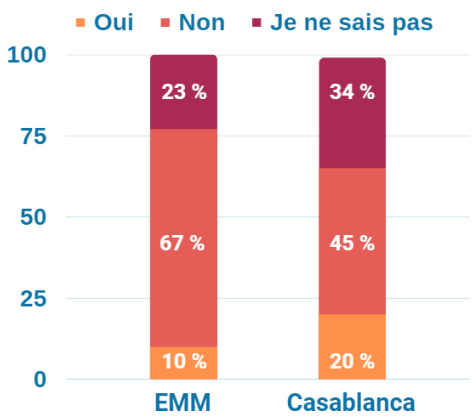


Figure 195 : Réponses à la question : « Pensez-vous que les autorités publiques luttent de manière suffisante contre le risque caniculaire (prévention, amélioration du cadre de vie...) ? ».

À Casablanca, la tendance est similaire puisque près de la moitié des répondants (45 %) estiment que ces derniers ne luttent pas suffisamment contre le risque caniculaire (prévention, amélioration du cadre de vie...) (**Figure 195**). 58 % des individus interrogés déclarent même ne pas faire confiance aux autorités publiques pour lutter contre ce phénomène, dont 41 % qui ne leur font pas du tout confiance (**Figure 196**). Néanmoins, lorsque l'on prend en compte le niveau de sensibilité relativement faible envers des problématiques climatiques (***cf.* 9.2.3.1**), ces résultats sont, selon nous, le reflet d'une méfiance générale envers les autorités publiques plutôt que d'une forte attente pour des mesures spécifiques de lutte contre les effets sanitaires des vagues de chaleur.

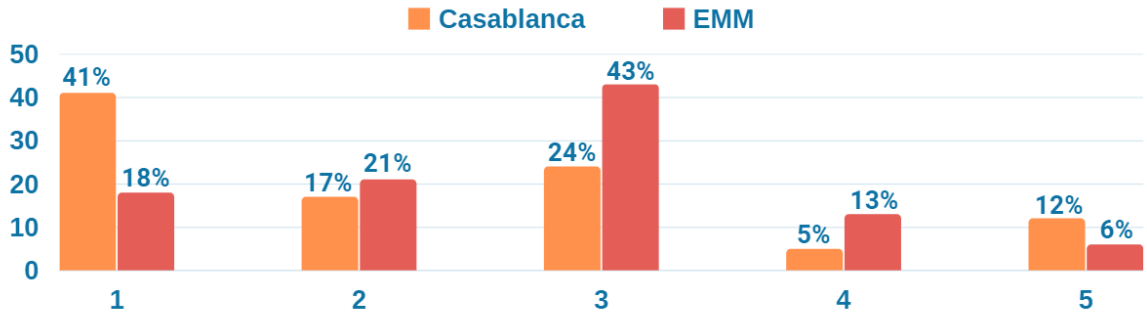


Figure 196 : Réponses à la question : « A quel point faites-vous confiance aux autorités publiques pour lutter contre les effets sanitaires des vagues de chaleur ? ».

9.2.4. Ressenti et perception des vagues de chaleur

9.2.4.1. Les Casablancais mieux adaptés à la chaleur

Nous avons demandé aux enquêtés s'ils se considéraient comme habitués ou non à la chaleur en les invitant à indiquer leur niveau d'adaptation sur une échelle allant de 1 (Je ne m'y suis pas habitué(e)) à 5 (Je m'y suis habitué(e)). Les réponses des niveaux 1 et 2 et celles des niveaux 4 et 5 ont été regroupées pour faire ressortir deux classes « pas habitué(e) » et « bien habitué(e) », celles du niveau 3 représentant la classe « modérément habitué(e) ». Les résultats indiquent que d'une manière générale, les Messins se considèrent moins habitués à la chaleur par rapport aux Casablancais (**Figure 197**), avec un écart de 11 points entre les deux groupes ne se considérant pas comme habitués. À l'inverse, les personnes se considérant mieux habituées à la chaleur (réponses « modérément habitué(e) » et « bien habitué(e) ») sont proportionnellement plus nombreuses dans l'échantillon de Casablanca, avec tout de même des écarts plus resserrés (entre 5 et 7 points).

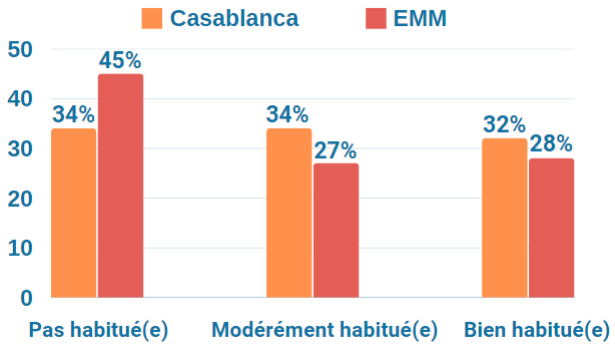


Figure 197 : Répartition des personnes déclarant s'être habituées et non à la chaleur.

Par ailleurs, nous relevons que la perception de la chaleur semble être liée à la crainte du risque caniculaire examinée dans la section **9.2.3.2**. En effet, les tests Khi² démontrent que les répondants déclarant craindre en priorité le risque caniculaire parmi tous les autres aléas naturels ont significativement plus tendance que les autres à estimer qu'ils ne sont pas habitués à la chaleur (cas de l'EEM : p-value < 0,001 ; Khi² : 11,297/cas de Casablanca : p-value < 0,026 ; Khi² : 4,981).

9.2.4.2. Le sentiment d'une santé plus impactée dans la population messine

Les habitants des deux territoires ont été invités à choisir parmi 9 symptômes, ceux décrivant le mieux ce qu'ils ressentent en période de vague de chaleur. La liste à choix multiple était accompagnée d'une case « autre » et d'une case « je ne ressens rien de particulier » (**Figure 198**). Au total, 90 % des répondants messins et 69 % des répondants casablancais ont déclaré avoir subi l'un des impacts sur la santé pendant les périodes d'exposition à la chaleur intense. En termes de symptômes physiques et de ressenti, environ deux tiers des répondants messins affirment ressentir une grande fatigue lors d'épisodes de forte chaleur (69 %) faisant de ce symptôme le plus commun parmi les enquêtés. Environ la moitié d'entre eux déclare également être sujets à une sudation excessive (53 %) ainsi qu'à une sensation de soif (47 %). Une température corporelle trop élevée et des maux de tête sont aussi fréquents chez les personnes ayant répondu au questionnaire. À Casablanca, les symptômes sont plus partagés, avec 58 % des répondants déclarant ressentir une sensation de soif. Par rapport à la population générale, ces chiffres sont sans doute moins élevés, car les personnes les plus fragiles (les personnes

âgées, les personnes en situation de handicap ou les personnes malades) sont sous-représentées dans nos échantillons.

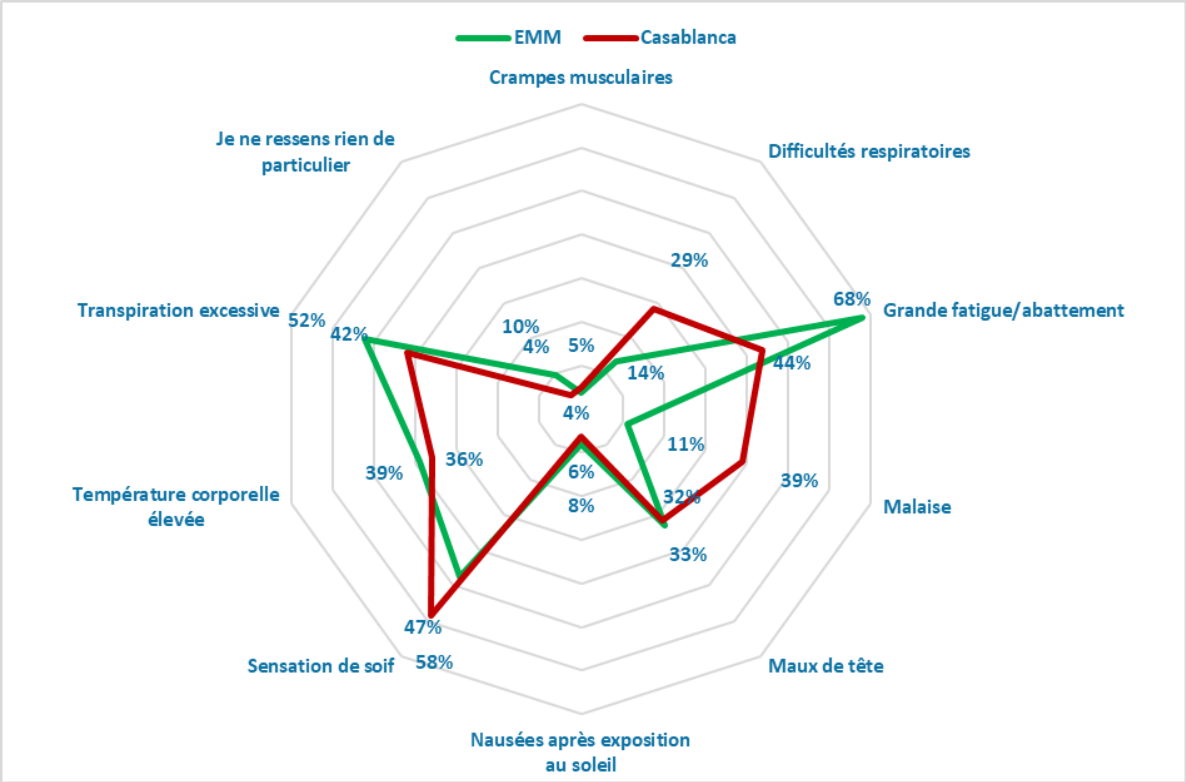


Figure 198 : Effets sur la santé des vagues de chaleur tels que ressentis par les habitants de l'agglomération messine et celle de Casablanca.

D'après nos résultats, une forte relation au Khi² a été constatée entre les deux variables «sexe » et « ressenti des symptômes » dans les deux terrains d'étude. Les femmes sont ainsi nettement plus sensibles à la chaleur extérieure que les hommes. Ce constat se confirme pour presque tous les symptômes ressentis en période de chaleur intense. De surcroît, parmi les répondants déclarant ne rien ressentir de particulier, la proportion d'hommes atteint 76 % dans le cas messin et 83 % dans le cas de Casablanca contre 24 % et 17 % de femmes respectivement (**Figure 199**). Ce résultat corrobore les études de van Steen *et al.* (2019a) et Sandholz *et al.* (2021) à Bonn (Allemagne) qui ont montré que les femmes souffrent davantage de la chaleur extérieure, et que le taux de mortalité dû aux vagues de chaleur est en moyenne 15 % plus élevé chez les femmes que chez les hommes.

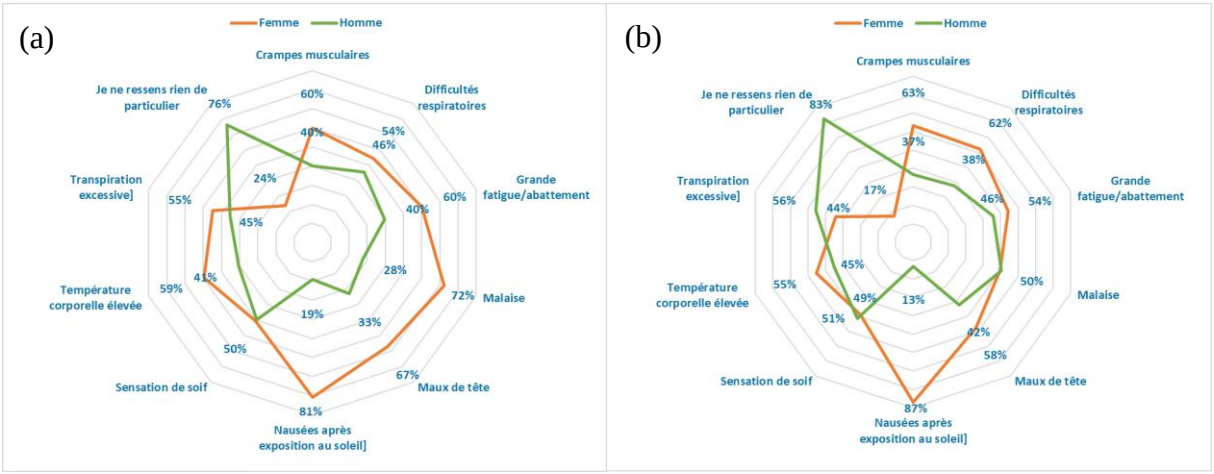


Figure 199 : Les symptômes physiques ressentis par les répondants selon le sexe pendant les périodes de forte chaleur a) cas de l'agglomération messine, b) cas de Casablanca.

9.2.4.3. Perception dissonante du ressenti thermique et cycle journalier

Il y a dissonance entre les deux territoires sur la question de la relation entre ressenti thermique et cycle journalier (**Figure 200**). Dans le cas messin, c'est la nuit que la majorité des habitants est affectée par la chaleur intense (54 %), alors que c'est plutôt en journée que l'effet de la chaleur est ressenti à Casablanca (58 %). La part des personnes ne ressentant pas de différence est identique (20 %). Ce résultat n'est pas simple à interpréter. On peut avancer l'hypothèse que sur le territoire messin, il y a une grande sensibilité à l'excès de chaleur nocturne dans la mesure où 70 % des répondants habitent en cœur de ville, dans les zones affectées par un ICU intense (Hassani et Drogue, 2020). En journée, les habitants de l'agglomération messine disposent de nombreux espaces verts en ville et de transports communs climatisés, ainsi que de espaces forestiers à proximité de la ville. Ceci pourrait atténuer la chaleur ressentie en journée. Dans les lieux enquêtés de Casablanca en revanche, il y a une plus forte carence en espaces verts et boisés.

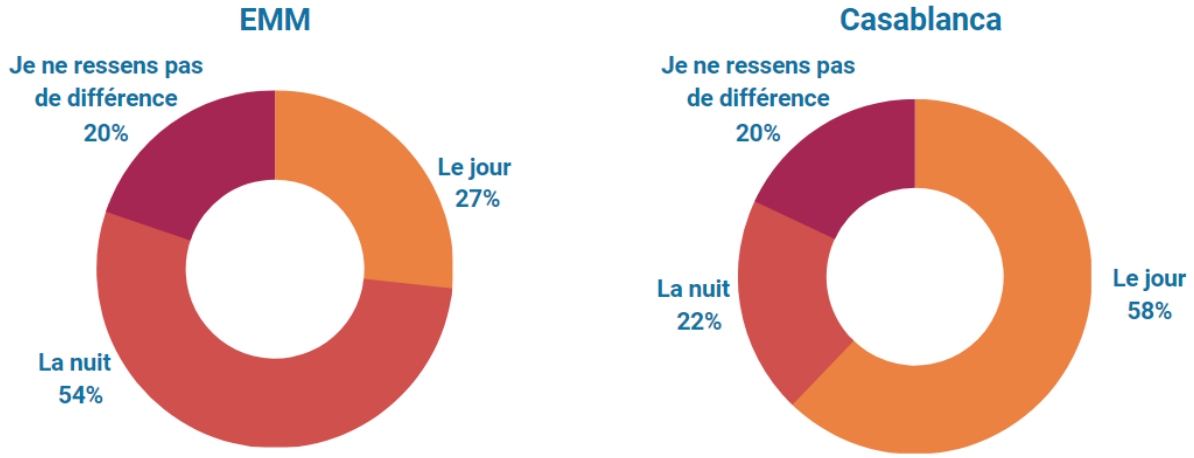


Figure 200 : Moment où la chaleur devient insupportable pour les habitants en fonction du cycle jour/nuit.

9.2.4.4. La chaleur intense mieux tolérée en journée

En moyenne, les enquêtés considèrent que les températures élevées sont plus facilement supportables de jour que de nuit, avec environ 6 °C à 7 °C d'écart entre la température maximale supportée le jour par rapport à la température maximale supportée la nuit dans les deux villes (**Tableau 48**). En termes de valeurs absolues, sur l'ensemble des personnes qui ont répondu à cette question dans nos deux terrains d'étude, moins de 3 % donnent une température d'inconfort nocturne supérieure à leur température d'inconfort diurne. En moyenne, les enquêtés jugent la température insupportable le jour à partir de 34,3 °C contre 28,1 °C pour la nuit.

Tableau 48 : Températures moyennes diurnes et nocturnes renseignées par les enquêtés des deux terrains d'étude.

Ville	Jour	Nuit
Casablanca (°C)	35,1	29,2
EMM (°C)	32,3	25,3

Par ailleurs, nous relevons que les températures maximales supportées par les Messins sont de 3 °C à 4 °C inférieures à celles supportées par les Casablancais (**Figure 201**), puisque la moyenne des températures indiquées par les enquêtés en période diurne est de 32,3°C pour Metz contre 35,1 °C pour Casablanca. En période nocturne, la moyenne est de 25,3 °C chez les répondants messins, contre 29,2 °C chez les répondants de Casablanca. Il y a donc une meilleure tolérance aux fortes chaleurs chez ces derniers (**Figure 202**).

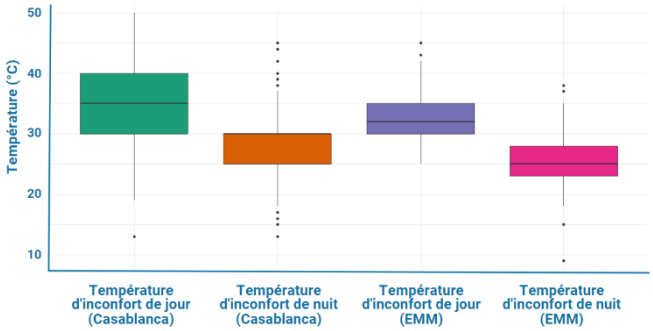


Figure 201 : Boites à moustache des valeurs de températures diurnes et nocturnes à partir desquelles la chaleur devient insupportable pour les habitants.

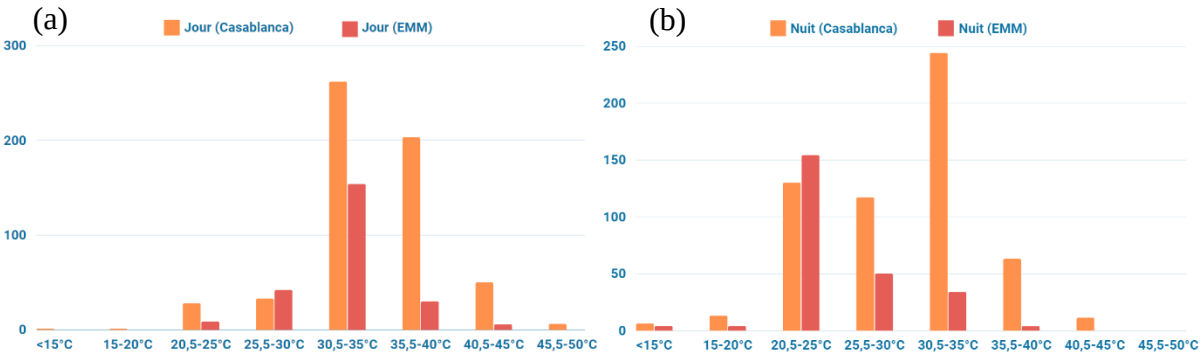


Figure 202 : (a) Histogramme des températures jugées insupportables la journée par huit classes ; (b) histogramme de températures jugées insupportables la nuit par huit classes.

9.2.4.5. Un ressenti thermique modulé par la pollution atmosphérique et l'humidité de l'air

Dans le but d'évaluer le lien entre la perception des vagues de chaleur et les conditions environnementales, les enquêtés ont été interrogés sur le lien entre vague de chaleur, pollution atmosphérique et humidité de l'air. Les résultats montrent qu'une grande majorité de la population a le sentiment que la chaleur s'accentue dans un espace où l'air est pollué (86 % en France et 87 % au Maroc). Ces résultats confirment certains travaux de recherche qui avancent une homogénéité entre les villes en ce qui concerne l'ampleur des effets combinés et les contributions relatives de la température et de la qualité de l'air aux taux de mortalité (Harlan *et al.*, 2006 ; Jacob et Winner, 2009 ; Harlan et Ruddell, 2011).

Le lien entre l'humidité de l'air et la perception de la chaleur est également établi : 85 % des habitants de l'agglomération messine et 72 % des habitants de l'agglomération casablancaise affirment qu'il y a un lien entre humidité et chaleur. Parmi eux, 76 % de Messins et 57 % des Casablancais perçoivent la chaleur comme étant plus difficile à supporter quand l'air est humide que quand il est sec.

9.2.4.6. Des activités quotidiennes diversement affectées selon le territoire enquêté

Si sur le territoire messin plus des deux tiers des enquêtés déclarent que leurs activités quotidiennes sont perturbées en cas de forte chaleur (70 %), sur le territoire de Casablanca cette part tombe à 50 %. Ces chiffres déjà importants, sont sans doute inférieurs à la réalité, car les populations les plus vulnérables (personnes âgées et souffrantes de pathologies) sont sous-représentées dans l'échantillon. Or, ce sont celles qui sont les plus susceptibles de voir leurs activités quotidiennes bouleversées par la chaleur intense.

Les participants de l'enquête sont ensuite invités à décrire précisément l'impact subi en répondant à une question ouverte. Les réponses sont ensuite présentées sous forme de nuages de mots (**Figure 203**). La taille de chaque mot reflète le nombre d'occurrences de celui-ci. Les principaux impacts signalés par les participants sont la fatigue, les maux de tête et une diminution de l'activité physique ou même l'annulation de certaines activités extérieures.

Figure 203 : Nuages de mots des impacts de la chaleur intense sur les activités quotidiennes des habitants (à gauche le cas messin et à droite le cas de Casablanca).

9.2.5. Étude de la vulnérabilité aux vagues de chaleur

9.2.5.1. Le rôle modulateur de l'acclimatation

Pour étudier la vulnérabilité aux risques lié à la chaleur, les enquêtés ont été invités à préciser à quel point ils se sentent vulnérables en cochant une case sur une échelle allant de 1 (je ne suis pas du tout vulnérable) à 5 (je suis très vulnérable). Les répondants choisissant les niveaux 4 ou 5 sont ensuite invités à préciser, dans le cadre d'une question ouverte, les raisons qui font d'eux des personnes vulnérables à ce risque.

Les résultats indiquent que d'une manière générale, les Casablancais sont moins enclins à se déclarer vulnérables à la chaleur intense (**Figure 204**). Ils s'estiment habitués à la chaleur. Lorsque l'on s'intéresse au profil des personnes se considérant comme vulnérables ou fortement vulnérables (niveaux 4 et 5), on constate qu'il s'agit le plus souvent de personnes correspondant aux critères classiques de la vulnérabilité : état de santé fragile (surpoids, diabète, maladies cardiaques, asthme…), logement insalubre, personnes isolées, travailleurs extérieurs, etc. En termes de sexe, 71 % des personnes se déclarant comme vulnérables sont des femmes dans le cas messin, contrairement à Casablanca où seuls 30 % d'entre elles sont des femmes.

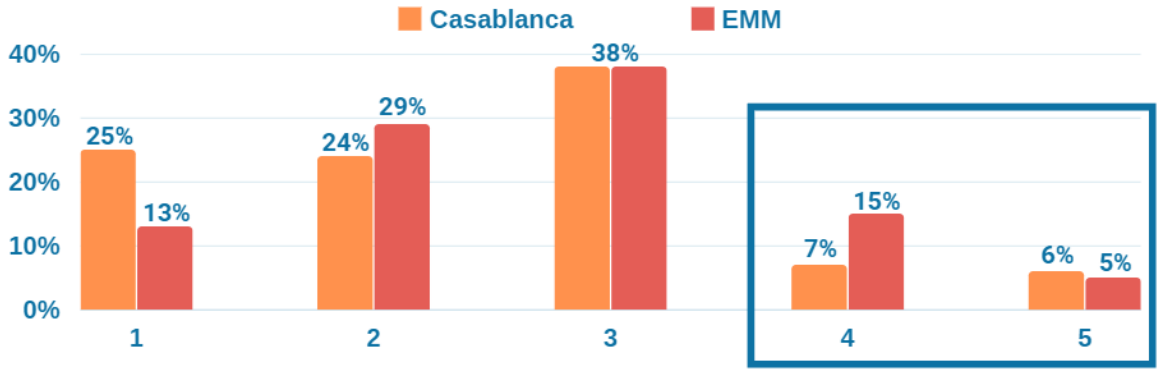


Figure 204 : Répartition des personnes se déclarant vulnérables aux vagues de chaleur sur une échelle de niveau allant de 1 (je ne suis pas du tout vulnérable) à 5 (je suis très vulnérable).

9.2.5.2. La sensation de vulnérabilité n'est pas l'apanage des personnes âgées

Au regard des tranches d'âge, on constate que la sensation de vulnérabilité ne se limite pas uniquement à la catégorie des personnes âgées de « 65 ans et plus » qui représente 17 % (cas messin) et 2 % (cas de Casablanca) de la population vulnérable. Les groupes de personnes âgées de 25 à 65 ans (cas messin) et de 18 ans à 65 ans (cas de Casablanca) représentent la majorité des personnes vulnérables dans nos échantillons avec 75 % et 97 % respectivement (**Tableau 49**). Par ailleurs, on constate que dans les deux territoires, les jeunes de moins de 18 ans sont la catégorie qui a le moins tendance à se sentir vulnérable à la chaleur intense. Cependant, ces résultats sont provisoires car les personnes âgées et les jeunes de moins de 18 ans sont sous-représentés dans nos échantillons.

Ce résultat surprenant est convergent avec l'enquête de Sandholz *et al.* (2021) menée dans la ville allemande de Bonn qui montre que les personnes les plus âgées se sont prononcées en faveur d'une faible vulnérabilité à la chaleur. L'explication tient au fait que cette catégorie de la population dispose de meilleures conditions de logement (logement préférentiellement situé en R0 ou R+1), et dispose souvent d'un accès à la climatisation ou à des espaces verts dans leur lieu d'habitation. Par ailleurs, ces personnes déclarent adapter leur comportement à la chaleur et prennent moins les transports en commun en comparaison des autres tranches d'âge. Ces différents éléments contribuent à réduire l'exposition au stress thermique des personnes âgées dans leur environnement domestique.

Tableau 49 : Parts des personnes ayant un niveau de vulnérabilité de 4 (je suis vulnérable) et 5 (je suis très vulnérable) selon les tranches d'âge.

Tranches d'âge	Eurométropole de Metz (%)	Casablanca (%)
Moins de 18 ans	0	1
18 ans - 24 ans	8	22
25 ans – 34 ans	21	37
35 ans – 49 ans	23	19
50 ans – 64ans	31	19
65 ans et plus	17	2

9.2.5.3. Un sentiment de vulnérabilité très présent dans la catégorie élève/étudiant

En termes de catégories socio-professionnelles, les étudiants apparaissent comme le groupe le plus enclin à se déclarer vulnérable aux risques liés à la chaleur (19 % dans le cas messin et 40 % dans le cas de Casablanca) (**Tableau 50**). Là encore, cette vulnérabilité perçue est sans doute liée à un niveau d'exposition plus élevé du fait de leurs conditions de vie souvent plus précaires, avec une dépendance plus importante aux transports en commun et un plus faible accès à la climatisation et aux espaces verts depuis leur domicile (Sandholz *et al.*, 2021). Mais rappelons néanmoins que cette partie de la population est sur-représenté dans nos deux échantillons.

Tableau 50 : Parts des personnes ayant un niveau de vulnérabilité de 4 (je suis vulnérable) et 5 (je suis très vulnérable) selon les catégories socio-professionnelles.

Catégories socioprofessionnelles	Eurométropole de Metz (%)	Casablanca (%)
Agriculteur/exploitant	2	0
Cadre/profession intellectuelle supérieure	13	14
Profession intermédiaire (santé, enseignement, administratif)	17	0
Employé (fonction publique, militaire, commerce)	25	0
Ouvrier	2	16
Elève/étudiant	19	40
Sans activité professionnelle	4	6
Retraité	17	10
Artisans, commerçants, chefs d'entreprise	0	14

9.2.6. Comportements et leviers d'action face aux vagues de chaleur

9.2.6.1. L'hydratation comme comportement phare en période de fortes chaleurs, la climatisation comme élément discriminant

En termes de comportements et de stratégies d'adaptation, le questionnaire présentait aux enquêtés une série de six propositions et une case « autre » en les invitant à cocher celles correspondant à leur attitude en cas de forte chaleur.

Le comportement adopté massivement par les enquêtés des deux territoires est le fait de s'hydrater en buvant beaucoup d'eau (73 % dans le cas messin et 91 % dans le cas de Casablanca), suivi par le choix d'un habillement plus léger (70 % dans le cas messin et 84 % dans le cas de Casablanca) (**Figure 205**). Ces stratégies d'adaptation à la chaleur sont, en effet, accessibles à tous les individus indépendamment de leur situation financière, ce qui participe sans doute à leur adoption par le plus grand nombre. En revanche, et de manière contre-intuitive, nous relevons que les Messins ont davantage recours à la climatisation (climatiseurs et ventilateurs inclus) que les Casablancais : seuls 26 % de ces derniers y ont recours, contre 60% dans le cas messin. De même, 6 % des Casablancais se réfugient dans les lieux publics climatisés contre 38 % dans le cas messin.

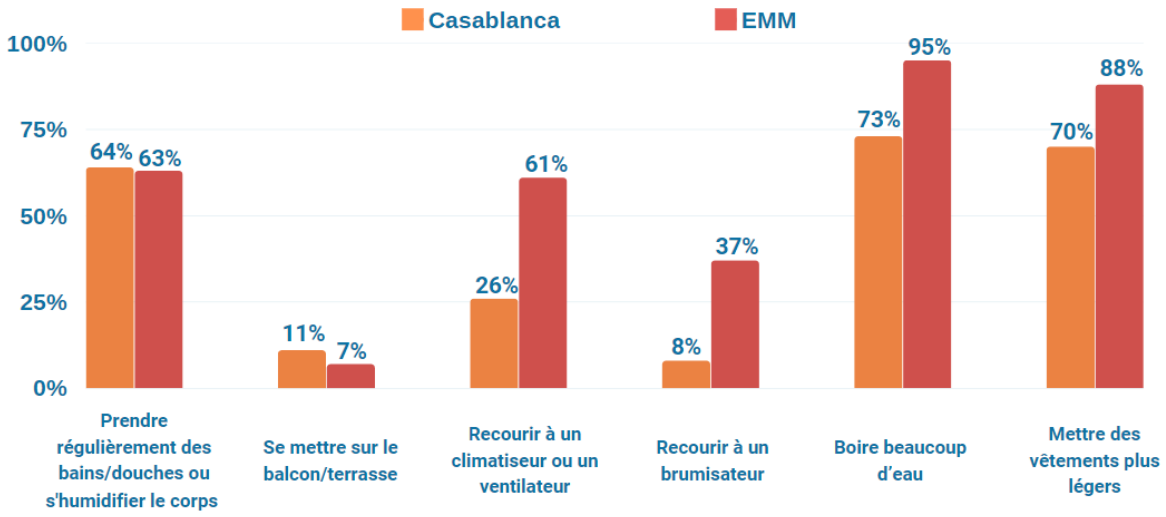


Figure 205 : Comportements adoptés par les habitants lors des périodes de forte chaleur.

9.2.6.2. La pratique des lieux comme marqueur spatial du comportement des habitants

Afin de mieux mesurer l'usage et la pratique des lieux chez les enquêtés en période caniculaire, nous leur avons présenté une carte interactive dans laquelle nous leur avons demandé de situer les endroits qui correspondent selon leurs expériences, à des sensations thermiques ou à des habitudes de fréquentations qu'ils adoptent en période de forte chaleur (**Figure 206**). Les points ont été choisis selon plusieurs critères tels que la fréquentation potentielle (accessibilité, proximité avec des points d'intérêts) ou leurs caractéristiques géographiques et/ou microclimatique (densité urbaine, végétalisation, proximité de points d'eau, etc.). Ils sont placés de manière à proposer au minimum deux espaces par quartier (un espace chaud et un espace frais).

Nous avions initialement prévu de donner la possibilité aux enquêtés de saisir eux-mêmes les points sur la carte, mais l'outil de passation fourni par notre établissement ne le permettait pas. Par conséquent, nous avons dû procéder autrement en présélectionnant un certain nombre de points sur les deux cartes et en demandant aux enquêtés d'en choisir au moins trois pour chaque question.

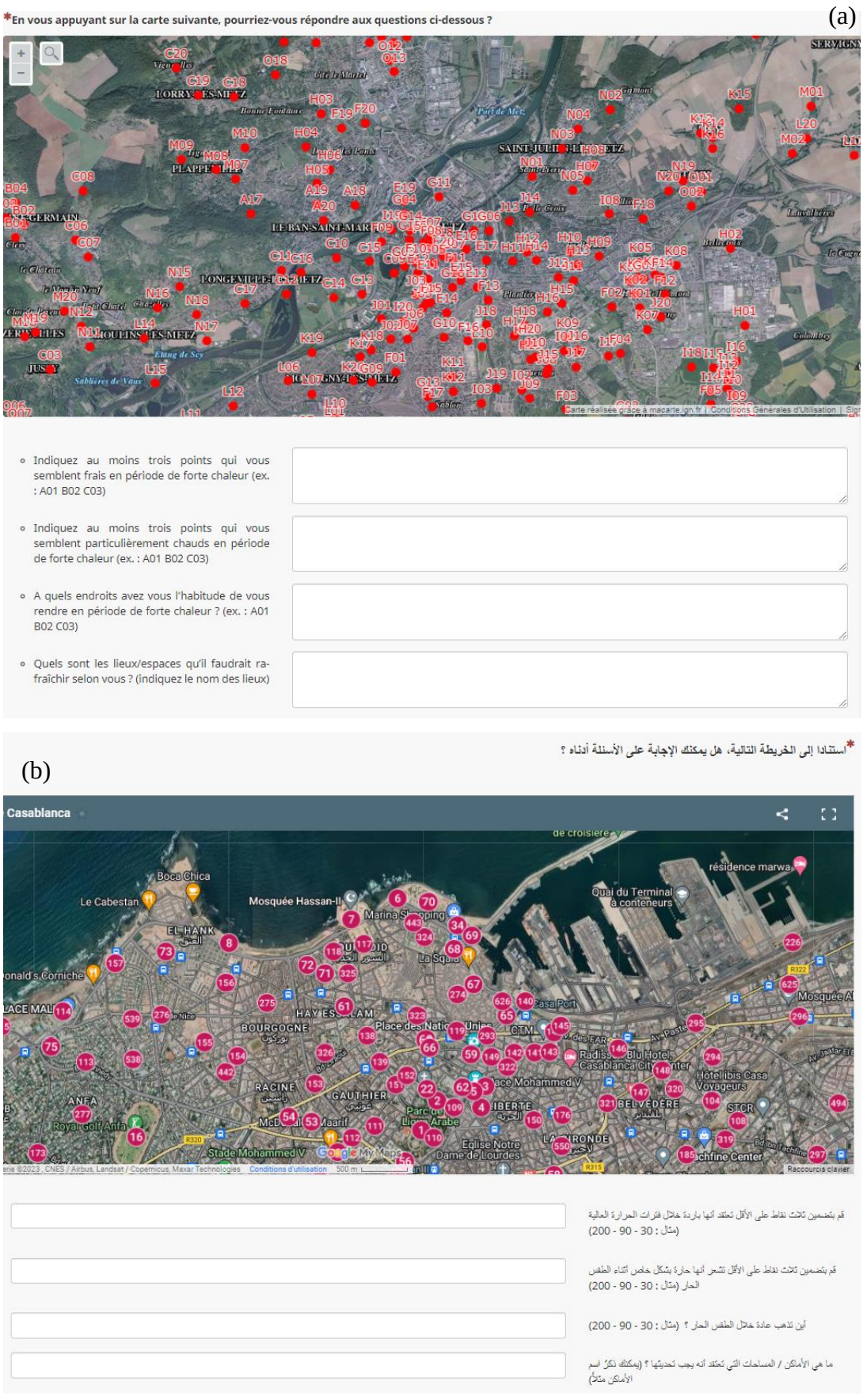


Figure 206 : Extraits des cartes interactives. a) Cas de Metz b) Cas de Casablanca (questionnaire en arabe).

Cependant, l'utilisation de cet outil est réservée aux enquêtes en ligne. Sur le terrain, il est nécessaire de disposer d'outils numériques adaptés tels que des tablettes. Or, lors de la passation des questionnaires en face-à-face, nous ne disposions pas de ces instruments, il a donc fallu s'adapter au contexte. Pour cela, nous avons dû reformuler les questions et demander aux enquêtés de citer des lieux sans leur montrer la carte correspondant.

Au total, 89 % des enquêtés de l'agglomération de Metz et 60 % des enquêtés de Casablanca ont répondu aux questions de la carte interactive, et plusieurs centaines de localisations ont été relevées. Il ressort de l'analyse des cartes (**Figure 207** et **Figure 208**) que les enquêtés ont instinctivement conscience des lieux les plus chauds et des lieux les plus frais de leur territoire. Effectivement, les lieux les plus souvent signalés pour la surchauffe sont des espaces très fréquentés souvent situés au centre-ville. Il s'agit par exemple de la place de la République et du parking Coislin à Metz, et de la place Mohammed V à Casablanca. De même, les participants ont tendance à se rendre spontanément dans les espaces végétalisés et à proximité des points d'eau pour se rafraîchir. Pour cela, ils exploitent les « atouts fraîcheurs » de leur territoire : à Metz, ce sont les zones boisées qui sont prisées par les habitants (plan d'eau, Fort Queuleu, Mont Saint-Quentin, etc.), tandis qu'à Casablanca, la situation côtière fait que les plages sont privilégiées en cas de vague de chaleur. Les Casablancais manifestent ainsi une préférence pour la partie ouest de la ville du fait d'un accès facilité par la ligne de tramway et la présence de nombreux aménagements attractifs tels que les plages d'Aïn Diab, les parcs de loisirs Sindibad et Tamaris Aquaparc, le Morocco Mall, de pistes cyclables et d'un mobilier urbain fourni (bancs publics, équipements sportifs, etc.). L'ensemble de ces caractéristiques contribuent à faire de cette partie de la ville un endroit très recherché en période de forte chaleur.

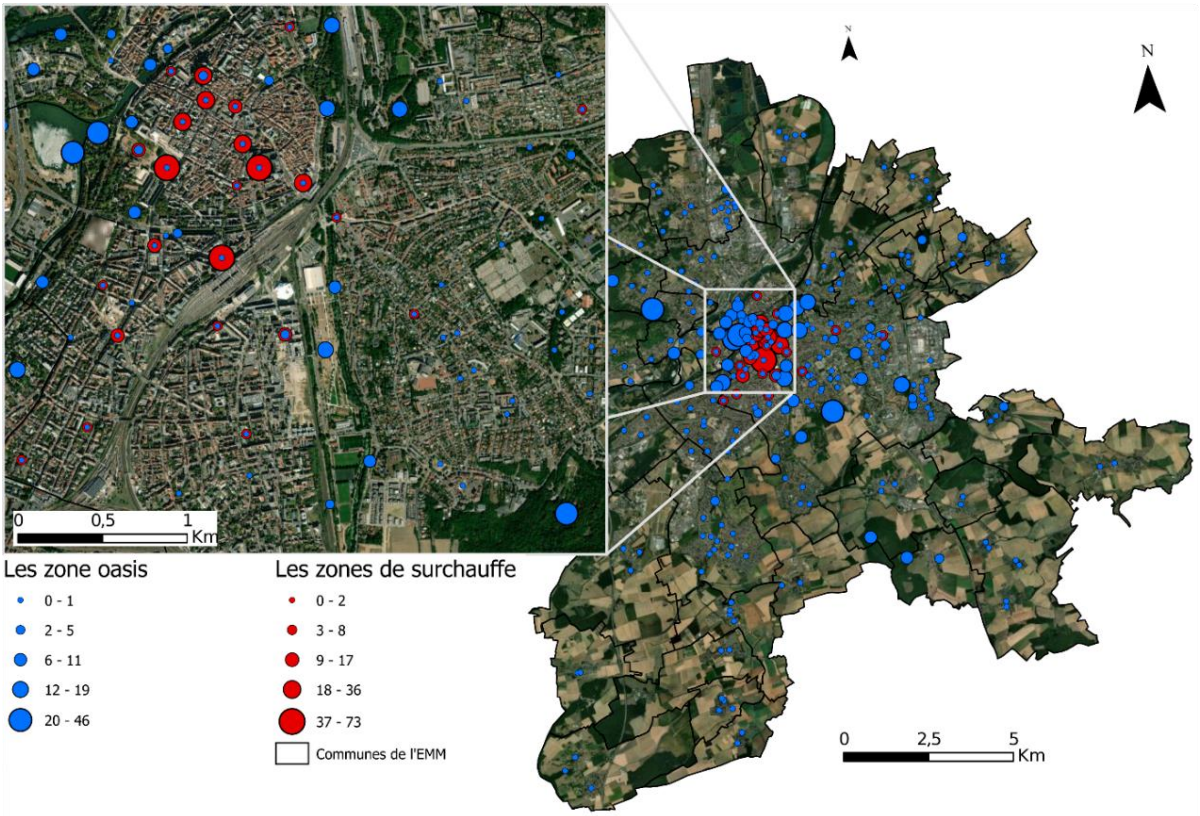


Figure 207 : Les zones de surchauffe et les oasis signalées par les répondants de l'EMM (en nombre d'occurrences).

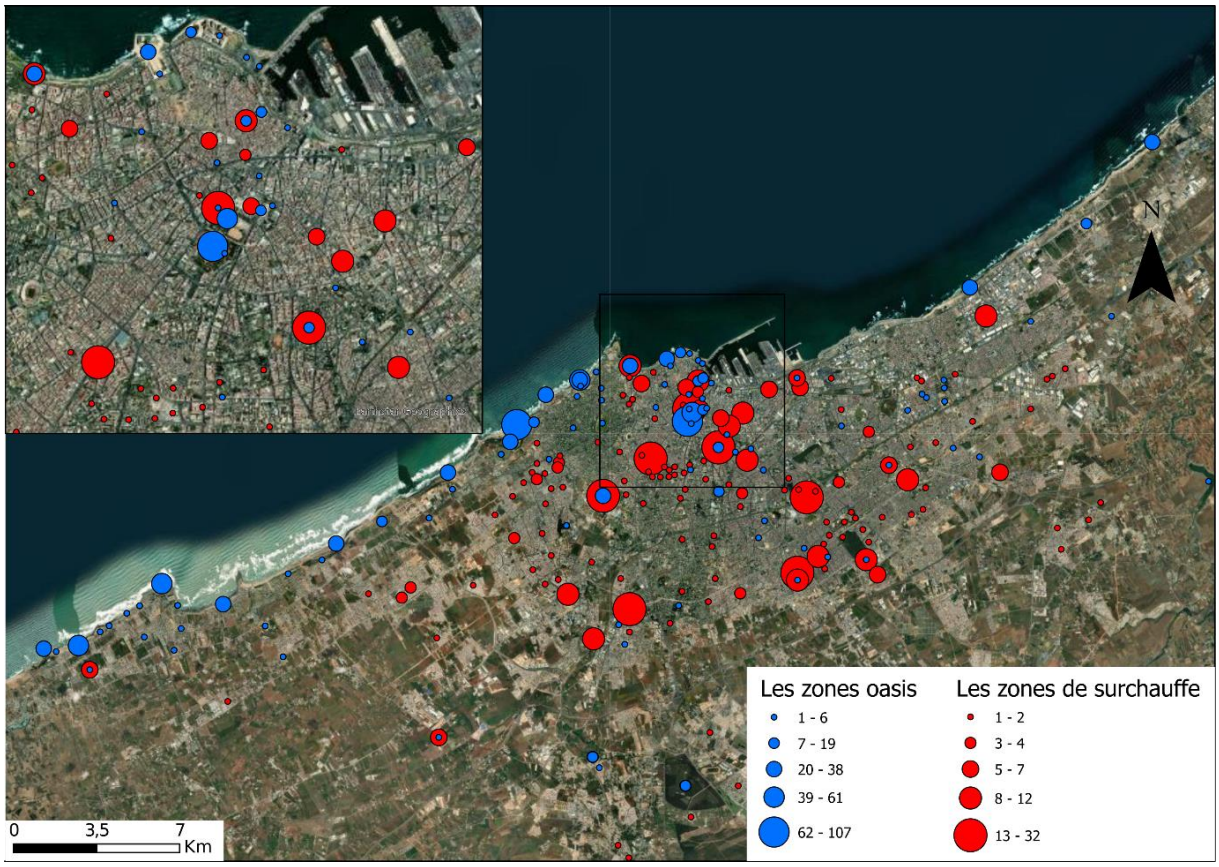


Figure 208 : Les « oasis » et les zones de surchauffe signalées par les répondants de Casablanca (en nombre d'occurrences).

9.2.6.3. La végétation, solution plébiscitée pour améliorer le confort thermique d'été

Les enquêtés ont été interrogés sur les atouts de leur ville en termes de confort et de cadre de vie en cas de forte chaleur. Pour cela, le questionnaire les invitait à faire un ou plusieurs choix parmi sept propositions. Les espaces verts sont plébiscités avec 81 % (cas messin) et 70 % (cas de Casablanca) des choix exprimés. Cela montre que les habitants de ces deux territoires sont conscients de l'action bénéfique de la végétation sur le climat urbain. Les points d'eau arrivent ensuite avec 42 % (à Metz) et 50 % (à Casablanca) (**Figure 209**). Une circulation routière réduite, les pistes cyclables, les toits et les murs végétalisés sont des solutions jugées secondaires. Le fait que l'automobile soit très présente dans les deux agglomérations et que les pistes cyclables, les murs et toits végétalisés soient peu voire très peu développés explique sans doute que les habitants ne fassent que rarement le lien entre ces solutions et la lutte contre la chaleur en ville.

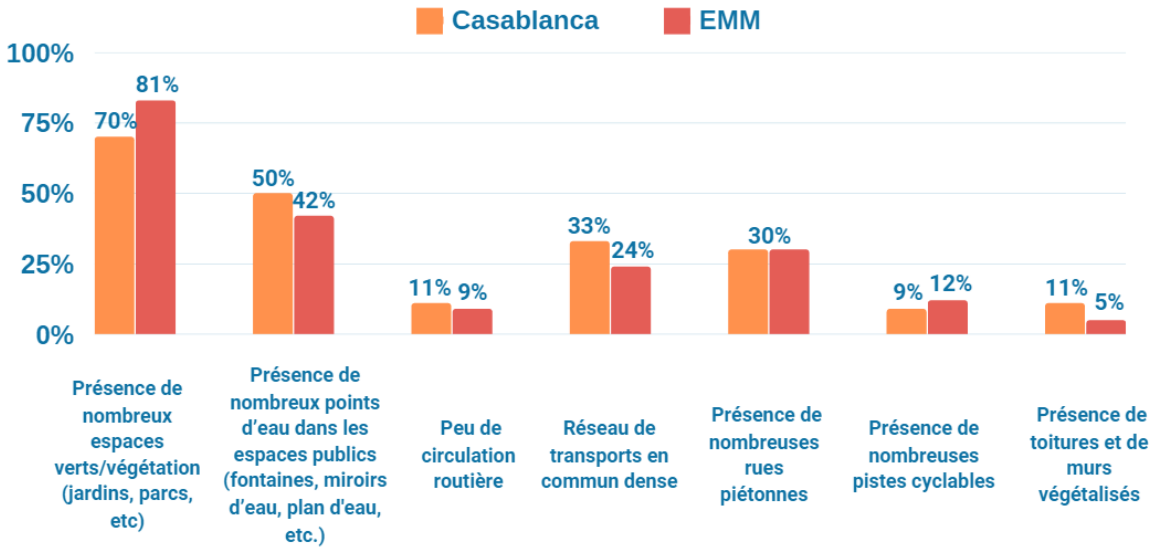


Figure 209 : Le point de vue des habitants sur les atouts des deux agglomérations en matière d'oasis et de cadre de vie en période de forte chaleur.

9.2.6.4. Une perception dissonante du levier d'action contre la surchauffe urbaine

Au terme du questionnaire, nous avons souhaité évaluer l'efficacité perçue de stratégies spécifiques d'atténuation des ICU. Pour ce faire, nous avons répertorié neuf stratégies d'aménagement et invité les enquêtés à se prononcer sur une échelle de pertinence de 1 à 5 (1 : non pertinent / 5 : très pertinent) pour améliorer le cadre de vie collectif pendant les périodes de canicule. Si l'on s'intéresse aux propositions jugées les moins pertinentes (niveau 1) et à celles jugées les plus pertinentes (niveau 5), on constate une différence entre les réponses apportées par les Casablancais et celles apportées par les Messins. Une grande majorité de ces derniers (70 %) jugent « pertinente » la stratégie « plus d'espaces verts/végétation » contre 38% des Casablancais. Ceux-ci priorisent la climatisation (probablement pour son effet direct et immédiat sur la chaleur dans les espaces intérieurs) alors que cette solution n'est mentionnée que par 21 % des Messins (**Figure 210**). Aucune des autres propositions ne se démarque. La rareté de la végétation à Casablanca pourrait expliquer la raison pour laquelle les participants n'ont pas spontanément envisagé cette solution. En revanche, l'usage de la climatisation semble être une aspiration partagée par les habitants de la ville, qui souhaitent être mieux équipés en la matière. Ainsi, à Casablanca, les solutions techniques sont privilégiées pour répondre à cette demande, tandis qu'à Metz, les solutions écologiques et naturelles sont davantage recherchées.

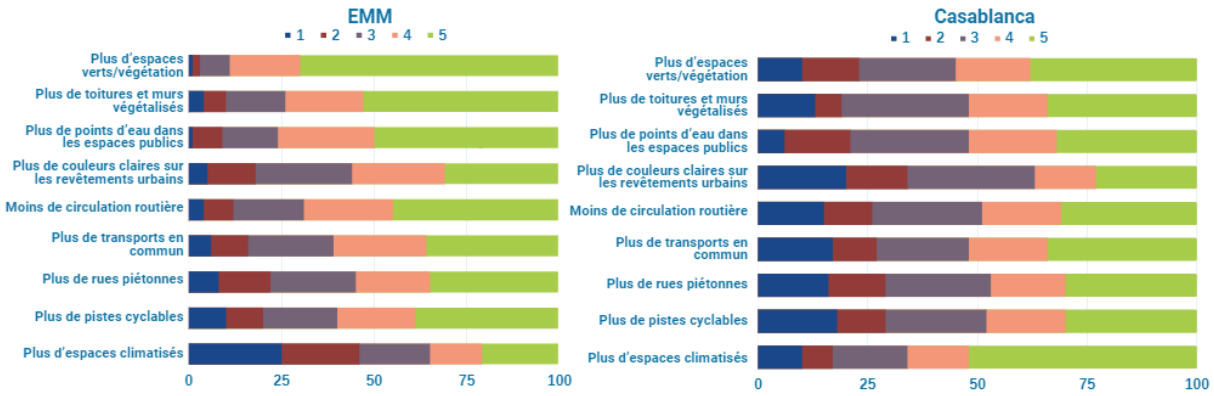


Figure 210 : Évaluation des propositions d'amélioration de cadre de vie en milieu urbain par les habitants des deux territoires comparés sur une échelle allant de 1 = non pertinente à 5 = très pertinente.

Synthèse

Ce chapitre explore la manière dont les habitants de Metz et de Casablanca, deux territoires distincts sur de nombreux aspects, sont affectés par le stress thermique et le risque lié à la chaleur intense, là où peu d'études intègrent l'expérience individuelle des habitants dans l'évaluation de la vulnérabilité urbaine aux risques liés à la chaleur. Nos résultats montrent des similitudes et des différences de ressenti et de comportement entre les habitants des deux villes étudiées : si les deux populations sont globalement conscientes des effets de la chaleur sur leur santé et leur bien-être, cette perception varie en fonction de nombreux facteurs tels que le sexe, l'âge ou la catégorie socioprofessionnelle. En confrontant les données recueillies à nos hypothèses de départ, nous relevons que :

(1) Si les Messins ont une plus forte conscience de la problématique du changement climatique, les deux populations sont toutes deux préoccupées par les mêmes aléas naturels, à savoir les sécheresses et les vagues de chaleur. Les réponses relatives aux sujets de société confirment la première hypothèse selon laquelle les préoccupations des habitants de Casablanca diffèrent largement de celles des habitants de Metz. En revanche, les réponses relatives aux risques naturels réfutent l'hypothèse avancée.

(2) Une différence dans la vulnérabilité de la population des deux régions est relevée : les Casablancais sont moins enclins à se déclarer vulnérables à la chaleur accablante, car ils se sentent souvent habitués. Cela peut aussi être lié à la situation géographique de la ville de Casablanca sur la côte atlantique qui lui fait bénéficier d'une brise marine rafraîchissante en journée. Il est avéré en effet, que la brise de mer affecte le confort thermique en améliorant l'ambiance bioclimatique grâce à son effet rafraîchissant, surtout dans les régions chaudes (Beltrando *et al.*, 2008 ; Dahech, 2014). D'ailleurs, les Méditerranéens recourent traditionnellement à la ventilation naturelle en orientant les ouvertures de leurs maisons dans la direction de la brise (Azorin-Molina *et al.*, 2011 ; Dahech, 2014). En revanche, les Messins pour se rafraîchir, ont le plus souvent recours à la climatisation et à la ventilation artificielles.

Ce résultat n'est pas surprenant, car selon une étude faite par l'ADEME en 2020[49], près de 25% des foyers français sont équipés d'un système de climatisation fixe ou mobile. Les climatiseurs mobiles sont les systèmes les plus vendus actuellement en France (80 % des ventes de climatiseurs mobiles, avec une progression de 8 % par an depuis plus de 10 ans). Ce résultat confirme donc la deuxième hypothèse.

Par ailleurs, les répondants s'estimant vulnérables dans nos échantillons nous renseignent sur le profil de ces personnes et les facteurs qui les rendent vulnérables. Il s'agit le plus souvent d'individus répondant aux critères classiques de la vulnérabilité : état de santé fragile (surpoids, diabète, maladies cardiaques, asthme…), logement insalubre, personnes isolées, travailleurs extérieurs, etc. Néanmoins, en termes de tranches d'âge, la sensation de vulnérabilité ne se limite pas uniquement aux personnes âgées, puisque les groupes de personnes âgées de 25 à 65 ans représentent la majorité des personnes vulnérables dans nos échantillons. En effet, si les personnes âgées sont la catégorie la plus fragile, elles bénéficient de meilleures conditions de vie, avec une plus faible exposition au stress thermique dans leur environnement domestique.

(3) En termes de ressenti et de perception des vagues de chaleur, les Messins sont plus nombreux que les Casablancais à déclarer avoir déjà subi l'un des impacts sur la santé pendant les périodes d'exposition à la chaleur. De plus, les femmes sont plus sensibles aux températures élevées que les hommes. Cependant, lorsqu'on s'intéresse à la relation entre le ressenti thermique et le cycle journalier, on constate une dissonance entre les deux territoires : c'est la nuit que la majorité des habitants de Metz est affectée par la chaleur intense alors que c'est plutôt en journée que l'effet de la chaleur est ressenti à Casablanca. On peut avancer l'hypothèse que sur le territoire messin, il y a une grande sensibilité à l'excès de chaleur nocturne dans la mesure où 70 % des répondants habitent en cœur de ville, dans les zones affectées par un ICU intense (Hassani et Drogue, 2020). Le même constat peut être établi en ce qui concerne l'impact de la chaleur intense sur les activités quotidiennes des répondants, puisque plus de deux tiers des enquêtés messins déclarent que leurs activités quotidiennes sont perturbées en cas de forte chaleur. Ces résultats confirment donc notre troisième hypothèse. Ils peuvent s'expliquer d'une part par la sous-représentation de certains profils dans nos échantillons tels que les agriculteurs, les ouvriers, et les moins de 18 ans ; et d'autre part, par le fait qu'à Casablanca, la population est globalement plus habituée à la chaleur et s'y adapte plus facilement. Il faut également prendre en considération la situation côtière de l'agglomération qui lui fait bénéficier, en journée, de l'effet rafraîchissant de la brise marine.

(4) L'analyse des cartes interactives a permis de comprendre les pratiques spatiales des répondants. Ces derniers considèrent instinctivement que les espaces urbains densément peuplés, dépourvus de végétation et de points d'eau sont les plus exposées au risque de canicule. D'ailleurs, pendant les périodes de fortes chaleurs, les répondants préfèrent se rafraîchir dans des zones végétalisées pour les Messins et au bord de la mer pour les Casablancais, ce qui confirme donc la quatrième hypothèse.

[49] ACTU ENVIRONNEMENT.com, 25 décembre 2022, « *Un quart des ménages français disposaient d'un système de climatisation en 2020* », (lien).

(5) Les données recueillies font état d'une perception divergente des leviers d'action contre la surchauffe urbaine : les Messins préféreraient avoir plus d'espaces végétalisés, tandis que les Casablancais souhaiteraient disposer de plus d'espaces climatisés. L'analyse de ces données confirme la cinquième hypothèse énoncée. Les Casablancais sont ainsi moins intéressés par les solutions « vertes » et privilégient des solutions techniques immédiates, contrairement aux Messins qui, ayant une plus grande conscience du réchauffement climatique, ont tendance à rechercher des solutions écologiques et naturelles.

Finalement au terme de cette étude, il nous apparaît que l'enquête par questionnaire constitue une méthode pertinente pour l'étude de la perception de risque caniculaire par une population, mais cela reste tout de même chronophage et complexe à mettre en œuvre quand il s'agit d'une enquête en face-à-face. En revanche, cette dernière favorise la fiabilité des données et évite les réponses erronées, puisque c'est l'enquêteur lui-même qui pose les questions dans l'ordre du questionnaire en s'assurant que les consignes sont suivies. L'enquête menée dans le cadre de cette thèse, à partir des deux cas d'étude que sont les villes de Metz et de Casablanca, pourra également aider les travaux sur d'autres territoires confrontés à des problématiques similaires. Signalons toutefois que dans le cas présent, notre étude présente quelques limites : tout d'abord, nos échantillons ne sont pas assez représentatifs de l'ensemble de la population des deux métropoles, car certaines catégories de personnes y sont sous-représentées (certaines tranches d'âge et catégories socio-professionnelles notamment) du fait des difficultés rencontrées pour la passation de l'enquête en face-à-face auprès des habitants de Metz, ce qui nous a conduits à nous appuyer principalement sur l'enquête en ligne. En outre, l'impératif d'avoir un questionnaire bref, nous a obligé à faire des choix parmi les questions à inclure. Par exemple, nous aurions aimé inclure des questions renseignant les revenus et les consultations médicales.

Chapitre 10 : Enquête par entretien auprès des acteurs locaux

En complément de l'enquête de terrain menée auprès des habitants des deux villes étudiées, nous avons souhaité approfondir nos résultats grâce à des données de nature qualitative. En effet, bien que les approches qualitatives soient largement reconnues et couramment utilisées dans les sciences sociales comme en géographie humaine, on y a encore trop peu recours dans la recherche portant sur des phénomènes physiques. Par exemple, Depietri *et al.* (2013) ont mené des entretiens auprès des acteurs locaux sur le sujet de la surchauffe urbaine à Cologne (Allemagne) en mettant l'accent sur les stratégies d'atténuation des effets négatifs des vagues de chaleur sur l'écosystème urbain ; Shih et Mabon (2021) ont eu recours aux entretiens auprès d'experts pour évaluer le poids des variables entrant en compte dans la mise en place d'un indice de vulnérabilité à la chaleur intense. En France, Verlynde (2018) a mené des entretiens exploratoires pour concevoir un questionnaire au sujet du risque inondation auprès des habitants de Dunkerque.

Ainsi, dans le cadre de cette thèse, nous avons mené une enquête auprès de certains acteurs locaux par le biais d'une série d'entretiens en face-à-face. L'objectif était d'interroger les parties prenantes pertinentes dans une logique interdisciplinaire, à savoir les élus, les services en charge de l'aménagement urbain, de l'environnement, de la planification et de la gestion des risques ainsi que les acteurs du domaine médico-social. En interrogeant ces acteurs, nous cherchons avant tout à connaître leur implication dans la thématique de la surchauffe urbaine et leur degré de conscience de cette problématique. Il s'agit de comprendre comment ils prennent en main le risque lié à la chaleur intense en ville, que ce soit en termes de prévention et de sensibilisation, ou d'aménagement urbain. Nous nous intéressons en particulier, à leur point de vue, ainsi que leur appréciation des moyens et outils déployés pour mettre en place une prévention des risques efficace, mais également la manière dont ils ont intégré le citoyen dans les démarches de planification pour l'aider à comprendre les dangers des vagues de chaleur vis-à-vis des personnes vulnérables. Ces éléments peuvent nous aider à vérifier leur appropriation des risques liés à la chaleur intense en identifiant les difficultés rencontrées dans leur mission et leurs aspirations futures.

Le traitement des entretiens devra alors répondre aux trois questions suivantes :

- Quelles sont les mesures prises pour prévenir les effets néfastes des vagues de chaleur ?
- Comment les acteurs publics sensibilisent la population sur ce risque ?
- Et enfin : quelles sont les mesures prises pour atténuer ou réduire leurs impacts sur la santé publique ?

Les résultats de cette enquête seront confrontés à ceux issus de l'enquête auprès des habitants, de sorte qu'en plus de produire des données utiles dans le cadre d'une démarche qualitative, ce travail peut également permettre d'identifier les éventuels décalages qui peuvent

exister entre l'administration locale et les administrés en termes de perception et de représentation des risques liés à la chaleur.

Dans la suite du manuscrit, nous exposons la méthodologie suivie et le contexte dans lequel ont été conduits ces entretiens, avant de présenter les résultats.

10.1. Méthodologie et contexte des entretiens **307**

10.1.1. Le mode opératoire : les entretiens semi-directifs 307

10.1.2. La sélection des acteurs publics à interroger dans chaque territoire 308

10.1.3. L'élaboration des grilles d'entretien 310

10.1.4. Conditions de réalisation de entretiens 311

10.2. Traitement et analyse **313**

10.3. Résultats **314**

10.3.1. Enjeux soulevés 315

10.3.2. Prise en compte de la problématique de la surchauffe urbaine 317

10.3.3. Difficultés rencontrées 318

Synthèse **320**

10.1. Méthodologie et contexte des entretiens

10.1.1. Le mode opératoire : les entretiens semi-directifs

Comme le relèvent Bongrand et Laborier (2005), l'entretien est la technique privilégiée dans l'analyse des politiques publiques. En effet, pour interroger les décideurs publics, l'entretien est une méthode plus efficace que le questionnaire, car plutôt que de partir de questions formulées par le chercheur, l'entretien valorise les questions et les problématiques soulevées par les enquêtés eux-mêmes (Blanchet et Gotman, 2010). Il s'agit ainsi de rechercher le point de vue de l'enquêté et de mettre en valeur son expérience et la vision qu'il a de son action. Plus précisément, il est possible de distinguer trois types d'entretiens : ceux à usage exploratoire qui permettent de cadrer la recherche et le terrain en vue d'élaborer des questionnaires plus détaillés, ceux à usage principal qui sont utilisés comme source d'information primaire, et enfin ceux à usage complémentaire qui servent à compléter et approfondir les résultats obtenus par d'autres outils méthodologiques (Maynard-Moody et Musheno, 2003). Dans notre recherche, l'enquête par entretien que nous avons choisi de mobiliser relève donc de la troisième catégorie, puisque les entretiens semi-directifs avec les acteurs et les réponses obtenues seront exploitées en conjonction avec l'ensemble des sources mobilisées.

Les entretiens semi-directifs sont des conversations dans lesquelles l'enquêteur a déjà en ligne de mire le type d'informations qu'il cherche à collecter et pour ce faire, a déjà établi une liste de thèmes à aborder. La conversation reste néanmoins libre et peut beaucoup varier d'un interlocuteur à un autre. Cette technique d'enquête se distingue de l'enquête directive dans laquelle la liste préconçue des questions et des sujets à aborder est invariable. Dans le cadre de l'entretien semi-directif, il s'agit de faciliter l'expression propre du répondant en évitant qu'il se sente enfermé. Lorsque ce dernier n'évoque pas de façon spontanée un thème figurant dans la grille, l'enquêteur l'invite à en parler. À l'inverse, s'il s'éloigne du sujet, l'enquêteur recentre l'entretien. Ainsi, la personne interviewée « se laisse diriger tout en dirigeant » (Piaget, 1947).

Un avantage significatif de cette méthode est la possibilité de faire émerger des informations jusqu'alors inconnues. Les participants peuvent être considérés comme des experts de sorte que lorsque l'opportunité de s'exprimer librement leur est offerte, de nouvelles informations peuvent émerger. Cette approche permet d'extraire à la fois des données quantitatives et qualitatives (les projets en cours, les objectifs fixés et les moyens d'y parvenir, etc.). En revanche, cette technique d'enquête souffre d'un certain manque de représentativité de l'information. Par sa nature qualitative, toute atteinte d'un seuil statistique pertinent est rendue impossible. Cela tient d'abord au temps nécessaire à la réalisation des entretiens puis à celui de leur traitement. La méthode relève davantage d'une approche intensive que d'une approche extensive (Morange et Schmoll, 2016), et ne peut dès lors que servir de complément à l'enquête par questionnaire diffusée au plus grand nombre. Ensuite, cela s'explique par leur objectif même : celui du recueil de témoignages. L'accent reste donc mis sur l'interrogation des représentations individuelles afin de mieux appréhender la complexité du sujet traité.

Plus concrètement, nous avons eu recours aux entretiens semi-directifs afin d'amener les acteurs interrogés à nous parler de la manière dont ils luttent contre les risques liés à la chaleur

intense, sans pour autant les restreindre à n'évoquer que les aspects purement liés à ces risques. Réchauffement climatique, surchauffe urbaine et stress thermique sont en effet imbriqués. Ce fut donc un choix logique que de s'autoriser certaines digressions, qui au final, ont souvent été bénéfiques aux échanges puisqu'aboutissant à des réflexions pertinentes sur la manière dont la lutte contre la surchauffe urbaine est menée.

Aussi, nos entretiens comprennent majoritairement des questions ouvertes et quelques questions fermées permettant d'obtenir des précisions lorsque cela s'est avéré nécessaire. Ils sont également thématisés en différentes rubriques définies préalablement afin de pouvoir interroger les acteurs publics sur plusieurs thématiques telles que les canicules passées, la situation du territoire par rapport au risque caniculaire, les zones de vulnérabilité et les populations vulnérables, leurs moyens d'action et de prévention des risques, leurs projets futurs, etc. Toutefois, malgré ce cadrage méthodologique, notre objectif consistait surtout à « laisser parler » les personnes interviewées.

10.1.2. La sélection des acteurs publics à interroger dans chaque territoire

Le choix des personnes à interroger a été réalisé à partir d'une liste préalablement établie regroupant les principaux organismes prenant part aux trois thématiques principales : les stratégies d'aménagement urbain, la gestion des risques et la politique sanitaire et sociale en lien avec la problématique de la chaleur en ville. À partir de cette liste sommaire, nous avons sélectionné des profils de personnes en tenant compte de leur poste et de leur influence dans les domaines considérés. Ont ainsi été choisis pour être interrogés, les acteurs du territoire qui ont une influence sur la gestion du risque ainsi que sur le risque en lui-même, puisqu'ils peuvent agir pour le contenir.

Les personnes choisies représentent toutes les structures et services de l'administration en lien avec la problématique et agissant sur l'un des terrains d'étude. Ils ont été classés selon leurs fonctions et domaines d'intervention, leur implication dans le territoire d'étude et leur connaissance de l'espace et sa planification. La fonction de chaque enquêté et son domaine d'intervention ont été identifiés avant toute prise de contact (fonctions principales et secondaires, responsabilités, types de mandats, place dans la hiérarchie administrative, etc.).

10.1.2.1. Les acteurs messins

Vingt-deux personnes ont été contactées à Metz et ses alentours (**Figure 211**). La prise de contact s'est faite via les adresses e-mail des acteurs glanées sur les réseaux professionnels ainsi que les pages web des organisations auxquelles ils appartiennent. Des relances par mail ont été envoyées, avec quelques fois des appels téléphoniques. Sur les vingt-deux personnes contactées, neuf ont accepté de nous accorder un entretien.

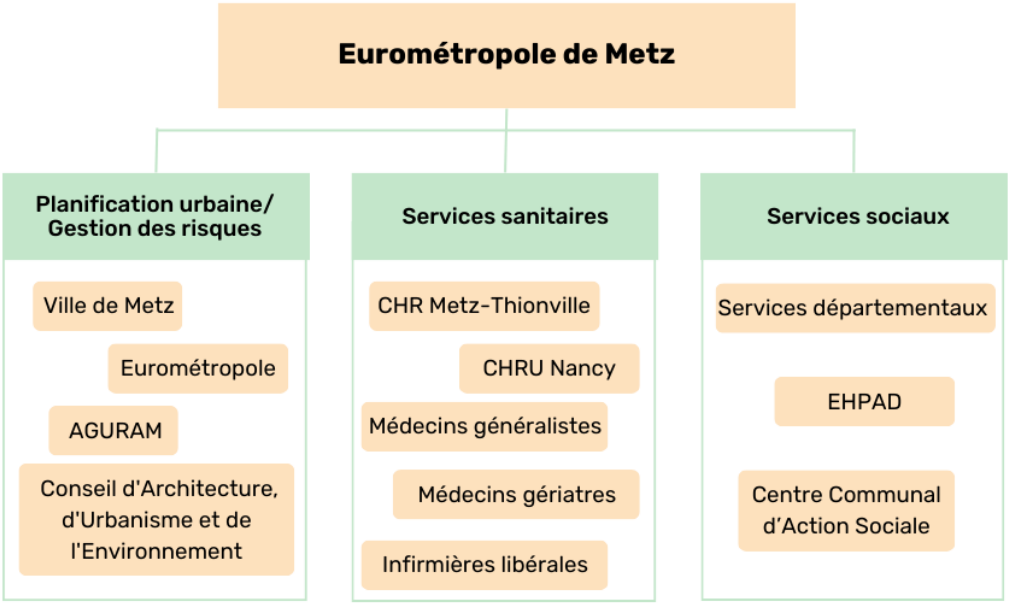


Figure 211 : Institutions et collectivités identifiées sur le territoire de Metz pour les entretiens semi-directifs.

10.1.2.2. Les acteurs casablancais

Dans le cas de Casablanca, les adresses e-mail des personnes identifiées n'étant pas diffusées sur Internet, nous n'avons pas pu utiliser ce moyen pour prendre contact. Aussi, les demandes de rendez-vous ont été effectuées via le réseau social *LinkedIn*, par téléphone, ou au cours des rencontres physiques effectuées sur place. Sur les 14 personnes contactées, seulement 2 ont accepté de nous accorder un entretien (**Figure 212**). Ce faible nombre est dû en grande partie à la fermeture des frontières du fait de la crise sanitaire en 2021 et 2022 qui nous a empêché de nous rendre sur place pour prendre contact, mais aussi et surtout, au manque de transparence des autorités marocaines qui sont souvent réticentes à communiquer sur l'action publique.

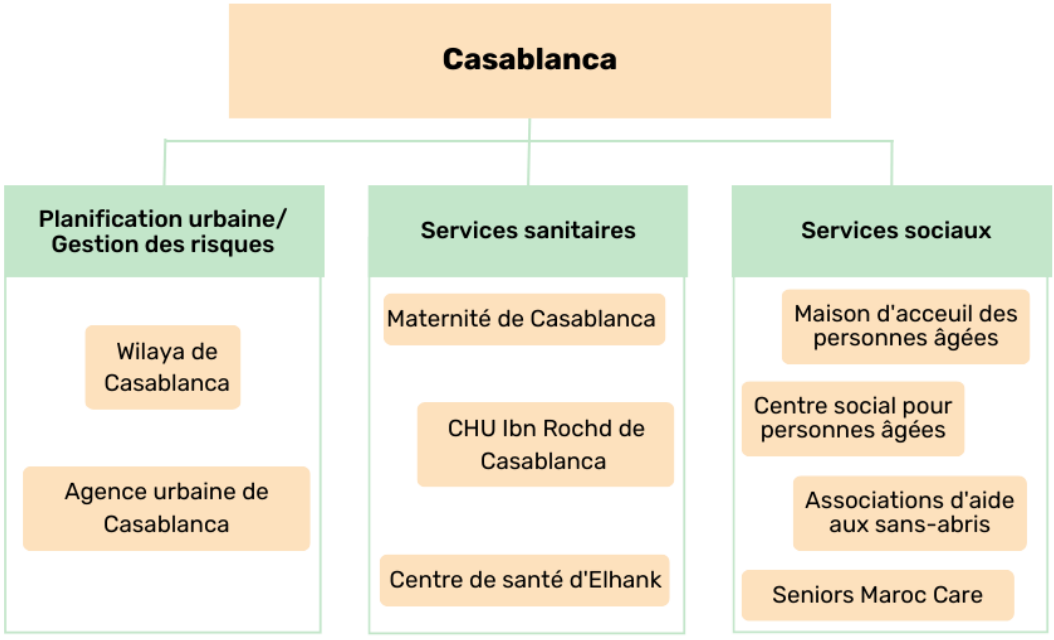


Figure 212 : Collectivités et institutions identifiées sur le territoire de Casablanca.

10.1.3. L’élaboration des grilles d’entretien

Avant de rencontrer les acteurs publics, des grilles d’entretien ont été élaborées afin de faciliter et normaliser le recueil de l’information. Un exemple est fourni dans le **tableau 51**. Cet outil est destiné à servir de guide et de support pour mener les entretiens en s’assurant que les principaux points d’intérêt sont abordés pendant l’entretien (Mason, 2002). Il s’agit aussi de hiérarchiser les sujets à aborder, et de mettre en place un ordre d’enchaînement logique des questions afin de pouvoir recueillir l’information nécessaire dans un laps temps relativement court (entre 30 et 45 minutes).

Ces grilles d’entretien se veulent les plus neutres possible afin de ne pas influencer les réponses et de ne pas orienter les échanges. Elles ont été adaptées aux profils des personnes à rencontrer en tenant compte de leurs fonctions et de leurs missions. De plus, afin de permettre la comparaison entre les deux terrains étudiés, les grilles produites pour Metz ont été traduites en arabe et adaptées au contexte marocain en ciblant des profils de personnes similaires dans les mêmes domaines d’intervention.

Chaque grille se décline en rubriques thématiques hiérarchisées, commençant par des questions générales sur les problématiques climatiques avant d’aborder des questions sur la chaleur en ville (canicules passées, zones à risque, outils mis en place pour gérer la crise, etc.). Le but de ces grilles est de connaître la manière avec laquelle nos interlocuteurs abordent ces problématiques et faire apparaître leurs attentes en matière de projet de territoire. De plus, les événements récents ou marquants peuvent parfois orienter les réponses des décideurs politiques. Le contexte socio-économique est un autre facteur explicatif relevé.

Tableau 51 : Exemple d'une grille utilisée pour un entretien semi-directif avec un agent chargé des parcs et jardins de la ville (Hassani et collaborateurs, 2022).

Date et heure de l'entretien : 16 juin 2021 à 14h30. **Mode d'entretien : visioconférence sur l'application *Micrsoft Teams.***	
Fonction du répondant	Directeur du pôle Parcs, Jardins et Espaces Naturels
Contexte	Une étude sur les risques liés à la chaleur intense, dans le cadre d'une thèse de doctorat en géographie sur la surchauffe urbaine à l'Eurométropole de Metz menée en collaboration avec l'EMM et l'ADEME. Cette étude fait partie du projet IATUS[50] visant à mettre en évidence l'universalité des ICU tout en diagnostiquant leurs spécificités géographiques.
Objectifs	Collecter des données sur - la gestion des espaces verts au niveau de la ville de Metz - la prise en compte des problématiques liées au changement climatique - Les stratégies d'aménagements des espaces verts prenant en compte la surchauffe urbaine
Informations transmises par les enquêteurs avant l'entretien	- Présentation des enquêteurs (fonctions et institution) - Présentation du contexte et de l'objectif de l'entretien - Demande de permission d'enregistrer
Questions posées	1. D'après votre expérience, l'importance des espaces verts a-t-elle évoluée dans votre ville ces dernières années ? Selon les élus ? Selon les riverains ?
	2. Vous et les autres membres de votre service êtes-vous sensibles à la problématique de la surchauffe urbaine ?
	3. Qu'est-ce qui vous préoccupe dans cette problématique ?
	4. Votre service prend-il en compte le phénomène de l'îlot de chaleur urbain dans l'aménagement des espaces verts ?
	5. Est-ce que les propriétés rafraîchissantes des végétaux sont un paramètre pris en considération dans les choix d'aménagement faits par votre service ?
	6. Sélectionnez-vous les essences végétales à implanter en fonction de critères liés à l'adaptation au réchauffement climatique et/ou à la résilience face à une sécheresse météorologique prolongée ?
	7. En période de vague de chaleur, constatez-vous une dégradation de la végétation au niveau des espaces verts ?
	8. Constatez-vous un regain de l'importance donnée par les élus/riverains aux espaces verts suite à une période de forte chaleur ?
	9. Comment pensez-vous que le nombre d'espaces verts évoluera dans les prochaines années à Metz et dans la métropole ?

10.1.4. Conditions de réalisation de entretiens

Les entretiens ont été menés en juin et juillet 2021 à Metz (**Tableau 52**) et en mai 2022 à Casablanca (**Tableau 52**), avec le concours d'un stagiaire recruté à cet effet (Tudoux, 2021). Ils ont été conduits selon un mode de passation en face-à-face au sein des structures professionnelles, à l'exception de trois entretiens menés en visio-conférence. Lorsque cela était

[50] IATUS : Îlots de chaleur, Adaptation, Territoires Urbains.

possible, nous avons interviewé deux personnes dans la même structure : le responsable du service et le chargé de mission afin d'avoir deux visions différentes.

De manière générale, un entretien typique débute, après un premier échange des politesses d'usage, par une prise de parole de notre part dans laquelle nous nous présentons et expliquons notre projet d'étude et l'objet de la rencontre. Nous demandons ensuite l'autorisation d'enregistrer les échanges, et expliquons l'utilisation ultérieure des informations recueillies. Ensuite, il est demandé à la personne interviewée de se présenter et d'exposer ses fonctions. Chaque entretien est différent et dépend de plusieurs facteurs tels que les fonctions, le profil de l'interlocuteur, ses disponibilités et le temps consacré.

La durée moyenne de passation était variable, allant de 40 minutes à 1 heure. Tous les entretiens ont fait l'objet d'enregistrements vocaux, qui ont ensuite été retranscrits manuellement dans leur intégralité afin de disposer d'une version numérique écrite. Les corpus obtenus ont ensuite été filtrés pour ne laisser que les échanges utiles à notre étude.

Tableau 52 : Corpus des entretiens semi-directifs de Metz (2021) et Casablanca (2022).

Enquêté	Fonction	Institution/organisme	Date et durée d'entretien
A.1 **A.2**	Chef de mission transition écologique et solidaire Chargée de projets développement durable	Ville	8 juin 2021, 50 min en visioconférence
A.3	Directeur des espaces vert de la ville de Metz	Ville	17 juin 2021, 40 min en visioconférence
A.4	Chef de projet Climat Air Energie	Métropole	23 juin 2021, 40 min en face-à-face
A.5	Chargée d'études environnementales	AGURAM	23 juin 2021, 30 min en face-à-face
A.6	Responsable du service santé publique	Conseil départemental	24 juin 2021, 50 min en face-à-face
A.7	Directrice de l'aide sociale	Conseil départemental	13 juillet 2021, 20 min en face-à-face
A.8	Responsable des services sociaux	Conseil départemental	13 juillet 2021, 20 min en face-à-face
A.9	Responsable du pôle autonomie	Conseil départemental	13 juillet 2021 20 min en face-à-face
A.10	Vice-président du syndicat MG-France, président de la fédération des soins primaires et médecin coordinateur dans deux EHPAD.	EHPAD	15 juillet 2021, 30 min en visioconférence
A.11	Responsable de la planification urbaine	Agence urbaine	9 mai 2022, 15 min en face-à-face
A.12	Médecin urgentiste	Hôpital	16 mai 2022, 17 min En face-à-face

10.2. Traitement et analyse

Pour faciliter l'analyse ultérieure du corpus, nous avons commencé par reformuler, avec prudence, les propos des interlocuteurs pour en faciliter l'analyse. Cela passe entre autres, par la suppression des éléments qui n'apportent rien en termes de contenu, qui sont perturbateurs et dont la suppression n'affecte pas le contenu ou le sens des propos. Nous avons aussi effectué un nettoyage en supprimant certains passages confus, les répétitions, et certains régulateurs verbaux (ben, heu, enfin…). Ce traitement complété, nous avons ensuite procédé à l'analyse qualitative du corpus en suivant l'approche thématique développée par Braun et Clarke (2006), (2014) en s'aidant du logiciel d'analyse qualitative *MAXQDA* (**Figure 213**). Cette méthode est articulée en deux grandes séquences structurées en 6 étapes (**Tableau 53**) :

La première séquence consiste à transformer le corpus de données en une séries de codes exploitables. Il s'agit de lire et relire l'intégralité de chaque retranscription afin de comprendre et s'approprier les propos du répondant, sans *a priori*. On parle aussi de « lecture flottante ». Ce travail permet d'identifier les principales thématiques du corpus qui sont ensuite reportées dans une grille d'analyse se présentant sous la forme d'un tableau. Ensuite, nous avons décomposé les discours des répondants en un certain nombre de segments de texte en veillant à ce qu'ils soient suffisamment longs et qu'ils incluent tous les éléments nécessaires à leur compréhension et interprétation. Ces extraits ont alors été codés en « unités de sens », puis agrégés par thématique au sein de la grille. Les unités de codes qui ne correspondent à aucun des thèmes ont été reportés sur une ligne « divers ».

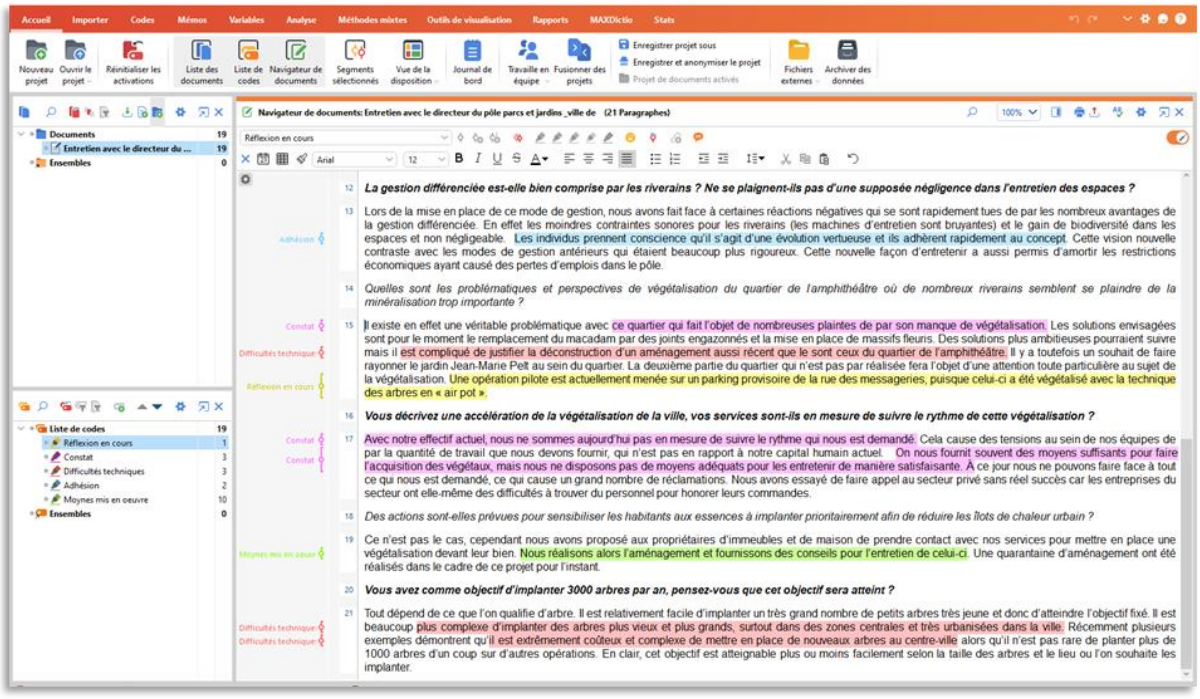


Figure 213 : Interface de traitement des verbatims du logiciel *MAXQDA*.

Dans un second temps, les codes et les thèmes ont été examinés et affinés de manière itérative, éliminés, combinés ou divisés. Les thèmes généraux ont été étiquetés et organisés pour inclure tous les codes pertinents. Une fois tous les codes reportés dans le tableau d'analyse, la seconde étape consiste à faire une première critique sans interprétation suivant une lecture horizontale en s'efforçant de (**Tableau 53**) :

- Repérer des récurrences, des termes qui reviennent dans chaque thème,
- Repérer les incohérences à l'intérieur d'un même thème ou entre les différents thèmes,
- Repérer de faits et phénomènes qui reviennent,
- Repérer des liens logiques,
- Repérer les blancs.

Ensuite, une lecture verticale par colonne (selon les thématiques) nous permet de comparer les fragments de discours relevant d'un même thème, mais issus de différents acteurs afin d'identifier des rapprochements, des divergences, des oppositions, etc. Une fois ce travail effectué, nous terminons en croisant le cadrage théorique et les thématiques des entretiens en faisant un retour aux objectifs fixés et aux hypothèses.

Tableau 53 : Les étapes suivies pour l'analyse thématique des entretiens.

Phase	Tâches
1	**Prise en main des données :** lecture répétée des transcriptions et prise de notes des idées qui se dégagent de chaque verbatim.
2	**Codage :** identification des thèmes importants et pertinents en lien avec le sujet traité. Cela implique le codage des verbatims recueillis en attribuant une couleur distincte à chaque idée présente dans le discours des enquêtés.
3	**Génération des thèmes initiaux :** vérification et validation du codage afin de faire ressortir les principaux thèmes du corpus selon une approche déductive en agrégeant les unités de codes.
4	**Vérification des thèmes :** il s'agit d'examiner chacun des thèmes par rapport aux données codées qui lui sont associées afin de déterminer leur cohérence et vérifier si elles répondent à la question de recherche. Dans cette phase, les thèmes sont développés davantage, ce qui implique parfois qu'ils soient divisés, combinés ou rejetés.
5	**Affinage des thèmes :** grâce à une analyse détaillée des thèmes en lien avec la question de recherche, chaque thème est nommé et, le cas échéant, subdivisé en sous-thématiques qui mettent chacune en évidence une idée récurrente dans les entretiens.
6	**Analyse critique :** rédaction d'un compte rendu pour synthétiser et contextualiser l'analyse des thèmes principaux et des sous-thématiques, en citant des verbatims des enquêtés pour illustrer et valider les analyses.

10.3. Résultats

Les entretiens semi-directifs menés ont mis en lumière les différentes approches suivies pour intégrer la question de la surchauffe urbaine dans les politiques publiques locales, et la réponse des personnes interviewées face à cette problématique et aux risques sanitaires qui en découlent. Nous avons pu identifier trois thèmes principaux, avec neuf sous-thèmes (**Figure 214**) :

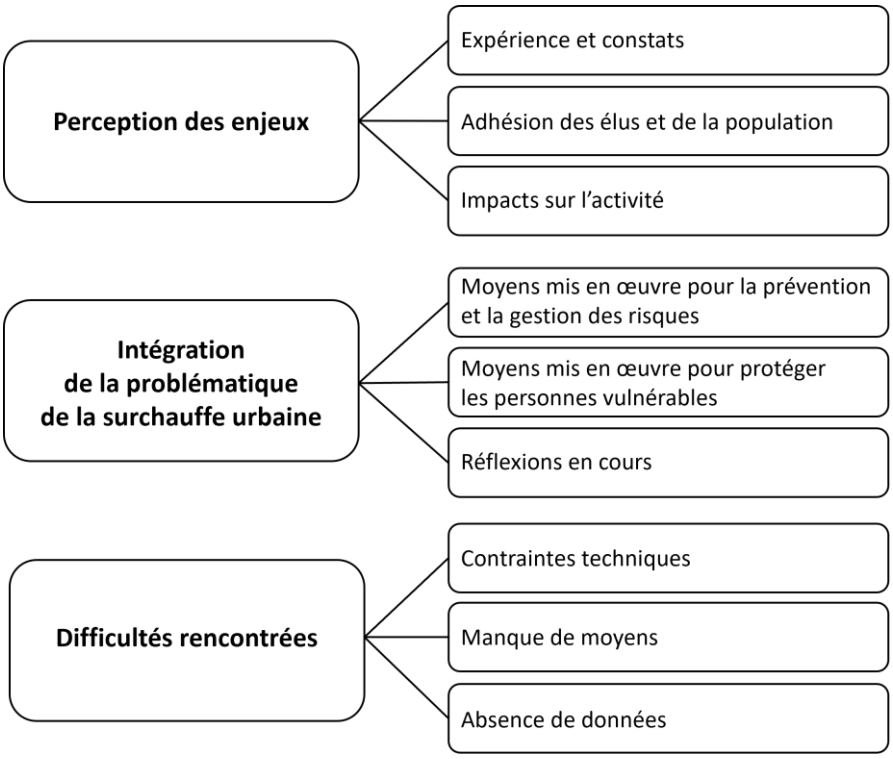


Figure 214 : Principaux thèmes et sous-thèmes identifiés dans les verbatims des entretiens semi-directifs.

10.3.1. Enjeux soulevés

Lors des entretiens, notre constat initial est celui d'une préoccupation pour le réchauffement climatique et la surchauffe urbaine sensiblement plus importante en France, où tous les enquêtés ont montré un engagement réel sur ces questions. Certains de nos enquêtés ont toutefois précisé que les enjeux climatiques, la qualité de l'air et la gestion de l'énergie n'ont été pris en compte que trop récemment au sein de la gouvernance publique à Metz. On nous signale cependant que Metz serait en avance sur beaucoup d'autres territoires au sujet de ces problématiques, bien qu'il existe une forte hétérogénéité de sensibilité entre les élus.

A.5 : « Ce ne sont pas les contraintes financières qui déterminent l'investissement de certaines communes dans l'environnement, mais véritablement la sensibilité des élus de ces communes. En témoignent un certain nombre de villages de la métropole qui s'investissent sur ces thématiques alors que ce n'est pas forcément le cas de toutes les communes qui ont des budgets plus conséquents ».

A l'inverse, notre interlocuteur de l'agence urbaine de Casablanca nous a indiqué que si son institution travaille bien sur les problématiques climatiques, ce n'est pas spécifiquement sur le sujet de l'ICU. Ce sujet est éclipsé par des problématiques environnementales jugées plus graves telles que la sécheresse, la pollution de l'air et l'érosion littorale.

Par ailleurs, il nous a été plusieurs fois signalé que les confinements liés à la crise du COVID-19 ont été des révélateurs de certaines insuffisances en termes d'aménagement dans les deux

villes. En particulier, le manque de végétation dans certains quartiers tels que celui de l'Amphithéâtre (Metz) qui a été l'objet d'une importante rénovation urbaine au cours de deux dernières décennies- est revenue à plusieurs reprises au cours des entretiens. Les riverains n'avaient accès à aucune zone végétalisée à proximité directe de leur logement, le seul jardin à proximité (le parc de la Seille) ayant été rendu inaccessible en raison des mesures sanitaires. Nos enquêtés des services sociaux nous ont d'ailleurs signalé une dégradation de la santé mentale au sein de la population générale.

L'exacerbation de la surchauffe urbaine en période de vague de chaleur est également un phénomène qui préoccupe nos interlocuteurs. L'un des médecins que nous avons interviewés nous a informé que les urgentistes sont confrontés à une recrudescence des pathologies liées à l'exposition à la chaleur intense, dont notamment une augmentation de la récurrence des coups de chaleur et des insolations. Ils sont aussi confrontés aux modifications métaboliques opérées durant les fortes chaleurs, créant des dérèglements dans l'assimilation des médicaments chez les malades chroniques polymédicamentés.

Par ailleurs, les acteurs du domaine médico-social déplorent le fait de ne travailler sur la thématique du stress thermique que quelques mois par an (en cas de déclenchement du plan canicule) au lieu de réaliser un travail de prévention tout au long de l'année. Ils appellent entre autres, à une intensification des efforts de prévention et d'adaptation car ils sont aujourd'hui insuffisants, voire pour certains « quasi nuls ». Ils signalent par exemple, que très peu d'établissements sont climatisés dans le champ de la protection de la petite enfance.

A.8 : « Les services de santé en France anticipent bien une multiplication des pathologies causées par le stress thermique, mais pas suffisamment à mon sens. Il y a bel et bien des volontés de faire de la prévention à ce sujet, mais cela n'est pas ancré dans les pratiques. Il reste beaucoup d'acteurs à convaincre du risque et de la nécessité de le prendre en compte ».

Les épisodes de stress thermique et hydriques intenses de ces dernières années ont également mis en lumière la nécessité d'adapter certaines pratiques en matière d'aménagement. Il a été constaté que certaines essences végétales présentes à Metz ne sont plus adaptées à ce territoire en raison de leur faible résistance à la sécheresse. En fait, c'est davantage la répétition des épisodes de forte chaleur qui porte atteinte à la santé des végétaux plus que l'intensité d'un seul épisode isolé. Ainsi, certaines espèces sont actuellement en bonne santé et pourraient le rester dans le futur si les températures estivales n'excèdent pas les normales, mais si les canicules continuent à se multiplier, il se peut qu'elles ne survivent pas. L'impact sur les végétaux n'est donc pas nécessairement visible pendant ou peu de temps après la canicule, mais il est bien présent et cause la dégradation de nombreuses essences végétales à long terme.

10.3.2. Prise en compte de la problématique de la surchauffe urbaine

La prise de conscience de plus en plus forte vis-à-vis des questions environnementales à Metz se traduit par leur intégration dans les actions menées, avec souvent d'importants budgets alloués.

> **A.3 :** « Dès l'étape de la budgétisation de nos opérations, nous prenons en compte la nécessité d'adaptation de la ville, avec le concept de « ville résiliente » qui impose à notre service une adaptation constante ».

Il en résulte que de nombreuses initiatives sont menées à toutes les échelles spatiales. A l'échelle du bâtiment en premier lieu, la ville a mis en place, depuis 2019, la convention CERQUAL qui permet de certifier toutes les opérations neuves avec le label Haute Qualité Environnementale (HQE) qui comprend un volet adaptation, avec le refroidissement passif des bâtiments par la ventilation, l'occultation, ainsi que la végétalisation des toitures et des espaces. Par conséquent, tout opérateur de projet neuf doit certifier son opération avec ce label pour obtenir un permis de construire. En parallèle, toutes les infrastructures commandées par la ville (cantines, écoles, médiathèques, centres sociaux, etc.) sont systématiquement certifiées HQE.

Néanmoins, c'est vers la végétalisation de l'espace urbain que s'orientent les efforts les plus importants avec des projets tous azimuts : l'implantation de 3000 arbres par an, la création de forêts urbaines, l'établissement d'une trame verte et bleue, ainsi que la mise en place de ZAC labélisées "écoquartier" incluant la création de noues végétalisées. Dans ce domaine, des réflexions sont également en cours quant au choix des essences d'arbres et au perfectionnement des techniques d'arrosage. Les acteurs de l'aménagement nous ont fait part d'un « verdissement » de leurs pratiques et de leurs méthodes de travail, avec notamment une mise en pause de la politique de développement de l'arrosage automatique pour adopter le principe de gestion différenciée des espaces verts (différenciation de la gestion des espaces verts selon leur vocation plus ou moins horticole).

> ***Ibid.*** **:** « Le changement climatique nous oriente aujourd'hui vers des espèces d'arbres méridionales sur lesquelles nous sommes en prospective. Pour cela, nous effectuons un travail d'expérimentation afin de vérifier la bonne comptabilité de certaines essences avec notre climat ».

La réflexion porte aussi sur une évolution de la politique territoriale. La ville de Metz envisage ainsi de supprimer certaines zones de la catégorie « urbanisation future » dans le PLU afin de les laisser végétalisées (naturelles ou agricoles). Il est également envisagé d'imposer sur le domaine public des surfaces végétales suffisantes, en incluant cette obligation dans les documents d'urbanisme. L'extension de cette mesure aux parcelles privées serait également un souhait, appuyé semble-t-il par les élus locaux. Cela pourrait passer par exemple, par le fait de conditionner l'obtention d'un permis de construire au fait que les surfaces végétales prévues dans le projet respectent une surface minimale.

De leur côté, les services sociaux ne sont pas en reste puisque nos interlocuteurs font état d'efforts importants en faveur des personnes vulnérables, avec notamment le suivi des personnes en grande perte d'autonomie (recevant l'allocation personnalisée d'autonomie). Sur la base de listes recensant les personnes isolées, des prises de contacts sont effectuées lors du déclenchement du plan canicule afin d'évaluer leurs situations et s'assurer qu'ils n'encourent pas de risques. Cette liste est mise à jour chaque année par la file active des travailleurs sociaux et de la mission « information coordination ». Ainsi, lorsqu'une personne en situation problématique est détectée, elle est accompagnée dans la sollicitation d'une aide à domicile, et ses proches sont alertés.

A.4 : « Durant le plan canicule, toutes les associations d'aide à domicile sont sur le qui-vive pour protéger les personnes vulnérables des épisodes de forte chaleur ».

A Casablanca, les personnes vulnérables sont pour leur part confrontées au coût élevé de l'accès aux soins. Le médecin que nous avons interviewé a souligné l'inefficience du système de santé et les frais de santé trop élevés pour les populations à revenus modestes. Au coûts élevés, s'ajoute, pour les plus pauvres, une mauvaise qualité des soins proposés, en particulier dans les structures publiques (Belghiti-Alaoui et Hachri, 2007).

10.3.3. Difficultés rencontrées

Les personnes enquêtées nous ont fait part de différentes contraintes empêchant une pleine prise en compte des problématiques liées à la surchauffe urbaine dans les politiques publiques. En particulier, les acteurs de l'aménagement nous ont signalé de multiples contraintes d'ordre technique, avec notamment la difficulté à concilier des impératifs écologiques qui sont parfois contradictoires. Par exemple, la nécessité de préserver la biodiversité dans certaines zones impose de faire des choix pour décider des essences d'arbre à implanter pour réduire l'ICU tout en permettant la continuité de la biodiversité. Sur ce sujet, il y a une attente vis-à-vis de l'étude *SESAME*[51] qui doit également servir de guide dans le choix des essences d'arbres à planter. Une problématique plus complexe encore est celle découlant de la nécessité de limiter l'étalement urbain qui oblige à trouver des ressources foncières, avec une densification des centres urbains.

A.1 : « La problématique est aujourd'hui que l'on demande aux aménageurs de densifier le territoire, or cela est souvent incompatible avec le fait de laisser les « dents creuses » à l'état naturel comme il l'est préconisé pour lutter contre les îlots de chaleur urbains et l'imperméabilisation des sols. Nous pouvons donc aujourd'hui causer des ruptures écologiques sous couvert de densification. Il y a donc des choix politiques à faire dans ce domaine afin de pallier cette contradiction ».

[51] Services EcoSystémiques rendus par les Arbres, Modulés selon l'Essence. Il s'agit d'une étude menée par la ville et la métropole en partenariat avec le Cerema visant d'identifier les services écosystémiques rendus par les arbres en fonction de leur essence.

La densité du centre-ville est l'obstacle le plus important à la plantation d'arbres plus grands et plus âgés, plus performant en matière de services climatiques. Par ailleurs, le centre-ville est caractérisé par son patrimoine architectural historique abondant, ce qui contraint la liberté d'action des aménageurs qui souhaiteraient établir des prescriptions en termes de couleur de surface des bâtiments. D'autres quartiers récents ne sont pas propices à des opérations de végétalisation ou de déminéralisation. Le quartier de l'Amphithéâtre à Metz est un exemple emblématique souvent cité, et remarqué pour son manque d'espaces verts :

> ***Ibid.*** **:** « Le quartier de l'amphithéâtre n'est pas une grande réussite. Un projet de végétalisation a donc été commandé par le maire mais celui-ci rencontre de nombreuses difficultés, comme la densité de réseaux (électricité, gaz…) ou le fait qu'il est difficilement justifiable de retravailler une voirie encore neuve ».

Enfin, les enquêtés rappellent que le champ d'intervention des aménageurs est en fin de compte assez limité avec peu de possibilités d'actions sur les espaces privés, représentant une grande partie de l'espace urbain.

Le manque de moyens est aussi une difficulté souvent rapportée, d'autant qu'elle se retrouve également chez les acteurs du domaine médico-social. Il peut s'agir de moyens financiers mais aussi et surtout, de moyens humains. Ainsi le manque d'effectifs et les difficultés de recrutement sont problématiques compte tenu de l'ampleur du travail demandé :

> **A.3 :** « Avec notre effectif actuel, nous ne sommes aujourd'hui pas en mesure de suivre le rythme de végétalisation qui nous est demandé ».

Cette contrainte est exacerbée en matière de prise en charge des personnes vulnérables, puisque les périodes de tension interviennent en saison estivale et correspondent aux épisodes de forte chaleur avec le déclenchement des plans canicule. Or, ces périodes coïncident avec une diminution du nombre de soignants et de travailleurs sociaux notamment à cause des vacances scolaires :

> **A.9 :** « Le grand nombre d'individus à appeler chaque jour lors du déclenchement du plan canicule demande des moyens humains conséquents. Or, nous manquons de personnel pour assurer le suivi téléphonique des personnes vulnérables durant le plan canicule car cette mission s'ajoute aux activités que nous menons au quotidien et peut donc empiéter sur les autres tâches des travailleurs sociaux. ».

Enfin, les difficultés rencontrées sont parfois liées à une absence de données à une échelle suffisamment fine au sujet des problématiques climatiques qui permettraient de spatialiser le besoin de projets d'aménagement visant à réduire l'ICU. Il y a ainsi une attente exprimée vis-à-vis de la présente thèse pour combler ce déficit.

Synthèse

L'enquête auprès des acteurs locaux, destinée à compléter et à approfondir les résultats de questionnaire et de l'indice de vulnérabilité, illustre l'importance croissante de la question de la vulnérabilité des territoires face à la problématique de la surchauffe urbaine. A Metz en particulier, les acteurs interrogés se sont engagés dans une démarche de prévention et d'adaptation multithématique avec une réelle volonté de renforcer la qualité de vie et la santé des habitants, tout autant que la durabilité et l'attractivité de leur territoire. Les stratégies déployées souffrent cependant d'un cloisonnement sectoriel et organisationnel avec une multiplicité des intervenants au sein d'un millefeuille territorial complexe et des différents services à l'intérieur de chaque organisation. Le constat est moins vrai à Casablanca, dont la gouvernance se montre moins volontariste. Même si les acteurs locaux perçoivent les signes concrets du réchauffement climatique, ils se montrent encore peu inquiets d'une recrudescence des risques liés à la chaleur.

En mettant ces résultats en parallèle avec ceux issus de l'enquête auprès des habitants, plusieurs points sont mis en évidence. D'une part, le niveau d'investissement élevé de la part des acteurs locaux messins sur les problématiques environnementales est à la mesure de la place occupée par les préoccupations écologiques dans la conscience individuelle et collective chez la population locale. Nous avions en effet relevé que la question du réchauffement climatique arrivait en bonne place parmi les thématiques préoccupant les répondants messins. Ce sujet était même cité deux fois plus souvent à Metz qu'à Casablanca (***cf.* 9.2.3.1**). Par ailleurs, les difficultés rapportées par les personnes interrogées au cours de nos entretiens, que ce soit en termes de manque de moyens qu'ils soient financiers, humains ou techniques, pourraient expliquer, au moins en partie, le manque de confiance que nous avions relevé de la part de la population messine vis-à-vis des pouvoirs publics. Un seul répondant sur dix à notre enquête estimait en effet, que les autorités publiques luttent de manière suffisante contre les risques liés à la chaleur intense (***cf.* 9.2.3.8**).

Il serait cependant présomptueux de vouloir ici proposer, à partir de 11 entretiens seulement, une évaluation de la réponse des acteurs locaux, pas plus qu'un diagnostic précis de l'efficacité des stratégies d'adaptation des territoires face aux risques socio-environnementaux induits par la chaleur. Effectivement, plusieurs lacunes peuvent être relevées, au premier rang desquelles, le nombre insuffisant d'acteurs interrogés en particulier à Casablanca. Ce déficit est principalement dû à la crise sanitaire provoquée par la pandémie de COVID-19 qui a considérablement entravé la prise de contact avec les acteurs ciblés. De surcroît, la fermeture des frontières durant plus d'une année nous a empêchés de nous rendre sur le terrain au Maroc. Par ailleurs, ce travail est rendu plus difficile par le fait que les autorités locales au Maroc sont souvent peu disposées à communiquer sur leur action ou à transmettre des données. Ce manque de transparence a d'ailleurs déjà été relevé par le rapport de l'OCDE (2018). Enfin, il aurait été souhaitable d'interroger des intervenants de natures plus diverses, notamment des professionnels directement au contact des usagers tels que les pompiers ou les infirmières libérales.

PARTIE III - CONCLUSION

Après avoir exploré la dimension physique de la surchauffe urbaine dans les parties 1 et 2, cette troisième partie de la thèse a porté sur la vulnérabilité à la chaleur telle que ressentie et vécue par les habitants des deux villes étudiées. Nous avons pu identifier les profils et les caractéristiques des groupes les plus vulnérables et les schémas spatiaux de la vulnérabilité à la chaleur. L'accent a été mis sur les connaissances actuelles concernant les changements sociaux, les vulnérabilités, les adaptations et les leçons tirées des événements de vagues de chaleur précédents. Cependant, en raison du changement climatique actuel et anticipé, des conditions socio-économiques évolutives et des nouvelles options d'adaptation pouvant émerger, ces connaissances doivent constamment être actualisées. De surcroît, le processus d'adaptation du milieu urbain et les mesures d'atténuation de la chaleur intense, qui renvoient aux ajustements destinés à faire face aux facteurs de stress thermique, sont nécessairement itératifs.

L'approche méthodologique que nous avons suivie, consistant en l'intégration de données quantitatives et qualitatives pour l'évaluation de vulnérabilité et la capacité d'adaptation grâce à des méthodes de recherche à la fois géospatiales, statistiques et de sciences sociales (enquête de terrain) semble adéquate pour appréhender un sujet d'une telle complexité. Elle peut également être utilisée pour mieux étudier la vulnérabilité à la chaleur dans d'autres contextes urbains.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans cette thèse avait pour objectif l'amélioration de la connaissance des risques liés aux fortes chaleurs en étudiant la manière dont les îlots de chaleur se déploient sur la scène urbaine et interagissent avec les conditions environnementales et la distribution spatiale des populations vulnérables aux risques liés à la chaleur. Une étude multi-échelle a été conduite dans les deux agglomérations géo-climatiquement constatées de Metz et de Casablanca selon une approche transversale s'appuyant sur les méthodes des sciences environnementales et des sciences sociales. Ce faisant, nous avions à cœur d'associer l'approche scientifique et les intérêts/acteurs du territoire afin que les données et connaissances acquises puissent ensuite être mises à profit comme aide à la décision pour prioriser leurs mesures de lutte contre l'inconfort thermique d'été.

Cet objectif a été traité selon deux axes : le premier portait sur l'élaboration d'un diagnostic climatologique des îlots de chaleur de surface et de la canopée urbaine à l'aide d'une approche multicritère et multi-échelle au moyen de plusieurs méthodes d'observation complémentaires. Les données expérimentales récoltées ont ensuite fait l'objet d'une analyse géostatistique et ont été valorisées pour mettre en évidence la distribution des champs thermiques et la variabilité des températures au sein de la ville à trois échelles spatiales. Le second axe consistait en la réalisation d'une étude de la vulnérabilité en vue d'identifier, à une échelle spatiale fine, les populations résidentielles vulnérables aux risques liés à la chaleur et évaluer leur ressenti thermique et leurs stratégies d'adaptation.

Axe 1 : diagnostic climatique et analyse géophysique de la surchauffe urbaine

Dans un premier temps, nous avons réalisé une étude diachronique des ICUs par situation radiative de saison chaude à l'échelle de l'agglomération sur la base des produits issus de la télédétection satellitaire. Pour cela, nous avons procédé à une analyse spatio-temporelle des températures de surface pour caractériser leur variabilité en fonction des typologies d'occupation du sol et des formes urbaines dans les deux villes étudiées au moyen de thermographies *Landsat* et *ECOSTRESS*. Nous avons alors pu mettre en évidence la formation, dans les deux villes étudiées, d'un ICUs qui atteint son intensité maximale en début de nuit. Ce phénomène est caractérisé par des écarts de températures équivalents entre les points les plus chauds des deux aires urbaines et leurs points les plus frais (ΔT entre +11 °C à l'EMM et +13°C dans GC), avec de très nets contrastes thermiques entre les différentes typologies d'occupation du sol. Les Ts élevées se retrouvent préférentiellement dans les espaces densément bâtis des centres-villes, des ZAE périphériques, mais aussi au niveau des surfaces en eau. Leur intensité baisse dès que l'habitat devient moins dense et que la végétation se fait plus présente.

En milieu de journée, les deux aires urbaines sont constituées d'une mosaïque de microclimats, avec cependant des différences marquées entre elles. Si sur le territoire de l'EMM, les clusters chauds se concentrent au niveau des espaces les plus urbanisés, dans le GC à l'inverse, l'arrière-pays rural est généralement plus chaud que le centre-ville qui présente alors un ensemble d'îlots de fraîcheur de surface (IFUs). Cette opposition entre les deux territoires s'explique par les différences en termes de climat et de type de couvert végétal : la végétation courte entourant la ville dans la région semi-aride de Casablanca est aussi sèche et chaude que la ville elle-même, le rayonnement solaire incident est donc peu intercepté et les sols se comportent comme des surfaces minérales. La majeure partie de l'énergie solaire incidente se transforme alors en chaleur sensible à peu près de la même manière que dans les espaces urbanisés. Au même moment, la brise marine rafraîchit la conurbation littorale et les immeubles de grande hauteur du centre-ville projettent des ombres importantes, contribuant à maintenir la fraîcheur jusqu'en fin de matinée. Sur le plan interannuel, nous avons relevé une tendance commune à l'extension des zones chaudes et à l'intensification des Ts corrélée à la croissance urbaine des deux agglomérations qui ont vu apparaître en leur périphérie, de nouveaux pôles urbains et des zones d'activités au cours de la période d'étude. Cela démontre la relation étroite liant la distribution spatio-temporelle des Ts et l'artificialisation des sols.

Par ailleurs, nous avons évalué l'impact des opérations d'aménagement récentes sur la distribution des Ts et, par extension, sur les ambiances climatiques micro-locales à l'aide des données *Landsat*, mais aussi en utilisant une caméra IRT *low cost* embarquée sur un drone, avec laquelle nous avons pu acquérir plusieurs thermographies aéroportées de bonne qualité. À des fins d'analyse inter-dates et inter-sites, nous avons développé un protocole pour les corriger radiométriquement par régression linéaire sur la base des données thermiques collectées sur le terrain à partir de trois cibles stables (une cible froide, une cible chaude, une cible intermédiaire). Nous avons alors constaté que les rénovations urbaines ont un impact sur la distribution des Ts puisque les changements dans la géométrie urbaine et les propriétés de surface modifient le bilan énergétique de surface. De plus, l'utilisation de nouveaux matériaux de construction, modifie l'albédo et les propriétés thermiques à la surface urbaine, ce qui affecte le rayonnement net et les échanges de conduction thermique au sol, avec un effet palpable sur l'intensité et la distribution des Ts. De plus, les opérations de réaménagement peuvent, dans certains cas, modifier la hauteur et la densité des bâtiments, ce qui influence le facteur de vue du ciel.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons également procédé au déploiement d'un réseau de 28 stations météorologiques dans le territoire de l'EMM (réseau REMTHAM) assurant un suivi continu des températures de l'air au niveau de la canopée urbaine afin de diagnostiquer l'ICU local et d'analyser sa variabilité spatio-temporelle. Les données relevées au cours des étés 2019 et 2020 ont mis en évidence un excédent thermique nocturne de l'ordre de +3,7 °C en moyenne sur le territoire de l'Eurométropole de Metz en été, atteignant un maximum de +7,6 °C. L'ICU messin peut être considéré comme un phénomène typiquement estival, observé préférentiellement les nuits calmes succédant à des journées radiatives. Il est aussi plus intense en période de canicule.

En outre, en dépit d'un échantillonnage de données assez limité, nous avons pu établir, au moyen d'une analyse par régression linéaire multicritère, des relations statistiquement robustes entre les ΔTa calculés à partir de données de température et des descripteurs physiques de l'environnement des stations à l'échelle de l'agglomération messine. Celles-ci sont principalement liées aux caractéristiques de l'environnement bâti à l'échelle locale (la densité du bâti et la présence de surfaces imperméables). Dans tous les cas testés, la régression sur des sous-ensembles de sondes permet d'expliquer plus de 75 % de la variabilité spatiale des ΔTa, avec des niveaux d'erreur en validation fractionnée conformes à l'état de l'art. Les cartes produites présentes toutes une même structure de l'ICU messin : c'est en cœur de ville et au niveau de l'armature urbaine (petites villes périphériques) qu'il est le plus sensible. Nous avons également constaté que les zones d'activités et les surfaces en eau restent chaudes en début de nuit. Ces résultats corroborent la distribution des Ts observées à l'aide de l'imagerie satellitaire.

Enfin, pour approfondir notre diagnostic de l'ICU messin et combler le déficit de données sur notre terrain casablancais -qui ne dispose pas d'un réseau de capteurs fixes-, nous avons mené des campagnes de mesures itinérantes le long de transects urbains prédéterminés. L'analyse des relevés effectués a fourni un aperçu en haute résolution de la distribution spatiale des Ta et a mis en évidence l'impact des typologies rencontrées à l'échelle intra-urbaine sur l'ICU. Nous avons pu constater que si l'ambiance thermique dans un point particulier de l'espace urbain est directement influencée par son environnement immédiat (type d'aménagement qui s'y trouve, présence ou non de surfaces végétales), elle est également influencée par sa situation relative au sein de l'aire urbaine. La confrontation de nos mesures aux zones climatiques locales définies sur la base de la classification LCZ montrent que celles-ci expliquent la majeure partie de la variabilité intra-urbaine de la température nocturne. En revanche, nous avons constaté que la distribution des Ta est également influencée par le positionnement géographique des classes LCZ. Cela s'explique par la circulation des brises en ville qui peut conduire à ce que des LCZ fraîches reçoivent de l'air chaud par effet d'advection depuis des LCZ plus chaudes à proximité. Elles auront alors tendance à présenter des Ta plus élevées que les autres LCZ du même type qui sont situées dans une autre partie de l'agglomération. L'amplitude des fluctuations intra-LCZ est ainsi amplifiée par l'ambiance thermique générale rencontrée à l'échelle locale. Des mesures complémentaires et une modélisation de la circulation des brises et du vent en ville seraient cependant nécessaires pour caractériser les interactions entre les différentes classes LCZ et mesurer l'effet d'advection thermique.

Axe 2 : Evaluation du ressenti thermique et de la vulnérabilité aux risques liés à la chaleur

Dans un second temps, après avoir établi le cadre conceptuel de la vulnérabilité, nous avons récolté des données à échelle fine (IRIS) pour constituer un panel de variables que nous avons classées selon les facteurs définissant cette notion. À ces données, nous avons intégré les résultats de notre diagnostic de l'ICU messin, puis nous leur avons appliqué une analyse statistique multivariée pour produire un indice de la vulnérabilité aux risques liés à la chaleur dans le territoire de l'EMM. La spatialisation de cet indice a abouti à une carte mettant en

évidence les zones sur lesquelles il faudrait porter une attention particulière en matière de sensibilisation et de prévention des risques liés à la chaleur. Il s'agit en particulier, des espaces à forte vulnérabilité concentrés au niveau du cœur de l'agglomération, des quartiers défavorisés à l'est et au nord, ainsi que dans certaines zones résidentielles en périphérie se distinguant par leur densité élevée et une proportion importante de résidents âgés. Cette étude de vulnérabilité n'a malheureusement pas pu être répliquée sur le territoire du GC en raison de l'épidémie de Covid-19 qui a considérablement ralenti nos travaux sur ce terrain extra-communautaire.

Le premier volet de l'enquête de terrain, menée par questionnaire, a montré des résultats intéressants permettant de caractériser le ressenti des habitants et les comportements adoptés durant les périodes de forte chaleur, et dessiner des cartes des espaces vus comme les plus frais et les plus chauds de chaque ville. En dépit des biais évidents liés à la surreprésentation de certaines tranches d'âge et de catégories socio-professionnelles, les répondants au questionnaire nous ont renseignés sur le profil des personnes s'estimant vulnérables dans nos échantillons, et sur les facteurs qui les rendent vulnérables. Il s'agit le plus souvent d'individus répondant aux critères classiques de la vulnérabilité : état de santé fragile, logement insalubre, personnes isolées, travailleurs extérieurs, etc. En revanche, en termes de tranches d'âge, nous avons constaté que la sensation de vulnérabilité ne se limitait pas aux personnes âgées puisque les groupes de personnes âgées de 25 à 65 ans ont représenté la majorité des personnes s'étant estimées vulnérables à la chaleur. Cela peut s'expliquer par le fait que, si les personnes âgées sont la catégorie la plus fragile, elles bénéficient de meilleures conditions de vie, avec une plus faible exposition au stress thermique dans leur environnement domestique.

Comparativement, les habitants des deux terrains d'étude montrent des similitudes et différences de comportement. Par exemple, nous avons constaté qu'indépendamment de leurs connaissances au sujet de l'ICU, les enquêtés ont généralement conscience des lieux les plus frais de leur territoire, et ont tendance à se rendre spontanément dans les espaces végétalisés et à proximité des points d'eau pour se rafraîchir. Pour cela, ils exploitent les « atouts fraîcheurs » de leur territoire : à Casablanca, la situation côtière fait que les plages sont privilégiées en cas de vague de chaleur, tandis que dans le territoire messin, ce sont plutôt les zones boisées qui sont prisées par les habitants. De même, les Messins apparaissent comme étant généralement plus sensibles aux températures élevées, surtout la nuit, et ont plus souvent recours à la climatisation pour s'en protéger. A l'inverse, les Casablancais tolèrent mieux la chaleur car s'estimant habitués. Enfin, il nous a paru intéressant de relever que la prise de conscience vis-à-vis du réchauffement climatique est nettement plus importante en France par rapport à celle que l'on perçoit au Maroc.

Le second volet de l'enquête visait à compléter et à approfondir les résultats du questionnaire, en interrogeant les acteurs locaux de l'aménagement et de la gestion des risques au moyen d'entretiens semi-directifs. Cependant, avec seulement 11 personnes interviewées, ce travail n'a pas été fructueux, là encore, en grande partie à cause du contexte sanitaire et de la fermeture des frontières nous empêchant de nous rendre à Casablanca. L'analyse du corpus d'entretiens nous a néanmoins permis de relever qu'au sein de l'EMM, les acteurs interrogés se sont engagés dans une démarche de prévention et d'adaptation multithématique avec une

réelle volonté de renforcer la qualité de vie et la santé des habitants, tout autant que la durabilité et l'attractivité de leur territoire. Les stratégies déployées souffrent cependant d'un cloisonnement sectoriel et organisationnel avec une multiplicité des intervenants au sein d'un millefeuille territorial complexe et des différents services à l'intérieur de chaque organisation. A Casablanca en revanche, la gouvernance locale s'est montrée moins volontariste, puisque bien qu'elle perçoive les signes concrets du réchauffement climatique, elle se montre encore peu inquiète d'une recrudescence des risques liés à la chaleur. Le niveau d'investissement de la part des acteurs locaux sur les problématiques environnementales est ainsi à la mesure de la place occupée par les préoccupations écologiques dans la conscience individuelle et collective chez la population locale. Nous avions en effet relevé que la question du réchauffement climatique arrivait en bonne place parmi les thématiques préoccupant les répondants messins. Ce sujet était même cité deux fois plus souvent à Metz qu'à Casablanca.

Retour d'expérience sur l'approche comparative

L'apport le plus sensible de la démarche comparative que nous avons menée, et dont témoignent également de nombreuses thèses de géographie, aura été tout d'abord l'étonnement que produit un retour sur le terrain après avoir séjourné, même brièvement, sur le second. Naviguer entre Metz et Casablanca a fait surgir des réflexions et des interrogations qui ne nous seraient pas apparues spontanément. Par exemple, alors que nous voulions au départ étudier l'ICU de surface, nous nous sommes rendu compte, qu'il n'y avait pas qu'un seul îlot de chaleur urbain de surface ; que parfois même, l'îlot de chaleur en question n'était pas du tout « urbain », mais plutôt « rural ». A Casablanca, nous avons relevé qu'en journée, le centre-ville était plus frais que son environnement, ce qui nous a poussé à investiguer plus en profondeur le phénomène, et à nous interroger sur le rôle de la brise marine.

En revanche, en dépit des avantages indéniables découlant de la mise en perspective de deux terrains d'étude, des limites non-négligeables existent. La première d'entre elles découle du fait que, choisir de comparer deux territoires différents, c'est dans une certaine mesure, chercher à maîtriser deux contextes culturels, politiques et sociaux différents et multiplier les éléments bibliographiques. C'est également développer des réseaux de connaissances dans deux espaces différents. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi, compte tenu de notre connaissance préalable et de notre ancrage territorial dans le territoire messin, de considérer l'EMM comme notre terrain-pivot tandis que le territoire casablancais servirait de terrain-miroir.

Une autre limite de cette approche réside dans la difficulté à appliquer concrètement, une méthodologie strictement identique aux deux terrains. Même si le cadre méthodologique était le même – même protocole de mesures itinérantes, même questionnaire pour l'enquête auprès des habitants entre autres – nous n'étions pas toujours en mesure de faire exactement des choses semblables à Metz et à Casablanca. Il a fallu adapter les méthodes aux « aspérités » du terrain. Certaines méthodologies avaient déjà été développées pour le territoire messin, mais pas pour Casablanca. C'est le cas par exemple, pour le réseau d'observation météorologique qui n'a pas pu être déployé à Casablanca principalement en raison de contraintes budgétaires substantielles et de la nécessité d'une présence continue sur place pour maintenir un réseau de stations météorologiques fonctionnel.

L'autre difficulté rencontrée, sans doute la plus sérieuse, est celle de l'indisponibilité ou de la difficulté d'accéder à certaines données dans le territoire-miroir. Ce fut par exemple le cas pour les données météorologiques de Casablanca comme expliqué dans le chapitre 3. En effet, si Météo-France propose les données concernant le climat de Metz en libre accès, la Direction Générale de la Météorologie du Maroc ne publie pas de fiches climatologiques. Nous avons alors dû recouper différentes sources documentaires pour collecter des données climatiques pour la ville de Casablanca en vue de décrire et qualifier son climat. Ce problème s'est également posé pour la BD TOPO® et surtout, pour les données statistiques caractérisant les profils socio-démographiques et socio-économiques de la population, ce qui nous a empêchés de développer l'indice de vulnérabilité pour le Grand Casablanca. A cela, il faut ajouter le fait que les acteurs interrogés dans notre enquête par entretiens étaient difficiles à approcher, et souvent peu disposés à coopérer ou à communiquer sur leurs actions, ce qui a compliqué la tâche pour établir un dialogue de confiance.

Enfin, pour pouvoir réaliser une étude sur deux ou plusieurs territoires, encore faut-il pouvoir facilement faire des va-et-vient entre eux. Or, cela n'est pas possible en cas de fermeture des frontières, comme ce fut le cas pendant la pandémie de COVID-19. Nous n'avions alors pas pu nous rendre sur le terrain casablancais, ce qui a entraîné du retard dans les travaux et nous a obligés à prolonger la thèse. A cause de cela, les séjours de recherche à Casablanca ont été plus ponctuels, plus concentrés, mais plus efficaces aussi. Mener une étude comparative entre deux terrains semble difficile à mener de front, du moins dans le temps imparti à la réalisation d'une thèse de doctorat.

En dépit des difficultés rencontrées, au cours de ces années de recherche, il nous est devenu évident que l'approche comparative a constitué une valeur ajoutée extrêmement intéressante à cette thèse, et a permis la réalisation d'un travail de terrain beaucoup plus approfondi que si l'on ne s'était intéressé qu'à un seul terrain.

Apport de la thèse dans la planification urbaine

Le travail mené dans le cadre de cette thèse a permis de produire de données et de cartes climatiques inédites, servant à documenter les variations de températures locales. Celles-ci ont permis aux élus, citoyens et agents des services techniques de s'approprier le défi climatique lors des opérations de pose de capteurs par exemple, ou des présentations en collectivité des résultats de l'exploitation des données recueillies (Drogue *et al.*, 2023). Les différentes cartes produites dans le cadre de cette thèse ont également été mobilisées lors de la co-construction en 2021 du diagnostic de vulnérabilité intégrée au 2e PCAET piloté par l'AGURAM intervenant comme assistant à la maîtrise d'ouvrage pour le compte de la Métropole (AGURAM, 2022). Enfin, les thermographies aéroportées par drone ont été très utiles pour discuter localement l'impact des bonnes ou de mauvaises pratiques d'adaptation fondées sur des projets d'aménagement.

Perspectives

A partir des axes de recherche développés dans cette thèse et des résultats obtenus, plusieurs perspectives apparaissent pour alimenter nos recherches :

- Le suivi des opérations de rénovation urbaine au moyen de la télédétection aéroportée par drone entamé ici doit être poursuivi. D'autres missions doivent être planifiées ultérieurement afin de quantifier l'effet rafraîchissant de la végétation qui vient d'être plantée -notamment au sein du parking de la route de Thionville-, une fois que celle-ci aura atteint sa pleine maturité. Ce faisant, des possibilités s'ouvrent pour le perfectionnement du protocole de correction radiométrique grâce à la collaboration avec le Cerema. Un protocole de conversion des comptes numériques des images IRT en données de températures au moyen d'une méthode par régression non-linéaire est d'ailleurs en cours de développement en se basant sur les paramètres d'étalonnage de la caméra radiométrique de référence (appartenant au Cerema). Un autre étalonnage est aussi envisagé pour différentes valeurs d'émissivité. Cela permettrait d'évaluer les résultats présentés ici et d'avoir une estimation de la marge d'erreur.

- L'indice de vulnérabilité aux risques liés à la chaleur que nous avons développé peut facilement être amélioré en intégrant les données que nous n'avons pas pu obtenir. Il s'agit en premier lieu des informations relatives aux antécédents médicaux (notamment les maladies cardiovasculaires, respiratoires, le diabète ou l'obésité), et à la qualité des logements. Une autre perspective serait de couvrir le terrain casablancais à condition d'obtenir les données à une échelle spatiale suffisamment fine.

- D'autres pistes concernent le réseau REMTHAM : outre la nécessité de densifier le réseau pour assurer une meilleure couverture spatiale de l'EMM et corriger les erreurs liées à la topographie dans la spatialisation de l'ICU, il serait intéressant d'intégrer d'autres paramètres météorologiques tels que les données anémométriques et les Ts issues des images ECOSTRESS. La poursuite des travaux de recherche déjà entamés avec le concours des stagiaires encadrés au cours de la thèse est également en perspective. Ces travaux portent en particulier, sur l'effet rafraîchissant de l'eau et de la végétation (Boumaiza, 2021), ainsi que sur le développement d'un indice de confort thermique (Amath,2021) en exploitant les données relatives à l'humidité issues du réseau REMTHAM.

- La spatialisation de l'ICU réalisée à l'aide d'une régression linéaire multiple est limitée vu qu'elle n'intègre pas suffisamment de données relatives à la structure tridimensionnelle de la ville et aux espaces végétalisés. En effet, le SVF a été extrait à partir des données satellitaires et de la BD TOPO® qui n'est pas assez précise. Il serait alors intéressant d'intégrer des données de volumétrie en utilisant l'imagerie LiDAR-HD pour reconstituer la morphologie urbaine et la hauteur de la végétation.

Bibliographie

ABER J., **MARZOLFF** M., **JOHANNES** R., **SUSAN** A., 2019, *Small Format Aerial Photography and UAS Imagery: Principles, Techniques and Geoscience Applications*, Second Edition, Elsevier, 382 p.

ACHILLE C., **ADAMI** A., **CHIARINI** S., **CREMONESI** S., **FASSI** F., **FREGONESE** L., **TAFFURELLI** L., 2015, « UAV-Based Photogrammetry and Integrated Technologies for Architectural Applications—Methodological Strategies for the After-Quake Survey of Vertical Structures in Mantua (Italy) », *Sensors*, 15(7), p. 15520-15539. doi:10.3390/s150715520

ACKERMAN B., 1985, « Temporal March of the Chicago Heat Island », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 24(6), p. 547-554. doi:10.1175/1520-0450(1985)024<0547:TMOTCH>2.0.CO;2

ADGER W. N., 2006, « Vulnerability », *Global Environmental Change*, 16(3), p. 268-281. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006

AGUILAR E., **AUER** I., **BRUNET** M., **PETERSON** T. C., **WIERINGA** J., 2003, « Guidelines on Climate Metadata and Homogenization », 1186 (WCDMP2), World Meteorological Organization, Geneva.

AGURAM, 2017, *Densités & Formes Urbaines Résidentielles sur le Territoire du SCoTAM*, Metz, France, AGURAM, 80 p.

AGURAM, 2020a, *HABITAT & DÉMOGRAPHIE*, Metz, France, AGURAM, 84 p.

AGURAM, 2020b, *MORPHOLOGIE URBAINE & PATRIMOINE*, Metz, France, AGURAM, 92 p.

AGURAM, 2022, *Vulnérabilité du territoire au changement climatique*, Metz, AGURAM, 12 p.

ALEXANDER P. J., **BECHTEL** B., **CHOW** W. T. L., **FEALY** R., **MILLS** G., 2016, « Linking urban climate classification with an urban energy and water budget model: Multi-site and multi-seasonal evaluation », *Urban Climate*, 17, p. 196-215. doi:10.1016/j.uclim.2016.08.003

ALEXANDER P. J., **MILLS** G., 2014, « Local Climate Classification and Dublin's Urban Heat Island », *Atmosphere*, 5(4), p. 755-774. doi:10.3390/atmos5040755

ALI-TOUDERT F., **MAYER** H., 2006, « Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate », *Building and Environment*, 41(2), p. 94-108. doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.013

ALI-TOUDERT F., **MAYER** H., 2007, « Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons », *Solar Energy*, 81, p. 742-754. doi:10.1016/j.solener.2006.10.007

ALLEN K., 2003, « Vulnerability reduction and the community-based approach: a Philippines study », *in Natural Disaster and Development in a Globalizing World*, 1st Edition, Routledge, p. 15.

ALLOUHI A., **ZAMZOUM** O., **ISLAM** M. R., **SAIDUR** R., **KOUSKSOU** T., **JAMIL** A., **DEROUICH** A., 2017, « Evaluation of wind energy potential in Morocco's coastal regions », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, p. 311-324. doi:10.1016/j.rser.2017.01.047

ALONSO L., 2021, « *Intérêt de la modélisation de la température de l'air associé à la nécessité de la caractérisation des vulnérabilités territoriales pour une compréhension systémique du risque aux fortes chaleurs en milieu urbain sur Lyon et Tokyo* », Thèse de doctorat, Université Jean Moulin Lyon, Lyon, France, 383 p.

ALONSO L., **RENARD** F., 2020, « A Comparative Study of the Physiological and Socio-Economic Vulnerabilities to Heat Waves of the Population of the Metropolis of Lyon (France) in a Climate Change Context », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), p. 1004. doi:10.3390/ijerph17031004

ALONSO M., **LABAJO** J., **FIDALGO** M., 2003, « Characteristics of the urban heat island in the city of Salamanca, Spain », *Atmósfera*, 16.

ALTENA B., **KÄÄB** A., 2017, « Elevation Change and Improved Velocity Retrieval Using Orthorectified Optical Satellite Data from Different Orbits », *Remote Sensing*, 9(3), p. 300. doi:10.3390/rs9030300

AMATH K., 2021, « *Cartographie de données de température et d'humidité de l'air à partir de mesures fixes : application au territoire de Metz Métropole* », Rapport de stage, master 2 STPE parcours ERGA, Université de Lorraine, Metz, 52 p.

AMINIPOURI M., **KNUDBY** A., **HO** H. C., 2016, « Using multiple disparate data sources to map heat vulnerability: Vancouver case study », *Canadian Geographies / Géographies canadiennes*, 60(3), p. 356-368. doi:10.1111/cag.12282

AMORIM M. C. de C. T., **DUBREUIL** V., **CARDOSO** R. D. S., 2015, « MODELAGEM ESPACIAL DA ILHA DE CALOR URBANA EM PRESIDENTE PRUDENTE (SP) – BRASIL », *Revista Brasileira de Climatologia*, 16. doi:10.5380/abclima.v16i0.40585

ANGIGNARD M., **GREIVING** S., **BAILLY** B., **MANON** D., **GLON** M., 2013, *Indicateurs de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique : recueil de littérature internationale*, ADEME, Ademe, 63 p.

APUR, 2012, *Les îlots de chaleur urbains à Paris – Cahier n°1*, Paris, France, Atelier parisien d'urbanisme, 35 p.

ARAGON B., **JOHANSEN** K., **PARKES** S., **MALBETEAU** Y., **AL-MASHHARAWI** S., **AL-AMOUDI** T., **ANDRADE** C. F., **TURNER** D., **LUCIEER** A., **MCCABE** M. F., 2020, « A Calibration Procedure for Field and UAV-Based Uncooled Thermal Infrared Instruments », *Sensors*, 20(11), p. 3316. doi:10.3390/s20113316

ARCHIBALD D., 1884, *An Account of Some Preliminary Experiments With Biram's Anemometers Attached to Kite Strings or Wires*, Cosmo Books (Shropshire., United Kingdom), 66-68 p.

ARIFWIDODO S. D., **TANAKA** T., 2015, « The Characteristics of Urban Heat Island in Bangkok, Thailand », *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, p. 423-428. doi:10.1016/j.sbspro.2015.06.484

ARNFIELD A. J., 2003, « Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island », *International Journal of Climatology*, 23(1), p. 1-26. doi:10.1002/joc.859

AUGER N., **TOM** K., 2002, *Chaleur accablante Mise à jour de la littérature concernant les impacts de santé publique et proposition de mesures d'adaptation*, Montréal, Québec, Direction de la santé publique, 34 p.

AUTHIE F., 2020, *Acquisition par drone et le récolement en VRD*, Rapport de fin d'étude, Le mans, France, École Supérieure d'ingénieurs Géomètres et Topographes, 77 p.

AWRANGJEB M., **ZHANG** C., **FRASER** C. S., 2013, « Automatic extraction of building roofs using LIDAR data and multispectral imagery », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83, p. 1-18. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.05.006

AZHAR G., **SAHA** S., **GANGULY** P., **MAVALANKAR** D., **MADRIGANO** J., 2017, « Heat Wave Vulnerability Mapping for India », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(4), p. 357. doi:10.3390/ijerph14040357

AZORIN-MOLINA C., **CHEN** D., **TIJM** S., **BALDI** M., 2011, « A multi-year study of sea breezes in a Mediterranean coastal site: Alicante (Spain) », *International Journal of Climatology*, 31(3), p. 468-486. doi:10.1002/joc.2064

BABAOUSMAIL H., **HOU** R., **AYUGI** B., **SIAN** K. T. C. L. K., **OJARA** M., **MUMO** R., **CHEHBOUNI** A., **ONGOMA** V., 2022, « Future changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean and Sahara regions using bias-corrected CMIP6 models », *International Journal of Climatology*, n/a(n/a). doi:10.1002/joc.7644

BAHI H., **RHINANE** H., **BENSALMIA** A., **FEHRENBACH** U., **SCHERER** D., 2016, « Effects of Urbanization and Seasonal Cycle on the Surface Urban Heat Island Patterns in the Coastal Growing Cities: A Case Study of Casablanca, Morocco », *Remote Sensing*, 8(10), p. 829. doi:10.3390/rs8100829

BAO J., **LI** X., **YU** C., 2015, « The Construction and Validation of the Heat Vulnerability Index, a Review », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(7), p. 7220-7234. doi:10.3390/ijerph120707220

BARBER B. R., 2017, *Cool Cities: Urban Sovereignty and the Fix for Global Warming*, Yale University Press, 224 p.

BARLOW J. F., 2014, « Progress in observing and modelling the urban boundary layer », *Urban Climate*, 10, p. 216-240. doi:10.1016/j.uclim.2014.03.011

BARSI J. A., **BARKER** J. L., **SCHOTT** J. R., 2003, « An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a single thermal band earth-sensing instrument », *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)*, 5, p. 3014-3016 vol.5. doi:10.1109/IGARSS.2003.1294665

BARSI J. A., **SCHOTT** J. R., **PALLUCONI** F. D., **HOOK** S. J., 2005, « Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments », *Earth Observing Systems X*, 5882, p. 58820E. doi:10.1117/12.619990

BASARA J. B., **BASARA** H. G., **ILLSTON** B. G., **CRAWFORD** K. C., 2010, « The Impact of the Urban Heat Island during an Intense Heat Wave in Oklahoma City », *Advances in Meteorology*, 2010, p. e230365. doi:10.1155/2010/230365

BASARA J. B., **ILLSTON** B. G., **FIEBRICH** C. A., **BROWDER** P. D., **MORGAN** C. R., **MCCOMBS** A., **BOSTIC** J. P., **MCPHERSON** R. A., **SCHROEDER** A. J., **CRAWFORD** K. C., 2011, « The Oklahoma City Micronet », *Meteorological Applications*, 18(3), p. 252-261. doi:10.1002/met.189

BASSETT R., **CAI** X., **CHAPMAN** L., **HEAVISIDE** C., **THORNES** J. E., **MULLER** C. L., **YOUNG** D. T., **WARREN** E. L., 2016, « Observations of urban heat island advection from a high-density monitoring network », *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(699), p. 2434-2441. doi:10.1002/qj.2836

BASU R., **SAMET** J. M., 2002, « Relation between Elevated Ambient Temperature and Mortality: A Review of the Epidemiologic Evidence », *Epidemiologic Reviews*, 24(2), p. 190-202. doi:10.1093/epirev/mxf007

BATUT A., 1890, *La photographie aérienne par cerf-volant / par Arthur Batut*, Hachette Bnf, 80 p.

BAYOMI N., **FERNANDEZ** J. E., 2023, « Quantification of heat vulnerability using system dynamics », *Frontiers in Built Environment*, 9.

BEAUFFORT G. de, 1995, *Aerial Photographs Taken from a Kite: Yesterday and Today*, KAPWA-Foundation Pub., 142 p.

BECERRA S., 2012, « Vulnérabilité, risques et environnement : l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Volume 12 Numéro 1. doi:10.4000/vertigo.11988

BECHTEL B., **ALEXANDER** P. J., **BECK** C., **BÖHNER** J., **BROUSSE** O., **CHING** J., **DEMUZERE** M., **FONTE** C., **GÁL** T., **HIDALGO** J., **HOFFMANN** P., **MIDDEL** A., **MILLS** G., **REN** C., **SEE** L., **SISMANIDIS** P., **VERDONCK** M.-L., **XU** G., **XU** Y., 2019, « Generating WUDAPT Level 0 data – Current status of production and evaluation », *Urban Climate*, 27, p. 24-45. doi:10.1016/j.uclim.2018.10.001

BECHTEL B., **ALEXANDER** P. J., **BÖHNER** J., **CHING** J., **CONRAD** O., **FEDDEMA** J., **MILLS** G., **SEE** L., **STEWART** I., 2015, « Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities », *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), p. 199-219. doi:10.3390/ijgi4010199

BECHTEL B., **DANEKE** C., 2012, « Classification of Local Climate Zones Based on Multiple Earth Observation Data », *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4), p. 1191-1202. doi:10.1109/JSTARS.2012.2189873

BECK C., **STRAUB** A., **BREITNER** S., **CYRYS** J., **PHILIPP** A., **RATHMANN** J., **SCHNEIDER** A., **WOLF** K., **JACOBEIT** J., 2018, « Air temperature characteristics of local climate zones in the Augsburg urban area (Bavaria, southern Germany) under varying synoptic conditions », *Urban Climate*, 25, p. 152-166. doi:10.1016/j.uclim.2018.04.007

BECK H. E., **ZIMMERMANN** N. E., **MCVICAR** T. R., **VERGOPOLAN** N., **BERG** A., **WOOD** E. F., 2018, « Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution », *Scientific Data*, 5(1), p. 180214. doi:10.1038/sdata.2018.214

BECKER F., **LI** Z.-L., 1990, « Towards a local split window method over land surfaces », *International Journal of Remote Sensing*, 11(3), p. 369-393. doi:10.1080/01431169008955028

BELGHITI-ALAOUI A., **HACHRI** H., 2007, « Évaluation de la performance des soins de santé primaires au Maroc », Rapport de consultation, Rabah, Maroc.

BELTRANDO G., **DAHECH** S., **MADELIN** M., 2008, « L'intérêt de l'étude des brises thermiques : exemples des brises littorales et orographiques. », *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 51, p. 49.

BENAZZOUZ A., **MABCHOUR** H., **EL HAD** K., **ZOURARAH** B., **MORDANE** S., 2021, « Offshore Wind Energy Resource in the Kingdom of Morocco: Assessment of the Seasonal Potential Variability Based on Satellite Data », *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), p. 31. doi:10.3390/jmse9010031

BENDIG J. V., 2015, *Unmanned aerial vehicles (UAVs) for multi-temporal crop surface modelling. A new method for plant height and biomass estimation based on RGB-imaging*, text.thesis.doctoral, Universität zu Köln.

BENMARHNIA T., **KIHAL-TALANTIKITE** W., **RAGETTLI** M. S., **DEGUEN** S., 2017, « Small-area spatiotemporal analysis of heatwave impacts on elderly mortality in Paris: A cluster analysis approach », *The Science of the Total Environment*, 592, p. 288-294. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.102

BENMECHETA A., 2016, *Estimation de la température de surface a partir de l'imagerie satellitale; validation sur une zone côtière d'Algérie*, phdthesis, Paris, France, Université Paris-Est, 116 p.

BERGER C., **ROSENTRETER** J., **VOLTERSEN** M., **BAUMGART** C., **SCHMULLIUS** C., **HESE** S., 2017, « Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature », *Remote Sensing of Environment*, 193, p. 225-243. doi:10.1016/j.rse.2017.02.020

BERNI J. A. J., **ZARCO-TEJADA** P. J., **SEPULCRE-CANTÓ** G., **FERERES** E., **VILLALOBOS** F., 2009, « Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery », *Remote Sensing of Environment*, 113. doi:10.1016/j.rse.2009.06.018

BERTHIER N., 2016, *Les techniques d'enquête en sciences sociales: méthodes et exercices corrigés*, Paris, France, Armand Colin, 350 p.

BESANCENOT J.-P., 2002, « Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines », *Environnement, Risques & Santé*, 1(4), p. 229-240.

BIDOU J.-É., **DROY** I., 2012, « Peut-on mesurer la vulnérabilité sociale et économique des ménages et des individus », *La mesure du développement*, p. 1-21.

BIGOT S., **DUCHE** S., **MADELIN** M., **ROME** S., 2017, « Etude du climat urbain : pour une mise à disposition de nouveaux services climatiques », *Bulletin de la Société Géographique de Liège*. doi:10.25518/0770-7576.4505

BLANCHET A., **GOTMAN** A., 2010, *L'entretien ; l'enquête et ses méthodes (2e édition) - Alain Blanchet, Anne Gotman - Armand Colin - Poche - Le Hall du Livre NANCY*, ARMAND COLIN, 128 p.

BONGRAND P., **LABORIER** P., 2005, « L'entretien dans l'analyse des politiques publiques : un impensé méthodologique ? », *Revue française de science politique*, 55(1), p. 73-111. doi:10.3917/rfsp.551.0073

Bonn F., 1994, *Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone*, 1re édition, Presses de l'Université du Québec, p. 592, https://www.jstor.org/stable/j.ctv18pgwp2

BONN F., **ROCHON** G., **FRANÇAISE** A. Précis de télédétection, UREF, 1992, Presses de l'Université du Québec, 520 p.

BONNEFOY C., 2013, *Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique*, Thèse de doctorat, Rennes, France, Rennes 2, 319 p.

BOOKS N., 2003, « Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework », Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper, p. 1-16.

BORDEN K. A., **SCHMIDTLEIN** M. C., **EMRICH** C. T., **PIEGORSCH** W. W., **CUTTER** S. L., 2007, « Vulnerability of U.S. Cities to Environmental Hazards », *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 4(2). doi:10.2202/1547-7355.1279

BORNSTEIN R. D., 1968, « Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 7(4), p. 575-582. doi:10.1175/1520-0450(1968)007<0575:OOTUHI>2.0.CO;2

BORNSTEIN R., **LIN** Q., 2000, « Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies », *Atmospheric Environment*, 34(3), p. 507-516. doi:10.1016/S1352-2310(99)00374-X

BORRELL C., **MARÍ-DELL'OLMO** M., **RODRÍGUEZ-SANZ** M., **GARCIA-OLALLA** P., **CAYLÀ** J. A., **BENACH** J., **MUNTANER** C., 2006, « Socioeconomic position and excess mortality during the heat wave of 2003 in Barcelona », *European Journal of Epidemiology*, 21(9), p. 633-640. doi:10.1007/s10654-006-9047-4

BOUCHAMA A., **DEHBI** M., **MOHAMED** G., **MATTHIES** F., **SHOUKRI** M., **MENNE** B., 2007, « Prognostic factors in heat wave related deaths: a meta-analysis », *Archives of Internal Medicine*, 167(20), p. 2170-2176. doi:10.1001/archinte.167.20.ira70009

BOUHALI A., 2016, « *Fabriquer des centralités marchandes dans le monde arabe : étude comparée de deux quartiers-marchés du commerce transnational au Caire et à Oran* », Thèse de doctorat, Toulouse, France, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 424 p.

BOUMAIZA I., 2021, « *L'eau bleue et l'eau verte pour lutter contre la surchauffe urbaine dans l'agglomération de Metz Métropole : apport de l'imagerie drone et du réseau de mesure REMTHAM* », Rapport de stage, master 2 STPE parcours ERGA, Université de Lorraine, Metz, France, 59 p.

BOUNOUA L., **SAFIA** A., **MASEK** J., **PETERS-LIDARD** C., **IMHOFF** M. L., 2009, « Impact of Urban Growth on Surface Climate: A Case Study in Oran, Algeria », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(2), p. 217-231. doi:10.1175/2008JAMC2044.1

BOURNEZ E., 2018, *Etude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains : approche combinée de mesures et de modélisations à différentes échelles*, Thèse de doctorat, Strasbourg, France, Université de Strasbourg, 217 p.

BOUYER J., 2009, *Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*, Thèse de doctorat, Nantes, France, Université de Nantes, 306 p.

BOZONNET E., **ALLARD** F., **MUSY** M., **CHAZELAS** M., **GUARRACINO** G., 2006, « URBAT : Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions », Rapport final, F04.39-CO 04 000058.

BRABANT C., **DUBREUIL** V., **PELLEN** J., 2023, « Spatialisation de l'îlot de chaleur à Rennes au moyen de réseau d'observation climatique dense », *Climat, eau et société : changements et défis*, p. 41-44.

BRAUN V., **CLARKE** V., 2006, « Using thematic analysis in psychology », *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), p. 77-101. doi:10.1191/1478088706qp063oa

BRAUN V., **CLARKE** V., 2014, « What can "thematic analysis" offer health and wellbeing researchers? », *International Journal of Qualitative Studies on Health and Well-being*, 9(1), p. 26152. doi:10.3402/qhw.v9.26152

BREIL M., **DOWNING** C., **KAZMIERCZAK** A., **ROMANOVSKA** L., **TERAMA** E., **SWART** R., 2018, *Social vulnerability to climate change in European cities – state of play in policy and practice*, EEA-European Environment Agency, ETC/CCA Technical Paper, Copenhagen, 85 p. doi:10.25424/CMCC/SOCVUL_EUROPCITIES

BRENNER C., **THIEM** C. E., **WIZEMANN** H.-D., **BERNHARDT** M., **SCHULZ** K., 2017, « Estimating spatially distributed turbulent heat fluxes from high-resolution thermal imagery acquired with a UAV system », *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), p. 3003-3026. doi:10.1080/01431161.2017.1280202

BROUSSE O., **MARTILLI** A., **FOLEY** M., **MILLS** G., **BECHTEL** B., 2016, « WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid », *Urban Climate*, 17, p. 116-134. doi:10.1016/j.uclim.2016.04.001

BUDZIER H., **GERLACH** G., 2015, « Calibration of uncooled thermal infrared cameras », *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 4(1), p. 187-197. doi:10.5194/jsss-4-187-2015

BUSATO F., **LAZZARIN** R. M., **NORO** M., 2014, « Three years of study of the Urban Heat Island in Padua: Experimental results », *Sustainable Cities and Society*, 10, p. 251-258. doi:10.1016/j.scs.2013.05.001

CAI M., **REN** C., **XU** Y., **LAU** K. K.-L., **WANG** R., 2018, « Investigating the relationship between local climate zone and land surface temperature using an improved WUDAPT methodology – A case study of Yangtze River Delta, China », *Urban Climate*, 24, p. 485-502. doi:10.1016/j.uclim.2017.05.010

CANTAT O., 1989, *Contribution à l'étude des variations du bilan d'énergie en région parisienne: Essai sur les bilans d'énergie dans les grandes métropoles*, Thèse de doctorat, 1970-2017, France, Université Paris-Sorbonne, 365 p.

CANTAT O., 2004, « L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps », *Norois*, 191, p. 75-102. doi:10.4000/norois.1373

CAO C., **LEE** X., **LIU** S., **SCHULTZ** N., **XIAO** W., **ZHANG** M., **ZHAO** L., 2016, « Urban heat islands in China enhanced by haze pollution », *Nature Communications*, 7(1), p. 12509. doi:10.1038/ncomms12509

CARNIELO E., **ZINZI** M., 2013, « Optical and thermal characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand », *Building and Environment*, 60, p. 56-65. doi:10.1016/j.buildenv.2012.11.004

CARPENTER S., **WALKER** B., **ANDERIES** J. M., **ABEL** N., 2001, « From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? », *Ecosystems*, 4(8), p. 765-781. doi:10.1007/s10021-001-0045-9

CARREGA, P., 1992, *Topoclimatologie et habitat · GéoProdig, portail d'information géographique*, Thèse de doctorat, Nice, France, Université Sophia Antipolis, 408 p.

CARTER J. G., 2011, « Climate change adaptation in European cities », *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3), p. 193-198. doi:10.1016/j.cosust.2010.12.015

CASANUEVA A., **BURGSTALL** A., **KOTLARSKI** S., **MESSERI** A., **MORABITO** M., **FLOURIS** A. D., **NYBO** L., **SPIRIG** C., **SCHWIERZ** C., 2019, « Overview of Existing Heat-Health Warning Systems in Europe », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(15), p. 2657. doi:10.3390/ijerph16152657

CDC, 2006, « Heat-related deaths--United States, 1999-2003 », *MMWR. Morbidity and mortality weekly report*, 55(29), p. 796-798.

CECILIA A., **CASASANTA** G., **PETENKO** I., **CONIDI** A., **ARGENTINI** S., 2023, « Measuring the urban heat island of Rome through a dense weather station network and remote sensing imperviousness data », *Urban Climate*, 47, p. 101355. doi:10.1016/j.uclim.2022.101355

CEREMA, 2017, *La résilience des territoires aux catastrophes*, rapport d'étude, Paris, France, Document du CGDD, 48 p.

CHANDER G., **MARKHAM** B. L., **BARSI** J. A., 2007, « Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4(3), p. 490-494. doi:10.1109/LGRS.2007.898285

CHANDLER T. J., 1962, « Temperature and Humidity Traverses Across London », *Weather*, 17(7), p. 235-242. doi:10.1002/j.1477-8696.1962.tb05125.x

CHANG Y., **XIAO** J., **LI** X., **MIDDEL** A., **ZHANG** Y., **GU** Z., **WU** Y., **HE** S., 2021, « Exploring diurnal thermal variations in urban local climate zones with ECOSTRESS land surface temperature data », *Remote Sensing of Environment*, 263, p. 112544. doi:10.1016/j.rse.2021.112544

CHANG Y., **XIAO** J., **LI** X., **ZHOU** D., **WU** Y., 2022, « Combining GOES-R and ECOSTRESS land surface temperature data to investigate diurnal variations of surface urban heat island », *Science of The Total Environment*, 823, p. 153652. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.153652

CHAPMAN L., **MULLER** C. L., **YOUNG** D. T., **WARREN** E. L., **GRIMMOND** C. S. B., **CAI** X.-M., **FERRANTI** E. J. S., 2015, « The Birmingham Urban Climate Laboratory: An Open Meteorological Test Bed and Challenges of the Smart City », *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(9), p. 1545-1560. doi:10.1175/BAMS-D-13-00193.1

CHARFI S., **DAHECH** S., 2018, « Cartographie des températures à Tunis par modélisation statistique et télédétection », *Mappemonde. Revue trimestrielle sur l'image géographique et les formes du territoire*, 123. doi:10.4000/mappemonde.442

CHEBANA F., **MARTEL** B., **GOSSELIN** P., **GIROUX** J.-X., **OUARDA** T. B. M. J., 2013, « A general and flexible methodology to define thresholds for heat health watch and warning systems, applied to the province of Québec (Canada) », *International Journal of Biometeorology*, 57(4), p. 631-644. doi:10.1007/s00484-012-0590-2

CHEN L., **NG** E., **AN** X., **REN** C., **LEE** M., **WANG** U., **HE** Z., 2012, « Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach », *International Journal of Climatology*, 32(1), p. 121-136. doi:10.1002/joc.2243

CHEN Y.-C., **YAO** C.-K., **HONJO** T., **LIN** T.-P., 2018, « The application of a high-density street-level air temperature observation network (HiSAN): Dynamic variation characteristics of urban heat island in Tainan, Taiwan », *The Science of the Total Environment*, 626, p. 555-566. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.01.059

CHENG W., **LI** D., **LIU** Z., **BROWN** R. D., 2021, « Approaches for identifying heat-vulnerable populations and locations: A systematic review », *Science of The Total Environment*, 799, p. 149417. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149417

CHHETRI D. B. T., **FUJIMORI** Y., **MORIWAKI** R., 2017, « LOCAL CLIMATE CLASSIFICATION AND URBAN HEAT/DRY ISLAND IN MATSUYAMA PLAIN », *土木学会論文集B1（水工学）*, 73(4), p. I_487-I_492. doi:10.2208/jscejhe.73.I_487

CHING J., **ALIAGA** D., **MILLS** G., **MASSON** V., **SEE** L., **NEOPHYTOU** M., **MIDDEL** A., **BAKLANOV** A., **REN** C., **NG** E., **FUNG** J., **WONG** M., **HUANG** Y., **MARTILLI** A., **BROUSSE** O., **STEWART** I., **ZHANG** X., **SHEHATA** A., **MIAO** S., **WANG** X., **WANG** W., **YAMAGATA**

Y., **DUARTE** D., **LI** Y., **FEDDEMA** J., **BECHTEL** B., **HIDALGO** J., **ROUSTAN** Y., **KIM** Y., **SIMON** H., **KROPP** T., **BRUSE** M., **LINDBERG** F., **GRIMMOND** S., **DEMUZURE** M., **CHEN** F., **LI** C., **GONZALES-CRUZ** J., **BORNSTEIN** B., **HE** Q., **TZU-PING**, **HANNA** A., **ERELL** E., **TAPPER** N., **MALL** R. K., **NIYOGI** D., 2019, « Pathway using WUDAPT's Digital Synthetic City tool towards generating urban canopy parameters for multi-scale urban atmospheric modeling », *Urban Climate*, 28, p. 100459. doi:10.1016/j.uclim.2019.100459

CHOPLIN A., 2006, « *Fabriquer des villes-capitales entre monde arabe et Afrique noire : Nouakchott (Mauritanie) et Khartoum (Soudan), étude comparée* », Thèse de doctorat, Paris, France, Paris 1, 535 p.

CHOW W. T. L., **CHUANG** W.-C., **GOBER** P., 2012, « Vulnerability to Extreme Heat in Metropolitan Phoenix: Spatial, Temporal, and Demographic Dimensions », *The Professional Geographer*, 64(2), p. 286-302. doi:10.1080/00330124.2011.600225

CHOW W. T. L., **ROTH** M., 2006, « Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore », *International Journal of Climatology*, 26(15), p. 2243-2260. doi:10.1002/joc.1364

CLAY R., **GUAN** H., **WILD** N., **BENNETT** J., **VINODKUMAR**, **EWENZ** C., 2016, « Urban Heat Island traverses in the City of Adelaide, South Australia », *Urban Climate*, 17, p. 89-101. doi:10.1016/j.uclim.2016.06.001

COLLIN DELAVAUD A., 2000, « L'apport des images satellitaires dans l'étude des dynamiques de l'occupation du sol des villes d'Amérique Latine », *Cybergeo: European Journal of Geography*. doi:10.4000/cybergeo.722

COLOMBERT M., 2008, « *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville* », Thèse de doctorat, Paris, France, Université Paris-Est, 537 p.

COLOMBERT M., **SALAGNAC** J.-L., **MORAND** D., **DIAB** Y., 2012, « Le climat et la ville : la nécessité d'une recherche croisant les disciplines », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-série 12. doi:10.4000/vertigo.11811

COLUNGA M. L., **CAMBRÓN-SANDOVAL** V. H., **SUZÁN-AZPIRI** H., **GUEVARA-ESCOBAR** A., **LUNA-SORIA** H., 2015, « The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico », *Atmósfera*, 28(3), p. 205-218. doi:10.20937/ATM.2015.28.03.05

COLWELL R. N., 1997, « History and place of photographic interpretation », *Manual of photographic interpretation*, 2, p. 33-58.

CONLON K. C., **MALLEN** E., **GRONLUND** C. J., **BERROCAL** V. J., **LARSEN** L., **O'NEILL** M. S., 2020, « Mapping Human Vulnerability to Extreme Heat: A Critical Assessment of Heat Vulnerability Indices Created Using Principal Components Analysis », *Environmental Health Perspectives*, 128(9), p. 097001. doi:10.1289/EHP4030

CORNILLON P.-A., **HENGARTNER** N., **MATZNER-LØBER** E., **ROUVIERE** L., 2019, *Régression avec R - 2e édition*, 2e édition, Les Ulis, EDP SCIENCES, 384 p.

CRISTÓBAL J., **JIMÉNEZ-MUÑOZ** J. C., **SOBRINO** J. A., **NINYEROLA** M., **PONS** X., 2009, « Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapor and air temperature », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D8). doi:10.1029/2008JD010616

CROSMAN E. T., **HOREL** J. D., 2010, « Sea and Lake Breezes: A Review of Numerical Studies », *Boundary-Layer Meteorology*, 137(1), p. 1-29. doi:10.1007/s10546-010-9517-9

CRUTZEN P. J., 2004, « New Directions : The growing urban heat and pollution "island" effect - impact on chemistry and climate », *Atmospheric Environment*, 38(21), p. 3539-3540.

CUTLER R. L., **FERNANDEZ-LLIMOS** F., **FROMMER** M., **BENRIMOJ** C., **GARCIA-CARDENAS** V., 2018, « Economic impact of medication non-adherence by disease groups: a systematic review », *BMJ Open*, 8(1), p. e016982. doi:10.1136/bmjopen-2017-016982

CUTTER S. L., **BORUFF** B. J., **SHIRLEY** W. L., 2003, « Social Vulnerability to Environmental Hazards* », *Social Science Quarterly*, 84(2), p. 242-261. doi:10.1111/1540-6237.8402002

CYR J. F., **MARCOUX** C., **DEUTSCH** J. C., **LAVALLÉE** P., 1998, « Urban hydrology: Adapting solution strategies to evolutive problems », *Revue des Sciences de l'Eau*, 11(SPEC. ISS.), p. 51.

CZAPLA-MYERS J., **MCCORKEL** J., **ANDERSON** N., **THOME** K., **BIGGAR** S., **HELDER** D., **AARON** D., **LEIGH** L., **MISHRA** N., 2015, « The Ground-Based Absolute Radiometric Calibration of Landsat 8 OLI », *Remote Sensing*, 7(1), p. 600-626. doi:10.3390/rs70100600

DA ROCHA G., **DUBREUIL** V., **MENDONÇA** F., 2019, « Résultats préliminaires de l'étude de l'ilot de chaleur urbain à Florianópolis (au sud du Brésil) », *Actes du 32e colloque de l'Association Internationale de Climatologie " Le Changement Climatique, la variabilité et les risques climatiques*", Thessalonique, Grèce, p. 378-383.

DAHECH S., 2012, « Evolution de la répartition spatiale des températures de l'air et de surface dans l'agglomération de Sfax entre 1987 et 2010. Impact sur la consommation d'énergie en été », *Climatologie*, Numéro Spécial, p. 11-32. doi:https://doi.org/10.4267/climatologie.543

DAHECH S., 2014, « Impact de la brise de mer sur le confort thermique au Maghreb oriental durant la saison chaude », *Cybergeo: European Journal of Geography*. doi:10.4000/cybergeo.26555

DAHECH S., **BERGES** J.-C., **BELTRANDO** G., 2012, « Localisation et dynamique du front de la brise de mer au Maghreb oriental », *Climatologie*, 9, p. 59-81. doi:10.4267/climatologie.189

DAHECH S., **CHARFI** S., 2017, « Aspect topoclimatiques de Bizerte (NE de la Tunisie) : Ilot de chaleur urbain et brises thermiques », *in Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée*, Laboratoire Population-Environnement-Développement, UMR 151 (AMU – IRD), Marseille, Les Impromptus du LPED, p. 138-159.

DANDOU A., **TOMBROU** M., **SOULAKELLIS** N., 2009, « The Influence of the City of Athens on the Evolution of the Sea-Breeze Front », *Boundary-Layer Meteorology*, 131(1), p. 35-51. doi:10.1007/s10546-008-9306-x

D'ANDRADE R. G., 1995, *The Development of Cognitive Anthropology*, Cambridge, Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139166645

DAUPHINE A., **PROVITOLO** D., 2007, « La résilience : un concept pour la gestion des risques », *Annales de géographie*, 654(2), p. 115-125. doi:10.3917/ag.654.0115

DAVIDSON B., 1967, « A Summary of the New York Urban Air Pollution Dynamics Research Program », *Journal of the Air Pollution Control Association*, 17(3), p. 154-158. doi:10.1080/00022470.1967.10468961

DE FRENNE P., **RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ** F., **COOMES** D. A., **BAETEN** L., **VERSTRAETEN** G., **VELLEND** M., **BERNHARDT-ROMERMANN** M., **D.BROWN** C., **BRUNET** J., **CORNELIS** J., **DECOCQ** G. M., **DIERSCHKE** H., **ERIKSSON** O., **GILLIAM** F. S., **HÉDL** R., **HEINKEN** T., **HERMY** M., **HOMMEL** P., **JENKINS** M. A., **KELLY** D. L., **KIRBY** K. J., **MITCHELL** F. J. G., **NAAF** T., **NEWMAN** M., **PETERKEN** G., **PETŘÍK** P., **SCHULTZ** J., **SONNIER** G., **VAN CALSTER** H., **WALLER** D. M., **WALTHER** G.-R., **BLANC** P. S., **WOODS** K. D., **WULF** M., **GRAÆ** B. J., **VERHEYEN** K., 2013, « Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(46), p. 18561-18565. doi:10.1073/pnas.1311190110

DE MUNCK C., 2013, *Modélisation de la végétation urbaine et des stratégies d'adaptation au changement climatique pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*, Thèse de doctorat, Toulouse, France, Université de Toulouse, 219 p.

DE RIDDER K., **MAIHEU** B., **LAUWAET** D., **DAGLIS** I. A., **KERAMITSOGLOU** I., **KOURTIDIS** K., **MANUNTA** P., **PAGANINI** M., 2017, « Urban Heat Island Intensification during Hot Spells—The Case of Paris during the Summer of 2003 », *Urban Science*, 1(1), p. 3. doi:10.3390/urbansci1010003

DELOR F., **HUBERT** M., 2000, « Revisiting the concept of 'vulnerability' », *Social Science & Medicine*, 50(11), p. 1557-1570. doi:10.1016/S0277-9536(99)00465-7

DEPIETRI Y., **WELLE** T., **RENAUD** F. G., 2013, « Social vulnerability assessment of the Cologne urban area (Germany) to heat waves: links to ecosystem services », *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 6, p. 98-117. doi:10.1016/j.ijdrr.2013.10.001

D'ERCOLE R., **PIGEON** P., 1999, « L'expertise internationale des risques dits naturels : intérêt géographique/Geographical relevance of natural risk assessment on an international scale », *Annales de géographie*, 108(608), p. 339-357. doi:10.3406/geo.1999.21777

DETIENNE M., 2002, « L'art de construire des comparables.Entre historiens et anthropologues », *Critique internationale*, 14(1), p. 68-78. doi:10.3917/crii.014.0068

DIAN C., **PONGRÁCZ** R., **DEZSŐ** Z., **BARTHOLY** J., 2020, « Annual and monthly analysis of surface urban heat island intensity with respect to the local climate zones in Budapest », *Urban Climate*, 31, p. 100573. doi:10.1016/j.uclim.2019.100573

DIRECTION REGIONALE DE L'AGRICULTURE REGION CASABLANCA-SETTAT, 2018, *Monographie agricole, Région de Casablanca-Settat*, Ph.D. thesis, Casablanca, Maroc, Direction Régionale de l'Agriculture Région Casablanca-Settat, 19 p.

DIRKSEN M., **RONDA** R. J., **THEEUWES** N. E., **PAGANI** G. A., 2019, « Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies », *Urban Climate*, 30, p. 100498. doi:10.1016/j.uclim.2019.100498

DOBROVOLNÝ P., **KRAHULA** L., 2015, « The spatial variability of air temperature and nocturnal urban heat island intensity in the city of Brno, Czech Republic », *Moravian Geographical Reports*, 23(3), p. 8-16. doi:10.1515/mgr-2015-0013

DORIGON L. P., **AMORIM** M. C. de C. T., 2019, « Spatial modeling of an urban Brazilian heat island in a tropical continental climate », *Urban Climate*, 28, p. 100461. doi:10.1016/j.uclim.2019.100461

DOULOS L., **SANTAMOURIS** M., **LIVADA** I., 2004, « Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials », *Solar Energy*, 77(2), p. 231-249. doi:10.1016/j.solener.2004.04.005

DOUSSET B., **GOURMELON** F., **GIRAUDET** E., **LAAIDI** K., **ZEGHNOUN** A., **BRETIN** P., **VANDENTORREN** S., 2011, « Evolution climatique et canicule en milieu urbain : apport de la télédétection à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire », Rapport de projet soutenu par la Fondation MAIF (2008-2011).

DOWNING T., **PATWARDHAN** A., **KLEIN** R. J. T., **MUKHALA** E., **STEPHEN** L., **WINOGRAD** M., **ZIERVOGEL** G., 2005, « Assessing vulnerability for climate adaptation », *Urban Adaptation Support Tool*, p. 67-89.

DRIOUECH F., **DÉQUÉ** M., **SÁNCHEZ-GÓMEZ** E., 2010, « Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation », *Global and Planetary Change*, 72(1), p. 1-10. doi:10.1016/j.gloplacha.2010.03.004

DRIOUECH F., **STAFI** H., **KHOUAKHI** A., **MOUTIA** S., **BADI** W., **ELRHAZ** K., **CHEHBOUNI** A., 2021, « Recent observed country-wide climate trends in Morocco », *International Journal of Climatology*, 41(S1), p. E855-E874. doi:10.1002/joc.6734

DROGUE G., **HASSANI** N., **BOUYER** J., **CLAVERIE** R., **DOUCHE** S., **ROGOVITZ** F., **SMAALAH** S., **BRASSEUR** L., **SUAIRE** M., 2023, « Dynamique partenariale autour de l'adaptation à la surchauffe urbaine dans l'agglomération messine (France) », *Climatologie*, 20. https://doi.org/10.1051/climat/202320011

DROGUE G., **HASSANI** N., **MANCEAU** L., **PARUKE** L., 2020, « Acquisition d'images thermiques infrarouges par drone pour la caractérisation de l'ICU de surface à échelle fine : étude pilote dans une ZAE du territoire de Metz Métropole (le plateau de Frescaty) », *Changement climatique et territoires*, p. 235-240. hal-02546728

DUBREUIL V., 2022, « Le changement climatique en France illustré par la classification de Köppen », *La Météorologie*, 2022(116), p. 37-47. doi:10.37053/lameteorologie-2022-0012

DUBREUIL V., **BRABANT** C., 2023, « Fréquence et évolution des nuits tropicales et des ilots de chaleur de forte intensité à Rennes », *Climat, eau et société : changements et défis*, p. 89-92.

DUBREUIL V., **BRABANT** C., **DELAUNAY** G., **NABUCET** J., **QUENOL** H., **CLAIN** F., **LEPRINCE,** F., **BREANO** J., **GEORGET** L., 2022, « Rennes, une Rennes, une ville climato-intelligente ? - L'IoT au service du suivi des îlots de chaleurville climato-intelligente ? », *Techniques de l'Ingénieur*. doi:https://doi.org/10.51257/a-v1-sc8020

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*, 17, p. 6. doi:10.1051/climat/202017006

DUBUISSON P., **GIRAUD** V., **CHOMETTE** O., **CHEPFER** H., **PELON** J., 2005, « Fast radiative transfer modeling for infrared imaging radiometry », *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 95(2), p. 201-220. doi:10.1016/j.jqsrt.2004.09.034

DUMAS G., 2021, « *Co-construction d'un réseau d'observation du climat urbain et de services climatiques associés : cas d'application sur la métropole toulousaine* », Thèse de doctorat, Toulouse, France, Toulouse 3, 228 p.

DUNSTAN S., **NOON** S., 2012, *Israeli Fortifications of the October War 1973*, Bloomsbury Publishing, Osprey Publishing, 64 p.

DUPONT S., 2001, « *Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO* », Thèse de doctorat, Nantes, France, Université de Nantes, 319 p.

DUPUIS C., **LEJEUNE** P., **MICHEZ** A., **FAYOLLE** A., 2020, « How Can Remote Sensing Help Monitor Tropical Moist Forest Degradation?—A Systematic Review », *Remote Sensing*, 12(7), p. 1087. doi:10.3390/rs12071087

DUREAU F., 1990, « Utiliser la télédétection spatiale pour observer les populations citadines », *Villes et citadins du Tiers Monde*, p. 23-55.

EBI K. L., **CAPON** A., **BERRY** P., **BRODERICK** C., **DE DEAR** R., **HAVENITH** G., **HONDA** Y., **KOVATS** R. S., **MA** W., **MALIK** A., **MORRIS** N. B., **NYBO** L., **SENEVIRATNE** S. I., **VANOS** J., **JAY** O., 2021, « Hot weather and heat extremes: health risks », *The Lancet*, 398(10301), p. 698-708. doi:10.1016/S0140-6736(21)01208-3

EBI K. L., **KOVATS** R. S., **MENNE** B., 2006, « An Approach for Assessing Human Health Vulnerability and Public Health Interventions to Adapt to Climate Change », *Environmental Health Perspectives*, 114(12), p. 1930-1934. doi:10.1289/ehp.8430

ECKSTEIN D., **KÜNZEL** V., **SCHÄFER** L., 2021, *Global Climate Risk Index 2021*, Rapport d'étude, 52 p.

EGLI E., 1951, *Die neue Stadt in Landschaft und Klima : Climate and town districts : consequences and demands.*, Erlenbach-Zurich, Verlag fur Architektur, 156 p.

ELLENA M., **BREIL** M., **SORIANI** S., 2020, « The heat-health nexus in the urban context: A systematic literature review exploring the socio-economic vulnerabilities and built

environment characteristics », *Urban Climate*, 34, p. 100676. doi:10.1016/j.uclim.2020.100676

EMERY J., **POHL** B., **CRÉTAT** J., **RICHARD** Y., **PERGAUD** J., **REGA** M., **ZITO** S., **DUDEK** J., **VAIRET** T., **JOLY** D., **THÉVENIN** T., 2021, « How local climate zones influence urban air temperature: Measurements by bicycle in Dijon, France », *Urban Climate*, 40, p. 101017. doi:10.1016/j.uclim.2021.101017

ERELL E., **PEARLMUTTER** D., **WILLIAMSON** T., 2010, *Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings*, 1st Edition, London, Routledge, 288 p. doi:10.4324/9781849775397

ERMAN A., **MOTTE** E., **GOYAL** R., **ASARE** A., **TAKAMATSU** S., **CHEN** X., **MALGIOGLIO** S., **SKINNER** A., **YOSHIDA** N., **HALLEGATTE** S., 2020, « The Road to Recovery the Role of Poverty in the Exposure, Vulnerability and Resilience to Floods in Accra », *Economics of Disasters and Climate Change*, 4. doi:10.1007/s41885-019-00056-w

ESCOURROU G., 1991, *Le Climat et la ville*, Paris, Nathan, Nathan Université., Géographie d'aujourd'hui., 190 p.

ESTOQUE R. C., **ISHTIAQUE** A., **PARAJULI** J., **ATHUKORALA** D., **RABBY** Y. W., **OOBA** M., 2023, « Has the IPCC's revised vulnerability concept been well adopted? », *Ambio*, 52(2), p. 376-389. doi:10.1007/s13280-022-01806-z

ESTOURNEL C., **VEHIL** R., **GUEDALIA** D., **FONTAN** J., **DRUILHET** A., 1983, « Observations and modeling of downward radiative fluxes /Solar and Infrared/ in urban/rural areas », *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, p. 134-142.

FAN H., **SAILOR** D. J., 2005, « Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia : A comparison of implementations in two PBL schemes », *Atmospheric Environment*, 39(1), p. 73-84. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.09.031

FARHADI H., **NAJAFZADEH** M., 2021, « Flood Risk Mapping by Remote Sensing Data and Random Forest Technique », *Water*, 13(21), p. 3115. doi:10.3390/w13213115

FAYE E., **JOLIVOT** A., **THÉAU** J., **REGNARD** J. L., **GÓMEZ-CANDÓN** D., 2022, « Thermal infrared. », *in Unmanned Aerial Vehicles in Environmental Sciences – Principles, Developments, and Applications.*, p. 157-177.

FAYE M., **DÈME** A., **DIONGUE** A. K., **DIOUF** I., 2021, « Impact of different heat wave definitions on daily mortality in Bandafassi, Senegal », *PloS One*, 16(4), p. e0249199. doi:10.1371/journal.pone.0249199

FENG J.-M., **WANG** Y.-L., **MA** Z.-G., **LIU** Y.-H., 2012, « Simulating the Regional Impacts of Urbanization and Anthropogenic Heat Release on Climate across China », *Journal of Climate*, 25(20), p. 7187-7203. doi:10.1175/JCLI-D-11-00333.1

FENNER D., **HOLTMANN** A., **MEIER** F., **LANGER** I., **SCHERER** D., 2019, « Contrasting changes of urban heat island intensity during hot weather episodes », *Environmental Research Letters*, 14(12), p. 124013. doi:10.1088/1748-9326/ab506b

FENNER D., **MEIER** F., **SCHERER** D., **POLZE** A., 2014, « Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001–2010 », *Urban Climate*, 10, p. 308-331. doi:10.1016/j.uclim.2014.02.004

FIELD C. B., **BARROS** V., **STOCKER** T. F., **DAHE** Q. (dir.), 2012, *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139177245

FILAHI S., **TRAMBLAY** Y., **MOUHIR** L., **DIACONESCU** E. P., 2017, « Projected changes in temperature and precipitation indices in Morocco from high-resolution regional climate models », *International Journal of Climatology*, 37(14), p. 4846-4863. doi:10.1002/joc.5127

FISCHER L., 2005, « Phénomènes radiatifs et îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Strasbourg », *Revue Géographique de l'Est*, 45(vol. 45 / 2), p. 99-112. doi:10.4000/rge.473

FISHER J. B., **LEE** B., **PURDY** A. J., **HALVERSON** G. H., **DOHLEN** M. B., **CAWSE-NICHOLSON** K., **WANG** A., **ANDERSON** R. G., **ARAGON** B., **ARAIN** M. A., **BALDOCCHI** D. D., **BAKER** J. M., **BARRAL** H., **BERNACCHI** C. J., **BERNHOFER** C., **BIRAUD** S. C., **BOHRER** G., **BRUNSELL** N., **CAPPELAERE** B., **CASTRO-CONTRERAS** S., **CHUN** J., **CONRAD** B. J., **CREMONESE** E., **DEMARTY** J., **DESAI** A. R., **DE LIGNE** A., **FOLTÝNOVÁ** L., **GOULDEN** M. L., **GRIFFIS** T. J., **GRÜNWALD** T., **JOHNSON** M. S., **KANG** M., **KELBE** D., **KOWALSKA** N., **LIM** J.-H., **MAÏNASSARA** I., **MCCABE** M. F., **MISSIK** J. E. C., **MOHANTY** B. P., **MOORE** C. E., **MORILLAS** L., **MORRISON** R., **MUNGER** J. W., **POSSE** G., **RICHARDSON** A. D., **RUSSELL** E. S., **RYU** Y., **SANCHEZ-AZOFEIFA** A., **SCHMIDT** M., **SCHWARTZ** E., **SHARP** I., **ŠIGUT** L., **TANG** Y., **HULLEY** G., **ANDERSON** M., **HAIN** C., **FRENCH** A., **WOOD** E., **HOOK** S., 2020, « ECOSTRESS: NASA's Next Generation Mission to Measure Evapotranspiration From the International Space Station », *Water Resources Research*, 56(4), p. e2019WR026058. doi:10.1029/2019WR026058

FLAHAUT B., 2001, « L'autocorrélation spatiale comme outil géostatistique d'identification des concentrations spatiales des accidents de la route », *Cybergeo: European Journal of Geography*. doi:10.4000/cybergeo.4011

FODEN W., **YOUNG** B., **AKCAKAYA** H. R., **GARCIA** R., **HOFFMAN** A., **STEIN** B., **THOMAS** C., **WHEATLEY** C., **BICKFORD** D., **CARR** J., **HOLE** D., **MARTIN** T., **PACIFICI** M., **PEARCE-HIGGINS** J., **PLATTS** P., **VISCONTI** P., **WATSON** J., **HUNTLEY** B., 2019, « Climate change vulnerability assessment of species », *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10. doi:10.1002/wcc.551

FOISSARD X., 2015, *L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise*, Thèse de doctorat, Rennes, France, Université Rennes 2, 233 p.

FOISSARD X., **DUBREUIL** V., **QUÉNOL** H., 2019, « Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France) », *Urban Climate*, 29, p. 100490. doi:10.1016/j.uclim.2019.100490

FOISSARD X., **QUENOL** H., **DUBREUIL** V., 2011, « L'influence de la variabilité des facteurs météorologiques sur l'occurrence et l'intensité de l'ilot de chaleur urbain à rennes en 2010. », *Climat montagnard et risques*, p. 261-266.

FOISSARD X., **ROME** S., **BIGOT** S., **FOUVET** A.-C., 2022, « Réseau de mesures et analyses spatio-temporelles de l'ilot de chaleur urbain grenoblois : l'été 2020 », *Le changement climatique, les risques et l'adaptation*, p. 1-7.

FOUNDA D., **PIERROS** F., **PETRAKIS** M., **ZEREFOS** C., 2015, « Interdecadal variations and trends of the Urban Heat Island in Athens (Greece) and its response to heat waves », *Atmospheric Research*, 161-162, p. 1-13. doi:10.1016/j.atmosres.2015.03.016

FOUNDA D., **SANTAMOURIS** M., 2017, « Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012) », *Scientific Reports*, 7(1), p. 10973. doi:10.1038/s41598-017-11407-6

FRANÇOIS A., **GAUCHE** É., **GENIN** A., 2016, « L'adaptation des territoires aux changements climatiques dans l'Oriental marocain : la vulnérabilité entre action et perceptions », *[VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement*, 16(1).

FUNG W. Y., **LAM** K. S., **NICHOL** J., **WONG** M. S., 2009, « Derivation of Nighttime Urban Air Temperatures Using a Satellite Thermal Image », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(4), p. 863-872. doi:10.1175/2008JAMC2001.1

FÜSSEL H.-M., 2007, « Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research », *Global Environmental Change*, 17(2), p. 155-167. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002

GABRIEL K. M. A., **ENDLICHER** W. R., 2011, « Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany », *Environmental Pollution*, 159(8), p. 2044-2050. doi:10.1016/j.envpol.2011.01.016

GADE R., **MOESLUND** T. B., 2014, « Thermal cameras and applications: a survey », *Machine Vision and Applications*, 25(1), p. 245-262. doi:10.1007/s00138-013-0570-5

GÁL T., 2018, « Weather and climate modeling possibilities using local climate zone concept and observation network in Szeged, Hungary », *10th International Conference on Urban Climate*, p. 193-199.

GÁL T., **BECHTEL** B., **LELOVICS** E., 2015, « Comparison of two different Local Climate Zone mapping methods », *ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*, p. 1-6.

GARTLAND L. M., 2008, *Heat Islands : Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas.*, 1 édition, London, Routledge, 208 p. doi:10.4324/9781849771559

GASPARRINI A., **GUO** Y., **HASHIZUME** M., **LAVIGNE** E., **ZANOBETTI** A., **SCHWARTZ** J., **TOBIAS** A., **TONG** S., **ROCKLÖV** J., **FORSBERG** B., **LEONE** M., **SARIO** M. D., **BELL** M. L., **GUO** Y.-L. L., **WU** C., **KAN** H., **YI** S.-M., **COELHO** M. de S. Z. S., **SALDIVA** P. H. N., **HONDA** Y., **KIM** H., **ARMSTRONG** B., 2015, « Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study », *The Lancet*, 386(9991), p. 369-375. doi:10.1016/S0140-6736(14)62114-0

GEIGER R., 1927, *Das Klima der bodennahen Luftschicht,* Springer Vieweg Wiesbaden, F. Vieweg & sohn akt.-ges., 646 p.

GEIGER R., 1954, « Landolt-Börnstein–Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, alte Serie Vol. 3 », *Ch. Klassifikation der Klimate nach W. Köppen.–Springer, Berlin*, p. 603-607.

GELETIČ J., **LEHNERT** M., **DOBROVOLNÝ** P., 2016, « Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities », *Remote Sensing*, 8(10), p. 788. doi:10.3390/rs8100788

GERVAIS-LAMBONY PHILIPPE, 2003, *Territoires citadins : 4 villes africaines*, Paris, France, Belin, mappemonde, 271 p.

GHOBADI A., **KHOSRAVI** M., **TAVOUSI** T., 2018, « Surveying of Heat waves Impact on the Urban Heat Islands: Case study, the Karaj City in Iran », *Urban Climate*, 24, p. 600-615. doi:10.1016/j.uclim.2017.12.004

GHOUATI S., 2016, « Réflexions sur la culture et les politiques culturelles au Maroc », *Alazmina-Alhadita*, 13, p. 24-32.

GIANNAROS T. M., **MELAS** D., 2012, « Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: The case study of Thessaloniki, Greece », *Atmospheric Research*, 118, p. 103-120. doi:10.1016/j.atmosres.2012.06.006

GIL CUESTA J., **VAN LOENHOUT** J. A. F., **COLAÇO** M. da C., **GUHA-SAPIR** D., 2017, « General Population Knowledge about Extreme Heat: A Cross-Sectional Survey in Lisbon and Madrid », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(2), p. 122. doi:10.3390/ijerph14020122

GILLESPIE A., **ROKUGAWA** S., **MATSUNAGA** T., **COTHERN** J. S., **HOOK** S., **KAHLE** A. B., 1998, « A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), p. 1113-1126. doi:10.1109/36.700995

GIZ, **EURAC**, 2017, *Risk Supplement to the Vulnerability Sourcebook Guidance on how to apply the Vulnerability Sourcebook's approach with the new IPCC AR5 concept of climate risk*, Bonn: GIZ, 64 p.

GOELDNER-GIANELLA L., **HUMAIN-LAMOURE** A.-L., 2010, « Les enquêtes par questionnaire en géographie de l'environnement », *L'Espace géographique*, 39(4), p. 325-344. doi:10.3917/eg.394.0325

GÓMEZ-CANDÓN D., **VIRLET** N., **LABBÉ** S., **JOLIVOT** A., **REGNARD** J.-L., 2016, « Field phenotyping of water stress at tree scale by UAV-sensed imagery: new insights for thermal acquisition and calibration », *Precision Agriculture*, 17(6), p. 786-800. doi:10.1007/s11119-016-9449-6

GONZALEZ-DUGO V., **ZARCO-TEJADA** P., **BERNI** J. A. J., **SUÁREZ** L., **GOLDHAMER** D., **FERERES** E., 2012, « Almond tree canopy temperature reveals intra-crown variability that is water stress-dependent », *Agricultural and Forest Meteorology*, 154-155, p. 156-165. doi:10.1016/j.agrformet.2011.11.004

GOODALL T., **BOVIK** A., **PAULTER** N. G., 2015, « Tasking on Natural Statistics of Infrared Images », *IEEE Transactions on Image Processing*, 25, p. 1-1. doi:10.1109/TIP.2015.2496289

GRATTON Y., 2002, « Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale », *Institut National de la Recherche Scientifique (INRS)*, Eau-Terre-Environnement, p. 1-4.

GRENZDÖRFFER G. J., **NAUMANN** M., **NIEMEYER** F., **FRANK** A., 2015, « Symbiosis of UAS Photogrammetry and TLS for Surveying and 3D Modeling of Cultural Heritage Monuments - A Case Study about the Cathedral of ST. Nicholas in the City of Greifswald », *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1-W4, p. 91-96. doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-91-2015

GRGIĆ G., **PUŠNIK** I., 2011, « Analysis of Thermal Imagers », *International Journal of Thermophysics*, 32(1), p. 237-247. doi:10.1007/s10765-011-0932-z

GRIMMOND C. S. B., 1992, « The suburban energy balance: Methodological considerations and results for a mid-latitude west coast city under winter and spring conditions », *International Journal of Climatology*, 12(5), p. 481-497. doi:10.1002/joc.3370120506

GRIMMOND C. S. B., **ROTH** M., **OKE** T. R., **AU** Y. C., **BEST** M., **BETTS** R., **CARMICHAEL** G., **CLEUGH** H., **DABBERDT** W., **EMMANUEL** R., **FREITAS** E., **FORTUNIAK** K., **HANNA** S., **KLEIN** P., **KALKSTEIN** L. S., **LIU** C. H., **NICKSON** A., **PEARLMUTTER** D., **SAILOR** D., **VOOGT** J., 2010, « Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective) », *Procedia Environmental Sciences*, 1, p. 247-274. doi:10.1016/j.proenv.2010.09.016

GRIMMOND S., 2007, « Urbanization and Global Environmental Change: Local Effects of Urban Warming », *The Geographical Journal*, 173(1), p. 83-88.

GUARDARO M., **HONDULA** D. M., **ORTIZ** J., **REDMAN** C. L., 2022, « Adaptive capacity to extreme urban heat: The dynamics of differing narratives », *Climate Risk Management*, 35, p. 100415. doi:10.1016/j.crm.2022.100415

GUO X., **FU** D., **WANG** J., 2006, « Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City », *Atmospheric Research*, 1-2(82), p. 112-126. doi:10.1016/j.atmosres.2005.12.007

GUO X., **HUANG** G., **JIA** P., **WU** J., 2019, « Estimating Fine-Scale Heat Vulnerability in Beijing Through Two Approaches: Spatial Patterns, Similarities, and Divergence », *Remote Sensing*, 11(20), p. 2358. doi:10.3390/rs11202358

HAJAT S., **SHERIDAN** S. C., **ALLEN** M. J., **PASCAL** M., **LAAIDI** K., **YAGOUTI** A., **BICKIS** U., **TOBIAS** A., **BOURQUE** D., **ARMSTRONG** B. G., **KOSATSKY** T., 2010, « Heat–Health Warning Systems: A Comparison of the Predictive Capacity of Different Approaches to Identifying Dangerously Hot Days », *American Journal of Public Health*, 100(6), p. 1137-1144. doi:10.2105/AJPH.2009.169748

HAMMERBERG K., **BROUSSE** O., **MARTILLI** A., **MAHDAVI** A., 2018, « Implications of employing detailed urban canopy parameters for mesoscale climate modelling: a

comparison between WUDAPT and GIS databases over Vienna, Austria », *International Journal of Climatology*, 38(S1), p. e1241-e1257. doi:10.1002/joc.5447

HAMMOUDY W., **ILMEN** R., **SINAN** M., 2022, « Impact du changement climatique sur les extrêmes de températures au Maroc », *Actes du 35e colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie "Le changement climatique, les risques et l'adaptation"*, Toulouse, France, p. 1-6.

HAMSTEAD Z. A., **FARMER** C., **MCPHEARSON** T., 2018, « Landscape-Based Extreme Heat Vulnerability Assessment », *Journal of Extreme Events*, 05(04), p. 1850018. doi:10.1142/S2345737618500185

HANSEN A., **BI** P., **NITSCHKE** M., **RYAN** P., **PISANIELLO** D., **TUCKER** G., 2008, « The effect of heat waves on mental health in a temperate Australian city », *Environmental Health Perspectives*, 116(10), p. 1369-1375. doi:10.1289/ehp.11339

HARDIN A. W., **LIU** Y., **CAO** G., **VANOS** J. K., 2018, « Urban heat island intensity and spatial variability by synoptic weather type in the northeast U.S. », *Urban Climate*, 24, p. 747-762. doi:10.1016/j.uclim.2017.09.001

HARLAN S. L., **BRAZEL** A. J., **PRASHAD** L., **STEFANOV** W. L., **LARSEN** L., 2006, « Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress », *Social Science & Medicine*, 63(11), p. 2847-2863. doi:10.1016/j.socscimed.2006.07.030

HARLAN S. L., **DECLET** -Barreto Juan H., **STEFANOV** W. L., **PETITTI** D. B., 2013, « Neighborhood Effects on Heat Deaths: Social and Environmental Predictors of Vulnerability in Maricopa County, Arizona », *Environmental Health Perspectives*, 121(2), p. 197-204. doi:10.1289/ehp.1104625

HARLAN S. L., **RUDDELL** D. M., 2011, « Climate change and health in cities: impacts of heat and air pollution and potential co-benefits from mitigation and adaptation », *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3), p. 126-134. doi:10.1016/j.cosust.2011.01.001

HART M. A., **SAILOR** D. J., 2009, « Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island », *Theoretical and Applied Climatology*, 95(3), p. 397-406. doi:10.1007/s00704-008-0017-5

HASSANI N., 2017, « *La sur-urbanisation de la ville de Casablanca : étude de l'évolution spatio-temporelle de la ville de Casablanca entre 1987 et 2017* », Mémoire de recherche de master 2, Metz, France, Université de Lorraine, 48 p. https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03038454

HASSANI N., **COLLABORATEURS**, 2022, « *IATUS : Ilots de chaleur urbains, Adaptation, Territoires UrbainS (Metz/Casablanca)* », Metz, Centre de recherche en géographie LOTERR, 50 p.

HASSANI N., **DROGUE** G., 2020, « Mesure et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'aire urbaine de Metz Métropole : premiers résultats de la campagne de mesure 2019 », *Climatologie*, 17, p. 8. doi:10.1051/climat/202017008

HASSANI N., **DROGUE** G., **MANCEAU** L., 2023a, « Suivi par drone et caméra IR des effets thermiques d'une opération de désimperméabilisation et de végétalisation d'un parking urbain (Metz, France) », *Acte du 36e colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie "Climat, eau et société : changements et défis"*, Bucarest, Roumanie, p. 1-4. https://hal.science/hal-04102840v2

HASSANI N., **FRANCOIS** D., **DROGUE** G., 2022, « Modélisation statistique multicritère de l'îlot de chaleur urbain en contexte caniculaire », *Acte du 35e colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie "Le changement climatique, les risques et l'adaptation"*, Toulouse, France, p. 1-6. doi:https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03655897

HASSANI N., **LEBAUT** S., **DROGUE** G., **BOUYER** J., **CLAVERIE** R., 2023b, « Potential of ECOSTRESS data to improve UHI modeling during warm season », paper presented at the 11th International Conference on Urban Climate. Sydney, Australia. https://hal.univ-lorraine.fr/hal-04210479v1

HASSANI N., **LEBAUT** S., **DROGUE** G., **SGHIR** S., 2020, « Evolution spatio-temporelle de températures de surface diurnes dans l'aire métropolitaine de Metz à partir de données Landsat », *Acte du 33e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie "Changement climatique et Territoires"*. Rennes. France. https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02934907

HASSANI N., **LEBAUT** S., **DROGUE** G., **SGHIR** S., 2021a, « Dynamique d'urbanisation et thermographies satellitaires en milieu méditerranéen : le cas du grand Casablanca (Maroc) », *Bulletin de la Société Géographique de Liège*. doi:10.25518/0770-7576.6449

HASSANI N., **LEBAUT** S., **SGHIR** S., **DROGUE** G., 2021b, « Évaluation de l'impact sur la température de surface de certains projets emblématiques de réaménagement dans l'aire métropolitaine de Casablanca (Maroc) », *Actes du 34e colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie "Changement climatique, Pénurie des ressources en eau,nexus eau/énergie et formes d'adaptation"*, Mohammédia, Maroc, p. 234-239. https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03465525

HASSANI N., **SGHIR** S., **LEBAUT** S., **DROGUE** G., 2019, « Campagne de mesures mobiles pour caractériser l'ICU d'été de la ville de Casablanca (Maroc) », *Les ressources naturelles au Maroc "politiques de gestion et enjeux de développement"*, Casablanca, Maroc, p. 1-13. https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03140935/document

HASSANI N., **SGHIR** S., **LEBAUT** S., **DROGUE** G., 2023c, « Perceptions, practices and adaptation to heat-related risks in France and Morocco: a comparative analysis in two cities », *Cybergeo : European Journal of Geography*, p. Article en cours de révision.

HCP, 2014, *Recensement général de la population et de l'habitat 2014*, Rabat, Maroc, 29 p.

HE B.-J., 2018, « Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects », *Urban Climate*, 24, p. 26-33. doi:10.1016/j.uclim.2018.01.004

HELLEQUIN A.-P., **FLANQUART** H., **MEUR-FEREC** C., **RULLEAU** B., 2013, « Perceptions du risque de submersion marine par la population du littoral languedocien : contribution à l'analyse de la vulnérabilité côtière », *Natures Sciences Sociétés*, 21(4), p. 385-399. doi:10.1051/nss/2014002

HEMON D., **JOUGLA** E., 2004, *Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 : suivi de la mortalité (21 août - 31 décembre 2003), causes médicales des décès (1 - 20 août 2003)*, report, Institut national de la santé et de la recherche médicale(INSERM).

HEUSINKVELD B. G., **HOVE** L. W. A. van, **JACOBS** C. M. J., **STEENEVELD** G. J., **ELBERS** J. A., **MOORS** E. J., **HOLTSLAG** A. a. M., 2010, « Use of a mobile platform for assessing urban heat stress in Rotterdam », p. 433-438.

HEUSINKVELD B. G., **STEENEVELD** G. J., **VAN HOVE** L. W. A., **JACOBS** C. M. J., **HOLTSLAG** A. a. M., 2014, « Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(2), p. 677-692. doi:10.1002/2012JD019399

HIDALGO GARCÍA D., 2021, « Analysis and precision of the Terrestrial Surface Temperature using Landsat 8 and Sentinel 3 images: Study applied to the city of Granada (Spain) », *Sustainable Cities and Society*, 71, p. 102980. doi:10.1016/j.scs.2021.102980

HIDALGO J., **MASSON** V., **BAKLANOV** A., **PIGEON** G., **GIMENO** L., 2008, « Advances in Urban Climate Modeling », *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), p. 354-374. doi:10.1196/annals.1446.015

HINTZ M. J., **LUEDERITZ** C., **LANG** D. J., **VON WEHRDEN** H., 2018, « Facing the heat: A systematic literature review exploring the transferability of solutions to cope with urban heat waves », *Urban Climate*, 24, p. 714-727. doi:10.1016/j.uclim.2017.08.011

HOFFMANN H., **NIETO** H., **JENSEN** R., **GUZINSKI** R., **ZARCO-TEJADA** P., **FRIBORG** T., 2016, « Estimating evaporation with thermal UAV data and two-source energy balance models », *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), p. 697-713. doi:10.5194/hess-20-697-2016

HOLMER B., **THORSSON** S., **ELIASSON** I., 2007, « Cooling rates, sky view factors and the development of intra-urban air temperature differences », *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 89(4), p. 237-248. doi:10.1111/j.1468-0459.2007.00323.x

HOOK S. J., **CAWSE-NICHOLSON** K., **BARSI** J., **RADOCINSKI** R., **HULLEY** G. C., **JOHNSON** W. R., **RIVERA** G., **MARKHAM** B., 2020, « In-Flight Validation of the ECOSTRESS, Landsats 7 and 8 Thermal Infrared Spectral Channels Using the Lake Tahoe CA/NV and Salton Sea CA Automated Validation Sites », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(2), p. 1294-1302. doi:10.1109/TGRS.2019.2945701

HOWARD L., 1818, « *The Climate of London* », W. Phillips, sold also by J. and A. Arch, 774 p.

HULLEY G. C., **GÖTTSCHE** F. M., **RIVERA** G., **HOOK** S. J., **FREEPARTNER** R. J., **MARTIN** M. A., **CAWSE-NICHOLSON** K., **JOHNSON** W. R., 2022, « Validation and Quality Assessment of the ECOSTRESS Level-2 Land Surface Temperature and Emissivity Product », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, p. 1-23. doi:10.1109/TGRS.2021.3079879

ICHINOSE T., **SHIMODOZONO** K., **HANAKI** K., 1999, « Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo », *Atmospheric Environment*, 33, p. 3897-3909. doi:10.1016/S1352-2310(99)00132-6

IMRAN M., **MEHMOOD** A., 2020, « Analysis and mapping of present and future drivers of local urban climate using remote sensing: a case of Lahore, Pakistan », *Arabian Journal of Geosciences*, 13(6), p. 278. doi:10.1007/s12517-020-5214-2

INOSTROZA L., **PALME** M., **BARRERA** F. de la, 2016, « A Heat Vulnerability Index: Spatial Patterns of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity for Santiago de Chile », *PLOS ONE*, 11(9), p. e0162464. doi:10.1371/journal.pone.0162464

IPCC, 2001, « TAR Climate Change 2001: The Scientific Basis », Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2007a, « AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report », Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger], Geneva, Switzerland.

IPCC, 2007b, « Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat », Rapport de synthèse, Genève, Suisse.

IPCC, 2012, « Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. », Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change., Cambridge and New York: Cambridge University Press.

IPCC, 2014, « AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 », Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer]., IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC, 2018, « An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C », Synthesis Report, 630 p.

IPCC, 2022, « *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* », Summary for Policymakers, Technical Summary and Frequently Asked Questions, Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 328 p.

IPCC, 2023, « AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 », Synthesis Report.

ISSA M. A., **CHEBANA** F., **MASSELOT** P., **CAMPAGNA** C., **LAVIGNE** É., **GOSSELIN** P., **OUARDA** T. B. M. J., 2021, « A heat-health watch and warning system with extended season and evolving thresholds », *BMC Public Health*, 21(1), p. 1479. doi:10.1186/s12889-021-10982-8

JACOB D. J., **WINNER** D. A., 2009, « Effect of climate change on air quality », *Atmospheric Environment*, 43(1), p. 51-63. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.051

JACOBSON M. Z., 1998, « Studying the effects of aerosols on vertical photolysis rate coefficient and temperature profiles over an urban airshed », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D9), p. 10593-10604. doi:10.1029/98JD00287

JAUREGUI E., 1997, « Heat island development in Mexico City », *Atmospheric Environment*, 31(22), p. 3821-3831. doi:10.1016/S1352-2310(97)00136-2

JAVEAU C., 1997, « *L'enquête par questionnaire : Manuel à l'usage du praticien* », Université de Bruxelles, 158 p.

JENSEN A. M., **MCKEE** M., **CHEN** Y., 2014, « Procedures for processing thermal images using low-cost microbolometer cameras for small unmanned aerial systems », *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, p. 2629-2632. doi:10.1109/IGARSS.2014.6947013

JENSEN A. M., **NEILSON** B. T., **MCKEE** M., **CHEN** Y., 2012, « Thermal remote sensing with an autonomous unmanned aerial remote sensing platform for surface stream temperatures », *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, p. 5049-5052. doi:10.1109/IGARSS.2012.6352476

JIMENEZ-MUNOZ J. C., **CRISTOBAL** J., **SOBRINO** J. A., **SORIA** G., **NINYEROLA** M., **PONS** X., 2009, « Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1), p. 339-349. doi:10.1109/TGRS.2008.2007125

JIMÉNEZ-MUÑOZ J. C., **SOBRINO** J. A., 2003, « A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22). doi:10.1029/2003JD003480

JIMENEZ-MUNOZ J. C., **SOBRINO** J. A., 2010, « A Single-Channel Algorithm for Land-Surface Temperature Retrieval From ASTER Data », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(1), p. 176-179. doi:10.1109/LGRS.2009.2029534

JIMÉNEZ-MUÑOZ J. C., **SOBRINO** J. A., **GILLESPIE** A., **SABOL** D., **GUSTAFSON** W. T., 2006, « Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI », *Remote Sensing of Environment*, 103(4), p. 474-487. doi:10.1016/j.rse.2006.04.012

JIMENEZ-MUNOZ J.-C., **SOBRINO** J. A., 2008, « Split-Window Coefficients for Land Surface Temperature Retrieval From Low-Resolution Thermal Infrared Sensors », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(4), p. 806-809. doi:10.1109/LGRS.2008.2001636

JIN M., **SHEPHERD** J. M., **ZHENG** W., 2011, « Urban Surface Temperature Reduction via the Urban Aerosol Direct Effect: A Remote Sensing and WRF Model Sensitivity Study », *Advances in Meteorology*, 2010, p. e681587. doi:10.1155/2010/681587

JOHNSON A., **O'BRIEN** J. J., 1973, « A Study of an Oregon Sea Breeze Event », *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, 12(8), p. 1267-1283.

JOHNSON D. P., **STANFORTH** A., **LULLA** V., **LUBER** G., 2012, « Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data », *Applied Geography*, 35(1), p. 23-31. doi:10.1016/j.apgeog.2012.04.006

JOHNSON D. P., **WILSON** J. S., 2009, « The socio-spatial dynamics of extreme urban heat events: The case of heat-related deaths in Philadelphia », *Applied Geography*, 29(3), p. 419-434. doi:10.1016/j.apgeog.2008.11.004

JOLIVOT A., **GOMEZ-CANDON** D., **LABBE** S., **VIRLET** N., **REGNARD** J.-L., 2017, « Acquisition d'images thermiques par drone : corrections radiométriques à partir de données terrain », C*olloque : scientifique drones er moyens légers aéroportés d'observation*, Montpelier, France, doi:10.13140/2.1.4789.3763

JOLIVOT A., **GOMEZ-CANDON** D., **SYLVAIN** L., **VIRLET** N., **REGNARD** J. L., 2014, *Acquisition d'images thermiques par drone : corrections radiométriques à partir de données terrain*, *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 213(2017), 213-214, 1-7, https://doi.org/10.52638/rfpt.2017.194

JOUGLA R., **HIDALGO** J., 2018, « Fiche introductive à la classification par Types de Temps Sensibles Metz », Projet de recherche ANR-MApUCE 1-35.

JOUMADY K., 1999, « Urbanisation et disparités spatiales au Maroc », *Méditerranée*, 91(1), p. 93-100. doi:10.3406/medit.1999.3091

JOUVET G., **WEIDMANN** Y., **KNEIB** M., **DETERT** M., **SEGUINOT** J., **SAKAKIBARA** D., **SUGIYAMA** S., 2018, « Short-lived ice speed-up and plume water flow captured by a VTOL UAV give insights into subglacial hydrological system of Bowdoin Glacier », *Remote Sensing of Environment*, 217, p. 389-399. doi:10.1016/j.rse.2018.08.027

KALKSTEIN L. S., **GREENE** J. S., 1997, « An evaluation of climate/mortality relationships in large U.S. cities and the possible impacts of a climate change. », *Environmental Health Perspectives*, 105(1), p. 84-93. doi:10.1289/ehp.9710584

KALKSTEIN L. S., **JAMASON** P. F., **GREENE** J. S., **LIBBY** J., **ROBINSON** L., 1996, « The Philadelphia Hot Weather–Health Watch/Warning System: Development and Application, Summer 1995 », *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(7), p. 1519-1528. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<1519:TPHWHW>2.0.CO;2

KALOUSTIAN N., **BECHTEL** B., 2016, « Local Climatic Zoning and Urban Heat Island in Beirut », *Procedia Engineering*, 169, p. 216-223. doi:10.1016/j.proeng.2016.10.026

KASTENDEUCH P., 2022, *Climatologie urbaine à Strasbourg, îlot de chaleur nocturne et confort thermique : de la mesure à la modélisation*, Thèse HDR, Strasbourg, France, Université de Strasbourg, 151 p.

KASTENDEUCH P., **NAJJAR** G., **LACARRERE** P., **COLIN** J., 2010, « Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg », *Climatologie*, Volume 7. doi:10.4267/climatologie.361

KEATINGE W. R., **COLESHAW** S. R. K., **EASTON** J. C., **COTTER** F., **MATTOCK** M. B., **CHELLIAH** R., 1986, « Increased platelet and red cell counts, blood viscosity, and plasma cholesterol levels during heat stress, and mortality from coronary and cerebral thrombosis », *The American Journal of Medicine*, 81(5), p. 795-800. doi:10.1016/0002-9343(86)90348-7

KELLY J., **EKLUNDH** L., **KLJUN** N., 2018, « Radiometric calibration of a UAV thermal camera », *Engineering, Environmental Science,*

https://www.semanticscholar.org/paper/Radiometric-calibration-of-a-UAV-thermal-camera-Kelly-Eklundh/3c00560ae50c9c34187904dcb01af863a7c3088c?p2df.

KELLY J., **KLJUN** N., **OLSSON** P.-O., **MIHAI** L., **LILJEBLAD** B., **WESLIEN** P., **KLEMEDTSSON** L., **EKLUNDH** L., 2019, « Challenges and Best Practices for Deriving Temperature Data from an Uncalibrated UAV Thermal Infrared Camera », *Remote Sensing*, 11(5), p. 567. doi:10.3390/rs11050567

KENNY G. P., **POIRIER** M. P., **METSIOS** G. S., **BOULAY** P., **DERVIS** S., **FRIESEN** B. J., **MALCOLM** J., **SIGAL** R. J., **SEELY** A. J. E., **FLOURIS** A. D., 2017, « Hyperthermia and cardiovascular strain during an extreme heat exposure in young versus older adults », *Temperature (Austin, Tex.)*, 4(1), p. 79-88. doi:10.1080/23328940.2016.1230171

KIM S. W., **BROWN** R. D., 2021, « Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review », *Science of The Total Environment*, 779, p. 146389. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146389

KJELLSTROM T., **LEMKE** B., **HYATT** O., **OTTO** M., 2014, « Climate change and occupational health: A South African perspective », *South African Medical Journal*, 104(8), p. 586-586.

KLEIN R. J. T., **NICHOLLS** R. J., **THOMALLA** F., 2003, « Resilience to natural hazards: How useful is this concept? », *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 5(1), p. 35-45. doi:10.1016/j.hazards.2004.02.001

KLEIN ROSENTHAL J., **KINNEY** P. L., **METZGER** K. B., 2014, « Intra-urban vulnerability to heat-related mortality in New York City, 1997–2006 », *Health & Place*, 30, p. 45-60. doi:10.1016/j.healthplace.2014.07.014

KLINENBERG E., 2002, *Heat Wave*, University of Chicago Press, 328 p.

KLINENBERG E., 2003, « Review of heat wave: social autopsy of disaster in Chicago », *The New England Journal of Medicine*, 348(7), p. 666-667. doi:10.1056/NEJM200302133480721

KŁYSIK K., 1996, « Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heat emissions in Lodz, Poland », *Atmospheric Environment*, 30(20), p. 3397-3404. doi:10.1016/1352-2310(96)00043-X

KOLOKOTRONI M., **GIRIDHARAN** R., 2008, « Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer », *Solar Energy*, 82(11), p. 986-998. doi:10.1016/j.solener.2008.05.004

KONINCKX G., **TENEAU** G., 2010, « Chapitre 1. La résilience : un nouveau concept », *in Résilience organisationnelle*, Louvain-la-Neuve, De Boeck Supérieur, Manager RH, p. 20-59.

KONSTANTINOV P., **VARENTSOV** M., **ESAU** I., 2018, « A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic », *Environmental Research Letters*, 13(7), p. 075007. doi:10.1088/1748-9326/aacb84

KÖPPEN W., 1900, « Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt », *Geographische Zeitschrift*, 6(11), p. 593-611.

KOTHARKAR R., **GHOSH** A., 2022, « Progress in extreme heat management and warning systems: A systematic review of heat-health action plans (1995-2020) », *Sustainable Cities and Society*, 76, p. 103487. doi:10.1016/j.scs.2021.103487

KOTZEN B., 2003, « An investigation of shade under six different tree species of the Negev desert towards their potential use for enhancing micro-climatic conditions in landscape architectural development », *Journal of Arid Environments*, 55(2), p. 231-274. doi:10.1016/S0140-1963(03)00030-2

KRIGE D. G., 2015, « *A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand* », Master's thesis of the University of Witwatersrand.

KRUSCHE P. M., **ALTHAUS** D., **GABRIEL** I., 1982, *Ökologisches Bauen*, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, Bauverlag GmbH, Wiesbaden & Berlin, Umweltbundesamt, 360 p
KUBIAK Y., **SERRE** O., 2010, « Restructurations militaires dans la zone d'emploi de Metz : une évaluation pour la reconversion des personnels - Economie Lorraine - 203 | Insee », *Insee*.

KUENZER C., **HEIMHUBER** V., **HUTH** J., **DECH** S., 2019, « Remote Sensing for the Quantification of Land Surface Dynamics in Large River Delta Regions—A Review », *Remote Sensing*, 11(17), p. 1985. doi:10.3390/rs11171985

LAAIDI K., **UNG** A., **WAGNER** V., **BEAUDEAU** P., **PASCAL** M., 2012, « Système d'alerte canicule et santé : principes, fondements et évaluation », Institut de Veille Sanitaire.

LACHGAR R., **BADRI** W., **CHLAIDA** M., 2022, « Assessment of future changes in downscaled temperature and precipitation over the Casablanca-Settat region (Morocco) », *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), p. 2123-2133. doi:10.1007/s40808-021-01213-5

LAGELOUZE T., 2022, « Comparaison de méthodes d'évaluation statistiques de la vulnérabilité sociale à la hausse de la chaleur en milieu urbain : application aux métropoles de Toulouse, Grenoble, Lyon et Paris », Mémoire de Master 2, Université Grenoble Alpes - Institut d'urbanisme et de géographie alpine.

LANDSBERG H. E., 1981, *The Urban Climate*, Academic Press, 289 p.

LAREAU F., **BAUDOUIN** Y., 2015, « Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la chaleur dans l'agglomération de Montréal », *Canadian Geographies / Géographies canadiennes*, 59(2), p. 234-245. doi:10.1111/cag.12166

LASSERRE G., 1983, « « Terres de bonne espérance le monde tropical » de Pierre Gourou », *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 36(141), p. 5-18. doi:10.3406/caoum.1983.3049

LAU N.-C., **NATH** M. J., 2012, « A Model Study of Heat Waves over North America: Meteorological Aspects and Projections for the Twenty-First Century », *Journal of Climate*, 25(14), p. 4761-4784. doi:10.1175/JCLI-D-11-00575.1

LEBAUT S., **HASSANI** N., **DROGUE** G., 2021, « Mesure et détection des îlots de chaleur et de fraîcheur en milieu tempéré semi-continental », *Actes du 34e colloque annuel de*

l'Association Internationale de Climatologie "Changement climatique, Pénurie des ressources en eau, nexus eau/énergie et formes d'adaptation", Mohammédia, Maroc, p. 299-304. doi:HAL Id: hal-03465195

LEBAUT S., **HASSANI** N., **DROGUE** G., 2022, « Exploration des variations thermiques diurnes dans une aire urbaine de milieu tempéré semi-continental à l'aide des données de température de surface terrestre ECOSTRESS », *Actes du 35e colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie "Le changement climatique, les risques et l'adaptation"*, Toulouse, France, p. 27-32. https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03657098v2/document

LECONTE F., 2014, *Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy*, Thèse de doctorat, Nancy, France, Université de Lorraine, 241 p.

LECONTE F., **BOUYER** J., **CLAVERIE** R., **PÉTRISSANS** M., 2015a, « Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements », *Building and Environment*, 83, p. 39-49. doi:10.1016/j.buildenv.2014.05.005

LECONTE F., **BOUYER** J., **CLAVERIE** R., **PÉTRISSANS** M., 2015b, « Estimation of spatial air temperature distribution at sub-mesoclimatic scale using the LCZ scheme and mobile measurements », *ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*, p. 1-5.

LEE S., **LEE** H., **MYUNG** W., **KIM** E. J., **KIM** H., 2018, « Mental disease-related emergency admissions attributable to hot temperatures », *The Science of the Total Environment*, 616-617, p. 688-694. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.10.260

LEE S.-H., **SONG** C.-K., **BAIK** J.-J., **PARK** S.-U., 2009, « Estimation of anthropogenic heat emission in the Gyeong-In region of Korea », *Theoretical and Applied Climatology*, 96(3), p. 291-303. doi:10.1007/s00704-008-0040-6

LEHNERT M., **SAVIĆ** S., **MILOŠEVIĆ** D., **DUNJIĆ** J., **GELETIČ** J., 2021, « Mapping Local Climate Zones and Their Applications in European Urban Environments: A Systematic Literature Review and Future Development Trends », *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), p. 260. doi:10.3390/ijgi10040260

LEICHENKO R., 2011, « Climate change and urban resilience », *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3), p. 164-168. doi:10.1016/j.cosust.2010.12.014

LELOVICS E., **UNGER** J., **GÁL** T., **GÁL** C. V., 2014, « Design of an urban monitoring network based on Local Climate Zone mapping and temperature pattern modelling », *Climate Research*, 60(1), p. 51-62. doi:10.3354/cr01220

LEMONSU A., **VIGUIÉ** V., **DANIEL** M., **MASSON** V., 2015, « Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France) », *Urban Climate*, 14, p. 586-605. doi:10.1016/j.uclim.2015.10.007

LENG F., **TAN** C. M., **PECHT** M., 2015, « Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature », *Scientific Reports*, 5, p. 12967. doi:10.1038/srep12967

LEON P., **CROUZET** F., **GASCON** R., 1972, *L'industrialisation en Europe au XIXe siècle: cartographie et typologie, Lyon, 7-10, octobre 1970*, Éditions du Centre national de la recherche scientifique, 636 p.

LEONARD D., **ROSSIGNOL** J.-L., 1997, *La Moselle et son climat*, Metz, Editions Serpenoise.

LEONE F., **VINET** F., 2006, « La vulnérabilité, un concept fondamental au coeur des méthodes d'évaluation des risques naturels », *in* Leone F., Vinet F. (dir.), *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles : analyses géographiques*, Service des publications de Montpellier 3, p. 9-25.

LI D., **BOU-ZEID** E., **OPPENHEIMER** M., 2014, « The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies », *Environmental Research Letters*, 9(5), p. 055002. doi:10.1088/1748-9326/9/5/055002

LI D., **BOU-ZEID** E. R., 2013, « Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: The impact in cities is larger than the sum of its parts », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), p. 2051-2064. doi:10.1175/JAMC-D-13-02.1

LI D., **YAN** S., **CHEN** G., 2023, « Effects of Urban Redevelopment on Surface Urban Heat Island », *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, p. 2366-2373. doi:10.1109/JSTARS.2023.3245826

LI H., **MEIER** F., **LEE** X., **CHAKRABORTY** T., **LIU** J., **SCHAAP** M., **SODOUDI** S., 2018, « Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin », *Science of The Total Environment*, 636, p. 818-828. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.04.254

LI X., **XIAO** J., **FISHER** J. B., **BALDOCCHI** D. D., 2021, « ECOSTRESS estimates gross primary production with fine spatial resolution for different times of day from the International Space Station », *Remote Sensing of Environment*, 258, p. 112360. doi:10.1016/j.rse.2021.112360

LI Z.-L., **BECKER** F., 1990, « Properties and comparison of temperature-independent thermal infrared spectral indices with NDVI for HAPEX data », *Remote Sensing of Environment*, 33(3), p. 165-182. doi:10.1016/0034-4257(90)90028-K

LI Z.-L., **TANG** B.-H., **WU** H., **REN** H., **YAN** G., **WAN** Z., **TRIGO** I. F., **SOBRINO** J. A., 2013, « Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives », *Remote Sensing of Environment*, 131, p. 14-37. doi:10.1016/j.rse.2012.12.008

LI Z.-L., **WU** H., **DUAN** S.-B., **ZHAO** W., **REN** H., **LIU** X., **LENG** P., **TANG** R., **YE** X., **ZHU** J., **SUN** Y., **SI** M., **LIU** M., **LI** J., **ZHANG** X., **SHANG** G., **TANG** B.-H., **YAN** G., **ZHOU** C., 2023, « Satellite Remote Sensing of Global Land Surface Temperature: Definition, Methods, Products, and Applications », *Reviews of Geophysics*, 61(1), p. e2022RG000777. doi:10.1029/2022RG000777

LIN Z., **HUILI** G., **XIAOJUAN** L., **YAOMING** S., **LINGLING** J., 2009, « Research on driving factors of land subsidence with remote sensing technology », *2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2, p. II-396-II-399. doi:10.1109/IGARSS.2009.5418098

LITIFU P., 2021, « *La thermographie par drone, un outil d'aide à la réhabilitation urbaine. L'exemple des Zones d'Activités Économiques de Metz-Métropole (Base Vie Frescaty)* », Mémoire de master 2 Urbanisme et Aménagement parours INTER, Metz, Université de Lorraine, Metz, France, 58 p.

LIU L., **LIN** Y., **LIU** J., **WANG** L., **WANG** D., **SHUI** T., **CHEN** X., **WU** Q., 2017a, « Analysis of local-scale urban heat island characteristics using an integrated method of mobile measurement and GIS-based spatial interpolation », *Building and Environment*, 117, p. 191-207. doi:10.1016/j.buildenv.2017.03.013

LIU L., **LIN** Y., **LIU** J., **WANG** L., **WANG** D., **SHUI** T., **CHEN** X., **WU** Q., 2017b, « Analysis of local-scale urban heat island characteristics using an integrated method of mobile measurement and GIS-based spatial interpolation », *Building and Environment*, 117, p. 191-207. doi:10.1016/j.buildenv.2017.03.013

LIU L., **LIU** J., **LIN** Y., 2016, « Spatial-temporal Analysis of the Urban Heat Island of a Subtropical City by Using Mobile Measurement », *Procedia Engineering*, 169, p. 55-63. doi:10.1016/j.proeng.2016.10.007

LIU X., **TANG** B.-H., **YAN** G., **LI** Z.-L., **LIANG** S., 2019, « Retrieval of Global Orbit Drift Corrected Land Surface Temperature from Long-term AVHRR Data », *Remote Sensing*, 11(23), p. 2843. doi:10.3390/rs11232843

LIU Z., **ZHENG** S., **ZHAO** L., 2018, « Evaluation of the ENVI-Met Vegetation Model of Four Common Tree Species in a Subtropical Hot-Humid Area », *Atmosphere*, 9(5), p. 198. doi:10.3390/atmos9050198

LOPEZ-CABEZA V. P., **ALZATE-GAVIRIA** S., **DIZ-MELLADO** E., **RIVERA-GOMEZ** C., **GALAN-MARIN** C., 2022, « Albedo influence on the microclimate and thermal comfort of courtyards under Mediterranean hot summer climate conditions », *Sustainable Cities and Society*, 81, p. 103872. doi:10.1016/j.scs.2022.103872

LOWRY W. P., 1977, « Empirical Estimation of Urban Effects on Climate: A Problem Analysis », *Journal of Applied Meteorology*, 16(2), p. 129-135. doi:10.1175/1520-0450(1977)016<0129:EEOUEO>2.0.CO;2

MADELIN M., **DUPUIS** V., 2020, « Intensité et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain parisien à partir de données participatives », *Climatologie*, 17, p. 9. doi:10.1051/climat/202017009

MADELIN M. H., 2004, *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : modélisations spatiales aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air*, Thèse de doctorat, Paris 7, Paris, France, 301 p.

MARKHAM B., **BARSI** J., **KVARAN** G., **ONG** L., **KAITA** E., **BIGGAR** S., **CZAPLA-MYERS** J., **MISHRA** N., **HELDER** D., 2014, « Landsat-8 Operational Land Imager Radiometric Calibration and Stability », *Remote Sensing*, 6(12), p. 12275-12308. doi:10.3390/rs61212275

MARQUES E., 2023, *Etude à fine échelle de l'îlot de chaleur urbain par modélisation bayésienne à partir de données opportunes*, Thèse de doctorat, Toulouse, France, Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP), 146 p.

MARQUES E., **MASSON** V., **NAVEAU** P., **MESTRE** O., **DUBREUIL** V., **RICHARD** Y., 2022, « Cartographie de l'îlot de chaleur urbain grâce aux thermomètres embarqués dans les voitures connectées : cas à Toulouse et Dijon », *35ème colloque de l'association internationale de climatologie, Le changement climatique, les risques et l'adaptation*, 2, p. 188-193.

MARQUÈS E., **MASSON** V., **NAVEAU** P., **MESTRE** O., **DUBREUIL** V., **RICHARD** Y., 2022, « Urban Heat Island Estimation from Crowdsensing Thermometers Embedded in Personal Cars », *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(4), p. E1098-E1113. doi:10.1175/BAMS-D-21-0174.1

MARTILLI A., 2007, « Current research and future challenges in urban mesoscale modelling », *International Journal of Climatology*, 27(14), p. 1909-1918. doi:10.1002/joc.1620

MARTINEZ G. S., **LINARES** C., **AYUSO** A., **KENDROVSKI** V., **BOECKMANN** M., **DIAZ** J., 2019, « Heat-health action plans in Europe: Challenges ahead and how to tackle them », *Environmental Research*, 176, p. 108548. doi:10.1016/j.envres.2019.108548

MARZOLFF I., 2022, « Historical developments of UAV use in environmental sciences. », *in Unmanned Aerial Vehicles in Environmental Sciences – Principles, Developments, and Applications.*, wbg Academic, p. 12-24.

MASATO G., **BONE** A., **CHARLTON-PEREZ** A., **CAVANY** S., **NEAL** R., **DANKERS** R., **DACRE** H., **CARMICHAEL** K., **MURRAY** V., 2015, « Improving the Health Forecasting Alert System for Cold Weather and Heat-Waves In England: A Proof-of-Concept Using Temperature-Mortality Relationships », *PLOS ONE*, 10(10), p. e0137804. doi:10.1371/journal.pone.0137804

MASON J., 2002, *Qualitative Researching*, 2e édition, Sage Publications Ltd, 223 p.

MASSON V., **GOMES** L., **PIGEON** G., **LIOUSSE** C., **PONT** V., **LAGOUARDE** J.-P., **VOOGT** J., **SALMOND** J., **OKE** T. R., **HIDALGO** J., **LEGAIN** D., **GARROUSTE** O., **LAC** C., **CONNAN** O., **BRIOTTET** X., **LACHÉRADE** S., **TULET** P., 2008, « The Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer (CAPITOUL) experiment », *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102, p. 135-157. doi:DOI 10.1007/s00703-008-0289-4

MATESE A., 2022, « Comparing UAV to other remote sensing techniques », *in Thermal infrared. In UAVs for the Environmental Sciences - Methods and Applications. Eds.*, wbg Academic, p. 26-36.

MAYNARD-MOODY S., **MUSHENO** M., 2003, *Cops, Teachers, Counselors: Stories from the Front Lines of Public Service*, University of Michigan Press. doi:10.3998/mpub.11924

MAYRHUBER E. A.-S., **DÜCKERS** M. L. A., **WALLNER** P., **ARNBERGER** A., **ALLEX** B., **WIESBÖCK** L., **WANKA** A., **KOLLAND** F., **EDER** R., **HUTTER** H.-P., **KUTALEK** R., 2018, « Vulnerability to heatwaves and implications for public health interventions - A scoping review », *Environmental Research*, 166, p. 42-54. doi:10.1016/j.envres.2018.05.021

MCADIE A., 1885, « Atmospheric Electricity at High Altitudes », *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 21, p. 129-134. doi:10.2307/25129810

McMillin L. M., 1975, « Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption », *Journal of Geophysical Research*, 80(36), p. 5113-5117. doi:10.1029/JC080i036p05113

Meier F., **Scherer** D., **Richters** J., **Christen** A., 2011, « Atmospheric correction of thermal-infrared imagery of the 3-D urban environment acquired in oblique viewing geometry », *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(5), p. 909-922. doi:10.5194/amt-4-909-2011

Menut L., 1997, *Etude expérimentale et théorique de la couche limite Atmosphérique en agglomération Parisienne*, Thèse de doctorat, Paris, France, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 213 p.

Mercier D., 2013, *Les drones aériens : passé, présent et avenir ; approche globale*, Paris, La Documentation française, Stratégie aérospatiale, 1 vol. (706 p.) p.

Mestayer P. G., **Anquetin** S., 1995, « Climatology of Cities », *in* Gyr A., Rys F.-S. (dir.), *Diffusion and Transport of Pollutants in Atmospheric Mesoscale Flow Fields*, Dordrecht, Springer Netherlands, ERCOFTAC Series, p. 165-189. doi:10.1007/978-94-015-8547-7_7

Mestayer P. G., **Durand** P., **Augustin** P., **Bastin** S., **Bonnefond** J.-M., **Bénech** B., **Campistron** B., **Coppalle** A., **Delbarre** H., **Dousset** B., **Drobinski** P., **Druilhet** A., **Fréjafon** E., **Grimmond** C. S. B., **Groleau** D., **Irvine** M., **Kergomard** C., **Kermadi** S., **Lagouarde** J.-P., **Lemonsu** A., **Lohou** F., **Long** N., **Masson** V., **Moppert** C., **Noilhan** J., **Offerle** B., **Oke** T. R., **Pigeon** G., **Puygrenier** V., **Roberts** S., **Rosant** J.-M., **Sanïd** F., **Salmond** J., **Talbaut** M., **Voogt** J., 2005, « The urban boundary-layer field campaign in marseille (ubl/clu-escompte): set-up and first results », *Boundary-Layer Meteorology*, 114(2), p. 315-365. doi:10.1007/s10546-004-9241-4

Meteo France, 2021, « Météo-France éclaire le climat en France jusqu'en 2100 », *Météo France*, https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/meteo-france-eclaire-le-climat-en-france-jusquen-2100.

Michel V., 2007, *Les mécanismes de la vulnérabilité à la chaleur : implication des stress systémique et cellulaire.*, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, Lyon, France, 194 p.

Middel A., **Lukasczyk** J., **Maciejewski** R., **Demuzere** M., **Roth** M., 2018, « Sky View Factor footprints for urban climate modeling », *Urban Climate*, 25, p. 120-134. doi:10.1016/j.uclim.2018.05.004

Miller A., 2002, *Subset Selection in Regression*, CRC Press, 258 p.

Mishra P., **Pandey** C. M., **Singh** U., **Gupta** A., **Sahu** C., **Keshri** A., 2019, « Descriptive Statistics and Normality Tests for Statistical Data », *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(1), p. 67-72. doi:10.4103/aca.ACA_157_18

Morakinyo T. E., **Lam** Y. F., 2016, « Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal

comfort », *Building and Environment*, 103, p. 262-275. doi:10.1016/j.buildenv.2016.04.025

MORANGE M., **SCHMOLL** C., 2016, *Les outils qualitatifs en géographie. Méthodes et applications*, Armand Colin, 224 p.

MORINI E., **TOUCHAEI** A. G., **CASTELLANI** B., **ROSSI** F., **COTANA** F., 2016, « The Impact of Albedo Increase to Mitigate the Urban Heat Island in Terni (Italy) Using the WRF Model », *Sustainability*, 8(10), p. 999. doi:10.3390/su8100999

MUKHERJEE F., **SINGH** D., 2020, « Assessing Land Use–Land Cover Change and Its Impact on Land Surface Temperature Using LANDSAT Data: A Comparison of Two Urban Areas in India », *Earth Systems and Environment*, 4(2), p. 385-407. doi:10.1007/s41748-020-00155-9

MULLER C. L., **CHAPMAN** L., **GRIMMOND** C. S. B., **YOUNG** D. T., **CAI** X., 2013a, « Sensors and the city: a review of urban meteorological networks », *International Journal of Climatology*, 33(7), p. 1585-1600. doi:10.1002/joc.3678

MULLER C. L., **CHAPMAN** L., **GRIMMOND** C. S. B., **YOUNG** D. T., **CAI** X.-M., 2013b, « Toward a Standardized Metadata Protocol for Urban Meteorological Networks », *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(8), p. 1161-1185. doi:10.1175/BAMS-D-12-00096.1

MUSHKIN A., **BALICK** L. K., **GILLESPIE** A. R., 2005, « Extending surface temperature and emissivity retrieval to the mid-infrared (3–5 μm) using the Multispectral Thermal Imager (MTI) », *Remote Sensing of Environment*, 98(2), p. 141-151. doi:10.1016/j.rse.2005.06.003

MUSHORE T. D., **DUBE** T., **MANJOWE** M., **GUMINDOGA** W., **CHEMURA** A., **ROUSTA** I., **ODINDI** J., **MUTANGA** O., 2019, « Remotely sensed retrieval of Local Climate Zones and their linkages to land surface temperature in Harare metropolitan city, Zimbabwe », *Urban Climate*, 27, p. 259-271. doi:10.1016/j.uclim.2018.12.006

NAJJAR G., 2006, *Etudes méso-climatiques en milieu hétérogène : de la moyenne montagne à la ville*, HDR, Strasbourg, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.

NAJJAR G., 2007, « Mesures et modélisations en climatologie dans les milieux complexes », *Journées de climatologie. Climat et société : mesures et modèles*, p. 11-25.

NAJJAR G., **KASTENDEUCH** P. P., **STOLL** M.-P., **COLIN** J.-R., **NERRY** F., **RINGENBACH** N., **BERNARD** J., **HATTEN** A. de, **LUHAHE** R., **VIVILLE** D., 2004, « Le projet Reclus - Télédétection, rayonnement et bilan d'énergie en climatologie urbaine à Strasbourg », *La Météorologie*, 46, p. 44-50. doi:10.4267/2042/36060

NASEHI S., **YAVARI** A., **SALEHI** E., **EMMANUEL** R., 2022, « Role of local climate zone and space syntax on land surface temperature (case study: Tehran) », *Urban Climate*, 45, p. 101245. doi:10.1016/j.uclim.2022.101245

NAUGHTON J., **MCDONALD** W., 2019, « Evaluating the Variability of Urban Land Surface Temperatures Using Drone Observations », *Remote Sensing*, 11(14), p. 1722. doi:10.3390/rs11141722

NAVAS-MARTÍN M. Á., **LÓPEZ-BUENO** J. A., **ASCASO-SÁNCHEZ** M. S., **SARMIENTO-SUÁREZ** R., **FOLLOS** F., **VELLÓN** J. M., **MIRÓN** I. J., **LUNA** M. Y., **SÁNCHEZ-MARTÍNEZ** G., **CULQUI** D., **LINARES** C., **DÍAZ** J., 2022, « Gender differences in adaptation to heat in Spain (1983–2018) », *Environmental Research*, 215, p. 113986. doi:10.1016/j.envres.2022.113986

NAYAK S. G., **SHRESTHA** S., **KINNEY** P. L., **ROSS** Z., **SHERIDAN** S. C., **PANTEA** C. I., **HSU** W. H., **MUSCATIELLO** N., **HWANG** S. A., 2018, « Development of a heat vulnerability index for New York State », *Public Health*, 161, p. 127-137. doi:10.1016/j.puhe.2017.09.006

NCCEH, 2010, « Conseils concernant la chaleur : populations vulnérables », Vancouver, Canada, https://ccnse.ca/resources/evidence-briefs/archive-conseils-concernant-la-chaleu-populations-vulnerables.

NEMANI R., **PIERCE** L., **RUNNING** S., **GOWARD** S., 1993, « Developing Satellite-derived Estimates of Surface Moisture Status », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 32(3), p. 548-557. doi:10.1175/1520-0450(1993)032<0548:DSDEOS>2.0.CO;2

NEUWIRTH K., **DUNWOODY** S., **GRIFFIN** R. J., 2000, « Protection Motivation and Risk Communication », *Risk Analysis*, 20(5), p. 721-734. doi:10.1111/0272-4332.205065

NFAOUI H., 2004, *Caractéristiques du gisement éolien marocain et optimisation d'un système aérogénérateur/groupe électrogène pour l'électrification des villages isolés*, Thèse de doctorat, Rabat, Maroc, Université Mohammed V, 352 p.

NICHOLSON S. E., 1975, « A pollution model for street-level air », *Atmospheric Environment (1967)*, 9(1), p. 19-31. doi:10.1016/0004-6981(75)90051-7

NITSCHKE M., **HANSEN** A., **BI** P., **PISANIELLO** D., **NEWBURY** J., **KITSON** A., **TUCKER** G., **AVERY** J., **DAL GRANDE** E., 2013, « Risk factors, health effects and behaviour in older people during extreme heat: a survey in South Australia », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(12), p. 6721-6733. doi:10.3390/ijerph10126721

OCDE, 2018, *Diagnostic d'intégrité au Maroc : Mettre en œuvre des politiques d'intégrité pour renforcer la confiance*, Examens de l'OCDE sur la gouvernance publique, 204 p.

OKE T., 2004, « Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites », 1250 (WMO/TD), World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland.

OKE T., 2006, « Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites », *WMO/TD- No. 1250; IOM Report- No. 81*, WMO.

OKE T. R., 1973, « CITY SIZE AND THE URBAN HEAT ISLAND », *Atmospheric Environment PergamonPres*, Vol. 7, p. 11.

OKE T. R., 1976, « The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands », *Atmosphere*, 14(4), p. 268-277. doi:10.1080/00046973.1976.9648422

OKE T. R., 1981, « Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations », *Journal of Climatology*, 1(3), p. 237-254. doi:10.1002/joc.3370010304

OKE T. R., 1982, « The energetic basis of the urban heat island », *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), p. 1-24. doi:10.1002/qj.49710845502

OKE T. R., 1987, *Boundary Layer Climates*, Londres, Psychology Press, édition 2, 460 p.

OKE T. R., 1988, « Street design and urban canopy layer climate », *Energy and Buildings*. doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6

OKE T. R., **MILLS** G., **CHRISTEN** A., **VOOGT** J. A., 2017, *Urban Climates*, Cambridge, Cambridge University Press. doi:10.1017/9781139016476

OKE T. R., **SPRONKEN-SMITH** R. A., **JÁUREGUI** E., **GRIMMOND** C. S. B., 1999, « The energy balance of central Mexico City during the dry season », *Atmospheric Environment*, 33(24), p. 3919-3930. doi:10.1016/S1352-2310(99)00134-X

OLIVO Y., **HAMIDI** A., **RAMAMURTHY** P., 2017, « Spatiotemporal variability in building energy use in New York City », *Energy*, 141, p. 1393-1401. doi:10.1016/j.energy.2017.11.066

O'MALLEY C., **KIKUMOTO** H., 2022, « An investigation into heat storage by adopting local climate zones and nocturnal-diurnal urban heat island differences in the Tokyo Prefecture », *Sustainable Cities and Society*, 83, p. 103959. doi:10.1016/j.scs.2022.103959

OZESMI S. L., **BAUER** M. E., 2002, « Satellite remote sensing of wetlands », *Wetlands Ecology and Management*, 10(5), p. 381-402. doi:10.1023/A:1020908432489

PABIAN F., 2015, « Commercial Satellite Imagery as an Evolving Open-Source Verification Technology: Emerging Trends and Their Impact for Nuclear Nonproliferation Analysis », EUR 27687, Luxembourg (Luxembourg), Publications Office of the European Union. doi:10.2789/933810

PANDEY P., **KUMAR** D., **PRAKASH** A., **MASIH** J., **SINGH** M., **KUMAR** S., **JAIN** V. K., **KUMAR** K., 2012, « A study of urban heat island and its association with particulate matter during winter months over Delhi », *Science of The Total Environment*, 414, p. 494-507. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.10.043

PARK C., **HA** J., **LEE** S., 2017, « Association between Three-Dimensional Built Environment and Urban Air Temperature: Seasonal and Temporal Differences », *Sustainability*, 9, p. 1338. doi:10.3390/su9081338

PARK H.-S., 1986, « Features of the heat island in seoul and its surrounding cities », *Atmospheric Environment (1967)*, 20(10), p. 1859-1866. doi:10.1016/0004-6981(86)90326-4

PARK Y., **GULDMANN** J.-M., 2020, « Understanding disparities in community green accessibility under alternative green measures: A metropolitan-wide analysis of

Columbus, Ohio, and Atlanta, Georgia », *Landscape and Urban Planning*, 200, p. 103806. doi:10.1016/j.landurbplan.2020.103806

PARK Y., **GULDMANN** J.-M., **LIU** D., 2021, « Impacts of tree and building shades on the urban heat island: Combining remote sensing, 3D digital city and spatial regression approaches », *Computers, Environment and Urban Systems*, 88, p. 101655. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2021.101655

PARLOW E., 2011, « Urban Climate », *in* Oxford, Oxford University Press, p. 31-44.

PASCAL M., **LAAIDI** K., **LEDRANS** M., **BAFFERT** E., **CASERIO-SCHÖNEMANN** C., **LE TERTRE** A., **MANACH** J., **MEDINA** S., **RUDANT** J., **EMPEREUR-BISSONNET** P., 2006, « France's heat health watch warning system », *International Journal of Biometeorology*, 50(3), p. 144-153. doi:10.1007/s00484-005-0003-x

PASCAL M., **LAAIDI** K., **VERRIER** A., 2019, « L'évolution des canicules : un défi pour la santé publique », *Les Tribunes de la santé*, 61(3), p. 23-29. doi:10.3917/seve1.061.0023

PELLISSIER V., **ROZÉ** F., **AGUEJDAD** R., **QUÉNOL** H., **CLERGEAU** P., 2008, « Relationships between soil seed bank, vegetation and soil fertility along an urbanisation gradient », *Applied Vegetation Science*, 11(3), p. 325-334. doi:10.3170/2008-7-18448

PENG S., **KON** Y., **WATANABE** H., 2022, « Effects of Sea Breeze on Urban Areas Using Computation Fluid Dynamic—A Case Study of the Range of Cooling and Humidity Effects in Sendai, Japan », *Sustainability*, 14(3), p. 1074. doi:10.3390/su14031074

PERREAULT S., 2015, *Processus d'acquisition de nouvelles connaissances en urbanisme : le cas de l'îlot de chaleur urbain.*, Mémoire de maitrise, Montréal, Université de Montréal.

PERRIN G., 2020, *Rafraîchissement urbain et confort d'été*, Dunod, 176 p.

PERRY E. M., **MORAN** M. S., 1994, « An evaluation of atmospheric corrections of radiometric surface temperatures for a semiarid rangeland watershed », *Water Resources Research*, 30(5), p. 1261-1269. doi:10.1029/93WR03056

PIAGET J., 1947, « LA REPRÉSENTATION DU MONDE CHEZ L'ENFANT », *in* 3e édition identique, PUF, p. 5-30.

PIGEON G., 2007, *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - Projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOUL*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, Toulouse, France, 170 p.

PINTON D., **CANESTRELLI** A., **FANTUZZI** L., 2020, « A UAV-Based Dye-Tracking Technique to Measure Surface Velocities over Tidal Channels and Salt Marshes », *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), p. 364. doi:10.3390/jmse8050364

POKHREL R., 2020, *ON THE ENERGY SUSTAINABILITY OF ACTIVE AND PASSIVE BUILDING INTEGRATED TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF A CHANGING CLIMATE FOR TROPICAL COASTAL CITIES CITY by Rabindra Pokhrel*, Ph.D. thesis.

POULIN E., **VAN NESTE** S. L., **GAGNON-LEWIS** C., **D'AMOURS** A.-M., 2021, « Action communautaire et adaptation aux changements climatiques : la participation des

organismes communautaires de Lachine à la résilience aux journées de chaleur accablante », Rapport final, Montréal (Québec) : Labo Climat Montréal.

POUX F., **NEUVILLE** R., **HALLOT** P., **BILLEN** R., 2017, « MODEL FOR SEMANTICALLY RICH POINT CLOUD DATA », *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-4-W5, p. 107-115. doi:10.5194/isprs-annals-IV-4-W5-107-2017

PRADO R. T. A., **FERREIRA** F. L., 2005, « Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials », *Energy and Buildings*, 37(4), p. 295-300. doi:10.1016/j.enbuild.2004.03.009

PUYGRENIER V., 2005, *Etude de la couche limite atmosphérique côtière durant ESCOMPTE 2001. Evaluation et amélioration des performances d'un radar UHF*, Thèse de doctorat, Toulouse, France, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 240 p.

PYRGOU A., **HADJINICOLAOU** P., **SANTAMOURIS** M., 2020, « Urban-rural moisture contrast: Regulator of the urban heat island and heatwaves' synergy over a mediterranean city », *Environmental Research*, 182, p. 109102. doi:10.1016/j.envres.2019.109102

QIN Z., **DALL'OLMO** G., **KARNIELI** A., **BERLINER** P., 2001, « Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-advanced very high resolution radiometer data », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D19), p. 22655-22670. doi:10.1029/2000JD900452

QIN Z., **KARNIELI** A., 1999, « Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR data », *International Journal of Remote Sensing*, 20(12), p. 2367-2393. doi:10.1080/014311699212074

QIN Z., **KARNIELI** A., **BERLINER** P., 2001, « A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region », *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), p. 3719-3746. doi:10.1080/01431160010006971

QUANZ J. A., **ULRICH** S., **FENNER** D., **HOLTMANN** A., **EIMERMACHER** J., 2018, « Micro-Scale Variability of Air Temperature within a Local Climate Zone in Berlin, Germany, during Summer », *Climate*, 6(1), p. 5. doi:10.3390/cli6010005

QUENAULT B., 2015, « La vulnérabilité, un concept central de l'analyse des risques urbains en lien avec le changement climatique », *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 110(1), p. 138-151. doi:10.3406/aru.2015.3175

QUÉNOL H., **BELTRANDO** G., 2008, « Impact of a new railway line embankment (Mediterranean TGV) on the frequency of spring frosts in a fruit-growing area of the Durance Valley (south of France) », *Meteorological Applications*, 15(3), p. 389-398. doi:10.1002/met.81

QUENOL H., **DUBREUIL** V., **MIMET** A., **PELLISSIER** V., **AGUEJDAD** R., **CLERGEAU** P., **BRIDIER** S., 2010, « Climat urbain et impact sur la phénologie végétale printanière », *La Météorologie*, 2010(68), p. 50-57. doi:10.4267/2042/31996

QUERCI J., **OLIVEAU** S., 2015, « Le système urbain indien : une construction ancienne en changement rapide », *Géoconfluences*, http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-regionaux/le-monde-indien-populations-et-espaces/corpus-documentaire/le-systeme-urbain-indien-une-construction-ancienne-en-changement-rapide.

RADFAR M., 2012, « Urban Microclimate, Designing the Spaces Between Buildings », *Housing Studies*, 27(2), p. 293-294. doi:10.1080/02673037.2011.615987

RAFAEL S., **RODRIGUES** V., **FERNANDES** A. P., **AUGUSTO** B., **BORREGO** C., **LOPES** M., 2019, « Evaluation of urban surface parameterizations in WRF model using energy fluxes measurements in Portugal », *Urban Climate*, 28, p. 100465. doi:10.1016/j.uclim.2019.100465

RAHMAN M. A., **MOSER** A., **RÖTZER** T., **PAULEIT** S., 2017, « Microclimatic differences and their influence on transpirational cooling of Tilia cordata in two contrasting street canyons in Munich, Germany », *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, p. 443-456. doi:10.1016/j.agrformet.2016.10.006

RAIHANI A., **HAMDOUN** A., **BOUATTANE** O., **CHERRADI** B., 2012, « Toward an accurate assessment of wind energy platform of Mohammedia city, Morocco », *IRACST – Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*, 2(5), p. 951-958.

RAJKOVICH N., **LARSEN** L., 2016, « A Bicycle-Based Field Measurement System for the Study of Thermal Exposure in Cuyahoga County, Ohio, USA », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(2), p. 159. doi:10.3390/ijerph13020159

RAMAMURTHY P., **BOU-ZEID** E., 2016, « Heatwaves and urban heat islands: A comparative analysis of multiple cities », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(1), p. 168-178. doi:10.1002/2016JD025357

RAMANATHAN V., **CHUNG** C., **KIM** D., **BETTGE** T., **BUJA** L., **KIEHL** J. T., **WASHINGTON** W. M., **FU** Q., **SIKKA** D. R., **WILD** M., 2005, « Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(15), p. 5326-5333. doi:10.1073/pnas.0500656102

RANGO A., **LALIBERTE** A. S., **STEELE** C., **HERRICK** J. E., **BESTELMEYER** B., **SCHMUGGE** T., 2006, « Using unmanned aerial vehicles for rangelands: current applications and future potentials », *Environmental Practice*, 8. doi:10.1017/S1466046606060224

RÄSÄNEN A., **HEIKKINEN** K., **PIILA** N., **JUHOLA** S., 2019, « Zoning and weighting in urban heat island vulnerability and risk mapping in Helsinki, Finland », *Regional Environmental Change*, 19(5), p. 1481-1493. doi:10.1007/s10113-019-01491-x

REA L. M., **ÑAMES**, **PARKER** R., **ALLEN** R., 2014, *Designing and conducting survey research*, Jossey-Bass, 352 p.

REDAÑO A., **CRUZ** J., **LORENTE** J., 1991, « Main features of the sea-breeze in Barcelona », *Meteorology and Atmospheric Physics*, 46(3), p. 175-179. doi:10.1007/BF01027342

REDON E., 2017, *Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III , Toulouse, France, 211 p.

REGHEZZA-ZITT M., **RUFAT** S., **DJAMENT-TRAN** G., **LE BLANC** A., **LHOMME** S., 2012, « What Resilience Is Not: Uses and Abuses », *Cybergeo: European Journal of Geography*. doi:10.4000/cybergeo.25554

REID C. E., **O** 'Neill Marie S., **GRONLUND** C. J., **BRINES** S. J., **BROWN** D. G., **DIEZ** -Roux Ana V., **SCHWARTZ** J., 2009, « Mapping Community Determinants of Heat Vulnerability », *Environmental Health Perspectives*, 117(11), p. 1730-1736. doi:10.1289/ehp.0900683

RENARD F., **ALONSO** L., **FITTS** Y., **HADJIOSIF** A., **COMBY** J., 2019, « Evaluation of the Effect of Urban Redevelopment on Surface Urban Heat Islands », *Remote Sensing*, 11(3), p. 299. doi:10.3390/rs11030299

REY G., **FOUILLET** A., **JOUGLA** É., **HEMON** D., 2007, « Vagues de chaleur, fluctuations ordinaires des températures et mortalité en France depuis 1971 », *Population*, 62(3), p. 533-563. doi:10.3917/popu.703.0533

RIAUX J., **BARBIER** R., **ET** O., **BARRETEAU**, 2009, « Construire et argumenter des enjeux de vulnérabilité en comité sécheresse », *in Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, Ile-de-France, France, p. 75-87.

RIBEIRO-GOMES K., **HERNÁNDEZ-LÓPEZ** D., **ORTEGA** J. F., **BALLESTEROS** R., **POBLETE** T., **MORENO** M. A., 2017, « Uncooled Thermal Camera Calibration and Optimization of the Photogrammetry Process for UAV Applications in Agriculture », *Sensors*, 17(10), p. 2173. doi:10.3390/s17102173

RICHARD Y., **EMERY** J., **DUDEK** J., **PERGAUD** J., **CHATEAU-SMITH** C., **ZITO** S., **REGA** M., **VAIRET** T., **CASTEL** T., **THÉVENIN** T., **POHL** B., 2018, « How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study », *Urban Climate*, 26, p. 258-274. doi:10.1016/j.uclim.2018.10.002

RICHARD Y., **POHL** B., **REGA** M., **PERGAUD** J., **THEVENIN** T., **EMERY** J., **DUDEK** J., **VAIRET** T., **ZITO** S., **CHATEAU-SMITH** C., 2021a, « Is Urban Heat Island intensity higher during hot spells and heat waves (Dijon, France, 2014–2019)? », *Urban Climate*, 35, p. 100747. doi:10.1016/j.uclim.2020.100747

RICHARD Y., **POHL** B., **REGA** M., **PERGAUD** J., **THEVENIN** T., **EMERY** J., **DUDEK** J., **VAIRET** T., **ZITO** S., **CHATEAU-SMITH** C., 2021b, « Is Urban Heat Island intensity higher during hot spells and heat waves (Dijon, France, 2014–2019)? », *Urban Climate*, 35, p. 100747. doi:10.1016/j.uclim.2020.100747

RIDHA S., 2017, *Urban heat Island mitigation strategies in an arid climate. In outdoor thermal comfort reacheable*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, France, 143 p.

RINGENBACH N., 2004, *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : Mesures, modélisation et validation sur Strasbourg*, Thèse de doctorat, Strasbourg, France, Strasbourg 1, 166 p.

RINNER C., **PATYCHUK** D., **BASSIL** K., **NASR** S., **GOWER** S., **CAMPBELL** M., 2013, « The Role of Maps in Neighborhood-level Heat Vulnerability Assessment for the City of Toronto », *Cartography and Geographic Information Science*, 37, p. 31-44. doi:10.1559/152304010790588089

RIVERA C., 2014, « Integrating Climate Change Adaptation into Disaster Risk Reduction in Urban Contexts: Perceptions and Practice », *PLoS Currents*, 6. doi:10.1371/currents.dis.7bfa59d37f7f59abc238462d53fbb41f

RIZVI S. H., **ALAM** K., **IQBAL** M. J., 2019, « Spatio -temporal variations in urban heat island and its interaction with heat wave », *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 185, p. 50-57. doi:10.1016/j.jastp.2019.02.001

ROBINSON P., 2010, *The London Meteorological Monitoring Network*, Thèse de doctorat, London, UK, Department of Geography, King's College London, 356 p.

ROBINSON P. J., 2001, « On the Definition of a Heat Wave », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 40(4), p. 762-775. doi:10.1175/1520-0450(2001)040<0762:OTDOAH>2.0.CO;2

ROME S., **BIGOT** Sylvain, **FOISSARD** X., **DUBUS** N., **FOUVET** A.-C., **ROUSSET** E., 2023, « Caractérisation des extrêmes thermiques estivaux en milieu urbain. Exemple de l'été 2022 dans le cœur de l'agglomération grenobloise (France) », *Climat, eau et société : changements et défis*, p. 233-236.

ROMERO RODRÍGUEZ L., **SÁNCHEZ RAMOS** J., **SÁNCHEZ DE LA FLOR** F. J., **ÁLVAREZ DOMÍNGUEZ** S., 2020, « Analyzing the urban heat Island: Comprehensive methodology for data gathering and optimal design of mobile transects », *Sustainable Cities and Society*, 55, p. 102027. doi:10.1016/j.scs.2020.102027

ROMERO-LANKAO P., **QIN** H., **DICKINSON** K., 2012, « Urban vulnerability to temperature-related hazards: A meta-analysis and meta-knowledge approach », *Global Environmental Change*, 22(3), p. 670-683. doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.04.002

ROTACH M. W., **GRYNING** S.-E., **BATCHVAROVA** E., **CHRISTEN** A., **VOGT** R., 2004, « Pollutant dispersion close to an urban surface – the BUBBLE tracer experiment », *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1), p. 39-56. doi:10.1007/s00703-003-0060-9

ROTACH M. W., **VOGT** R., **BERNHOFER** C., **BATCHVAROVA** E., **CHRISTEN** A., **CLAPPIER** A., **FEDDERSEN** B., **GRYNING** S.-E., **MARTUCCI** G., **MAYER** H., **MITEV** V., **OKE** T. R., **PARLOW** E., **RICHNER** H., **ROTH** M., **ROULET** Y.-A., **RUFFIEUX** D., **SALMOND** J. A., **SCHATZMANN** M., **VOOGT** J. A., 2005, « BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project », *Theoretical and Applied Climatology*, 81(3), p. 231-261. doi:10.1007/s00704-004-0117-9

ROWLAND T., 2008, « Thermoregulation during exercise in the heat in children: old concepts revisited », *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 105(2), p. 718-724. doi:10.1152/japplphysiol.01196.2007

SAILOR D. J., **LU** L., 2004, « A top–down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas », *Atmospheric Environment*, 38(17), p. 2737-2748. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.01.034

SAKHY A., 2016, *Îlots de chaleur et morphologie urbaine de l'agglomération parisienne. Conséquences sur la mortalité durant la canicule de 2003*, Thèse de doctorat, Paris, France, Université Paris Diderot (Paris 7) Sorbonne Paris Cité, 340 p.

SALAMANCA F., **MARTILLI** A., **YAGÜE** C., 2012, « A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies », *International Journal of Climatology*, 32(15), p. 2372-2386. doi:10.1002/joc.3398

SALIN E., 2002, *Les centres historiques du Caire et de Mexico : représentations de l'espace, mutations urbaines et protection du patrimoine*, Thèse de doctorat, Paris, France, Paris 10, 629 p.

SALISBURY J. W., **D'ARIA** D. M., 1992, « Emissivity of terrestrial materials in the 8–14 μm atmospheric window », *Remote Sensing of Environment*, 42(2), p. 83-106. doi:10.1016/0034-4257(92)90092-X

SAN MARCO J.-L., 2018, « Canicules : s'y préparer toujours mieux », *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, 16-14, p. 2.

SANDHOLZ S., **SETT** D., **GRECO** A., **WANNEWITZ** M., **GARSCHAGEN** M., 2021, « Rethinking urban heat stress: Assessing risk and adaptation options across socioeconomic groups in Bonn, Germany », *Urban Climate*, 37, p. 100857. doi:10.1016/j.uclim.2021.100857

SANTAMOURIS M., 2005, « Passive Cooling of Buildings », *in dvances of Solar Energy'*, Group Building Environmental Studies, Physics Department, University of Athens, Athens, Greece, Routledge, p. 3-40.

SANTAMOURIS M., **SYNNEFA** A., **KARLESSI** T., 2011, « Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions », *Solar Energy*, 85(12), p. 3085-3102. doi:10.1016/j.solener.2010.12.023

SANTE PUBLIC FRANCE, 2023, « Fortes chaleurs et canicule : un impact sur la mortalité important nécessitant le renforcement de la prévention et de l'adaptation au changement climatique », https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2023/fortes-chaleurs-et-canicule-un-impact-sur-la-mortalite-important-necessitant-le-renforcement-de-la-prevention-et-de-l-adaptation-au-changement-cl.

SANTE PUBLIQUE FRANCE, 2018, « Canicule et changement climatique : bilan des fortes chaleurs en 2017 et impacts sanitaires de la chaleur », https://www.santepubliquefrance.fr/liste-des-actualites/canicule-et-changement-climatique-bilan-des-fortes-chaleurs-en-2017-et-impacts-sanitaires-de-la-chaleur

SANTOS I. G., **LIMA** H. G., **ASSIS** E., 2003, « A comprehensive approach of the sky view factor and building mass in an urban area of the city of Belo Horizonte, Brazil. »,.

SARRAT C., **LEMONSU** A., **MASSON** V., **GUEDALIA** D., 2006, « Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution », *Atmospheric Environment*, 40(10), p. 1743-1758. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.11.037

SCHATZ J., **KUCHARIK** C. J., 2015, « Urban climate effects on extreme temperatures in Madison, Wisconsin, USA », *Environmental Research Letters*, 10(9), p. 094024. doi:10.1088/1748-9326/10/9/094024

SCHMID H. P., **CLEUGH** H. A., **GRIMMOND** C. S. B., **OKE** T. R., 1991, « Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain », *Boundary-Layer Meteorology*, 54(3), p. 249-276. doi:10.1007/BF00183956

SCHMIST W., 1929, *Die Verteilung der Minimumtemperaturen in der Frostnacht des 12/05/1927 im Gemeindegebiet von Wien*, Fortschr. Landwirtsch., 681-686 p.

SCHWAB A., **ZACHENBACHER** D., 2009, « Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben », REKLIBO, Wissenschaftlicher Abschlussbericht-Band 1, Weingarten, Pädagogische Hochschule Weingarten.

SCOTT A. A., **WAUGH** D. W., **ZAITCHIK** B. F., 2018, « Reduced Urban Heat Island intensity under warmer conditions », *Environmental Research Letters*, 13(6), p. 064003. doi:10.1088/1748-9326/aabd6c

SEGUR F., 2019, « Requalification bioclimatique de la rue Garibaldi à Lyon », *Des solutions pour la ville de demain : vers une renaturation des sols, Journée technique du Cerema*, p. 22.

SEMENZA J. C., **RUBIN** C. H., **FALTER** K. H., **SELANIKIO** J. D., **FLANDERS** W. D., **HOWE** H. L., **WILHELM** J. L., 1996, « Heat-Related Deaths during the July 1995 Heat Wave in Chicago », *New England Journal of Medicine*, 335(2), p. 84-90. doi:10.1056/NEJM199607113350203

SENA C. Á. P., **DA PAIXÃO** J. A. R., **FRANÇA** J. R. de A., 2021, « A Topological Data Analysis approach for retrieving Local Climate Zones patterns in satellite data », *Environmental Challenges*, 5, p. 100359. doi:10.1016/j.envc.2021.100359

SHAHIDAN Mohd. F., **SHARIFF** M. K. M., **JONES** P., **SALLEH** E., **ABDULLAH** A. M., 2010, « A comparison of Mesua ferrea L. and Hura crepitans L. for shade creation and radiation modification in improving thermal comfort », *Landscape and Urban Planning*, 97(3), p. 168-181. doi:10.1016/j.landurbplan.2010.05.008

SHARMA J., **RAVINDRANATH** N. H., 2019, « Applying IPCC 2014 framework for hazard-specific vulnerability assessment under climate change », *Environmental Research Communications*, 1(5), p. 051004. doi:10.1088/2515-7620/ab24ed

SHEN L., **ZHAO** C., **MA** Z., **LI** Z., **LI** J., **WANG** K., 2019, « Observed decrease of summer sea-land breeze in Shanghai from 1994 to 2014 and its association with urbanization », *Atmospheric Research*, 227, p. 198-209. doi:10.1016/j.atmosres.2019.05.007

SHENG H., **CHAO** H., **COOPMANS** C., **HAN** J., **MCKEE** M., **CHEN** Y., 2010, « Low-cost UAV-based thermal infrared remote sensing: Platform, calibration and applications », *Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, p. 38-43. doi:10.1109/MESA.2010.5552031

SHIH W.-Y., **MABON** L., 2021, « Understanding heat vulnerability in the subtropics: Insights from expert judgements », *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 63, p. 102463. doi:10.1016/j.ijdrr.2021.102463

SINGH S., **NATH** S., **KOHLI** R., **SINGH** R., 2005, « Aerosols over Delhi during pre-monsoon months: Characteristics and effects on surface radiation forcing », *Geophysical Research Letters*, 32(13). doi:10.1029/2005GL023062

SIU L. W., **HART** M. A., 2013, « Quantifying urban heat island intensity in Hong Kong SAR, China », *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(5), p. 4383-4398. doi:10.1007/s10661-012-2876-6

SKARBIT N., **GÁL** T., **UNGER** J., 2018, *Evaluation of spatial and temporal distribution of air temperature in local climate zones based on long-term database in Szeged, Hungary.*, 10th International Conference on Urban Climate, New York, United Nations,

SKARBIT N., **STEWART** I. D., **UNGER** J., **GÁL** T., 2017, « Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the 'local climate zones' of Szeged, Hungary », *International Journal of Climatology*, 37(S1), p. 582-596. doi:10.1002/joc.5023

SMIGAJ M., **GAULTON** R., **SUAREZ** J. C., **BARR** S. L., 2017, « Use of Miniature Thermal Cameras for Detection of Physiological Stress in Conifers », *Remote Sensing*, 9(9), p. 957. doi:10.3390/rs9090957

SMOLIAK B. V., **SNYDER** P. K., **TWINE** T. E., **MYKLEBY** P. M., **HERTEL** W. F., 2015, « Dense Network Observations of the Twin Cities Canopy-Layer Urban Heat Island », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(9), p. 1899-1917. doi:10.1175/JAMC-D-14-0239.1

SMOYER K. E., 1998, « Putting risk in its place: methodological considerations for investigating extreme event health risk », *Social Science & Medicine*, 47(11), p. 1809-1824. doi:10.1016/S0277-9536(98)00237-8

SOBRINO J. A., **JIMÉNEZ-MUÑOZ** J. C., 2005, « Land surface temperature retrieval from thermal infrared data: An assessment in the context of the Surface Processes and Ecosystem Changes Through Response Analysis (SPECTRA) mission », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D16). doi:10.1029/2004JD005588

SOBRINO J. A., **JIMÉNEZ-MUÑOZ** J. C., **EL-KHARRAZ** J., **GÓMEZ** M., **ROMAGUERA** M., **SÒRIA** G., 2004, « Single-channel and two-channel methods for land surface temperature retrieval from DAIS data and its application to the Barrax site », *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), p. 215-230. doi:10.1080/0143116031000115210

SOBRINO J. A., **JIMÉNEZ-MUÑOZ** J. C., **PAOLINI** L., 2004, « Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 », *Remote Sensing of Environment*, 90(4), p. 434-440. doi:10.1016/j.rse.2004.02.003

SOBRINO J. A., **JIMENEZ-MUOZ** J. C., **SORIA** G., **ROMAGUERA** M., **GUANTER** L., **MORENO** J., **PLAZA** A., **MARTINEZ** P., 2008, « Land Surface Emissivity Retrieval From Different VNIR and TIR Sensors », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), p. 316-327. doi:10.1109/TGRS.2007.904834

SOBRINO J. A., **LI** Z.-L., **STOLL** M. P., **BECKER** F., 1994, « Improvements in the split-window technique for land surface temperature determination », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(2), p. 243-253. doi:10.1109/36.295038

SOBRINO J. A., **RAISSOUNI** N., 2000, « Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco », *International Journal of Remote Sensing*, 21(2), p. 353-366. doi:10.1080/014311600210876

SOBRINO J., **COLL** C., **CASELLES** V., 1991, « Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA-11 AVHRR channels 4 and 5 », *Remote Sensing of Environment*, 38(1), p. 19-34. doi:10.1016/0034-4257(91)90069-I

SOUBEYROUX J.-M., **BERNUS** S., **CORRE** L., **DROUIN** A., **DUBUISSON** B., **ETCHEVERS P.,** P., **GOUGET V.,** V., **JOSSE P.,** P., **KERDONCUFF M.,** M., **SAMACOITS R.,** R., **TOCQUER** F., 2021, *Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole*, Rapport technique, Toulouse, France : Météo-France, Météo France, 98 p.

SOUBEYROUX J.-M., **MASSON** V., 2017, « Accompagner l'adaptation au changement climatique de la ville : l'expérience menée avec Toulouse Métropole », *Climat, ville et environnement*, Sfax, Tunisie p. 174-179. doi:http://www.climato.be/aic/colloques/actes/Sfax2017_actes.pdf

SOUCH C. A., **SOUCH** C., 1993, « The Effect of Trees on Summertime Below Canopy Urban Climates: A Case Study Bloomington, Indiana », *Arboriculture & Urban Forestry*, 19(5), p. 303-312. doi:10.48044/jauf.1993.049

STARK B., **SMITH** B., **CHEN** Y., 2014, « Survey of thermal infrared remote sensing for Unmanned Aerial Systems », *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, p. 1294-1299. doi:10.1109/ICUAS.2014.6842387

STEWART I. D., 2011a, « A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature », *International Journal of Climatology*, 31(2), p. 200-217. doi:10.1002/joc.2141

STEWART I. D., 2011b, *Redefining the urban heat island*, phdthesis, University of British Columbia. doi:10.14288/1.0072360

STEWART I. D., **KENNEDY** C. A., 2017, « Metabolic heat production by human and animal populations in cities », *International Journal of Biometeorology*, 61(7), p. 1159-1171. doi:10.1007/s00484-016-1296-7

STEWART I. D., **OKE** T. R., 2012, « Local Climate Zones for Urban Temperature Studies », *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), p. 1879-1900. doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1

STEWART I. D., **OKE** T. R., **KRAYENHOFF** E. S., 2014, « Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations », *International Journal of Climatology*, 34(4), p. 1062-1080. doi:10.1002/joc.3746

STEWART I., **KENNEDY** C., 2015, « Estimating anthropogenic heat release from megacities », ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate held jointly with the 12th Symposium on the Urban Environment, Toulouse, France, p. 6.

STONE J. Brian, 2012, *The City and the Coming Climate: Climate Change in the Places We Live*, Cambridge, Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139061353

STRAUB A., **BERGER** K., **BREITNER** S., **CYRYS** J., **GERUSCHKAT** U., **JACOBEIT** J., **KÜHLBACH** B., **KUSCH** T., **PHILIPP** A., **SCHNEIDER** A., **UMMINGER** R., **WOLF** K., **BECK** C., 2019, « Statistical modelling of spatial patterns of the urban heat island intensity in the urban environment of Augsburg, Germany », *Urban Climate*, 29, p. 100491. doi:10.1016/j.uclim.2019.100491

STREILING S., **MATZARAKIS** A., 2003, « Influence of Single and Small Clusters of Trees on the Bioclimate of a City: A Case Study », *Arboriculture & Urban Forestry*, 29(6), p. 309-316. doi:10.48044/jauf.2003.037

STREUTKER D. R., 2002, « A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas », *International Journal of Remote Sensing*, 23(13), p. 2595-2608. doi:10.1080/01431160110115023

SUGIURA R., **NOGUCHI** N., **ISHII** K., 2007, « Correction of Low-altitude Thermal Images applied to estimating Soil Water Status », *Biosystems Engineering*, 96(3), p. 301-313. doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.11.006

SUN C.-Y., **BRAZEL** A. J., **CHOW** W. T. L., **HEDQUIST** B. C., **PRASHAD** L., 2009, « Desert heat island study in winter by mobile transect and remote sensing techniques », *Theoretical and Applied Climatology*, 98(3), p. 323-335. doi:10.1007/s00704-009-0120-2

SUNDBORG Å., 1951, « Climatological studies in Uppsala, with special regard to the temperature conditions in the urban area », *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1(19), p. 107-113. doi:https://doi.org/10.1177/0309133395019001

TAHA H., 1997, « Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat », *Energy and Buildings*, 25(2), p. 99-103. doi:10.1016/S0378-7788(96)00999-1

TAILLET R., **VILLAIN** L., **FEBVRE** P., 2018, *Dictionnaire de physique*, De Boeck Superieur, 976 p.

TANG H., **LI** Z.-L., 2014, *Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, Springer Remote Sensing/Photogrammetry. doi:10.1007/978-3-642-42027-6

TAPIA C., **ABAJO** B., **FELIU** E., **MENDIZABAL** M., **MARTINEZ** J. A., **FERNÁNDEZ** J. G., **LABURU** T., **LEJARAZU** A., 2017, « Profiling urban vulnerabilities to climate change: An indicator-based vulnerability assessment for European cities », *Ecological Indicators*, 78, p. 142-155. doi:10.1016/j.ecolind.2017.02.040

THEEUWES N. E., **STEENEVELD** G.-J., **RONDA** R. J., **HOLTSLAG** A. A. M., 2017, « A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe », *International Journal of Climatology*, 37(1), p. 443-454. doi:10.1002/joc.4717

THORNTHWAITE C. W., 1948, « An Approach toward a Rational Classification of Climate », *Geographical Review*, 38(1), p. 55-94. doi:10.2307/210739

TIAN Y., **ZHOU** W., **QIAN** Y., **ZHENG** Z., **YAN** J., 2019, « The effect of urban 2D and 3D morphology on air temperature in residential neighborhoods », *Landscape Ecology*, 34(5), p. 1161-1178. doi:10.1007/s10980-019-00834-7

TOMLINSON C. J., **CHAPMAN** L., **THORNES** J. E., **BAKER** C. J., 2011, « Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: a case study for Birmingham, UK », *International Journal of Health Geographics*, 10(1), p. 42. doi:10.1186/1476-072X-10-42

TORRES-RUA A., 2017, « Vicarious Calibration of sUAS Microbolometer Temperature Imagery for Estimation of Radiometric Land Surface Temperature », *Sensors*, 17(7), p. 1499. doi:10.3390/s17071499

TOURNADRE V., 2015, *Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère : application au suivi d'évolution de digues*, Thèse de doctorat, Paris, France, Université Paris-Est, 250 p.

TRANG P. M., **ROCKLÖV** J., **GIANG** K. B., **KULLGREN** G., **NILSSON** M., 2016, « Heatwaves and Hospital Admissions for Mental Disorders in Northern Vietnam », *PLOS ONE*, 11(5), p. e0155609. doi:10.1371/journal.pone.0155609

TSE J. W. P., **YEUNG** P. S., **FUNG** J. C.-H., **REN** C., **WANG** R., **WONG** M. M.-F., **CAI** M., 2018, « Investigation of the meteorological effects of urbanization in recent decades: A case study of major cities in Pearl River Delta », *Urban Climate*, 26, p. 174-187. doi:10.1016/j.uclim.2018.08.007

TSIN P. K., **KNUDBY** A., **KRAYENHOFF** E. S., **HO** H. C., **BRAUER** M., **HENDERSON** S. B., 2016, « Microscale mobile monitoring of urban air temperature », *Urban Climate*, 18, p. 58-72. doi:10.1016/j.uclim.2016.10.001

TUDOUX L., 2021, *Le croisement des approches quantitatives et qualitatives au profit de la gestion du risque de surchauffe urbaine à Metz Métropole*, Mémoire de master 2 Urbanisme et Aménagement parcours INTER, Université de Lorraine, Metz, 85 p.

TURNER D., **LUCIEER** A., **DE JONG** S., 2015, « Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) », *Remote Sensing*, 7, p. 1736-1757. doi:10.3390/rs70201736

TURVEY R., 2007, « Vulnerability Assessment of Developing Countries: The Case of Small-island Developing States », *Development Policy Review*, 25(2), p. 243-264. doi:10.1111/j.1467-7679.2007.00368.x

UEJIO C. K., **WILHELMI** O. V., **GOLDEN** J. S., **MILLS** D. M., **GULINO** S. P., **SAMENOW** J. P., 2011, « Intra-urban societal vulnerability to extreme heat: The role of heat exposure and the built environment, socioeconomics, and neighborhood stability », *Health & Place*, 17(2), p. 498-507. doi:10.1016/j.healthplace.2010.12.005

ULPIANI G., 2021, « On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework », *Science of The Total Environment*, 751, p. 141727. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141727

UNDRR, 2015, *Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015 - 2030*, UNISDR/GE/2015-ICLUX FR 1re édition, Genève, Suisse, Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophe, 40 p.

UNGER J., 2004, « Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach », *Climate Research*, 27(3), p. 253-264. doi:10.3354/cr027253

UNITED NATIONS, 2018, *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*,, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, United Nations, (ST/ESA/SER.A/420), 123 p.

VALOIS P., **TALBOT** D., **RENAUD** J.-S., **CANON** M., **BOUCHARD** D., 2018, *Suivi de l'adaptation à la chaleur chez les personnes habitant dans les dix villes les plus peuplées du Québec*, Québec : Université Laval, OQACC, 73 p.

VALOR E., **CASELLES** V., 1996, « Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas », *Remote Sensing of Environment*, 57(3), p. 167-184. doi:10.1016/0034-4257(96)00039-9

VAN DE GRIEND A. A., **OWE** M., 1993, « On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces », *International Journal of Remote Sensing*, 14(6), p. 1119-1131. doi:10.1080/01431169308904400

VAN GAMEREN V., **WEIKMANS** R., **ZACCAI** E., 2014, « II. Dimensions sociales du risque climatique », *in* Paris, La Découverte, Repères, p. 23-38.

VAN HOVE L. W. A., **JACOBS** C. M. J., **HEUSINKVELD** B. G., **ELBERS** J. A., **VAN DRIEL** B. L., **HOLTSLAG** A. A. M., 2015, « Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration », *Building and Environment*, 83, p. 91-103. doi:10.1016/j.buildenv.2014.08.029

VAN STEEN Y., **NTARLADIMA** A.-M., **GROBBEE** R., **KARSSENBERG** D., **VAARTJES** I., 2019, « Sex differences in mortality after heat waves: are elderly women at higher risk? », *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 92(1), p. 37-48. doi:10.1007/s00420-018-1360-1

VERDONCK M.-L., **DEMUZERE** M., **HOOYBERGHS** H., **BECK** C., **CYRYS** J., **SCHNEIDER** A., **DEWULF** R., **VAN COILLIE** F., 2018, « The potential of local climate zones maps as a heat stress assessment tool, supported by simulated air temperature data », *Landscape and Urban Planning*, 178, p. 183-197. doi:10.1016/j.landurbplan.2018.06.004

VERLYNDE N., 2018, *De la perception du risque d'inondation aux propositions d'adaptation en territoire de côtes basses densément peuplées : le cas de la communauté urbaine de Dunkerque*, Thèse de doctorat, Dunkerque, France, Université du Littoral Côte d'Opale, 615 p.

VESCOVI L., **REBETEZ** M., **RONG** F., 2005, « Assessing public health risk due to extremely high temperature events: climate and social parameters », *Climate Research*, 30(1), p. 71-78. doi:10.3354/cr030071

VOOGT J., 2007, « How Researchers Measure Urban Heat Islands », p. 34, https://bit.ly/2V9awXv.

VOOGT J. A., **OKE** T. R., 1997, « Complete Urban Surface Temperatures », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 36(9), p. 1117-1132. doi:10.1175/1520-0450(1997)036<1117:CUST>2.0.CO;2

WAGNER V., **UNG** A., **CALMET** C., **PASCAL** M., 2018, « Évolution des vagues de chaleur et de la mortalité associée en France, 2004-2014 », *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, 16-17, p. 6.

WALAWENDER J. P., **SZYMANOWSKI** M., **HAJTO** M. J., **BOKWA** A., 2014, « Land Surface Temperature Patterns in the Urban Agglomeration of Krakow (Poland) Derived from Landsat-7/ETM+ Data », *Pure and Applied Geophysics*, 171(6), p. 913-940. doi:10.1007/s00024-013-0685-7

WAN H. Y., 2006, « A note on knowledge capital and the needham paradox », *in Harnessing Globalization*, WORLD SCIENTIFIC, p. 5-28. doi:10.1142/9789812773999_0001

WAN Z., **DOZIER** J., 1996, « A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4), p. 892-905. doi:10.1109/36.508406

WAN Z., **LI** Z.-L., 1997, « A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4), p. 980-996. doi:10.1109/36.602541

WANG C., **MIDDEL** A., **MYINT** S. W., **KAPLAN** S., **BRAZEL** A. J., **LUKASCZYK** J., 2018, « Assessing local climate zones in arid cities: The case of Phoenix, Arizona and Las Vegas, Nevada », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 141, p. 59-71. doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.04.009

WANG F., **QIN** Z., **SONG** C., **TU** L., **KARNIELI** A., **ZHAO** S., 2015, « An Improved Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data », *Remote Sensing*, 7(4), p. 4268-4289. doi:10.3390/rs70404268

WANG H., **MAO** K., **YUAN** Z., **SHI** J., **CAO** M., **QIN** Z., **DUAN** S., **TANG** B., 2021, « A method for land surface temperature retrieval based on model-data-knowledge-driven and deep learning », *Remote Sensing of Environment*, 265, p. 112665. doi:10.1016/j.rse.2021.112665

WANG K., **LIANG** S., 2009, « Evaluation of ASTER and MODIS land surface temperature and emissivity products using long-term surface longwave radiation observations at SURFRAD sites », *Remote Sensing of Environment*, 113(7), p. 1556-1565. doi:10.1016/j.rse.2009.03.009

WANG M., **ZHANG** Z., **HU** T., **LIU** X., 2019, « A Practical Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval: Application to Landsat Series Data », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(1), p. 299-316. doi:10.1029/2018JD029330

WANG R., **REN** C., **XU** Y., **LAU** K. K.-L., **SHI** Y., 2018, « Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: A case study of Hong Kong », *Urban Climate*, 24, p. 567-576. doi:10.1016/j.uclim.2017.10.001

WANG R., **VOOGT** J., **REN** C., **NG** E., 2022, « Spatial-temporal variations of surface urban heat island: An application of local climate zone into large Chinese cities », *Building and Environment*, 222, p. 109378. doi:10.1016/j.buildenv.2022.109378

WARREN E. L., **YOUNG** D. T., **CHAPMAN** L., **MULLER** C., **GRIMMOND** C. S. B., **CAI** X.-M., 2016, « The Birmingham Urban Climate Laboratory-A high density, urban meteorological dataset, from 2012-2014 », *Scientific Data*, 3, p. 160038. doi:10.1038/sdata.2016.38

WEISS M., **MILMAN** B., **ROSEN** B., **EISENSTEIN** Z., **ZIMLICHMAN** R., 1992, « Analysis of the diminished skin perfusion in elderly people by laser Doppler flowmetry », *Age and Ageing*, 21(4), p. 237-241. doi:10.1093/ageing/21.4.237

WHITMAN S., **GOOD** G., **DONOGHUE** E. R., **BENBOW** N., **SHOU** W., **MOU** S., 1997, « Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave. », *American Journal of Public Health*, 87(9), p. 1515-1518.

WHO, **ROE**, 2008, *Heat–health action plans: guidance*, World Health Organization, Regional Office for Europe, 58 p.

WHO, **ROE**, 2011, *Public health advice on preventing health effects of heat*, WHO/EURO:2011-2510-42266-58691, 37 p.

WICKI A., **PARLOW** E., **FEIGENWINTER** C., 2018, « Evaluation and Modeling of Urban Heat Island Intensity in Basel, Switzerland », *Climate*, 6(3), p. 55. doi:10.3390/cli6030055

WILHELMI O. V., **HAYDEN** M. H., 2010, « Connecting people and place: a new framework for reducing urban vulnerability to extreme heat », *Environmental Research Letters*, 5(1), p. 014021. doi:10.1088/1748-9326/5/1/014021

WMO, 2013, *The Global Climate 2001-2010: A decade of climate extremes*, WMO-No. 1103, Geneva, switzerland, 119 p.

WMO, 2015, *Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events*, DRAFT VERSION – FIRST REVIEW BY TT-DEWCE, 62 p.

WMO, 2018, *Guide to Climatological Practices*, WMO-No. 100, Geneva, Switzerland, 139 p.

WOILLEZ M.-N., 2019, « Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : observations, projections et impacts. », *in Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : observations, projections et impacts*, Agence française de développement, p. 1-33. doi:10.3917/afd.woill.2019.01.0001

WOLF T., **CHUANG** W.-C., **MCGREGOR** G., 2015, « On the Science-Policy Bridge: Do Spatial Heat Vulnerability Assessment Studies Influence Policy? », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(10), p. 13321-13349. doi:10.3390/ijerph121013321

WOLF T., **MCGREGOR** G., 2013, « The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom », *Weather and Climate Extremes*, 1, p. 59-68. doi:10.1016/j.wace.2013.07.004

WOLF T., **MCGREGOR** G., **ANALITIS** A., 2014, « Performance Assessment of a Heat Wave Vulnerability Index for Greater London, United Kingdom », *Weather, Climate, and Society*, 6(1), p. 32-46. doi:10.1175/WCAS-D-13-00014.1

WU J., **LIU** C., **WANG** H., 2022, « Analysis of Spatio-temporal patterns and related factors of thermal comfort in subtropical coastal cities based on local climate zones », *Building and Environment*, 207, p. 108568. doi:10.1016/j.buildenv.2021.108568

XIAO J., **FISHER** J. B., **HASHIMOTO** H., **ICHII** K., **PARAZOO** N. C., 2021, « Emerging satellite observations for diurnal cycling of ecosystem processes », *Nature Plants*, 7(7), p. 877-887. doi:10.1038/s41477-021-00952-8

XIAO-RUI T., **MCRAE** D. J., **LI-FU** S., **MING-YU** W., **HONG** L., 2005, « Satellite remote-sensing technologies used in forest fire management », *Journal of Forestry Research*, 16(1), p. 73-78. doi:10.1007/BF02856861

YADAV N., **SHARMA** C., 2018, « Spatial variations of intra-city urban heat island in megacity Delhi », *Sustainable Cities and Society*, 37, p. 298-306. doi:10.1016/j.scs.2017.11.026

YAHYANEJAD S., 2013, *Orthorectified Mosaicking of Images from Small-scale Unmanned Aerial Vehicles*, Thèse de doctorat, Klagenfurt, Autriche, Alpen-Adria Universität Klagenfurt Fakultät für Technische Wissenschaften, 88 p.

YAMANE T., 1967, *Statistics An Introductory Analysis. 2nd Edition*, Second Edition, Harper & Row, 919 p.

YAMASHITA S., 1996, « Detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric tram-cars in Metropolitan Tokyo », *Atmospheric Environment*, 30(3), p. 429-435. doi:10.1016/1352-2310(95)00010-0

YAN H., **WU** F., **NAN** X., **HAN** Q., **SHAO** F., **BAO** Z., 2022, « Influence of view factors on intra-urban air temperature and thermal comfort variability in a temperate city », *Science of The Total Environment*, 841, p. 156720. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.156720

YAN H., **YANG** S., **GUO** X., **WU** F., **WU** R., **SHAO** F., **BAO** Z., 2021, « Impact of Land Cover Composition and Structure on Air Temperature Based on the Local Climate Zone Scheme in Hangzhou, China », *Atmosphere*, 12(8), p. 936. doi:10.3390/atmos12080936

YANG J., **JIN** S., **XIAO** X., **JIN** C., **XIA** J. (Cecilia), **LI** X., **WANG** S., 2019, « Local climate zone ventilation and urban land surface temperatures: Towards a performance-based and wind-sensitive planning proposal in megacities », *Sustainable Cities and Society*, 47, p. 101487. doi:10.1016/j.scs.2019.101487

YANG P., **REN** G., **HOU** W., 2019, « Impact of daytime precipitation duration on urban heat island intensity over Beijing city », *Urban Climate*, 28, p. 100463. doi:10.1016/j.uclim.2019.100463

YAP D., 1975, « Seasonal excess urban energy and the nocturnal heat island — Toronto », *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 23(1), p. 69-80. doi:10.1007/BF02247308

YOSHINO M., 1975, *Climate in a Small Area: An Introduction to Local Meteorology*, University of Tokyo Press, 602 p.

YOW D. M., 2007, « Urban Heat Islands: Observations, Impacts, and Adaptation », *Geography Compass*, 1(6), p. 1227-1251. doi:10.1111/j.1749-8198.2007.00063.x

YUAN F., **BAUER** M. E., 2007, « Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery », *Remote Sensing of Environment*, 106(3), p. 375-386. doi:10.1016/j.rse.2006.09.003

ZARCO-TEJADA P. J., **GONZÁLEZ-DUGO** V., **BERNI** J. A. J., 2012, « Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera », *Remote Sensing of Environment*, 117. doi:10.1016/j.rse.2011.10.007

ZHANG W., **MCMANUS** P., **DUNCAN** E., 2018, « A Raster-Based Subdividing Indicator to Map Urban Heat Vulnerability: A Case Study in Sydney, Australia », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), p. 2516. doi:10.3390/ijerph15112516

ZHAO L., **LEE** X., **SMITH** R. B., **OLESON** K., 2014a, « Strong contributions of local background climate to urban heat islands », *Nature*, 511(7508), p. 216-219. doi:10.1038/nature13462

ZHAO L., **OPPENHEIMER** M., **ZHU** Q., **BALDWIN** J. W., **EBI** K. L., **BOU-ZEID** E., **GUAN** K., **LIU** X., 2018, « Interactions between urban heat islands and heat waves », *Environmental Research Letters*, 13(3), p. 034003. doi:10.1088/1748-9326/aa9f73

ZHENG B., **CHEN** Y., **HU** Y., 2022, « Analysis of land cover and SUHII pattern using local climate zone framework—A case study of Chang-Zhu-Tan main urban area », *Urban Climate*, 43, p. 101153. doi:10.1016/j.uclim.2022.101153

ZHENG M., **ZHANG** J., **SHI** L., **ZHANG** D., **PANGALI SHARMA** T. P., **PRODHAN** F. A., 2020, « Mapping Heat-Related Risks in Northern Jiangxi Province of China Based on Two Spatial Assessment Frameworks Approaches », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), p. 6584. doi:10.3390/ijerph17186584

ZHOU L., **DICKINSON** R. E., **TIAN** Y., **FANG** J., **LI** Q., **KAUFMANN** R. K., **TUCKER** C. J., **MYNENI** R. B., 2004, « Evidence for a significant urbanization effect on climate in China », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(26), p. 9540-9544. doi:10.1073/pnas.0400357101

ZHOU W., **HUANG** G., **CADENASSO** M. L., 2011, « Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes », *Landscape and Urban Planning*, 102(1), p. 54-63. doi:10.1016/j.landurbplan.2011.03.009

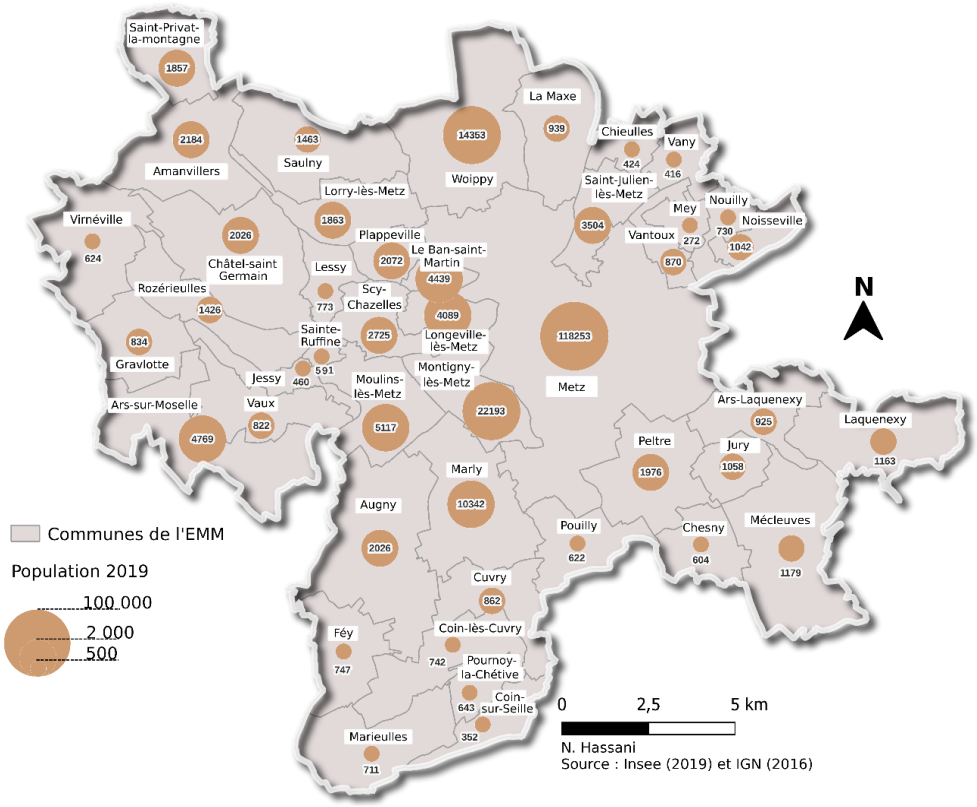
ZHOU X., **OKAZE** T., **REN** C., **CAI** M., **ISHIDA** Y., **MOCHIDA** A., 2020, « Mapping local climate zones for a Japanese large city by an extended workflow of WUDAPT Level 0 method », *Urban Climate*, 33, p. 100660. doi:10.1016/j.uclim.2020.100660

ZHOU X.-N., **DU** Y.-Z., **ZHAO** H.-Z., **LIU** Y.-X., 2018, « Localization of five-dimensional Elko spinors with non-minimal coupling on thick branes », *The European Physical Journal C*, 78(6), p. 493. doi:10.1140/epjc/s10052-018-5971-1

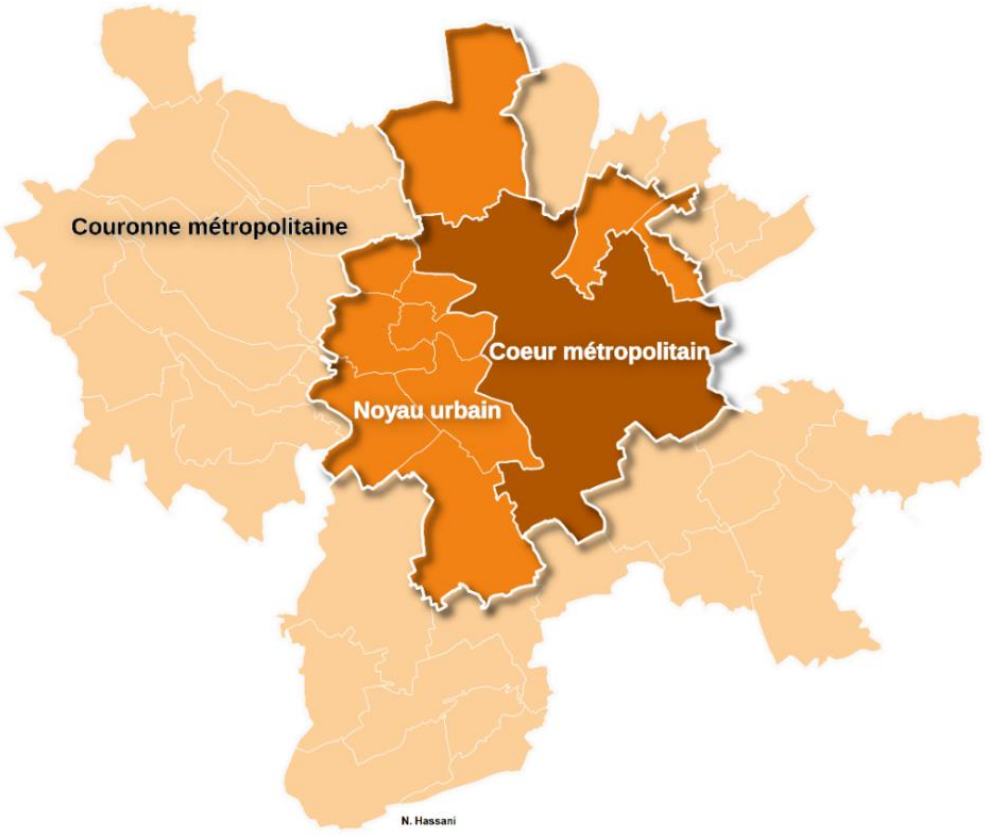
ZHU W., **YUAN** C., 2023, « Urban heat health risk assessment in Singapore to support resilient urban design — By integrating urban heat and the distribution of the elderly population », *Cities*, 132, p. 104103. doi:10.1016/j.cities.2022.104103

ZYANI B., 1986, « Habitat, contrainte foncière et développement urbain à Casablanca », *in* Baduel P. R. (dir.), *Habitat, État, société au Maghreb*, CNRS Éditions, p. 213-229. doi:10.4000/books.editionscnrs.811

Annexes



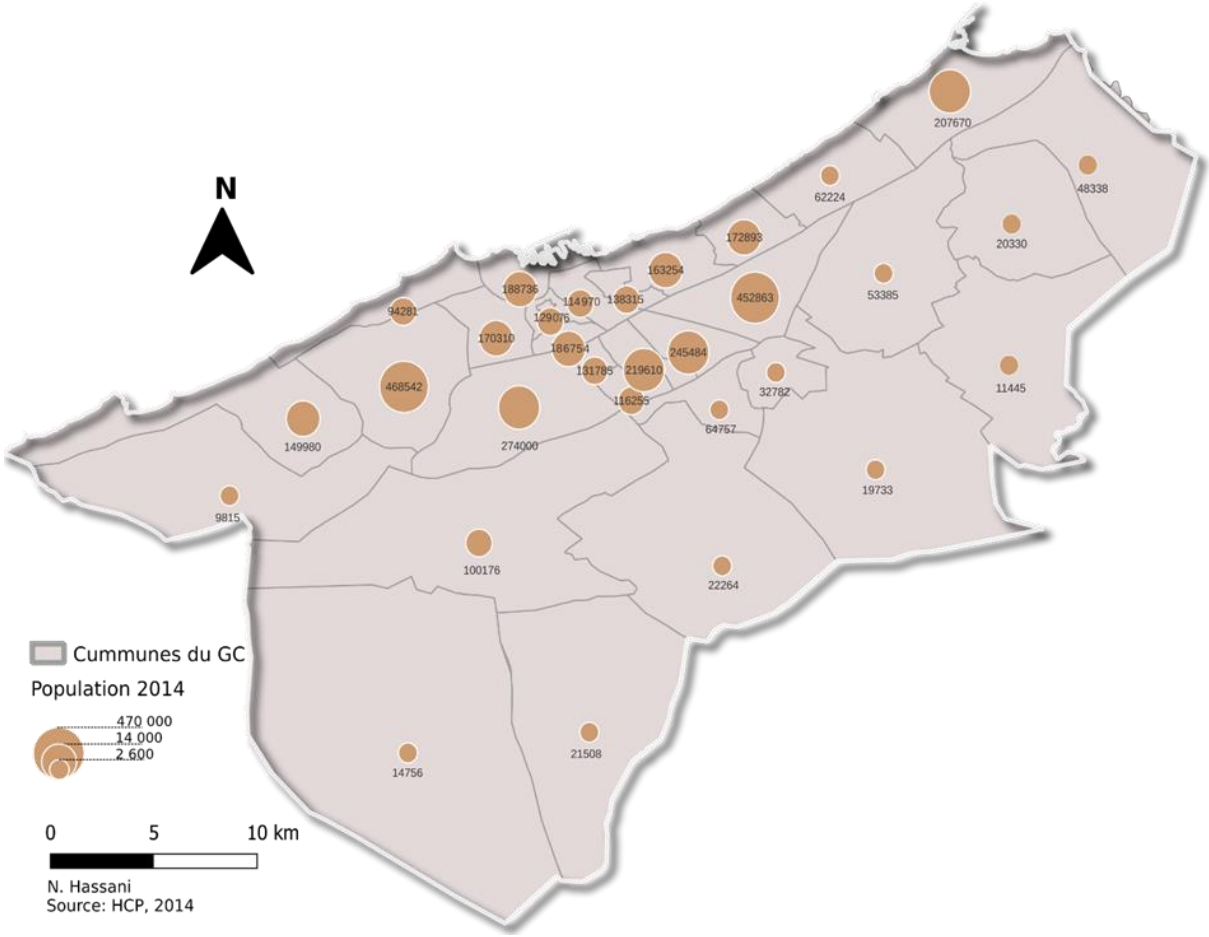
Annexe 1 : Population des communes de l'Eurométropole de Metz.



Annexe 2 : Composition du territoire de l'Eurométropole de Metz.

Liste des communes					
1	Anfa	12	SIdi Moumen	23	Tit Mellil
2	Maârif	13	Sidi Othmane	24	Lahraouiyine
3	Sidi Belyout	14	Moulay Rachid	25	Médouina
4	Hay Hassani	15	Ben M'sick	26	Sidi Hajjaj Oued Hassar
5	Aïn Chock	16	Sbata	27	Mejjatia Ouled Taleb
6	Mers Sultan	17	Mechaouar	28	Mohammédia
7	Al Fida	18	Dar Bouazza	29	Ain Harrouda
8	Essoukhour Assawda	19	Bouskoura	30	Ben Yaklef
9	Hay Mohammedi	20	Nouaceur	31	Echellalate
10	Aïn Sebaâ	21	Ouled Azzouz	32	Sidi Moussa Ben Mejdoub
11	Sidi Bernoussi	22	Ouled Saleh	33	Sidi Moussa Ben Ali

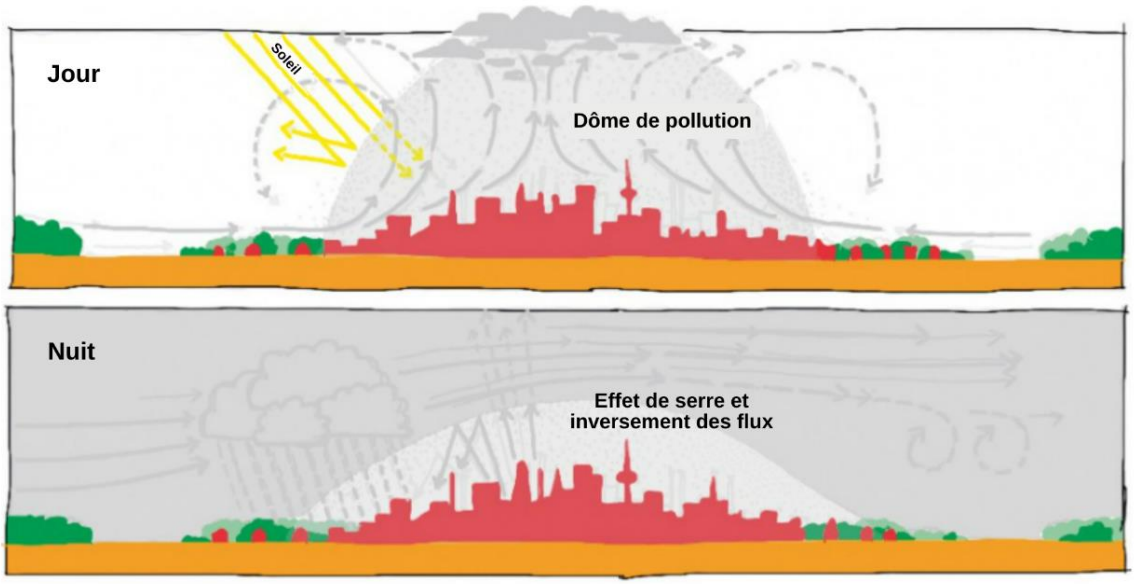
Annexe 3 : Les 33 communes et arrondissements du Grand Casablanca.



Annexe 4 : Population des communes du Grand Casablanca.

Annexe 5 : Photographies de la station météorologique *Metz-Frescaty* de Météo-France.

Annexe 6 : Photographies de la station météorologique *Aéroport Metz-Nancy-Lorraine* de Météo-France.



Annexe 7 : Effets de la pollution atmosphérique sur le microclimat urbain (adapté de Krusche *et al.*, 1982)

Annexe 8 : Données météorologiques (moyennes horaires) au moment du passage du capteur *ECOSTRESS* (source : station Direction Nationale de la Météorologie de Casablanca).

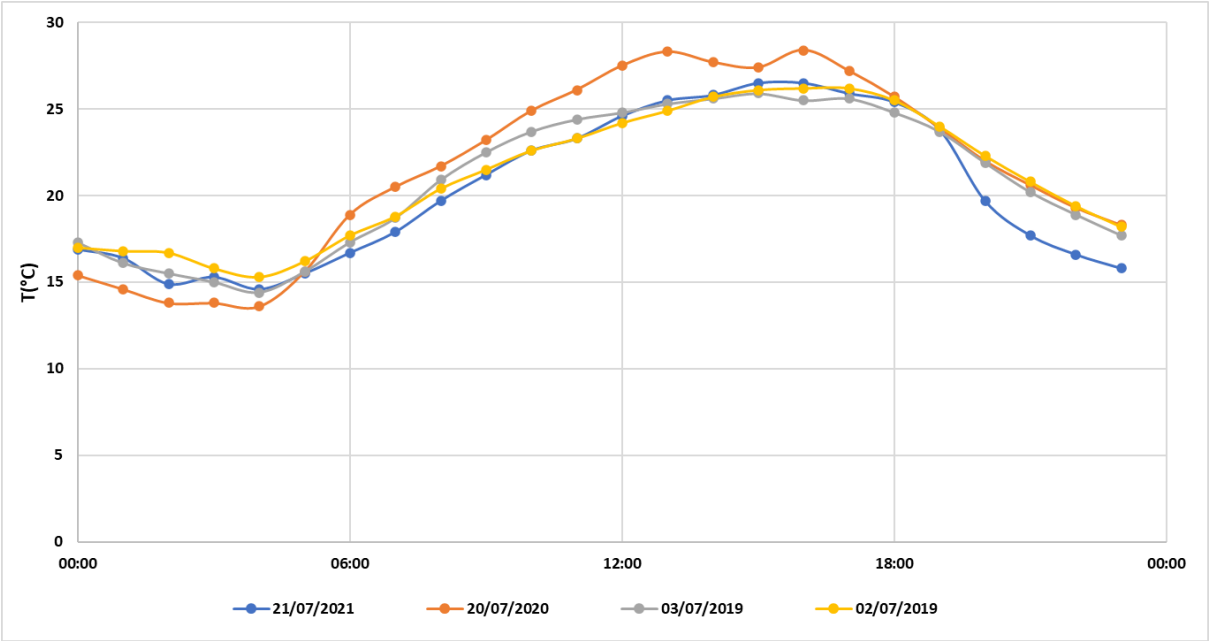
Date et heure (UTC)	T (°C)	HR (%)	Vitesse de vent (km/h)	Direction de vent (°)	Pression Atmosphérique (hPa)
31/05/2022 (21h27)	20,4	76	16,5	330	1016
05/07/2019 (02h05)	19	71	11	40	1018
08/07/2021 (23h11)	21	79	13	10	1017
14/07/2021 (05h01)	16	86	7	80	1016

Annexe 9 : Données météorologiques (moyennes horaires) au moment du passage du capteur *ECOSTRESS* (source : station de Météo-France *Metz-Frescaty*).

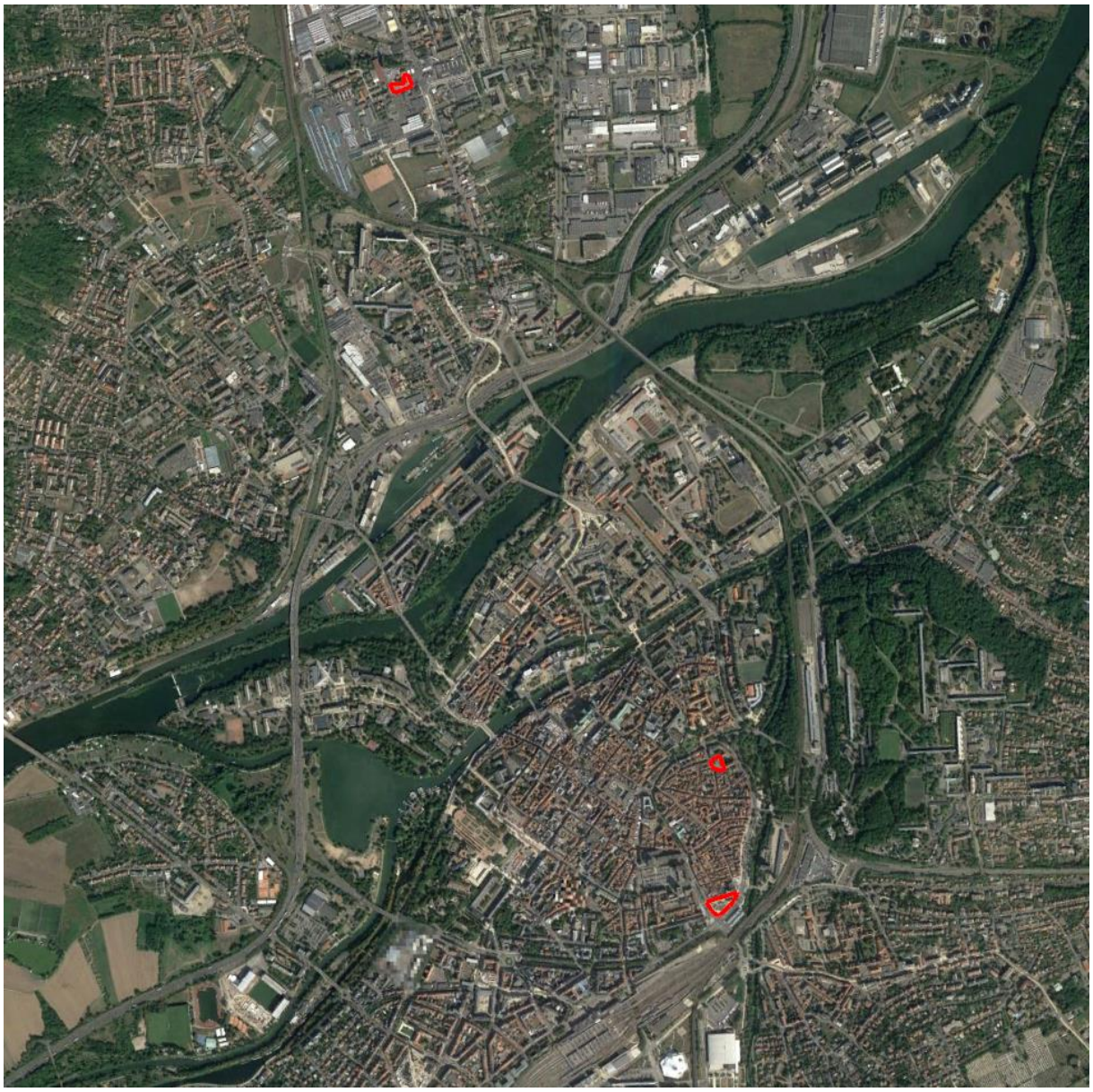
Date et heure (UTC)	T (°C)	HR (%)	Vitesse de vent (km/h)	Direction de vent (°)	Pression Atmosphérique (hPa)
02/07/2019 (04h38)	18,8	71	9	360	1021,6
03/07/2019 (03h47)	15,5	60	9	10	1017,2
16/07/2020 (21h08)	15,5	91	4	280	1019,7
20/07/2020 (23h08)	20,6	59	13	10	1015,6
21/07/2021 (19h29)	25,5	43	8	340	1020,3

Annexe 10 : Horaires du coucher et du lever de soleil dans les deux territoires d'étude.

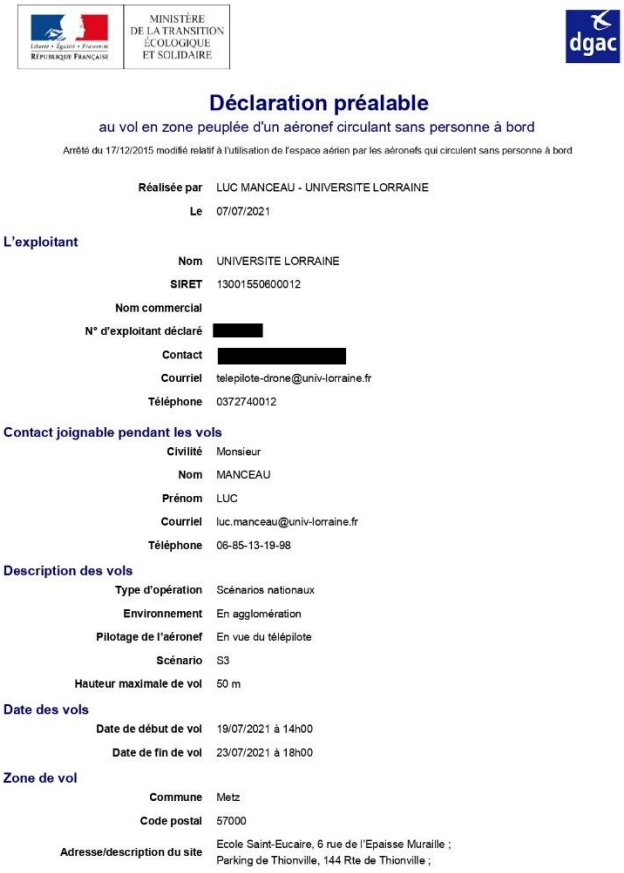
Ville	Date	Heure de prise (heure locale)	Coucher de soleil (heure locale)	Lever de soleil
EMM	21/07/2021	21h29	21:30	05:53
	20/07/2020	01h08	21:31	05:52
	03/07/2019	03h47	21:43	05:36
	02/07/2019	06h38	21:43	05:35
	16/07/2020	23h08	21:35	05:47
GC	31/05/2022	22h27	20:35	06:21
	08/07/2021	00h11	20:44	06:27
	05/07/2019	03h05	20:44	06:26
	14/07/2021	06h01	20:42	06:30



Annexe 11 : Températures enregistrées par la station *Metz-Frescaty* durant les journées de la prise des images *ECOSTRESS*.



Annexe 12 : Image satellite de *Google Earth* montant les sites choisis pour les missions drone.



MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

dgac

Déclaration préalable

au vol en zone peuplée d'un aéronef circulant sans personne à bord

Arrêté du 17/12/2015 modifié relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord

Réalisée par	LUC MANCEAU - UNIVERSITE LORRAINE
Le	07/07/2021

L'exploitant

Nom	UNIVERSITE LORRAINE
SIRET	13001550600012
Nom commercial	
N° d'exploitant déclaré	[redacted]
Contact	[redacted]
Courriel	telepilote-drone@univ-lorraine.fr
Téléphone	0372740012

Contact joignable pendant les vols

Civilité	Monsieur
Nom	MANCEAU
Prénom	LUC
Courriel	luc.manceau@univ-lorraine.fr
Téléphone	06-85-13-19-98

Description des vols

Type d'opération	Scénarios nationaux
Environnement	En agglomération
Pilotage de l'aéronef	En vue du télépilote
Scénario	S3
Hauteur maximale de vol	50 m

Date des vols

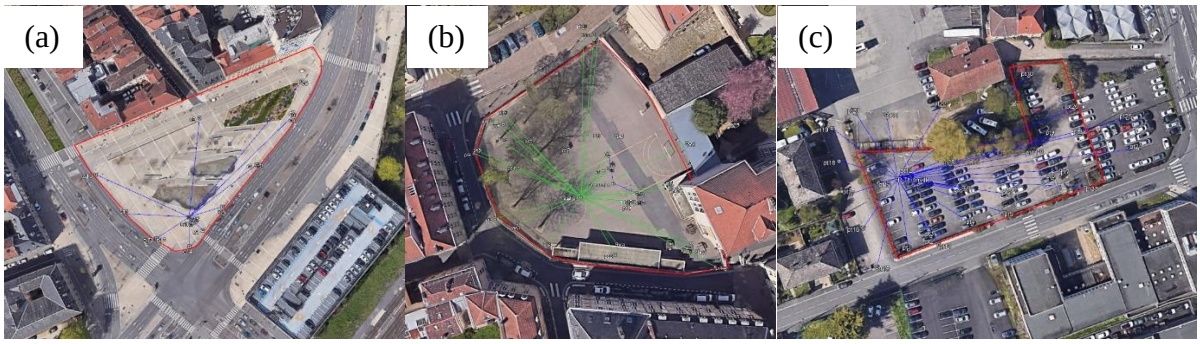
Date de début de vol	19/07/2021 à 14h00
Date de fin de vol	23/07/2021 à 18h00

Zone de vol

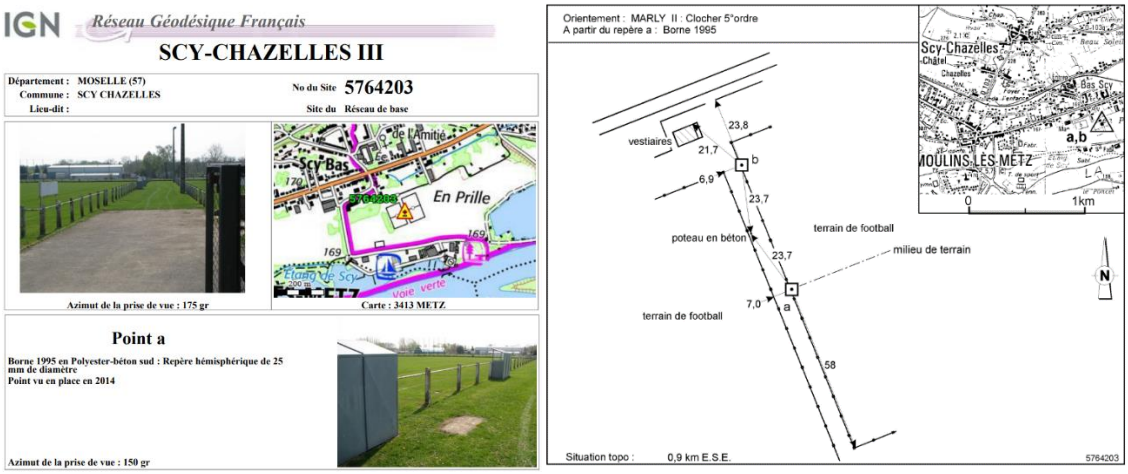
Commune	Metz
Code postal	57000
Adresse/description du site	Ecole Saint-Eucaire, 6 rue de l'Epaisse Muraille ; Parking de Thionville, 144 Rte de Thionville ;

Annexe 13 : Autorisation délivrée par la préfecture de la Moselle pour la mission drone dans la cour de l'école Saint-Eucaire

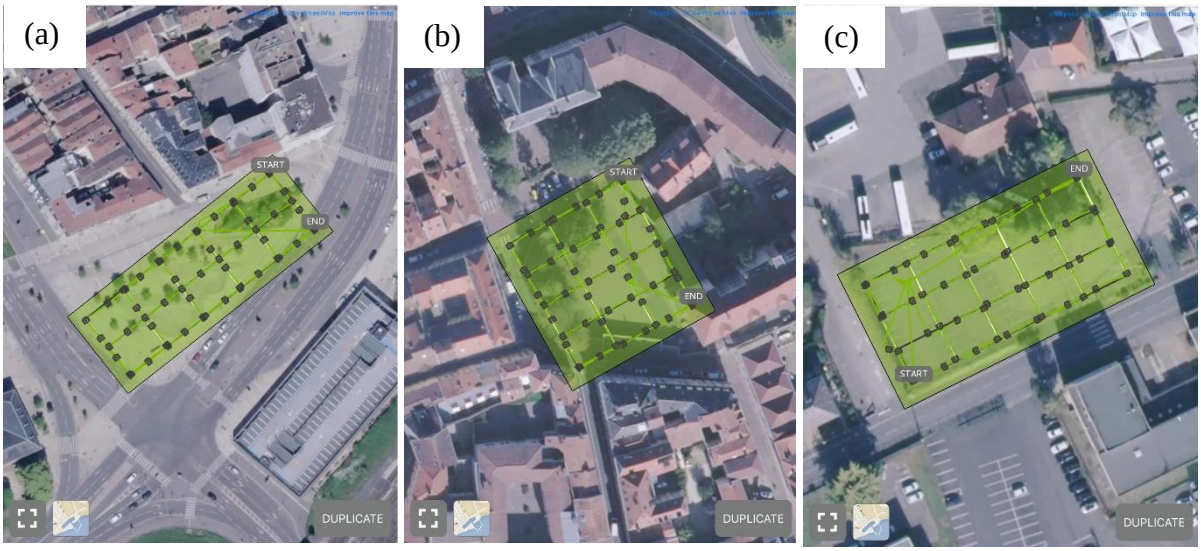
Annexe 14 : Arrêté municipal pour la mission drone dans le parking de la route de Thionville avant travaux.



Annexe 15 : Réseaux de points de contrôle GPS des trois sites étudiés (a : place Mazelle ; b : cour Saint-Eucaire ; c : parking route de Thionville (fond de carte : *Google Satellite*)).



Annexe 16 : Borne géodésique du réseau géodésique français dans la commune de Scy-Chazelles (source : IGN)



Annexe 17 : Plans de vol suivis pour les trois sites étudiés issus de plate-forme de l'application *Pix4D* (a : place Mazelle ; b : cour Saint-Eucaire ; c : parking route de Thionville)

Annexe 18 : Aperçu détaillé des conditions météorologiques sur la plate-forme *UAV Forcast*(source : uavforecast.com).

1) La place Mazelle neutralisée et surveillée par un agent de la police municipale.
2) Partie « bosquet » de la place.
3) Mesures mobiles de température de l'air sous abri et d'hygrométrie dans la fontaine urbaine à jets d'eau.
4) Préparation du drone et de la caméra thermique embarquée (située dans l'abri en polystyrène).
5) Dépose du drone sur l'aire d'envol.
6) Le drone au décollage.
7) Le drone en vol.
8) Téléchargement des données collectées par les sondes de température des mires thermiques après le vol.

Annexe 19 : Légende des photographies de la figure 104 (de haut en bas et de gauche à droite).

1) Mise en place de la station totale GPS sur le repère géodésique local (clou topographique). Opérateurs : Luc Manceau et Ikram Boumaiza
2) Mires thermiques et sondes de température tinytag
3) Mires thermiques et drone sur aire d'envol
4) Vue du plan de vol du drone sur l'Ipad
5) Télépilote (Luc Manceau) et assistant télépilote (Gilles Drogue) pendant le vol
6)Vue sur la console de la station météorologiques Vantage Pro 2 Plus
7) Vue de la caméra FLIR A655sc, FOV 45°
8) Stations météorologiques et la station de confort thermique

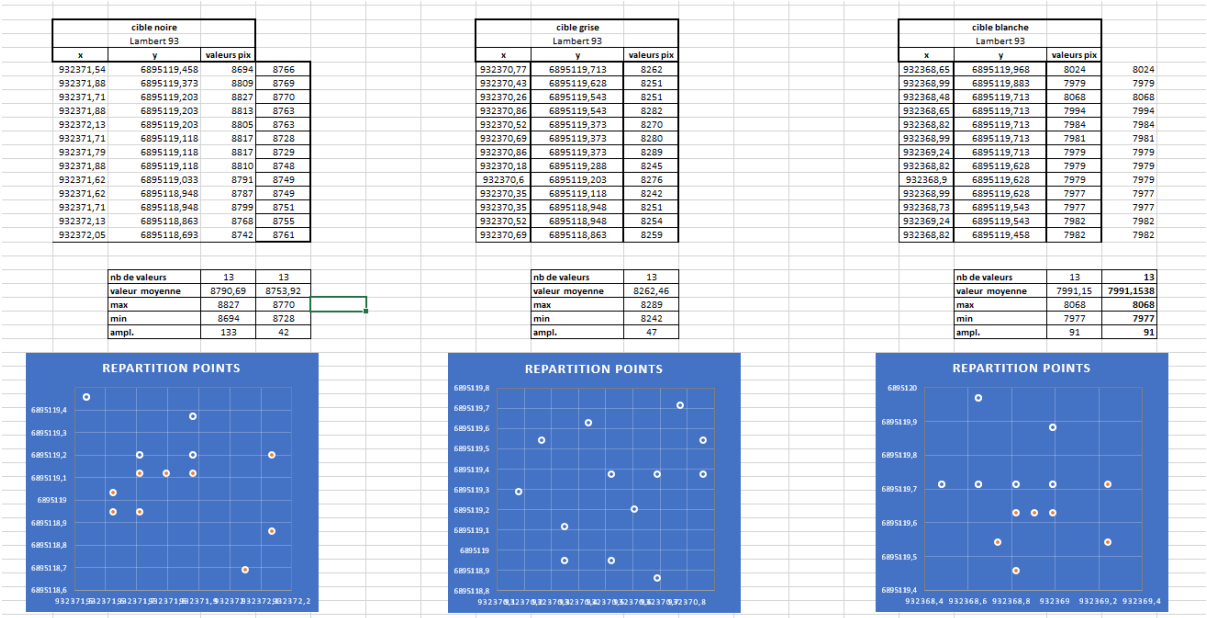
Annexe 20 : Légende des photographies de la figure 105 (de haut en bas et de gauche à droite).

1) Vue générale du site en direction du nord-est à 13h29 locales.
2) Vue générale du site en direction du nord-ouest à 13h38 locales.
3) Mise en place de la station totale GPS sur le repère géodésique locale (clou topographique).
4) Préparation des mires thermiques.
5) Le drone juste avant le décollage.
6) Vue de près de l'aéronef (drone quadrcioptère du LOTERR)
7) Vue de la caméra thermique FLIR Vue Pro 336 9 mm 35° FOV dans son abri anti-radiation et anti refroidissement éolien.
8) Signalisation de l'arrêté municipal à l'entrée du parking.

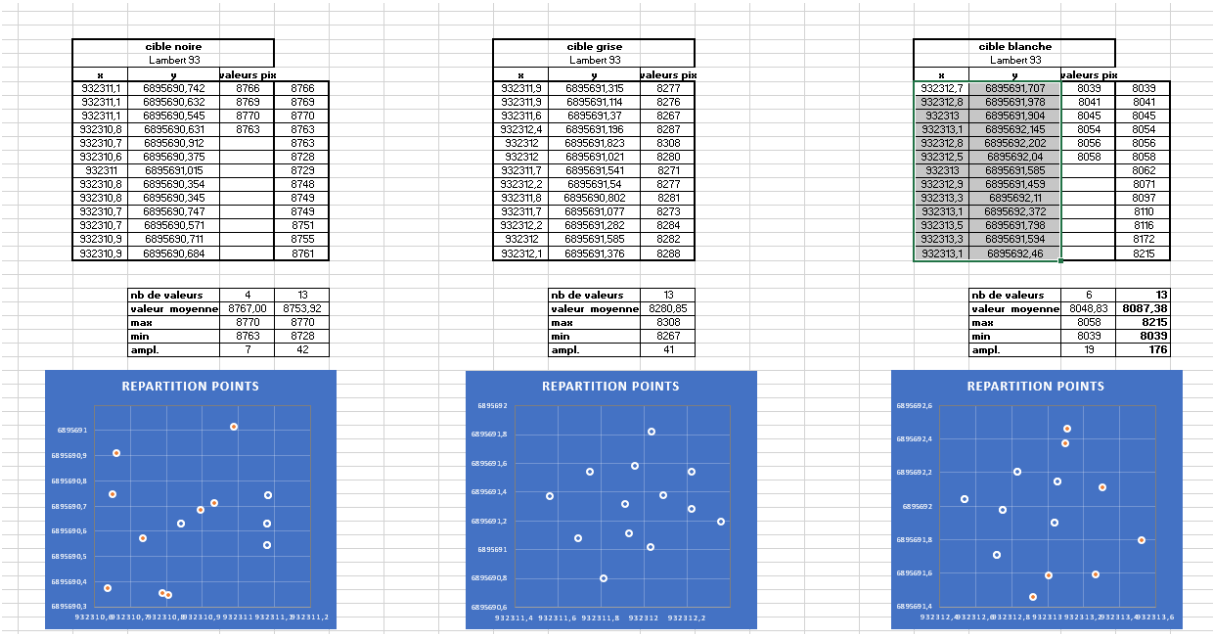
Annexe 21 : Légende des photographies de la figure 106 (de haut en bas et de gauche à droite).

1) Vue générale du site en direction du sud.
2) Préparation des mires thermiques.
3) Signalisation de l'arrêté municipal à l'entrée du parking.
4) Aperçu détaillé des conditions météorologiques issues de la plate-forme uavforecast.com
5) Mise en place de la station totale GPS sur le repère géodésique locale (clou topographique).
6) Mise en place de la station météorologique Vantage Pro plus.
7) Manipulation du drone par le télépilote et les assistants.
8) Le drone juste avant le décollage

Annexe 22 : Légende des photographies de la figure 107 (de haut en bas et de gauche à droite).



Annexe 23 : Répartition des pixels des trois cibles issues de l'othomosaïque de la place Mazelle (juin 2021).



cible noire Lambert 93			
x	y	valeurs pix	
932311,1	6895690,742	8766	8766
932311,1	6895690,632	8769	8769
932311,1	6895690,545	8770	8770
932310,8	6895690,631	8763	8763
932310,7	6895690,912		8763
932310,6	6895690,375		8728
932311	6895691,015		8729
932310,8	6895690,354		8748
932310,8	6895690,345		8749
932310,7	6895690,747		8749
932310,7	6895690,571		8751
932310,9	6895690,711		8755
932310,9	6895690,684		8761

nb de valeurs	4	13
valeur moyenne	8767,00	8753,92
max	8770	8770
min	8763	8728
ampl.	7	42

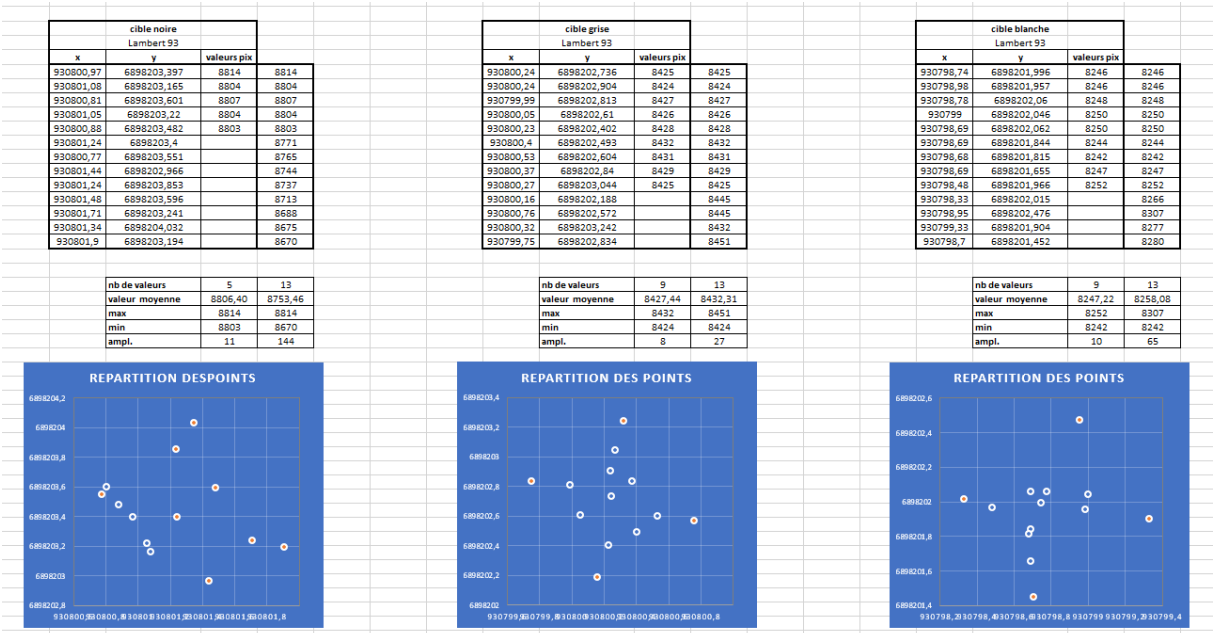
cible grise Lambert 93			
x	y	valeurs pix	
932311,9	6895691,315	8277	
932311,9	6895691,114	8276	
932311,6	6895691,37	8267	
932312,4	6895691,196	8287	
932312	6895691,823	8308	
932312	6895691,021	8280	
932311,7	6895691,541	8271	
932312,2	6895691,54	8277	
932311,8	6895690,802	8281	
932311,7	6895691,077	8273	
932312,2	6895691,282	8284	
932312	6895691,585	8282	
932312,1	6895691,376	8288	

nb de valeurs	13
valeur moyenne	8280,85
max	8308
min	8267
ampl.	41

cible blanche Lambert 93			
x	y	valeurs pix	
932312,7	6895691,707	8039	8039
932312,8	6895691,978	8041	8041
932313	6895691,904	8045	8045
932313,1	6895692,145	8054	8054
932312,8	6895692,202	8056	8056
932312,5	6895692,04	8058	8058
932313	6895691,585		8062
932312,9	6895691,459		8071
932313,3	6895692,11		8097
932313,1	6895692,372		8110
932313,5	6895691,798		8116
932313,3	6895691,594		8172
932313,1	6895692,46		8215

nb de valeurs	6	**13**
valeur moyenne	8048,83	**8087,38**
max	8058	**8215**
min	8039	**8039**
ampl.	19	**176**

Annexe 24 : Répartition des pixels des trois cibles issues de l'othomosaïque de la cour Saint-Eucaire lors du vol avant travaux (juillet 2021).



cible noire Lambert 93			
x	y	valeurs pix	
930800,97	6898203,397	8814	8814
930801,08	6898203,165	8804	8804
930800,81	6898203,601	8807	8807
930801,05	6898203,22	8804	8804
930800,88	6898203,482	8803	8803
930801,24	6898203,4		8771
930800,77	6898203,551		8765
930801,44	6898202,966		8744
930801,24	6898203,853		8737
930801,48	6898203,596		8713
930801,71	6898203,241		8688
930801,34	6898204,032		8675
930801,9	6898203,194		8670

nb de valeurs	5	13
valeur moyenne	8806,40	8753,46
max	8814	8814
min	8803	8670
ampl.	11	144

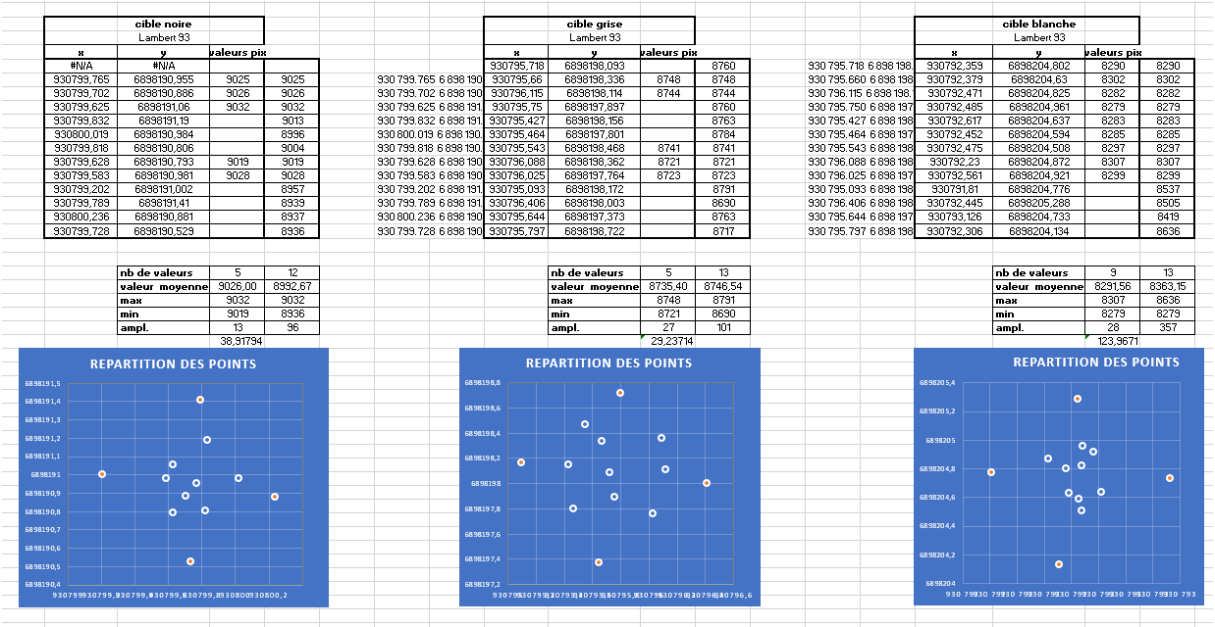
cible grise Lambert 93			
x	y	valeurs pix	
930800,24	6898202,736	8425	8425
930800,24	6898202,904	8424	8424
930799,99	6898202,813	8427	8427
930800,05	6898202,61	8426	8426
930800,23	6898202,402	8428	8428
930800,4	6898202,493	8432	8432
930800,53	6898202,604	8431	8431
930800,37	6898202,84	8429	8429
930800,27	6898203,044	8425	8425
930800,16	6898202,188		8445
930800,76	6898202,572		8445
930800,32	6898203,242		8432
930799,75	6898202,834		8451

nb de valeurs	9	13
valeur moyenne	8427,44	8432,31
max	8432	8451
min	8424	8424
ampl.	8	27

cible blanche Lambert 93			
x	y	valeurs pix	
930798,74	6898201,996	8246	8246
930798,98	6898201,957	8246	8246
930798,78	6898202,06	8248	8248
930799	6898202,046	8250	8250
930798,69	6898202,062	8250	8250
930798,69	6898201,844	8244	8244
930798,68	6898201,815	8242	8242
930798,69	6898201,655	8247	8247
930798,48	6898201,966	8252	8252
930798,33	6898202,015		8266
930798,95	6898202,476		8307
930799,33	6898201,904		8277
930798,7	6898201,452		8280

nb de valeurs	9	13
valeur moyenne	8247,22	8258,08
max	8252	8307
min	8242	8242
ampl.	10	65

Annexe 25 : Répartition des pixels des trois cibles issues de l'othomosaïque du parking route de Thionville lors du vol avant travaux (juillet 2021).



cible noire Lambert 93			
x	y	valeurs pix	
#N/A	#N/A		
930799,765	6898190,955	9025	9025
930799,702	6898190,886	9026	9026
930799,625	6898191,06	9032	9032
930799,832	6898191,19		9013
930800,019	6898190,984		8996
930799,818	6898190,806		9004
930799,628	6898190,793	9019	9019
930799,583	6898190,981	9028	9028
930799,202	6898191,002		8957
930799,789	6898191,41		8939
930800,236	6898190,881		8937
930799,728	6898190,529		8936

nb de valeurs	5	12
valeur moyenne	9026,00	8932,67
max	9032	9032
min	9019	8936
ampl.	13	96
	38,31794	

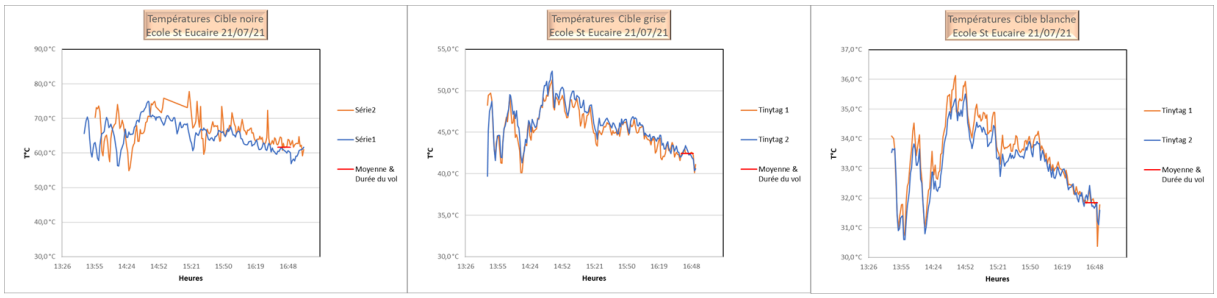
cible grise Lambert 93			
x	y	valeurs pix	
930795,718	6898198,093		8760
930795,66	6898198,336	8748	8748
930796,115	6898198,114	8744	8744
930795,75	6898197,897		8760
930795,427	6898196,156		8763
930795,464	6898197,801		8784
930795,543	6898198,468	8741	8741
930796,088	6898196,362	8721	8721
930796,025	6898197,764	8723	8723
930795,093	6898198,172		8791
930796,406	6898198,003		8690
930795,644	6898197,373		8763
930795,797	6898198,722		8717

nb de valeurs	5	13
valeur moyenne	8735,40	8746,54
max	8748	8791
min	8721	8690
ampl.	27	101
	29,23714	

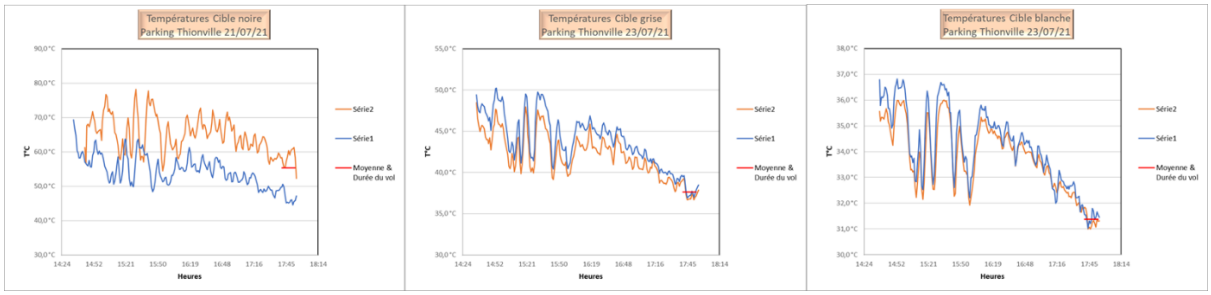
cible blanche Lambert 93			
x	y	valeurs pix	
930792,359	6898204,802	8290	8290
930792,379	6898204,63	8302	8302
930792,471	6898204,825	8282	8282
930792,485	6898204,961	8279	8279
930792,617	6898204,637	8283	8283
930792,452	6898204,594	8285	8285
930792,475	6898204,508	8297	8297
930792,23	6898204,872	8307	8307
930792,561	6898204,321	8299	8299
930791,81	6898204,776		8537
930792,445	6898205,288		8505
930793,126	6898204,733		8419
930792,306	6898204,134		8636

nb de valeurs	9	13
valeur moyenne	8291,56	8363,15
max	8307	8636
min	8279	8279
ampl.	28	357
	123,9671	

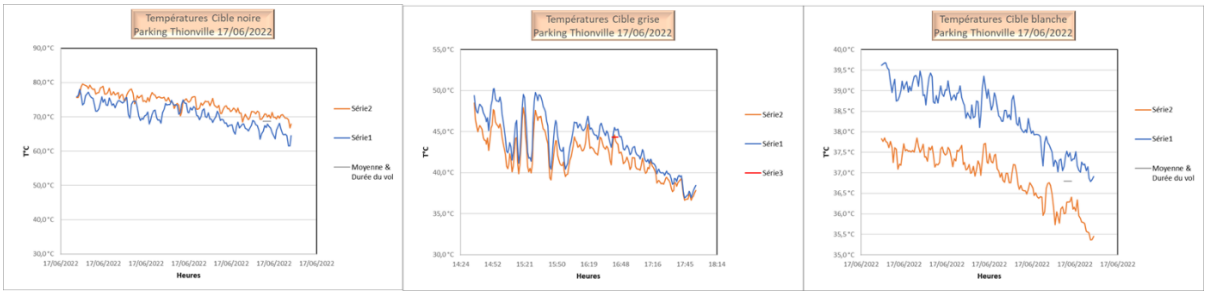
Annexe 26 : Répartition des pixels des trois cibles issues de l'othomosaïque du parking route de Thionville lors du vol après travaux (juin 2022).



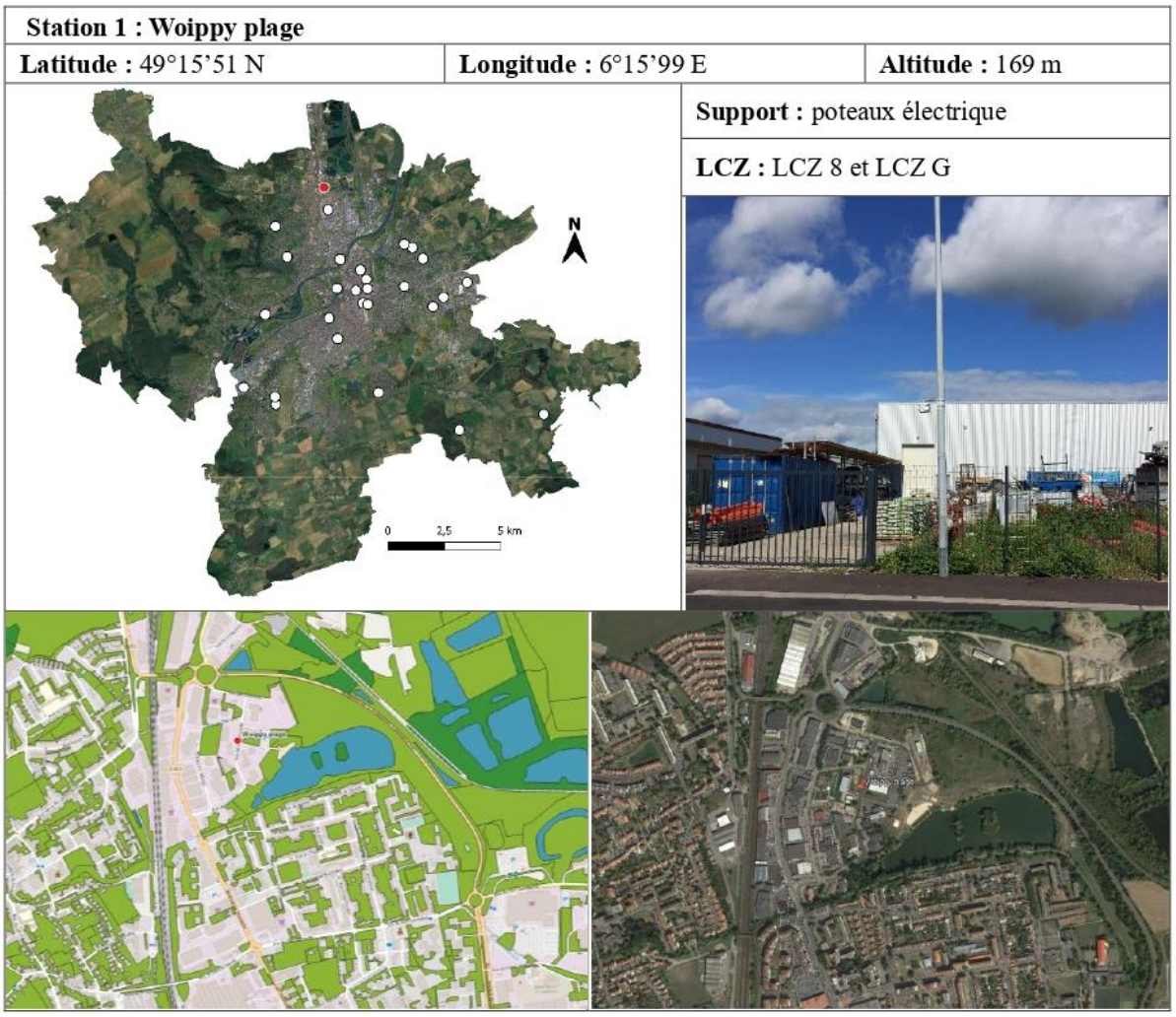
Annexe 27 : Données de températures enregistrées par les sondes *Tinytag* des trois cibles durant le vol sur le site de la cour Saint-Eucaire.



Annexe 28 : Données de températures enregistrées par les sondes *Tinytag* des trois cibles durant le vol avant travaux au parking de la route de Thionville.

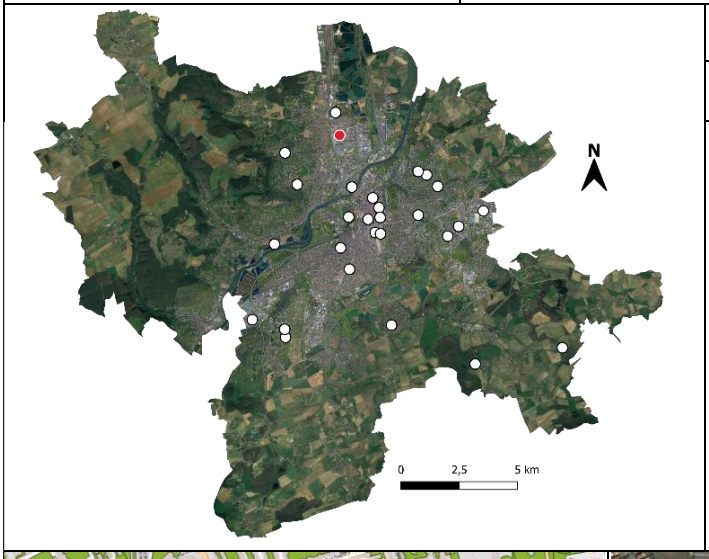


Annexe 29 : Données de températures enregistrées par les sondes *Tinytag* des trois cibles durant le vol après travaux au parking de la route de Thionville.



Annexe 30 : Caractéristiques du point d'observation « *Woippy plage* » du réseau REMTHAM.

Station 2 : Avenue de Thionville		
Latitude : 49°14’23 N	**Longitude :** 6°16’47 E	**Altitude :** 169 m

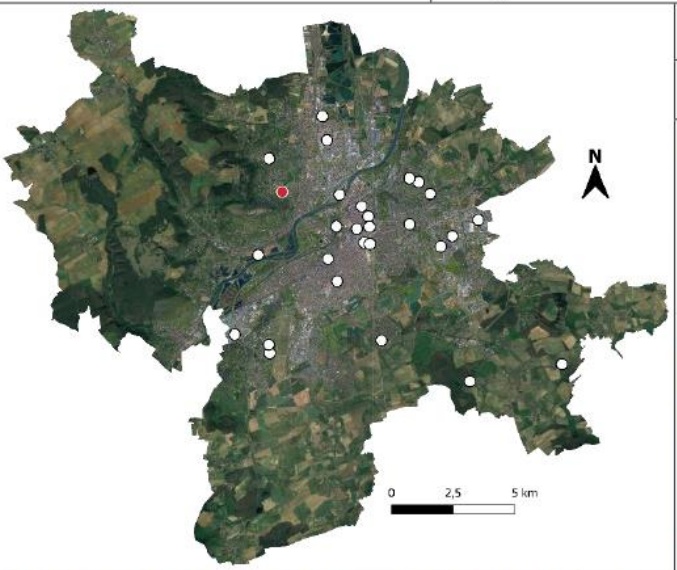


Support : poteaux électrique

LCZ : LCZ 8

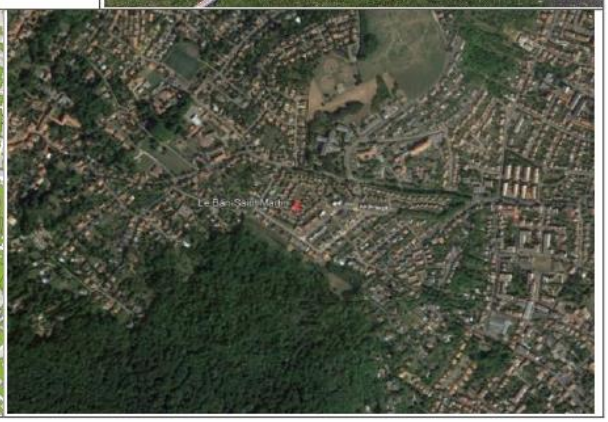
Annexe 31 : Caractéristiques du point d’observation « *Avenue de Thionville* » du réseau REMTHAM.

Station 3 : Le Ban-Saint-Martin		
Latitude : 49°12’90 N	**Longitude :** 6°13’59 E	**Altitude :** 180 m



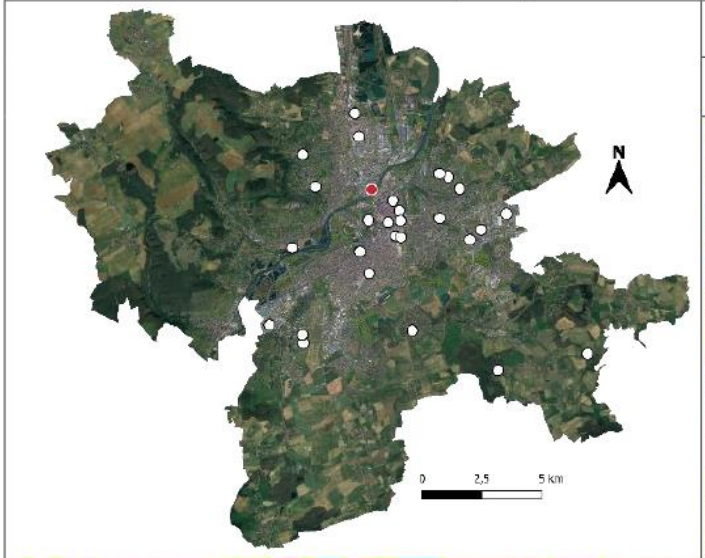
Support : poteaux électrique

LCZ : LCZ 6



Annexe 32 : Caractéristiques du point d’observation « *Le Ban-Saint-Martin* » du réseau REMTHAM**.**

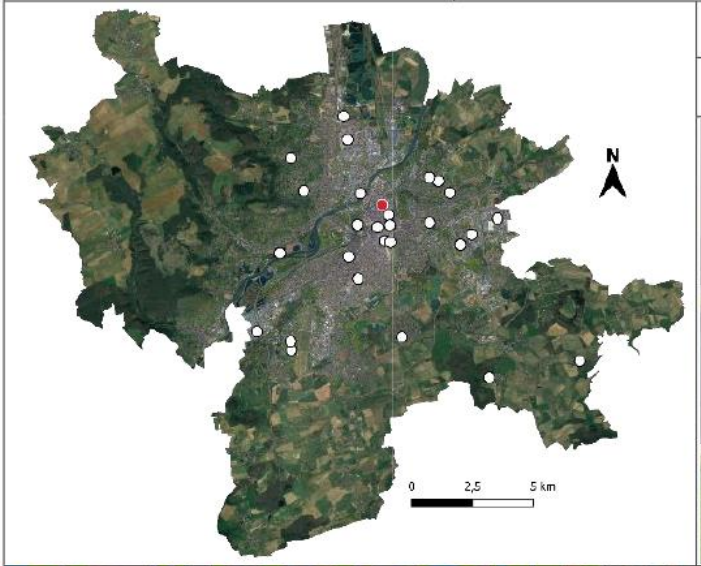
Station 4 : Place de France		
Latitude : 49°07'35 N	**Longitude :** 6°10'03 E	**Altitude :** 165 m



Support : poteau métallique

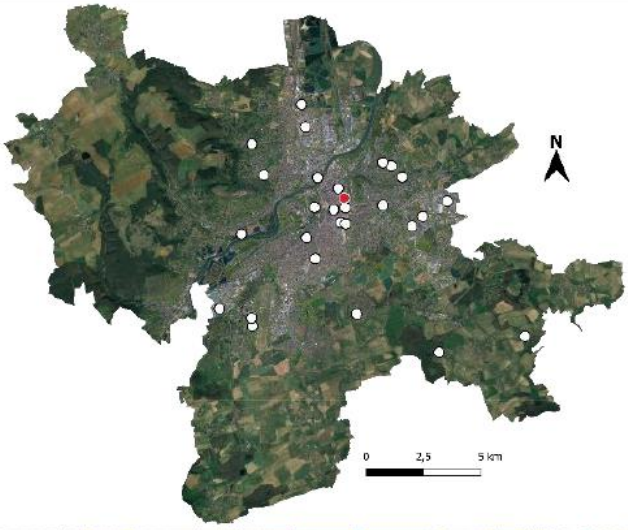
LCZ : LCZ 5 et LCZ B

Annexe 33 : Caractéristiques du point d'observation « *Place de France* » du réseau REMTHAM**.**

Station 5 : Place Jeanne d'Arc		
Latitude : 49°07'18 N	**Longitude :** 6°10'47 E.	**Altitude :** 190 m
	**Support :** poteau métallique **LCZ :** LCZ 2	

Annexe 34 : Caractéristiques du point d'observation « *Place Jeanne d'Arc* » du réseau REMTHAM**.**

Station 6 : Place au Lièvre		
Latitude : 49°07’03 N	**Longitude :** 6°10’59 E	**Altitude :** 175 m

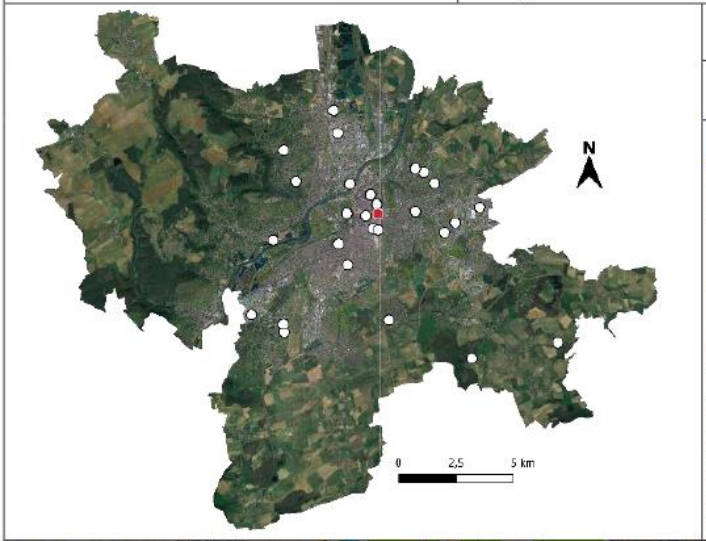


Support : Lampadaire métallique

LCZ : LCZ 2

Annexe 35 : Caractéristiques du point d’observation « *Place au Lièvre* » du réseau REMTHAM**.**

Station 7 : Place Mazelle		
Latitude : 49°06’51 N	**Longitude :** 6°10’47 E	**Altitude :** 180 m

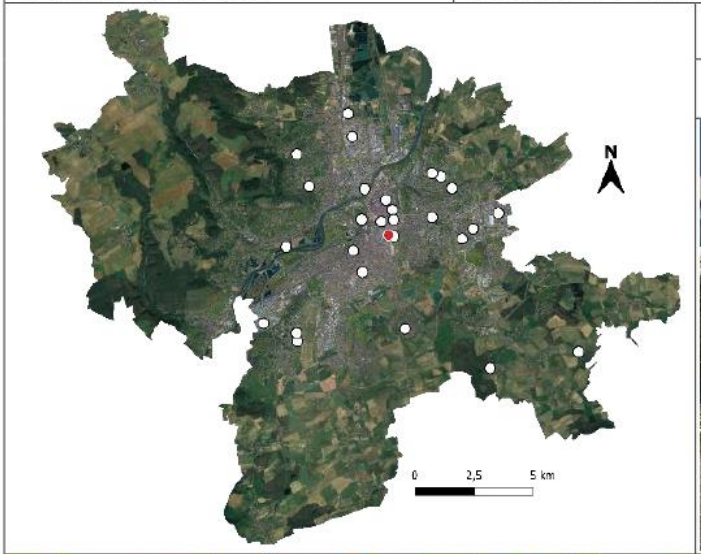


Support : poteau métallique

LCZ : LCZ 2

Annexe 36 : Caractéristiques du point d’observation « *Place Mazelle* » du réseau REMTHAM**.**

Station 8 : Centre Pompidou		
Latitude : 49°10’48 N	**Longitude :** 6°17’99 E	**Altitude :** 190 m

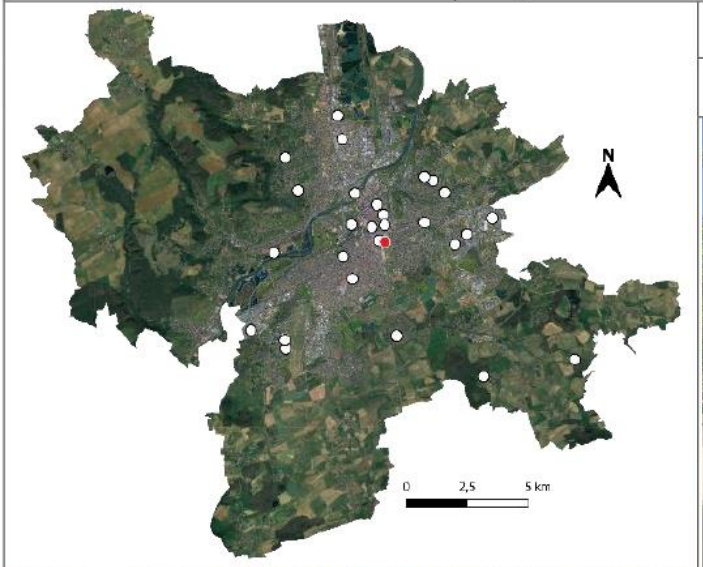


Support : poteau métallique

LCZ : LCZ 5 et LCZ E

Annexe 37 : Caractéristiques du point d’observation « *Centre Pompidou* » du réseau REMTHAM**.**

Station 9 : Les arènes		
Latitude : 49°6’28 N	**Longitude :** 6°11’0 E	**Altitude :** 172 m

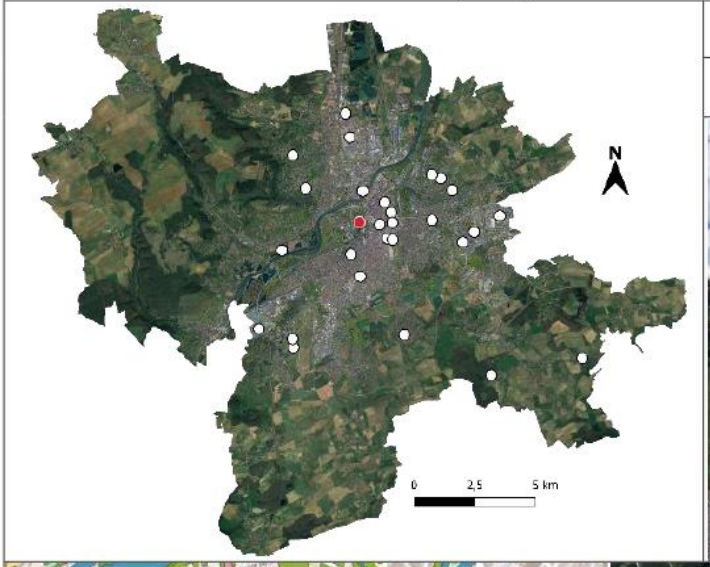


Support : poteau métallique

LCZ : LCZ B

Annexe 38 : Caractéristiques du point d’observation « *Les arènes* » du réseau REMTHAM**.**

Station 10 : Plan d'eau		
Latitude : 49°11'45 N	**Longitude :** 6°16'52 E	**Altitude :** 169 m

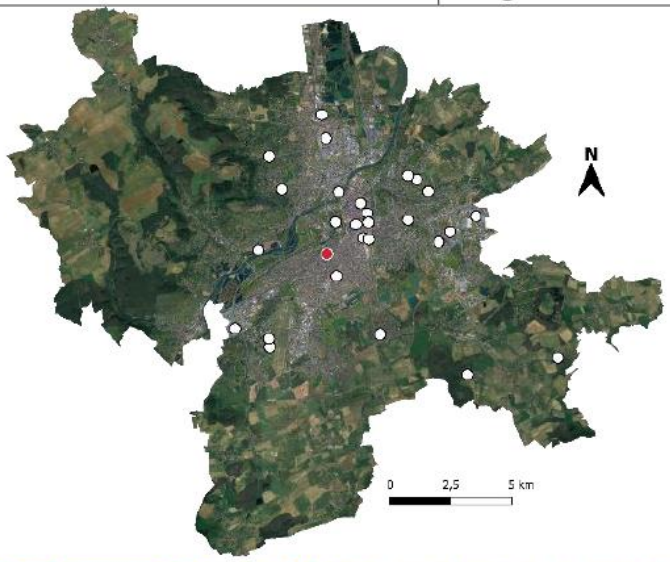


Support : poteau métallique

LCZ : LCZ C et LCZ G

Annexe 39 : Caractéristiques du point d'observation « *Plan d'eau* » du réseau REMTHAM**.**

Station 11 : Rue Saint-Paul		
Latitude : 49°05'40 N	**Longitude :** 6°09'35 E	**Altitude :** 181 m

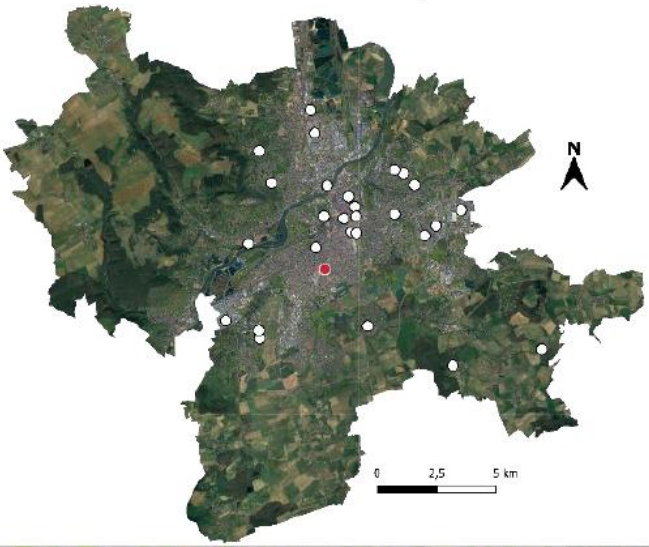


Support : poteau métallique

LCZ : LCZ 5 et LCZ 9

Annexe 40 : Caractéristiques du point d'observation « *Rue Saint-Paul* » du réseau REMTHAM**.**

Station 12 : Rue au Sugnon		
Latitude : 49°05'40 N	**Longitude :** 6°06'52 E	**Altitude :** 179 m

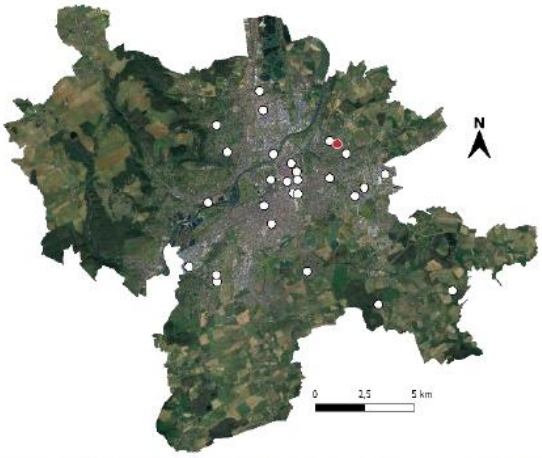


Support : poteau métallique

LCZ : LCZ 5 et LCZ E

Annexe 41 : Caractéristiques du point d'observation « *Rue au Sugnon* » du réseau REMTHAM**.**

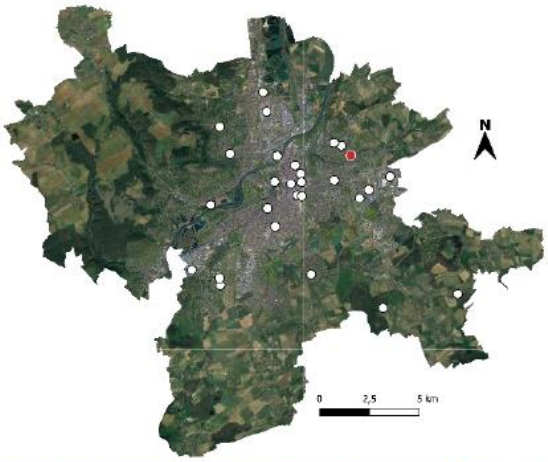
Station 13 : Hauts de Vallières		
Latitude : 49°07'46 N	**Longitude :** 6°12'43 E	**Altitude :** 230 m



Support : poteau métallique

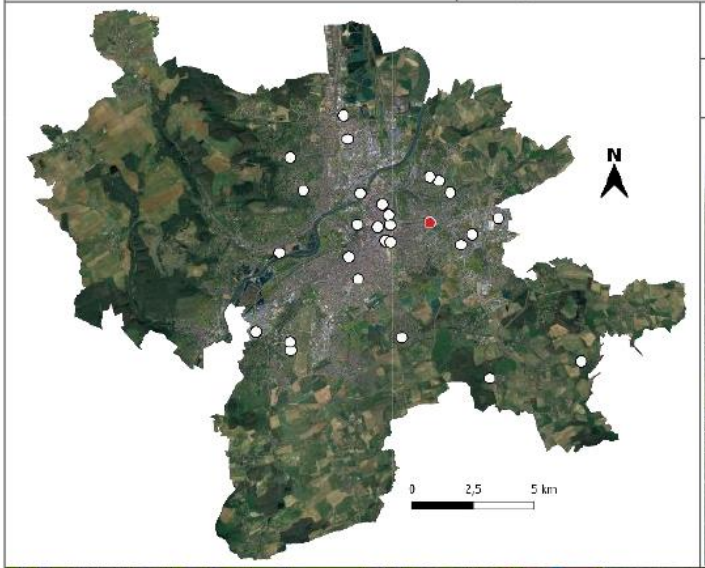
LCZ : LCZ 6

Annexe 42 : Caractéristiques du point d'observation « *Hauts de Vallières* » du réseau REMTHAM**.**

Station 14 : Bas de Vallières		
Latitude : 49°04’21 N	**Longitude :** 6°11’16 E	**Altitude :** 175 m
	**Support :** poteau métallique **LCZ :** LCZ 9 et LCZ 6	

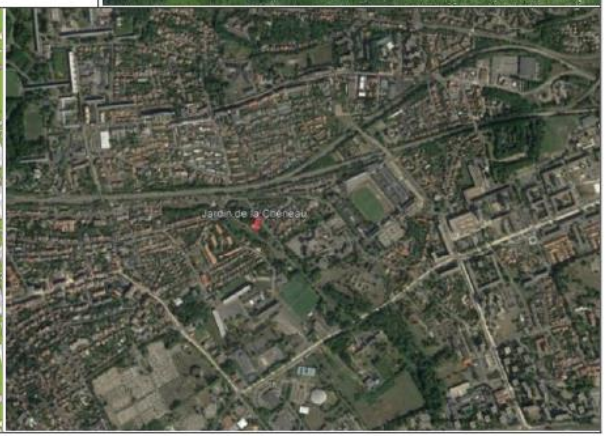
Annexe 43 : Caractéristiques du point d’observation « *Bas de Vallières* » du réseau REMTHAM**.**

Station 15 : Jardin de la Cheneau		
Latitude : 49°06'52 N	**Longitude :** 6°12'21 E	**Altitude :** 190 m



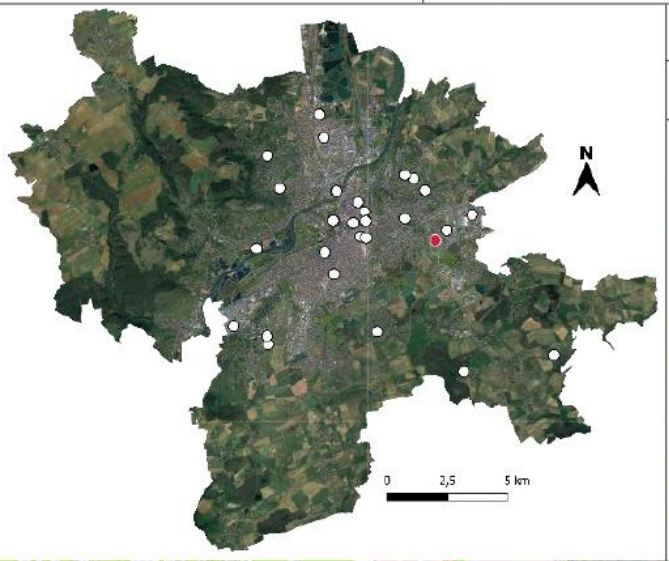
Support : poteau métallique

LCZ : LCZ B



Annexe 44 : Caractéristiques du point d'observation « *Jardin de la Cheneau* » du réseau REMTHAM**.**

Station 16 : Rue Claude Chappe		
Latitude : 49°6'20 N	**Longitude :** 6°13'22 E	**Altitude :** 200 m

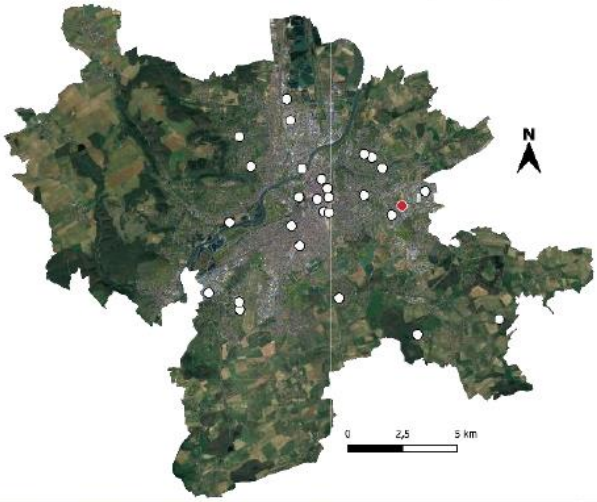


Support : poteau métallique

LCZ : LCZ 5 et LCZ 8

Annexe 45 : Caractéristiques du point d'observation « *Rue Claude Chappe* » du réseau REMTHAM**.**

Station 17 : ZAC de Sébastopol		
Latitude : 49°6'33 N	**Longitude :** 6°13'47 E	**Altitude : 210 m**

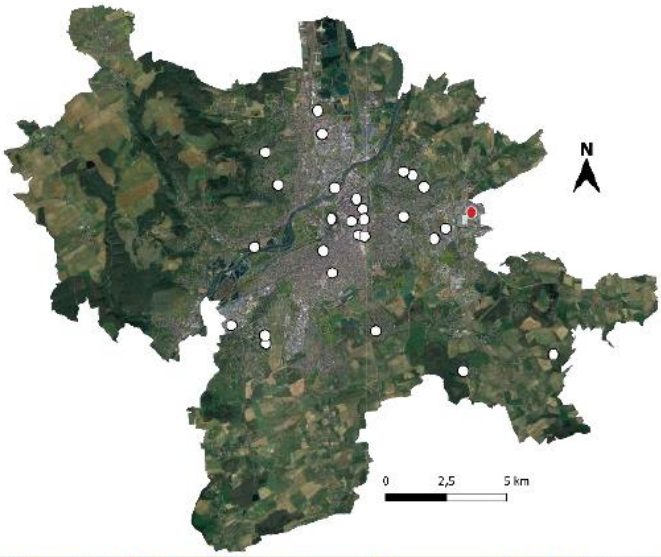


Support : poteau métallique

LCZ : LCZ 8

Annexe 46 Caractéristiques du point d'observation « *ZAC de Sébastopol* » du réseau REMTHAM**.**

Station 18 : ZAC d'Actipôle		
Lat. : 49°06'34 N	**Long. :** 6°14'09 E	**Alt. :** 215 m

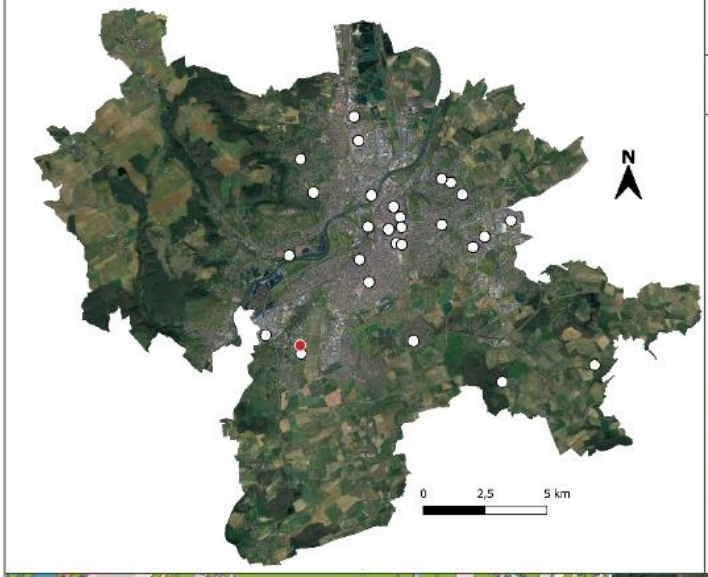


Support : poteau métallique

LCZ : LCZ 8

Annexe 47 : Caractéristiques du point d'observation « *ZAC d'Actipôle* » du réseau REMTHAM.

Station 20 : Base-vie		
Latitude : 49°07’41 N	**Longitude :** 6°13’68 E	**Altitude :** 190 m

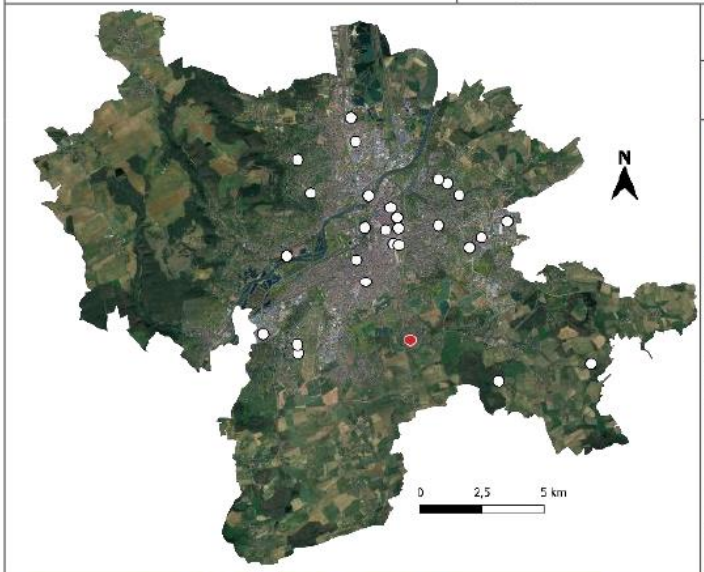


Support : poteau métallique

LCZ : LCZ 8 et LCZ D

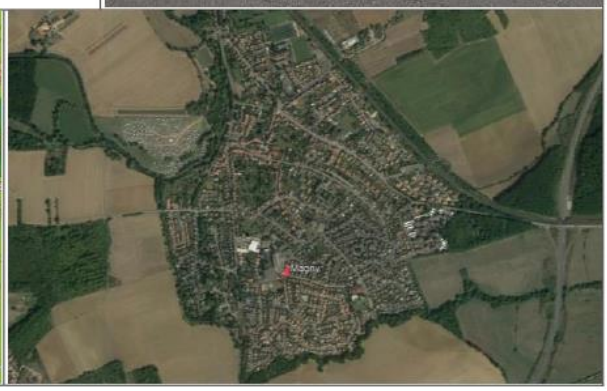
Annexe 48 : Caractéristiques du point d’observation « *Base-vie* » du réseau REMTHAM**.**

Station 19 : Magny		
Latitude : 49°04'21 N	**Longitude :** 6°11'16 E	**Altitude :** 192 m



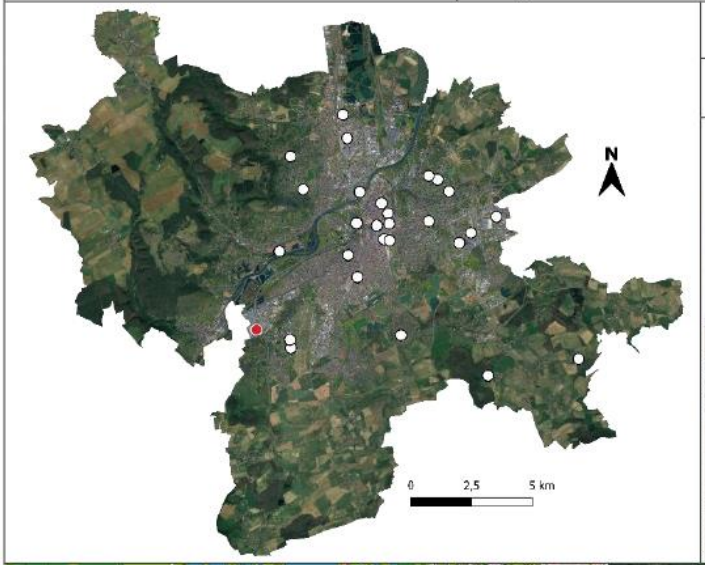
Support : poteau métallique

LCZ : LCZ 9



Annexe 49 : Caractéristiques du point d'observation « *Magny* » du réseau REMTHAM**.**

Station 21 : ZAC d'Augny		
Latitude : 49°4'36 N	**Longitude :** 6°9'22 E	**Altitude :** 170 m

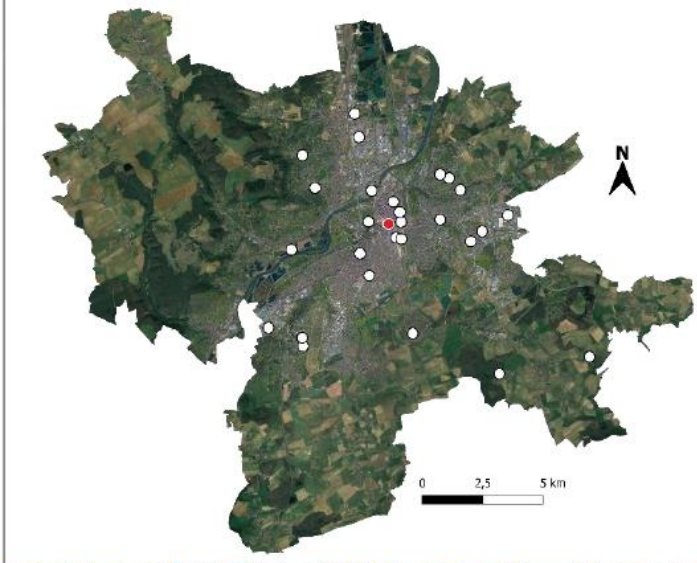


Support : poteau métallique

LCZ : LCZ 8

Annexe 50 : Caractéristiques du point d'observation « *ZAC d'Augny* » du réseau REMTHAM**.**

Station 22 : Ecole Saint-Martin		
Latitude : 49° 6'48 N	**Longitude :** 6° 10'36 E	**Altitude :** 180 m

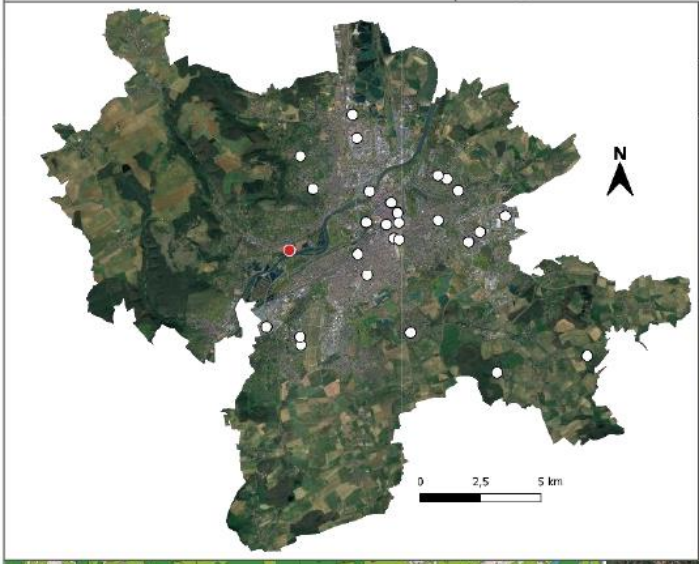


Support : mat métallique

LCZ : LCZ 2

Annexe 51 : Caractéristiques du point d'observation « *Ecole Saint-Martin* » du réseau REMTHAM**.**

Station 23 : Scy-Chazelles		
Latitude : 49° 06'20 N	**Longitude :** 6° 07'15 E	**Altitude :** 169 m

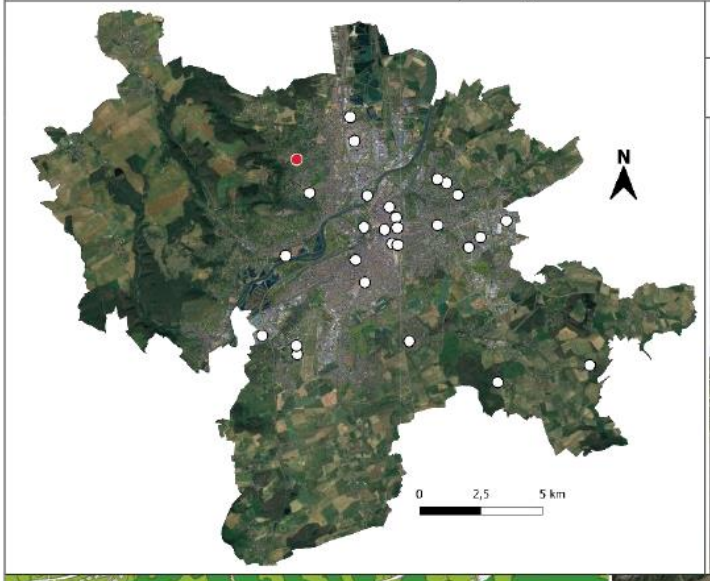


Support : poteau en béton

LCZ : LCZ 8, LCZ G et LCZ D

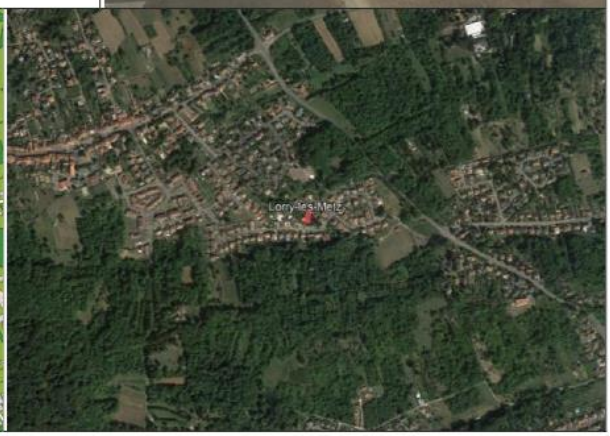
Annexe 52 : Caractéristiques du point d'observation « *Scy-Chazelles* » du réseau REMTHAM**.**

Station 24 : Lorry-lès-Metz		
Latitude : 49° 08’25 N	**Longitude :** 6° 07’45 E	**Altitude :** 221 m



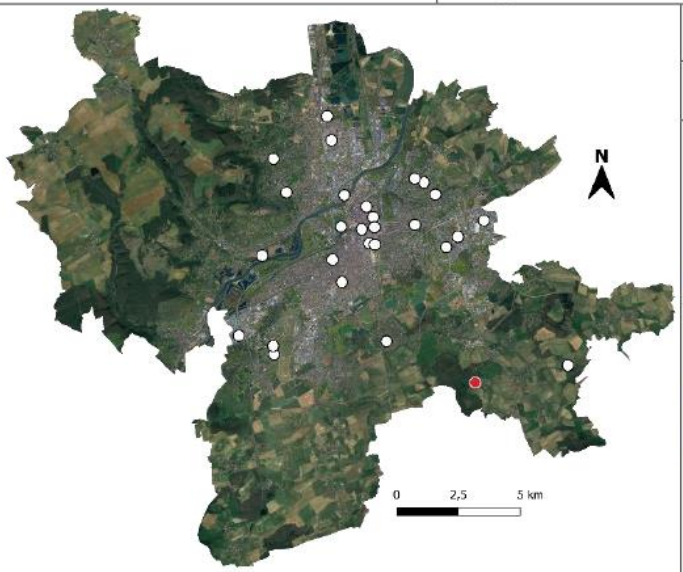
Support : poteau métallique

LCZ : LCZ 6



Annexe 53 : Caractéristiques du point d’observation « *Lorry-lès-Metz* » du réseau REMTHAM**.**

Station 25 : Chesny		
Latitude : 49° 03’22 N	**Longitude :** 6° 14’09 E	**Altitude :** 203 m

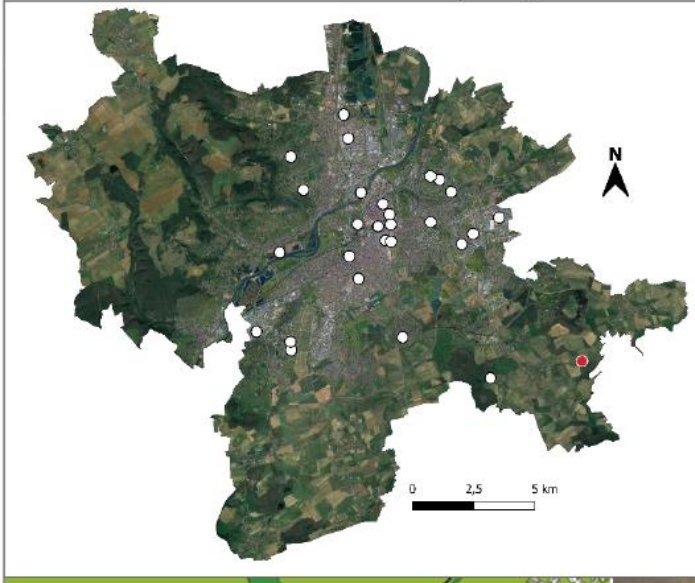


Support : poteau en bois

LCZ : LCZ A et LCZ D

Annexe 54 : Caractéristiques du point d’observation « *Chesny* » du réseau REMTHAM**.**

Station 26 : Mécleuves		
Latitude : 49° 03'39 N	**Longitude :** 6° 17'14 E	**Altitude :** 219 m



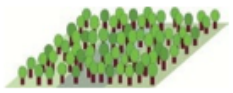
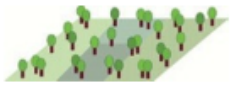
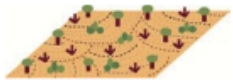
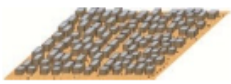
Support : poteau en béton

LCZ : LCZ D

Annexe 55 : Caractéristiques du point d'observation « *Mécleuves* » du réseau REMTHAM**.**

Annexe 56 : Caractéristiques de la mini-station météorologique Kestrel 5500.

Instruments de mesure	**Intervalle de mesure**	**Précision (+/-)**	**Sensibilité**
Sonde (température de l'air)	-29 à 70 °C	0,5 à 0,9 °C	0,1 °C
Sonde (humidité relative)	10 à 90 % à 25 °C sans condensation	±2 % HR	0,1 % HR
Girouette (direction de vent)	0 à 360°	±5°	
Anémomètres (vitesse de vent)	0,6 à 40 m/s	±3 %	0,1 m/s
Pression atmosphérique	700 a à 1100hPa | mbar	1,5 hPa | mbar	0,1 hPa | mbar

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

Annexe 57 : Les dix-sept classes de la classification LCZ (Stewart et Oke, 2012)

Enquête sur la vulnérabilité à la surchauffe urbaine

Cette enquête est destinée à mieux comprendre la vulnérabilité des habitants de la Métropole de Metz face au risque de surchauffe urbaine. L'objectif est de recueillir votre avis sur ce sujet brûlant d'actualité ! Ce questionnaire est strictement anonyme et rapide à remplir (environ 15 minutes). Nous vous remercions vivement pour votre participation !

1. Informations au sujet du répondant et de son environnement

1.1. Vous êtes
○ Femme ○ Homme

1.2. Quelle est votre année de naissance ?
……

1.3. Quelle est votre catégorie professionnelle ?
○ Agriculteur ○ Employé ○ Ouvrier ○ Elève/Etudiant
○ Sans activité professionnelle ○ Artisan, commerçant ou chef d'entreprise
○ Cadres et professions intellectuelles supérieures ○ Retraité ➔ quel était votre métier :……

1.4. Souffrez-vous d'une maladie ou d'un handicap ?
○ Oui ○ Non
Si oui, quelle est sa gravité ?
○ Faible gravité (pas d'atteinte à l'espérance de vie, symptômes légers)
○ Gravité moyenne (pas d'atteinte à l'espérance de vie, symptômes lourds)
○ Forte gravité (atteinte à l'espérance de vie)

1.5. Dans quelle commune et quel quartier habitez-vous ?
Commune :…… , Quartier……, Nom de la rue (optionnel)…… ……..

1.6. Quel est votre type de logement ?
○ Appartement dans un immeuble ○ Appartement dans une maison
○ Maison ○ Autre :……

1.7. Votre logement est-il doté d'un jardin privatif ?
○ Oui ○ Non
Si non, Avez-vous un espace vert (parc ou jardin) à proximité de chez-vous ?
○ Oui ○ Non

1.8. De quels dispositifs d'économie d'énergie est équipé votre logement ?
□ Climatisation □ Double vitrage □ Isolation
□ Ventilateur □Stores □Autre :……..

1.9. Où travaillez-vous ?
□ Chez vous □ Dans un bureau □Ecole/Université
□ En extérieur □ Autre ……

2. Ressenti thermique et perception du risque caniculaire

2.1. Parmi les sujets suivants, quels sont les trois sujets qui vous préoccupent le plus à titre personnel ? (Veuillez sélectionner 3 réponses)
□ La culture □ La défense nationale □ La fiscalité □ La justice □ Le logement □ Le réchauffement climatique
□ La politique □ La santé publique □ L'économie □ L'éducation □ L'emploi □ L'environnement □ L'insécurité

2.2. Parmi ces aléas naturels, lesquels vous inquiètent le plus autour de votre lieu de vie ?
□ Glissements de terrain □ Inondations par débordement de cours d'eau □ Sécheresses □ Épisodes caniculaires
□ Inondations par ruissellement urbain □Pluies intenses □ Tempêtes □ Vagues de froid □Autre:……

2.3. Ces dernières années, les étés vous ont-ils paru de plus en plus chauds là où vous habitez ?
○ Oui ○ Non

2.4. Avez-vous déjà vécu une canicule en Moselle ?
○ Oui ○ Non
Si oui, en quelle(s) année(s) ?……

2.5. Que ressentez-vous lors des épisodes de forte chaleur ?
□ Crampes musculaires □ Difficultés respiratoires □ Grande fatigue/abattement □ Malaise □ Maux de tête
□ Nausées après exposition au soleil □ Sensation de soif □ Température corporelle élevée
□ Transpiration excessive □ Je ne ressens rien de particulier □ Autre : ……

2.6. Vous informez-vous des recommandations sanitaires en cas de vague de chaleur ?
○ Oui ○ Non
Si oui, par quels moyens ?
□ Par les médias traditionnels (presse, radio, télévision) □ Par internet
□ Par voie d'affichage extérieur □ Par des messages diffusés par les pouvoirs publics

2.7. Vous estimez-vous suffisamment sensibilisé(e) par rapport aux risques sanitaires liés aux vagues de chaleur ?
○ Oui ○ Non

2.8. Pensez-vous que dans les prochaines années, le nombre de canicules augmentera sur votre territoire ?
○ Oui ○ Non ○ Je ne sais pas
Si oui, pourquoi ? Si non, pourquoi ?
……

2.9. Pensez-vous que les autorités publiques luttent de manière suffisante contre le risque caniculaire (prévention, amélioration du cadre de vie,...) ?
○ Oui ○ Non ○ Je ne sais pas

2.10. En période de forte chaleur, souffrez-vous davantage de la chaleur le jour ou la nuit ?
○ Le jour ○ La nuit ○ Je ne ressens pas de différence

2.11. A partir de quelle température la chaleur devient-elle insupportable pour vous durant la journée ? Durant la nuit ? Seule une valeur numérique est acceptée.
Température d'inconfort de jour (°C) :……Température d'inconfort de nuit (°C) :……..

2.12. Selon vous, de quels facteurs dépendent les risques pour la santé liés aux épisodes de chaleur ? Numérotez chaque case dans l'ordre de vos préférences de 1 à 5

□ Intensité de la chaleur □ Durée d'exposition
□ Heure d'exposition □ Âge
□ Présence de pathologies chroniques sous-jacentes (diabète, surpoids, asthme, cardiovasculaires, etc.)

2.13. Vos activités quotidiennes sont-elles affectées par la chaleur intense ? ○ Oui ○ Non

Si oui, quels en sont les impacts ? ……..

1.14. Pour chacune des questions suivantes, nous vous demandons d'évaluer votre ressenti sur une échelle allant de 1 à 5.

	1	2	3	4	5
a. A quel point vous sentez-vous habitué(e) aux chaleurs excessives ? 1 : Je n'y suis pas habitué(e). 5 : Je m'y suis habitué(e).	○	○	○	○	○
b. A quel niveau estimez-vous vos connaissances des consignes et conduites à tenir en périodes caniculaires ? 1 : Nul. 5 : Très bon.	○	○	○	○	○
c. A quel point faites-vous confiance aux autorités publiques pour lutter contre les effets sanitaires des vagues de chaleur ? 1 : Je ne leur fais pas du tout confiance. 5 : Je leur fais complètement confiance.	○	○	○	○	○
d. A quel point vous sentez-vous vulnérable face au risque caniculaire ? 1 : Je ne suis pas du tout vulnérable. 5 : Je suis très vulnérable.	○	○	○	○	○

2.13.d. Si la réponse donnée est égale ou supérieure à 4, pourriez-vous dire pourquoi ?
……..

1.15. En cas de canicule, quel est votre niveau d'inquiétude à propos des sujets suivants ? (1 : pas d'inquiétude 5 : forte inquiétude)

	1	2	3	4	5
Le bouleversement de mes activités quotidiennes	○	○	○	○	○
Le malaise ou le décès d'un proche	○	○	○	○	○
Les conséquences sur ma santé (insolation, déshydratation, difficultés respiratoires, malaise, etc.)	○	○	○	○	○
La perturbation de mon sommeil	○	○	○	○	○
Le déclenchement d'incendies	○	○	○	○	○
La survenance d'une sécheresse (assèchement des plantes et jardins, rupture d'alimentation en eau)	○	○	○	○	○

1.16. Souffrez-vous davantage de la chaleur lorsque vous vous trouvez dans un milieu où l'air est particulièrement pollué (par exemple, dans les zones d'embouteillage, dans le centre-ville...) ?
○ Oui ○Non

1.17. L'humidité de l'air ambiant a-t-elle une influence sur votre perception de la chaleur ?
○ Oui ○Non
Quelle est cette influence ? ○ J'ai plus chaud lorsque l'air est sec ○ J'ai plus chaud lorsque l'air est humide

3. Pratiques d'adaptation et comportement en périodes de vague de chaleur

3.1. Lors des périodes caniculaires, où vous rendiez-vous pour vous rafraîchir ? *
□ A mon bureau professionnel □ A la campagne □ A la montagne □ A la piscine □ A proximité d'un point d'eau □ En forêt
□ Dans un espace public (cinéma, centre commercial, musée, église,...) □ Dans un parc/jardin □ En bord de mer □ Autre : ……..

3.2. Quel est votre comportement chez vous lors d'une période caniculaire ?
□ Prendre régulièrement des bains/douches ou s'humidifier le corps plusieurs fois par jour □ Recourir à un climatiseur ou un ventilateur
□ Recourir à un brumisateur □ Boire beaucoup d'eau □ Mettre des vêtements plus légers □ Se mettre sur le balcon/terrasse
□ Autre:……..

3.3. Evaluez les propositions suivantes selon leur degré de pertinence en termes d'amélioration du cadre de vie collectif pendant les périodes caniculaires (1 : non pertinente / 5 : très pertinente).

	1	2	3	4	5
Plus d'espaces verts/végétation (jardins, parcs, etc.)	○	○	○	○	○
Plus de toitures et murs végétalisés	○	○	○	○	○
Plus de points d'eau dans les espaces publics (fontaines, miroirs d'eau, etc.)	○	○	○	○	○
Plus de couleurs claires sur les revêtements urbains (surfaces des bâtiments, des trottoirs, etc.)	○	○	○	○	○
Moins de circulation routière	○	○	○	○	○
Plus de transports en commun	○	○	○	○	○
Plus de rues piétonnes	○	○	○	○	○
Plus de pistes cyclables	○	○	○	○	○
Plus d'espaces climatisés	○	○	○	○	○

3.4. Selon vous, quels sont les atouts de la Métropole de Metz pour préserver les zones de fraîcheur et améliorer le cadre de vie en période de forte chaleur ?

□ Présence de nombreux espaces verts/végétation (jardins, parcs, etc.) □ Peu de circulation routière Réseau de transports en commun dense
□ Présence de nombreux points d'eau dans les espaces publics (fontaines, miroirs d'eau, plan d'eau, etc.)
□ Présence de nombreuses pistes cyclables Présence de toitures et de murs végétalisés □ Présence de nombreuses rues piétonnes
□ Autre: ……

3.5. Selon vous, quel acteur du territoire peut agir pour réduire les effets néfastes des vagues de chaleur ?
□ L'Etat □ Les organismes publics Les organismes publics □ Les collectivités territoriales (région, département, commune)
□ Les collectivités territoriales (région, Wilaya, Daïra) □ Les associations Les associations
□ Les particuliers Les particuliers □ Autre : ……

3.6. En vous appuyant sur la carte suivante, pourriez-vous répondre aux questions ci-dessous ?

- Indiquez au moins trois points qui vous semblent frais en période de forte chaleur (ex. : A01 B02 C03) : ……
- Indiquez au moins trois points qui vous semblent particulièrement chauds en période de forte chaleur (ex. : A01 B02 C03) : ……
- A quels endroits avez vous l'habitude de vous rendre en période de forte chaleur ? (ex. : A01 B02 C03) : ……
- Quels sont les lieux/espaces qu'il faudrait rafraîchir selon vous ? (indiquez le nom des lieux) :……

Annexe 58 : Questionnaire utilisé pour l'enquête auprès de la population de l'Eurométropole de Metz.

دراسة استقصائية عن التعرض لارتفاع درجة الحرارة في المناطق الحضرية

مرحبًا! مرحبا بكم في هذه الاستمارة على شبكة الإنترنت التي تهدف إلى فهم هشاشة سكان مدينة الدار البيضاء لخطر ارتفاع درجة الحرارة في المناطق الحضرية.
والهدف من ذلك هو الحصول على رأيكم في هذا الموضوع الساخن!
في نهاية هذا الاستبيان، ستجدون خريطة تفاعلية: الغرض منها؟ التعرف على تفضيلاتكم الجغرافية أثناء موجات الحرارة وتحسين البيئة المعيشية الخاصة بكم.
هذا الاستبيان مجهول الهوية وسريع الملء (حوالي 12 دقيقة).
شكرا جزيلا لمشاركتكم!

1. معلومات عن المستبين وبيئته

1.1. الجنس:
○ انثى ○ ذكر

2.1. ما هي سنة ميلادك؟
.....

3.1. المهنة :
○ مزارع ○ موظف ○ تلميذ/طالب ○ بدون عمل ○ متقاعد ○ اخرى: .....
○ المهنة المتوسطة (الصحة، التعليم) ○ الحرفيين/التجار/رئيس شركة ○ إطار/مهنة فكرية عليا ○ عامل

1.4.الى اي درجة تتضرر حالتك الصحية في موجات الحر؟ (1: غياب الضرر 5: ضرر قوي): ○ 1 ○2 ○ 3 ○ 4 ○ 5

1.5. في أي عمالة/إقليم تقيم؟ ..... **في أي البلدية؟** ..... في أي حي/شارع تقيم؟.....

1.6. ما هو نوع السكن الخاص بك
○ منزل ○ شقة في منزل
○ شقة في مبنى ○ منزل قصديري ○ اخرى: .....

1.7. هل يحتوى مكان الإقامة الخاص بك على حديقة خاصة؟
○ نعم ○لا

إذا كان الجواب لا,هل لديك حديقة عامة او منتزه بالقرب من مكان إقامتك؟
○ نعم ○لا

1.8. هل منزلك مجهز بمعدات الراحة الحرارية التالية:
□ تكييف الهواء □ زجاج مزدوج
□ العزل □ مروحة
□ الستائر □ أخرى.....

1.9. قبل الأزمة الصحية، أين كنت تعمل؟
□ في المنزل □ في المكتب
□ في الميدان □ اخرى: .....

2. الشعور بالحرارة المفرطة وإدراك مخاطرها

1.2. من بين المواضيع التالية، ما هي المواضيع الثلاثة التي تهتم بها أكثر من غيرها بصفتك الشخصية؟ (يرجى اختيار 3 إجابات)
□ الثقافة □ الدفاع الوطني □ الضرائب □ العدالة □ السكن □ السياسة □ الاحتباس الحراري
□ الصحة العامة □ ا الاقتصاد □ الصحة العامة □ التعليم □ التوظيف □ البيئة □ انعدام الأمن

2.2. من بين هذه المخاطر الطبيعية، ما هي المخاطر التي تقلقك أكثر بشأن مقر سكنك؟
□ موجات الحرارة العالية □ انزلاقات الأرضية □ فيضانات بسبب تفيض الأنهار □ جفاف □ عواصف
□ فيضانات بسبب جريان المياه في المناطق الحضرية □ أمطار غزيرة □ موجات البرد □ اخرى :.....

3.2. في السنوات الأخيرة، هل احسست بأن الصيف يزداد سخونة حيث تعيش؟
○ نعم ○لا

4.2. هل سبق لك أن شهدت موجة حر واحدة على الأقل في الدار البيضاء الكبرى؟
○ نعم ○لا
في أي سنة؟ .....

5.2. ما هو شعورك خلال النوبات الحرارية العالية؟
□ تشنج/تقلص العضلات □ صعوبات في التنفس □ التعب الشديد □ عدم الارتياح □ صداع الراس □ الغثيان بعد التعرض للشمس
□ الشعور بالعطش □ ارتفاع درجة حرارة الجسم □ التعرق المفرط □ لا أشعر بأي شيء معين □ اخرى: .....

6.2. هل تستفسر عن التوصيات الصحية في حالة حدوث موجة حرارية؟
○ نعم ○لا
عبر اي وسيلة
□ بواسطة وسائل الإعلام التقليدية (الصحافة والإذاعة والتلفزيون)
□ على شبكة الإنترنت
□ بواسطة الملصقات الخارجية
□ من خلال الرسائل التي تنشرها الحكومة **ما هي هذه الرسائل**

7.2.هل تشعر أنك على دراية كافية بالمخاطر الصحية المرتبطة بموجات الحرارة؟
○ نعم ○لا

8.2.هل تعتقد أن في السنوات القليلة القادمة، سيزداد عدد موجات الحرارة في منطقتك؟
○ نعم، حدد السبب في التعليق .....
○ لا، حدد السبب في التعليق .....
○ لا أعلم

9.2.هل تعتقد أن السلطات العامة تكافح بما فيه الكفاية ضد خطر موجات الحرارة (الوقاية، تحسين البيئة المعيشية،...) ؟
○ نعم ○لا ○لا أعلم

10.2.خلال فترات الحرارة العالية، هل تعاني أكثر من الحرارة خلال النهار أو الليل؟
○ نهارا ○ ليلا ○ لا أشعر بأي فرق

11.2.ابتدأ من أي درجة مئوية الحرارة تصبح لا تطاق خلال النهار؟ خلال الليل؟ الاستبيان لا يقبل سوى الأرقام
درجة الحرارة خلال الليل :.....
درجة الحرارة خلال النهار :.....

12.2.ما هي العوامل التي تعتقد أنها تؤثر على المخاطر الصحية المرتبطة بموجات الحرارة؟ من فضلك رقم كل صندوق بالترتيب للمراجعة من 1 إلى 5
□ الحالة الصحية (مرض السكري، مرض السمنة، مرض الربو، اضطرابات القلب والأوعية الدموية، الخ)
□ العمر
□ شدة الحرارة
□ وقت التعرض
□ مدة التعرض

هل تتأثر أنشطتك اليومية بالحرارة الشديدة؟ **إذا كان الجواب نعم ,ما هي الآثار؟**

○ نعم ○لا .....

لكل سؤال من الأسئلة التالية، نطلب منك تقييم مشاعرك على مقياس من 1 إلى 5.

	1	2	3	4	5
a إلى اي درجة أصبحت معتادا على الحرارة المفرطة؟ 1: لست معتاداً على ذلك 5: لقد تعودت على ذلك	○	○	○	○	○
b ما مستوى إدراكك لتعليمات والسلوكيات التي يجب اتخاذها في أوقات موجات الحرارة؟ 1: ضعيف 5: ممتاز	○	○	○	○	○
c. ما مدى ثقتك بالسلطات العامة لمكافحة الآثار الصحية لموجات الحرارة؟ 1: أنا لا أثق بهم على الإطلاق 5: أثق بهم تماما	○	○	○	○	○
d.ما مدى قدرتك لتحمل الموجات الحرارية؟ 1: ضعيفة 5: ممتازة	○	○	○	○	○

2.18. إذا كانت الإجابة المعطاة تساوي أو أكبر من 4، هل يمكنك أن تقول لماذا؟

.....

في حالة حدوث موجة حر، ما هو مستوى قلقك بشأن الموضوعات التالية؟ (1: لا تقلق 5: قلق شديد)

	1	2	3	4	5
اضطراب أنشطتي اليومية	○	○	○	○	○
عدم الراحة أو وفاة أحد أفراد أسرته	○	○	○	○	○
العواقب على صحتي (ضربة الشمس، الجفاف ، صعوبات التنفس ، الشعور بالضيق ، إلخ.)	○	○	○	○	○
اضطراب نومي	○	○	○	○	○
اندلاع الحرائق	○	○	○	○	○
حدوث جفاف (تجفيف النباتات والحدائق، وتعطيل إمدادات المياه)	○	○	○	○	○

هل تعاني أكثر من الحرارة عندما تكون في بيئة يكون فيها الهواء ملوثا بشكل خاص (على سبيل المثال، في مناطق الازدحام المروري ، في وسط المدينة ...)؟

○ نعم ○لا

هل تؤثر رطوبة الهواء المحيط على إدراكك للحرارة؟ **إذا كان الجواب نعم ,اين يتجلى هذا التأثير؟**

○ نعم ○لا ○اشعر بالحرارة عندما يكون الهواء رطبا ○اشعر بالحرارة عندما يكون الهواء جافاً ○عادات التأقلم والسلوك اثناء الموجات الحرارية

3. عادات التأقلم والسلوك اثناء الموجات الحرارية

3.1. في أوقات الحرارة العالية، أين تذهب للاستعاش؟

□ الى مكتبي □ الى الريف □ الى الجبال □ الى المسبح □ بالقرب من بحيرة، واد،... □ الى حديقة عامة/منتزه
□ الى مكان عام (السينما، مركز التسوق، المتحف، المسجد،...) □ الى البحر □ الى الغابة □ اخرى:

3.2. ما هو سلوكك في المنزل أثناء موجة الحر؟

□ أخذ الحمامات العادية المنتظمة/الاستحمام أو تنعيش جسمك عدة مرات في اليوم □ قضاء الوقت في الشرفة/السقيفة □ استخدام رشاشة الرطوبة
□ استخدام مكيف الهواء أو مروحة □ ارتداء ملابس خفيفة □ شرب الكثير من الماء □ أخرى: .....

3.3. قيم المقترحات التالية على أساس درجة أهميتها من حيث تحسين البيئة المعيشية الجماعية خلال فترات الحرارة العالية (1: غير ذى صلة / 5 : ذات الصلة جدا)

	1	2	3	4	5
المزيد من المساحات الخضراء/الغطاء النباتي (الحدائق والمتنزهات، إلخ)	○	○	○	○	○
المزيد من السقوف والجدران الخضراء	○	○	○	○	○
المزيد من نقاط المياه في الأماكن العامة (النوافير، مرايا المياه، إلخ)	○	○	○	○	○
ألوان أكثر إضاءة على الكسوة الحضرية (أسطح المباني والأرصفة وإلخ)	○	○	○	○	○
حركة مرور أقل	○	○	○	○	○
المزيد من وسائل النقل العام	○	○	○	○	○
المزيد من شوارع المشاة	○	○	○	○	○
المزيد من ممرات الدراجات	○	○	○	○	○
المزيد من المساحات المكيفة	○	○	○	○	○

3.4. في رأيك، ما هي مقومات مدينة الدار البيضاء للحفاظ على مناطق النضارة وتحسين البيئة المعيشية في فترات الحرارة العالية؟

□ وجود العديد من المساحات الخضراء/الغطاء النباتي (الحدائق والمتنزهات، إلخ □ وجود العديد من العناصر المائية في الأماكن العامة (النوافير، المرايا المائية، الماء، إلخ)
□ قلة حركة المرور □ كثافة شبكة النقل العام □ وجود العديد من شوارع المشاة □ وجود العديد من مسارات الدراجات
□ وجود السقوف والجدران الخضراء □ اخرى:

3.5. في رأيك، ما هي الجهات الفاعلة في الإقليم التي يمكنها العمل على الحد من الآثار الضارة لموجات الحرارة؟

□ الدولة □ الهيئات العامة □ السلطات المحلية (المنطقة، الإدارة، البلديات) □ الجمعيات □ الأفراد □ اخرى: .....

استنادا إلى الخريطة التالية، هل يمكنك الإجابة على الأسئلة أدناه؟

□ قم بتضمين ثلاث نقاط على الأقل تعتقد أنها باردة خلال فترات الحرارة العالية (مثال: 30 - 90 - 200)
□ قم بتضمين ثلاث نقاط على الأقل تشعر أنها حارة بشكل خاص أثناء الطقس الحار (مثال: 30 - 90 - 200)
□ أين تذهب عادة خلال الطقس الحار؟ (مثال: 30 - 90 - 200)
□ ما هي الأماكن / المساحات التي تعتقد أنه يجب تحديثها؟ (يمكنك ذكر اسم الأماكن مثلاً)

Annexe 59 : Questionnaire utilisé pour l'enquête auprès de la population de Casablanca (version arabe).

Enquête sur la vulnérabilité à la surchauffe urbaine dans Grand Casablanca

Bonjour ! Bienvenue sur cette enquête web destinée à mieux comprendre la vulnérabilité des habitants de la Métropole de Casablanca face au risque de surchauffe urba
L'objectif est de recueillir votre avis sur ce sujet brûlant d'actualité ! Vous trouverez à la fin de ce questionnaire une carte interactive : son but ? Connaître vos préféren
géographiques lors des vagues de chaleur et améliorer votre cadre de vie. Ce questionnaire est strictement anonyme et rapide à remplir (environ 12 minutes).
Nous vous remercions vivement pour votre participation !

1. Informations au sujet du répondant et de son environnement

1.1. Vous êtes
○ Femme ○ Homme

1.2. Quelle est votre année de naissance ?
……

1.3. Quelle est votre catégorie professionnelle ?
○ Agriculteur ○ Employé ○ Ouvrier ○ Elève/Etudiant
○ Sans activité professionnelle ○ Artisan, commerçant et chef d'entreprise
○ Cadres et professions intellectuelles supérieures ○ Retraité ➔quel était votre métier :

1.4.À quel point votre santé est-elle affectée par les vagues de chaleur ? (1 : aucun d'impact 5 : fort impact) : ○1 ○2 ○3 ○4 ○5

1.5. Dans quelle commune et quel quartier habitez-vous ?
Adresse : rue…….…….. , quartier…….……..,Commune :…….……

1.6. Quel est votre type de logement ?
○ Appartement dans un immeuble ○ Appartement dans une maison
○ Maison ○ Bidonville ○ Autre :…….……

1.7. Votre logement est-il doté d'un jardin privatif ?
○ Oui ○ Non
Si non, Avez-vous un espace vert (parc ou jardin) à proximité de chez-vous ?
○ Oui ○ Non

1.8. De quels dispositifs d'économie d'énergie est équipé votre logement ?
□ Climatisation □ Double vitrage □ Isolation
□ Ventilateur □Stores □Autre :…….……..

1.9. Avant la crise sanitaire, où travailliez-vous ?
□ Chez vous □ Dans un bureau
□ En extérieur □ Autre …….……

2. Ressenti thermique et perception du risque caniculaire

2.1. Parmi les sujets suivants, quels sont les trois sujets qui vous préoccupent le plus à titre personnel ? (Veuillez sélectionner 3 réponses)
□ La culture □ La défense nationale □ La fiscalité □ La justice □ Le logement □ Le réchauffement climatique
□ La politique □ La santé publique □ L'économie □ L'éducation □ L'emploi □ L'environnement □ L'insécurité

2.2. Parmi ces aléas naturels, lesquels vous inquiètent le plus autour de votre lieu de vie ?
□ Épisodes caniculaires □ Glissements de terrain □ Inondations par débordement de cours d'eau □ Sécheresses
□ Inondations par ruissellement urbain □Pluies intenses □ Tempêtes □ Vagues de froid □Autre:……

2.3. Ces dernières années, les étés vous ont-ils paru de plus en plus chauds là où vous habitez ? ○ Oui ○ Non

2.4. Avez-vous déjà vécu une canicule au Grand Casablanca ? ○ Oui ○ Non
En quelle(s) année(s) ?……

2.5. Que ressentez-vous lors des épisodes de forte chaleur ?
□ Crampes musculaires □ Difficultés respiratoires □ Grande fatigue/abattement □ Malaise □ Maux de tête
□ Nausées après exposition au soleil □ Sensation de soif □ Température corporelle élevée
□ Transpiration excessive □ Je ne ressens rien de particulier □ Autre: ……..

2.6. Vous informez-vous des recommandations sanitaires en cas de vague de chaleur ? ○ Oui ○ Non
Par quels moyens ?
□ Par les médias traditionnels (presse, radio, télévision) □ Par internet
□ Par voie d'affichage extérieur □ Par des messages diffusés par les pouvoirs publics
Lesquelles ?
……

2.7. Vous estimez-vous suffisamment sensibilisé(e) par rapport aux risques sanitaires liés aux vagues de chaleur ?
○ Oui ○ Non

2.8. Pensez-vous que dans les prochaines années, le nombre de canicules augmentera sur votre territoire ?
○ Oui ○ Non ○ Je ne sais pas
Si oui, pourquoi ? Si non, pourquoi ?
……

2.9. Pensez-vous que les autorités publiques luttent de manière suffisante contre le risque caniculaire (prévention, amélioration du cadre de vie,...) ?
○ Oui ○ Non ○ Je ne sais pas
En période de forte chaleur, souffrez-vous davantage de la chaleur le jour ou la nuit ?
○ Le jour ○ La nuit ○ Je ne ressens pas de différence

2.10. A partir de quelle température la chaleur devient-elle insupportable pour vous durant la journée ? Durant la nuit ? Seule une valeur numérique es acceptée.
Température d'inconfort de jour (°C) :……Température d'inconfort de nuit (°C) :……..

2.11. Selon vous, de quels facteurs dépendent les risques pour la santé liés aux épisodes de chaleur ? Numérotez chaque case dans l'ordre de vos préférenc à 5

□ Intensité de la chaleur □ Durée d'exposition
□ Heure d'exposition □ Âge
□ Présence de pathologies chroniques sous-jacentes (diabète, surpoids, asthme, cardiovasculaires, etc.)

2.12. Vos activités quotidiennes sont-elles affectées par la chaleur intense ?
○ Oui ○ Non
Si oui, quels en sont les impacts ?
……

2.13. Pour chacune des questions suivantes, nous vous demandons d'évaluer votre ressenti sur une échelle allant de 1 à 5.

	1	2	3	4	5
a. A quel point vous sentez-vous habitué(e) aux chaleurs excessives ? 1 : Je n'y suis pas habitué(e). 5 : Je m'y suis habitué(e).	○	○	○	○	○
b. A quel niveau estimez-vous vos connaissances des consignes et conduites à tenir en périodes caniculaires ? 1 : Nul. 5 : Très bon.	○	○	○	○	○
c. A quel point faites-vous confiance aux autorités publiques pour lutter contre les effets sanitaires des vagues de chaleur ? 1 : Je ne leur fais pas du tout confiance. 5 : Je leur fais complètement confiance.	○	○	○	○	○
d. A quel point vous sentez-vous vulnérable face au risque caniculaire ? 1 : Je ne suis pas du tout vulnérable. 5 : Je suis très vulnérable.	○	○	○	○	○

2.13.d. Si la réponse donnée est égale ou supérieure à 4, pourriez-vous dire pourquoi ?

……..

1.14. En cas de canicule, quel est votre niveau d'inquiétude à propos des sujets suivants ? (1 : pas d'inquiétude 5 : forte inquiétude)

	1	2	3	4	5
Le bouleversement de mes activités quotidiennes	○	○	○	○	○
Le malaise ou le décès d'un proche	○	○	○	○	○
Les conséquences sur ma santé (insolation, déshydratation, difficultés respiratoires, malaise, etc.)	○	○	○	○	○
La perturbation de mon sommeil	○	○	○	○	○
Le déclenchement d'incendies	○	○	○	○	○
La survenance d'une sécheresse (assèchement des plantes et jardins, rupture d'alimentation en eau)	○	○	○	○	○

1.15. Souffrez-vous davantage de la chaleur lorsque vous vous trouvez dans un milieu où l'air est particulièrement pollué (par exemple, dans les zo d'embouteillage, dans le centre-ville...) ?

○ Oui ○Non

1.16. L'humidité de l'air ambiant a-t-elle une influence sur votre perception de la chaleur ? ○ Oui ○Non

Quelle est cette influence ?

○ J'ai plus chaud lorsque l'air est sec ○ J'ai plus chaud lorsque l'air est humide

3. Pratiques d'adaptation et comportement en périodes de vague de chaleur

3.1. Lors des périodes caniculaires, où vous rendiez-vous pour vous rafraîchir ? *

□ A mon bureau professionnel □ A la campagne □ A la montagne □ A la piscine □ A proximité d'un point d'eau □ En forêt
□ Dans un espace public (cinéma, centre commercial, musée, mosquée,...) □ Dans un parc/jardin □ En bord de mer □ Autre : ……..

3.2. Quel est votre comportement chez vous lors d'une période caniculaire ?

□ Prendre régulièrement des bains/douches ou s'humidifier le corps plusieurs fois par jour □ Recourir à un climatiseur ou un ventilateur
□ Recourir à un brumisateur □ Boire beaucoup d'eau □ Mettre des vêtements plus légers □ Se mettre sur le balcon/terrasse
□ Autre:……..

3.3. Evaluez les propositions suivantes selon leur degré de pertinence en termes d'amélioration du cadre de vie collectif pendant les périodes caniculai : non pertinente / 5 : très pertinente).

	1	2	3	4	5
Plus d'espaces verts/végétation (jardins, parcs, etc.)	○	○	○	○	○
Plus de toitures et murs végétalisés	○	○	○	○	○
Plus de points d'eau dans les espaces publics (fontaines, miroirs d'eau, etc.)	○	○	○	○	○
Plus de couleurs claires sur les revêtements urbains (surfaces des bâtiments, des trottoirs, etc.)	○	○	○	○	○
Moins de circulation routière	○	○	○	○	○
Plus de transports en commun	○	○	○	○	○
Plus de rues piétonnes	○	○	○	○	○
Plus de pistes cyclables	○	○	○	○	○
Plus d'espaces climatisés	○	○	○	○	○

3.4. Selon vous, quels sont les atouts de la Métropole de Casablanca pour préserver les zones de fraîcheur et améliorer le cadre de vie en période de forte chaleur ?

□ Présence de nombreux espaces verts/végétation (jardins, parcs, etc.) □ Peu de circulation routière Réseau de transports en commun dense
□ Présence de nombreux points d'eau dans les espaces publics (fontaines, miroirs d'eau, plan d'eau, etc.)
□ Présence de nombreuses pistes cyclables Présence de toitures et de murs végétalisés □ Présence de nombreuses rues piétonnes
□ Autre: ……

3.5. Selon vous, quel acteur du territoire peut agir pour réduire les effets néfastes des vagues de chaleur ?

□ L'Etat □ Les organismes publics Les organismes publics □ Les collectivités territoriales (région, Wilaya, Daïra)
□ Les collectivités territoriales (région, Wilaya, Daïra) □ Les associations Les associations
□ Les particuliers Les particuliers □ Autre : ……

3.6. En vous appuyant sur la carte suivante, pourriez-vous répondre aux questions ci-dessous ?

- Indiquez au moins trois points qui vous semblent frais en période de forte chaleur (ex. : A01 B02 C03) : ……
- Indiquez au moins trois points qui vous semblent particulièrement chauds en période de forte chaleur (ex. : A01 B02 C03) : ……
- A quels endroits avez vous l'habitude de vous rendre en période de forte chaleur ? (ex. : A01 B02 C03) : ……
- Quels sont les lieux/espaces qu'il faudrait rafraîchir selon vous ? (indiquez le nom des lieux) :……

Annexe 60 : Questionnaire d'enquête de la population de Casablanca (version française).

Liste des figures

Figure 1 : Carte situant les deux terrains d'étude à l'échelle sub-continentale. 3
Figure 2 : Synopsis des recherches menées sur le territoire-pivot (Eurométropole de Metz) et le territoire-miroir (Grand Casablanca) dans le cadre de cette thèse 8
Figure 3 : Imbrication des échelles climatiques, de la couche limite urbaine et des sous-couches constituantes (adapté de Rotach *et al.*, 2005). 15
Figure 4 : Bilan d'énergie en milieu urbain ($W.m^{-2}$) (adapté de Ringenbach, 2004). 16
Figure 5 : Visualisation de la couche de canopée urbaine (adapté de Voogt, 2007). 20
Figure 6 : Profil horizontal schématisé d'un ICU nocturne (www.cerema.fr). 20
Figure 7 : Structure verticale de l'atmosphère urbaine pour des vents supérieurs (a) et inférieurs (b) à 3m/s (d'après Mestayer et Anquetin, 1995) 22
Figure 8 : Méthodes de mesure et de détection des différents types d'îlots de chaleur urbains et périmètre de recherche de la thèse. 23
Figure 9 : Processus d'évapotrans-piration (APUR, 2012) 25
Figure 10 : Différence de température entre les surfaces exposées au soleil et celles à l'ombre au niveau de l'avenue du Président Hoover à Lille (arbre-en-ville.fr). 25
Figure 11 : Clichés pris sur revêtement de sol à la ZAC de la Grange-aux-belles à Paris (Apur, 2012) 26
Figure 12 : Relation entre albédo et émissivité de certains matériaux (Perrin, 2020). 27
Figure 13 : Effets de la réflectance solaire et de l'émissivité thermique sur l'ICU. 28
Figure 14 : Effet de la rugosité urbaine sur l'écoulement des flux d'air (energieplus-lesite.be). 28
Figure 15 : Phénomène de brise thermique en contexte urbain (adapté de Oke *et al.*, 2017). 29
Figure 16 : Illustration du piégeage radiatif d'après Estournel, (1982). 30
Figure 17 : (a) Illustration du facteur de vue du ciel (APUR, 2012), (b) Vue du ciel de Time Square (SVF=0,37) à New York (Etats-Unis) (Middel *et al.*, 2018). 31
Figure 18 : Evolution de l'exposition aux rayonnements solaires dans un canyon urbain symétrique orienté nord-sud à différents moments de la journée en fonction du rapport d'aspect. 32
Figure 19 : Relation empirique entre l'AR dans le centre urbain et l'intensité maximale de l'ICU ($\Delta \mathrm{Tu} - \mathrm{r(max)}$) (Oke, 1988). 33
Figure 20 : Contributions sectorielles au dégagement de chaleur anthropique (QF) de certaines métropoles en 2011 (adapté de Stewart et Kennedy, 2017). 34
Figure 21 : Effets des activités humaines sur le milieu urbain. 36
Figure 22 : Amplitude de l'ICU moyen horaire selon la fraction de la couverture nuageuse avec une vitesse de vent inférieure à 5m/s à Londres (adapté de Kolokotroni et Giridharan, 2008). 37
Figure 23 : Schéma de circulation de la brise côtière (adapté de Oke *et al.*, 2017). 40
Figure 24 : Principales causes du phénomène de l'ICU (adapté de Busato *et al.*, 2014). 41
Figure 25 : Les cadres d'évaluation des impacts liés au changement climatique du GIEC. A gauche le cadre d'évaluation de la vulnérabilité dans les troisième (2001) et quatrième (2007) rapports, et à droite le cadre du risque dans le cinquième rapport (2014) (adapté de Estoque *et al.*, 2023). 45
Figure 26 : Comparaison de la signification des termes clés entre l'AR4 et l'AR5 (GIZ et EURAC, 2017). 46

Figure 27 : Composantes de la vulnérabilité au changement climatique dans l'AR4 (GIZ et EURAC, 2017). 47
Figure 28 : Infographie diffusée par Santé Publique France au sujet des risques liés à la chaleur. 50
Figure 29 : Équilibre des échanges thermiques de l'organisme (source : Institut National de Recherche et de Sécurité). 51
Figure 30 : Les composantes de la résilience (source : Cerema). 56
Figure 31 : Parts de pays disposant de système d'alerte canicule-santé à l'échelle des continents (Kotharkar et Ghosh, 2022). 62
Figure 32 : PNC et effets bénéfiques sur la mortalité en France (Santé Publique France, 2018). 64
Figure 33 : Seuils des indicateurs météorologiques utilisés en 2016 (Wagner *et al.*, 2018). . 65
Figure 34 : Situation de l'aire urbaine de Metz à l'échelle nationale et régionale. 68
Figure 35 : Les 44 communes de l'Eurométropole de Metz. *NB* : la carte ne tient pas compte de l'intégration des deux communes de Roncourt et de Lorry-Mardigny. 69
Figure 36 : Situation du Grand Casablanca à l'échelle nationale et à l'échelle régionale (découpage en provinces). 71
Figure 37 : Extrait de la dalle Scan 25 de l'IGN décrivant le territoire de l'EMM. *NB* : la légende est disponible dans la documentation de la BD Scan 25. 73
Figure 38 : Les grandes unités paysagères du territoire l'EMM (AGURAM, 2020b). 74
Figure 39 : Description du territoire du Grand Casablanca (source : fond de carte QGIS). .. 75
Figure 40 : Parts d'occupation du sol dans les deux terrains d'étude. 76
Figure 41 : Carte d'occupation du sol du territoire de l'EMM (données : BD TOPO® (2019)). 76
Figure 42 : Carte de l'occupation du sol du territoire du GC (données : *Landsat* 2019). 77
Figure 43 : (a) Classification de Köppen-Geiger appliqué au Maroc (1981-2010) (DGMM, 2021) et (b) à la France (1988-2017) (Dubreuil, 2022). 78
Figure 44 : Diagramme ombro-thermique de la ville de Casablanca établi à partir de données provenant du *Hong Kong National Observatory* (https://worldweather.wmo.int/) mises à disposition dans le cadre de la résolution 40 de la WMO. Tm : température moyenne, Tx : température maximale, Tn : température minimale. 79
Figure 45 : Diagramme ombro-thermique établi à partir des données de la station de Metz-Frescaty. 80
Figure 46 : Températures moyennes mensuelles des stations Casablanca-Anfa, Fès-Sais (données du site infoclimat.fr) et Metz-Frescaty. *NB* : Les périodes de référence toutes centrées entre 2005 et 2010 varient d'une station à l'autre, mais leur longueur (>15 ans) est suffisante pour que les courbes puissent être considérées comme robustes. 80
Figure 47 : Durées d'insolation mensuelle des stations de Casablanca-Anfa (1996-2018) et de Metz-Nancy-Lorraine (1991-2020) (source des données : Nfaoui (2004), ogimet.com, Météo-France). 81
Figure 48 : Vitesses de vent mensuelles à Casablanca (1978-1982) et *Metz-Frescaty* (1991-2020). 82
Figure 49 : Roses des vents annuelles à (a) Mohammédia (année 2004) et (b) *Metz-Frescaty* (normale 1961-1990) (source : Allouhi *et al*. (2017) (vent à 8 m) ; Jougla et Hidalgo (2018) (vent à 10 m)). 83

Figure 50 : Evolution des types de climat au Maroc durant les périodes 1961-1970 et 1991-2000, définis selon l'indice d'aridité de De Martonne (Driouech *et al.*, 2010 cité par Woillez, 2019)..... 84
Figure 51 : Anomalies de température annuelle sur la période 1984-2016 au Maroc et tendance au réchauffement à Casablanca-Anfa (flèche noire). Les triangles rouges indiquent une tendance positive significative (seuil de 5 %) (source des données: Driouech *et al.* (2021))..85
Figure 52 : Anomalies de température annuelle sur la période 1984-2016 pour la station Metz-Frescaty (source des données : Météo-France). 85
Figure 53 : (a) Courbes d'anomalie de la pluviométrie annuelle pour la région du Grand Casablanca et (b) la station Metz-Frescaty. Période de référence : 1984-2016 (source : Driouech *et al.* (2021) et Météo-France)..... 86
Figure 54 : Schéma des interactions systémiques entre la dynamique urbaine et la formation d'un ICU..... 88
Figure 55 : Le spectre électromagnétique avec le spectre infrarouge subdivisé (adapté de Gade et Moeslund, 2014)..... 93
Figure 56 : Image infrarouge thermique d'une harde de cervidés (source : *clearview imaging*). 93
Figure 57 : Chaine de traitement suivie pour l'extraction des Ts à partir de données satellitaires par la méthode à fenêtre unique (SC) (adapté de Tang et Li (2014))..... 103
Figure 58 : Chaîne de traitement décrivant la méthodologie suivie pour le calcul des températures de surface (Ts) à partir des données infrarouges *Landsat*. 105
Figure 59 *:* Températures de surface (Ts) du Grand Casablanca pour quatre journées d'été réparties entre 1984 et 2019. a) 25/08/1984 ; b) 21/06/1995 ; c) 04/08/2011 ; d) 07/06/2019. 108
Figure 60 : Températures de surface (Ts) de l'EMM pour quatre journées d'été réparties entre 1985 et 2019. 110
Figure 61 : Vues détaillées des différentes LCZ de Casablanca (fond de carte : *Google Earth*). 112
Figure 62 : Vues détaillées des différentes LCZ de l'EMM (fond de carte : *Google Earth*). 113
Figure 63 : Boites à moustache des Ts par classes LCZ : en haut les Ts du GC (07/06/2019) et en bas les Ts de l'EMM (23/08/2019). *NB* : se référer au chapitre 7 pour la production des cartes LCZ. 114
Figure 64 : Boîtes à moustaches des Ts et des indices spectraux du site d'Anfa Park (croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile). 118
Figure 65 : Boîtes à moustaches des Ts et des indices spectraux de la place Mohammed V (croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile)..... 118
Figure 66 : Boites à moustaches des Ts et des indices spectraux du pôle Innovation-Santé Mercy (croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile)..... 119
Figure 67 : Boites à moustaches des Ts et des indices spectraux du quartier de l'Amphithéâtre (croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile)..... 120

Figure 68 : Boites à moustaches des Ts et des indices spectraux de la ville verte de Bouskoura croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile). 121
Figure 69 : Boites à moustaches des Ts et des indices spectraux du quartier d'affaires de Sidi Maârouf (croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile). 122
Figure 70 : Boites à moustaches des Ts et des indices spectraux du centre commercial Waves Actisud (croix rouge : moyenne ; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1er quartile ; limite supérieure : 3e quartile). 123
Figure 71 : Ts nocturnes du Grand Casablanca (spatiocarte du 17/06/2015 à 23h22 heure locale) et vues en miniature des sites commentés dans le texte et transects NS et NE/SO. 125
Figure 72 : Profil thermique du transect nord/sud établi à partir de la thermographie *Landsat* nocturne du 17/06/2015. 126
Figure 73 : Profil thermique du transect nord-est/sud-ouest établi à partir de la thermographie *Landsat* nocturne du 17/06/2015. 126
Figure 74 : Températures de surfaces nocturnes de l'EMM (spatiocarte *ECOSTRESS* du 16/07/2022 à 22h34 heure locale), vues en miniature des sites commentés dans le texte et transects N/S et E/O. 127
Figure 75 : Profil thermique du transect nord/sud établi à partir de la thermographie *ECOSTRESS* nocturne du 16/07/2022. 128
Figure 76 : Profil thermique du transect est/ouest établi à partir de la thermographie *ECOSTRESS* nocturne du 16/07/2022. 128
Figure 77 : Températures de surface (Ts) du GC à quatre moments de la nuit. a) 31/05/2022 ; b) 08/07/2021 ; c) 05/07/2019 ; d) 14/07/2021 (les horaires indiqués sont en heure locale). 129
Figure 78 : Températures de surface (Ts) du l'EMM à quatre moments de la nuit. a) 21/07/2021, b) 20/07/2020, c) 09/07/2019, d) 02/07/2019 (les horaires indiqués sont en heure locale). 130
Figure 79 : Le cerf-volant utilisé par Arthur Batut pour capturer des photos aériennes (source : Espace photographie Arthur Batut). 134
Figure 80 : Avion *Voisin BN32* du capitaine Max Boucher (www.drone-malin.com). 136
Figure 81 : (a) Drone à voilure fixe « *le Boreal* » et (b) drone à multi-motors « *OnyxStar Fox-C8 XT* ». 138
Figure 82 : Modélisation 3D de l'Église Saint-Nicolas (Greifswald en Allemagne) issue des images recueillies à l'aide d'un drone (Grenzdörffer *et al.*, 2015). 139
Figure 83 : Carte des restrictions pour le vol des drones en France (source : Geoportail, données avril 2022). 141
Figure 84 : Schéma illustrant les types de scénarios de vol de drone (source : https://www.flyingeye.fr/). 142
Figure 85 : Le principe d'une caméra thermique infrarouge (IR) recevant un rayonnement 144
Figure 86 : Schéma d'un pixel de microbolomètre à base de silicium (adapté de Faye *et al.*, 2022). 145
Figure 87 : A) dessin schématique du dispositif de mesure au sol (cibles thermiques), B) et C) images issues du dispositif dans les bandes RVB et IRT respectivement, D) températures absolues enregistrées sur les différentes cibles lors du vol (adapté de Jolivot *et al.*, 2017). . 147
Figure 88 : Équation d'étalonnage radiométrique appliquée pour récupérer les données de température étalonnées (les marques rouges représentent les images IRT acquises sur les cibles d'étalonnage thermique) (adapté de Jolivot *et al.*, 2017). 147

Figure 89 : Vue aérienne de la place Mazelle (source : *Google Satellite).* 148
Figure 90 : Etat de la place Mazelle au moment de la construction du réservoir d'eau (2010) (source batiactu.com). 149
Figure 91 : Vue aérienne de la cour de l'école Saint-Eucaire avant travaux (Source : *Google Earth*). 149
Figure 92 : Plan de masse au 1/200 des futurs aménagements de la cour Saint-Eucaire (Source : ville de Metz). 149
Figure 93 : Vue aérienne ante-aménagement du parking de la route de Thionville (surface d'environ de 2 km²) (source : *Google Satellite*). 150
Figure 94 : (a) Caméra thermique infrarouge *Flir Pro* et (b) nacelle sur laquelle elle est installée. 151
Figure 95 : Photographie du drone *DJI Phantom 4 Pro* utilisé pour cette étude. 152
Figure 96 : (a) Les cibles thermiques revêtues de feuilles de canson blanches, noires et grises (parking avant travaux) et (b) les cibles thermiques revêtues de feuilles d'aluminium adhésives couvertes d'une peinture mate (parking après travaux). 153
Figure 97 : Le capteur thermique *Tinytag Talk 2*. 153
Figure 98 : La station *Vantage Pro 2 Plus* nstallée au niveau de la cour de l'école Saint-Eucaire. 154
Figure 99 : Délimitation de la zone de vol pour chaque site étudié. 156
Figure 100 : (a) Mise en place du GPS différentiel *Trimble* sur le repère géodésique local (clou de géomètre) et (b) mise en place de la Station Totale *Timble Série S5*. 157
Figure 101 : Résultat du premier test effectué au laboratoire, le 2 mai 2019 à 15h00. 158
Figure 102 : (a) Boitier en polystyrène protégeant la caméra pendant le vol du drone et (b) kit GPS de la caméra. 159
Figure 103 : Vue du plan de vol de la cour Saint-Eucaire via l'interface de l'application *Pix4D* sur l'*iPad*®. 159
Figure 104 : Prises de vue au sol lors de la mission sur la place Mazelle (crédits photo : Gilles Drogue et Dominique Brion, légende des photos en **Annexe 19**). 161
Figure 105 : Prises de vue au sol lors de la mission sur la cour de l'école Saint-Eucaire (crédits photo : Gilles Drogue et l'auteure, légende des photos en **Annexe 20**). 161
Figure 106 : Prises de vue au sol lors de la mission sur le parking de la route de Thionville avant travaux (crédits photo : Gilles Drogue et l'auteure, légende des photos en **Annexe 21**). 162
Figure 107 : Prises de vue au sol lors de la mission sur le parking de la route de Thionville après travaux (crédits photo : Gilles Drogue et l'auteure, légende des photos en **Annexe 22**). 162
Figure 108 : Alignement des images optiques de la cour de l'école Saint-Eucaire à l'aide des points de contrôle dans *Metashape.* 163
Figure 109 : (a) Construction d'un premier nuage de points et (b) construction d'un nuage de points denses. 165
Figure 110 : (a) Construction d'un maillage 3D par triangulation et (b) Création du maillage 3D par texturage. 166
Figure 111 : Habillage du modèle 3D à partir des images originales de la cour Saint-Eucaire. 166
Figure 112 : (a) Vue vers le nord-est et (b) vue vers le nord de la place Mazelle. 166
Figure 113 : (a) Vue zénithale et (b) vue vers le sud-ouest de la cour de l'école Saint-Eucaire. 167

Figure 114 : a) Vue zénithale et (b) vue vers l'ouest du parking de la route de Thionville avant réaménagement..... 167
Figure 115 : a) Vue vers le nord et (b) vue vers l'ouest du parking route de Thionville après réaménagement..... 167
Figure 116 : A gauche l'image optique accompagnée des points de contrôle utilisés pour l'alignement de l'image thermique située à droite (site : cour de l'école Saint-Eucaire). 168
Figure 117 : (a) MNE généré par les images optiques pour la cour Saint-Eucaire et (b) modélisation thermique 3D de la cour Saint-Eucaire..... 169
Figure 118 : Echantillonnage ponctuel sur les cibles de la signature numérique (cas de la cour Saint-Eucaire)..... 169
Figure 119 : Relation entre CN et Ts au niveau des trois cibles thermiques pour la cour Saint-Eucaire..... 170
Figure 120 : Relation entre CN et Ts au niveau des trois cibles thermiques pour la place Mazelle. 170
Figure 121 : Relation entre CN et Ts au niveau des trois cibles thermiques pour chacune des deux missions au parking de la route de Thionville..... 171
Figure 122 : Méthodologie suivie pour produire les images IRT (source : télépilote Luc Manceau)..... 172
Figure 123 : Thermographies de la place Mazelle superposées sur l'orthomosaïque optique (14 juin 2021 à 16h50)..... 173
Figure 124 : Boîtes à moustaches des Ts par état de surface sur la place Mazelle. 173
Figure 125 : Thermographies de la cour Saint-Eucaire superposées sur l'orthomosaïque optique (21 juillet 2021 à 16h40). 174
Figure 126 : Histogramme des Ts de la cour Saint-Eucaire. 175
Figure 127 : A gauche (a et b), l'orthomosaïque IR superposée sur l'orthomosaïque optique lors de la phase avant travaux (23 juillet 2021 à 17h30) : à droite (c et d), l'ortho-mosaïque IR superposée sur l'ortho-mosaïque optique lors de la phase après travaux (17 juin 2022 à 16h40). 176
Figure 128 : Profils de TS et de CN avant et après réaménagement des transects au niveau du parking et de la rue adjacente (rue de Méric) (Hassani *et al.*, 2023a)..... 177
Figure 129 : Principales approches adoptées pour la conception de réseaux de mesure (adapté de Robinson, 2010). 184
Figure 130 : Répartition des études analysées par I. D. Stewart selon neuf critères de qualité méthodologique (Stewart, 2011a). 185
Figure 131 : Sonde thermique HOBO..... 190
Figure 132 : À gauche station météorologique du réseau REMTHAM (rue de Saint-Paul, Montigny-lès-Metz). 191
Figure 133 : la station *Vantage Pro 2 plus* implantée dans la cour de l'école maternelle Saint-Martin. 191
Figure 134 : Localisation des sondes du réseau REMTHAM et des stations météorologiques de Météo-France et d'ATMO Grand-Est. 193
Figure 135 : Typologie des stations météorologiques du réseau REMTHAM et part d'occupation du sol dans un rayon de 500 m. 194
Figure 136 : $\Delta Tamax$ estimé à l'aide du modèle prédictif de Oke (1973) et le $\Delta Tamax$ relevé par la différence entre les stations *Place au Lièvre* et *Mécleuves* (adapté de Schwab et Zachenbacher (2009)) 196

Figure 137 : Températures relevées par les stations *Place au Lièvre* et *Base-vie* et les ΔTa du 5 au 6 juillet 2019. 197
Figure 138 : Températures relevées par les stations *Place au Lièvre* et *Mécleuves* et ΔTa du 12 au 13 juillet 2020. 198
Figure 139 : ΔTa horaires toutes journées confondues, quel que soit le type de temps pour les deux saisons extrêmes : été JJA (a, c), hiver DJF (b, d). 199
Figure 140 : Fréquences saisonnières des ΔTa max calculées entre les stations *Place au Lièvre* et *Mécleuves*. 200
Figure 141 : Comparaison entre l'écart de température maximal nocturne (*Place au Lièvre* vs *Base-vie*) observé et calculé (modèle de Theeuwes *et al.* (2017)). Période du 15 juin au 20 août 2019 (67 nuits). 202
Figure 142 : Dynamique journalière des Ta des stations *Place Mazelle, Base-Vie* et *Metz-Frescaty*, et de la vitesse et de la direction du vent (*Metz-Frescaty*) du 25 juin au 1er juillet 2019. 202
Figure 143 : (a) sonde H1 sur candélabre, rue Marchant ; (b) sonde H2 sous houppier ; (c) sonde H3 du parc de la Cheneau. 203
Figure 144 : ΔTa horaire établies pour la période allant du 21 juillet au 31 août 2021 entre la sonde H1 (candélabre, rue Marchant) et la sonde H2 (houppier d'un arbre), sur la place Jeanne d'Arc. 204
Figure 145 : Courbes de température des sondes H1 (candélabre, rue Marchant), H2 (houppier d'un arbre), H3 (candélabre, jardin de la Cheneau) et d'écart H1-H2 du 12 août au 16 août 2021. 205
Figure 146 : Courbes d'humidité relative, de tension de vapeur des sondes H1 (rue Marchant), H2 (houppier d'un arbre) et vitesse du vent horaire à la station *Metz-Frescaty* du 12 août au 16 août 2021. 206
Figure 147 : Valeurs des températures maximales (Tx) et minimales (Tn) relevées par les stations *Place au Lièvre* et *Mécleuves* du 1er au 18 août 2020. 209
Figure 148 : Extrait des séquences de nuits choisies pour étudier la variabilité spatiale de l'ICU. 211
Figure 149 : Emprise des buffers concentriques servant à déterminer les parts d'occupation du sol sont calculées (station *Magny*). 212
Figure 150 : Chaîne de traitement décrivant la méthodologie suivie pour établir le modèle de régression linéaire multiple (Hassani *et al.*, 2022). 214
Figure 151 : Chaîne de traitement décrivant la méthodologie suivie pour le calage et la validation croisée du modèle d'interpolation spatiale (Hassani *et al.*, 2022). 215
Figure 152 : Distribution des écarts de température lors des canicules de juin et juillet 2019 et de la canicule d'août 2020 (maille 5 x 5 m). 217
Figure 153 : Distribution de la moyenne des écarts maximum lors des deux phases (maille 5 x 5 m). Phase 1 à gauche et phase 2 à droite. 219
Figure 154 : à gauche la station *Kestrel 5500* et à droite le GPS *Oregon™ 600*. 225
Figure 155 : Vélo équipé de la mini-station météorologique *Kestrel 5500* utilisé pour les mesures mobiles sur le territoire de l'Eurométropole de Metz. 225
Figure 156 : (a) et (b) les itinéraires parcourus au sein de l'EMM, (c) les itinéraires parcourus à Casablanca lors des campagnes de mesures mobiles. 227
Figure 157 : Erreur de positionnement géographique des points de mesures en ville liée à une rue-canyon (Boulevards Ibnou Sina et Oued Laou à Casablanca). 230

Figure 158 : Exemple de recalage des températures mesurées (mesures itinérantes effectuées le 25/7/2019 de 21h30 à 23h06). 231
Figure 159 : Corrélation entre les données de températures relevées par les mesures mobiles (station mini-Kestrel sonde à découvert) et celles enregistrées par les sondes du réseau REMTHAM (sous abri). 232
Figure 160 : Ecarts de Ta « instantanés » avec la station *Mécleuves* le long des transects urbains (Lebaut *et al.*, 2021). 233
Figure 161 : Profil des écarts de Ta (°C) avec la station *Mécleuves* sur l'itinéraire AB lors de la campagne du 8 août 2020. 234
Figure 162 : Profil des écarts de Ta (°C) avec la station *Mécleuves* de l'itinéraire CD lors de la campagne du 10 août 2020. 235
Figure 163 : Profil des écarts de Ta (°C) avec la station *Mécleuves* de l'itinéraire EF lors de la campagne du 11 août 2020. 236
Figure 164 : Les écarts de Ta « instantanés » avec la station de l'aéroport Mohammed V le long des transects urbains. 237
Figure 165 : Profil des écarts de Ta (°C) avec la station de l'aéroport Mohammed V sur l'itinéraire AB lors de la campagne du 17 juillet 2019. 238
Figure 166 : Profil des écarts de Ta (°C) avec la station de l'aéroport Mohammed V sur l'itinéraire CD lors de la campagne du 16 juillet 2019. 238
Figure 167 : Profil des écarts de Ta (°C) avec la station de l'aéroport Mohammed V sur l'itinéraire EF lors de la campagne du 12 juillet 2019. 239
Figure 168 : Chaîne de traitements de la méthode de classification LCZ *WUDAPT* L0. 244
Figure 169 : Classification LCZ de l'EMM. 245
Figure 170 : Classification LCZ du GC. 246
Figure 171 : Boites à moustache des Ta observées par mesure mobile par classe LCZ à l'EMM. 247
Figure 172 : Boites à moustache des Ta observées par mesure mobile par classe LCZ à Casablanca. 248
Figure 173 : Température moyenne de chaque session de mesure pour des LCZ de même type à l'EMM. 249
Figure 174 : Température moyenne de chaque session de mesure pour des LCZ de même type au GC. 249
Figure 175 : Relation entre les températures l'air et la distance au centre-ville à l'EMM. 250
Figure 176 : Relation entre les températures l'air et la distance au centre-ville à Casablanca. 251
Figure 177 : Relation entre les Ta et la distance au centre-ville en fonction des classes LCZ à l'EMM. 252
Figure 178 : Relation entre les Ta et la distance au centre-ville en fonction des classes LCZ à Casablanca. 253
Figure 179 : Opération appliquée sur les variables identifiées pour produire l'indice de vulnérabilité à la chaleur à l'aide de l'ACP. 268
Figure 180 : Carte de vulnérabilité à la chaleur de l'Eurométropole de Metz à l'échelle des IRIS. 269
Figure 181 : Structure du questionnaire ayant servi à enquêter les habitants du GC et de l'EMM. 274

Figure 182 : Exemple de lieux de l'enquête en face-à-face à Casablanca (place Mohammed V (a) et parc de la Ligue Arabe (b)) et à l'Eurométropole de Metz (place de la République (c) et Esplanade (d)). 277
Figure 183 : Répartition des répon-dants selon le sexe..... 279
Figure 184 : (a) Répartition des répondants selon les catégories d'âge. (b) Répartition des répondants selon les catégories socio-professionnelles. 279
Figure 185 : (a) Réponses à la question : « Quel est votre type de logement ? » ; (b) Réponses à la question : « De quels équipements de confort thermique votre logement est-il doté ? ».280
Figure 186 : (a) Réponses à la question : « Votre logement est-il doté d'un jardin privatif ? » ; (b) Réponses à la question : « Avez-vous un espace vert à proximité de chez-vous ? ». 280
Figure 187 : Réponses à la question : « Avant la crise sanitaire, où travailliez-vous ? ». 281
Figure 188 : Les sujets de société préoccupant le plus les répondants (3 thématiques au choix parmi 13). 282
Figure 189 : Les dangers naturels inquiétant les répondants. 282
Figure 190 : Les années durant lesquelles les répondants à l'enquête affirment avoir fait l'expérience d'une canicule..... 283
Figure 191 : Réponses à la question : « Pensez-vous que dans les prochaines années, le nombre de canicules augmentera sur votre territoire ? »..... 284
Figure 192 : Réponses à la question : « Vous informez-vous des recommandations sanitaires en cas de vague de chaleur ? ». 285
Figure 193 : Réponses à la question : « Par quels moyens ? »..... 286
Figure 194 : Réponses à la question : « Vous estimez-vous suffisamment sensibilisé(e) par rapport aux risques sanitaires liés aux vagues de chaleur ? ». 287
Figure 195 : Réponses à la question : « Pensez-vous que les autorités publiques luttent de manière suffisante contre le risque caniculaire (prévention, amélioration du cadre de vie...) ? ». 288
Figure 196 : Réponses à la question : « A quel point faites-vous confiance aux autorités publiques pour lutter contre les effets sanitaires des vagues de chaleur ? ». 288
Figure 197 : Répartition des personnes déclarant s'être habituées et non à la chaleur..... 289
Figure 198 : Effets sur la santé des vagues de chaleur tels que ressentis par les habitants de l'agglomération messine et celle de Casablanca. 290
Figure 199 : Les symptômes physiques ressentis par les répondants selon le sexe pendant les périodes de forte chaleur a) cas de l'agglomération messine, b) cas de Casablanca. 291
Figure 200 : Moment où la chaleur devient insupportable pour les habitants en fonction du cycle jour/nuit..... 291
Figure 201 : Boites à moustache des valeurs de températures diurnes et nocturnes à partir desquelles la chaleur devient insupportable pour les habitants..... 292
Figure 202 : (a) Histogramme des températures jugées insupportables la journée par huit classes ;..... 292
Figure 203 : Nuages de mots des impacts de la chaleur intense sur les activités quotidiennes des habitants 294
Figure 204 : Répartition des personnes se déclarant vulnérables aux vagues de chaleur sur une échelle de niveau allant de 1 (je ne suis pas du tout vulnérable) à 5 (je suis très vulnérable). 295
Figure 205 : Comportements adoptés par les habitants lors des périodes de forte chaleur. . 297
Figure 206 : Extraits des cartes interactives. a) Cas de Metz b) Cas de Casablanca (questionnaire en arabe). 298

Figure 207 : Les zones de surchauffe et les oasis signalées par les répondants de l'EMM (en nombre d'occurrences). 299
Figure 208 : Les « oasis » et les zones de surchauffe signalées par les répondants de Casablanca (en nombre d'occurrences). 300
Figure 209 : Le point de vue des habitants sur les atouts des deux agglomérations en matière d'oasis et de cadre de vie en période de forte chaleur. 301
Figure 210 : Évaluation des propositions d'amélioration de cadre de vie en milieu urbain par les habitants des deux territoires comparés sur une échelle allant de 1 = non pertinente à 5 = très pertinente. 302
Figure 211 : Institutions et collectivités identifiées sur le territoire de Metz pour les entretiens semi-directifs. 309
Figure 212 : Collectivités et institutions identifiées sur le territoire de Casablanca. 309
Figure 213 : Interface de traitement des verbatims du logiciel *MAXQDA*. 313
Figure 214 : Principaux thèmes et sous-thèmes identifiés dans les verbatims des entretiens semi-directifs. 315

Liste des tableaux

Tableau 1 : Échelles spatiales d'étude du climat d'après (Yoshino, 1975). 14
Tableau 2 : Seuils de vitesse du vent propre à éliminer l'ICU pour des villes de différentes tailles (He, 2018). 39
Tableau 3 : Les différents systèmes d'alerte canicule-santé dans le monde (Hajat *et al.*, 2010). 63
Tableau 4 : Subdivisons de la bande infrarouge thermique selon la norme ISO 20473. 94
Tableau 5 : Quelques satellites/plateformes d'observation de la Terre (OT) embarquant un capteur thermique (liste non-exhaustive). 95
Tableau 6 : Méthodes d'extraction des Ts à partir des données satellitaires. 99
Tableau 7 : Les métadonnées de Landsat TM 5 (source : http://earthexplorer.usgs.gov). ... 100
Tableau 8 : Les métadonnées de Landsat OLI/TIRS 8 (source : http://earthexplorer.usgs.gov). 101
Tableau 9 : Caractéristiques des images *Landsat* multi-dates utilisées dans cette étude..... 101
Tableau 10 : Données météorologiques (moyennes horaires) au moment du passage des satellites (source : Direction Nationale de la Météorologie de Casablanca et Météo-France). 102
Tableau 11 : Présentation des quatre sites emblématiques du GC..... 115
Tableau 12 : Présentation des trois sites emblématiques de l'EMM. 116
Tableau 13 : Evolution des Ts sur le site d'Anfa Park sur la période 1995-2019. 117
Tableau 14 : Evolution des Ts sur le site de la place Mohammed V sur la période 1995-2019. 118
Tableau 15 : Evolution des Ts du pôle Innovation-Santé Mercy sur la période 1985-2019. 119
Tableau 16 : Evolution des Ts du quartier de l'Amphithéâtre 1985-2019. 120
Tableau 17 : Evolution des Ts pour la ville verte de Bouskoura sur la période 1995-2019. 121
Tableau 18 : Evolution des Ts pour le quartier d'affaires de Sidi Maârouf sur la période 1995-2019. 121
Tableau 19 : Evolution des températures de surface pour le centre commercial Waves Actisud 1985-2019..... 122
Tableau 20 : Caractéristiques des images *ECOSTRESS* utilisées dans cette étude. 124
Tableau 21 : portée, résolution, précision des capteurs de la station Vantages2 Pro + ... 154
Tableau 22 : Coordonnées de la borne de Scy-Chazelles (Système : RGF93 v2b)..... 157
Tableau 23 : Informations sur les vols en fonction des sites étudiés. 160
Tableau 24 : Nombre d'images optiques et thermiques recueillies pour chaque site (Etat 0 : avant travaux/Etat ; 1 : après travaux)..... 163
Tableau 25 : Nombre d'images optiques et de points de contrôle utilisés pour l'alignement des images (Etat 0 : avant travaux/Etat 1 : après travaux)..... 164
Tableau 26 : Nombre de points dans les nuages fins et denses générés à partir des images optiques servant à construire la modélisation 3D (Etat 0 : avant travaux/Etat 1 : après travaux). 164
Tableau 27 : Exemples de réseaux d'observation urbains déployés depuis le début des années 2000 en Europe et aux Etats-Unis. 182
Tableau 28 : Caractéristiques de la station météorologique de Metz-Frescaty. 189
Tableau 29 : Caractéristiques de la station d'ATMO Grand-Est (www.atmo-grandest.eu/donnees-par-station)..... 189

Tableau 30 : Les ΔTa moyens diurnes et nocturnes relevés en été et en hiver. 200
Tableau 31 : Fréquence des classes d'intensité de l'ICU messin selon les saisons (ΔTa maximal *Place au Lièvre-Mécleuves*). 201
Tableau 32 : Environnement des deux sondes Ha et H2. 204
Tableau 33 : Nombre de jours par classe d'ICU (°C) en fonction du dépassement ou non des seuils de canicule. 208
Tableau 34 : Synthèse des statistiques des modèles de régression linéaire multiple (Hassani *et al.*, 2022). 215
Tableau 35 : Fréquence des classes de valeurs des résidus observés par les stations au cours des périodes caniculaires étudiées. 217
Tableau 36 : Synthèse des statistiques des modèles de régression linéaire multiple. 218
Tableau 37 : Fréquence des classes de valeurs des résidus observés par les stations au cours des deux phases. 219
Tableau 38 : Méthodes utilisées pour concevoir les transects mobiles dans des études ayant recours à cette méthode de mesure. 226
Tableau 39 : Récapitulatif des sessions de mesures mobiles réalisées dans les deux terrains étudiés 229
Tableau 40 : Conditions météorologiques lors des campagnes de mesure mobiles (stations Metz Frescaty et Aéroport Mohammed V). 229
Tableau 41 : Niveaux de classification LCZ *WUDAPT* (adapté de Ching *et al.* (2019)) 243
Tableau 42 : Les images *Landsat* utilisées pour produire la classification LCZ des deux terrains d'étude. 244
Tableau 43 : Variables sélectionnées pour élaborer l'indice de vulnérabilité sur le territoire de l'EMM (en jaune les variables de sensibilité, en rose les variables relatives à l'exposition et en vert les variables se rapportant à la résilience). 264
Tableau 44 : Les poids factoriels des variables sur chaque facteur de l'ACP, avec en gras, le poids factoriel maximum par variable. 267
Tableau 45 : Informations au sujet du répondant et de son environnement proche. Exemple du questionnaire messin. 274
Tableau 46 : Variables recherchées et questions posées pour mesurer la perception du risque caniculaire par les habitants. Exemple du questionnaire messin. 275
Tableau 47 : Parts des personnes s'estimant sensibilisées et non sensibilisées selon les tranches d'âge. 287
Tableau 48 : Températures moyennes diurnes et nocturnes renseignées par les enquêtés des deux terrains d'étude. 292
Tableau 49 : Parts des personnes ayant un niveau de vulnérabilité de 4 (je suis vulnérable) et 5 (je suis très vulnérable) selon les tranches d'âge. 295
Tableau 50 : Parts des personnes ayant un niveau de vulnérabilité de 4 (je suis vulnérable) et 5 (je suis très vulnérable) selon les catégories socio-professionnelles 296
Tableau 51 : Exemple d'une grille utilisée pour un entretien semi-directif avec un agent chargé des parcs et jardins de la ville (Hassani et collaborateurs, 2022). 311
Tableau 52 : Corpus des entretiens semi-directifs de Metz (2021) et Casablanca (2022). 312
Tableau 53 : Les étapes suivies pour l'analyse thématique des entretiens. 314

Table des matières

REMERCIEMENTS **3**
SOMMAIRE **6**
INTRODUCTION GENERALE **1**
Intérêt de l'approche comparative en géographie **4**
Choix des deux villes étudiées **5**
Organisation de la thèse **7**
PARTIE I : PROBLEMATIQUE SCIENTIFIQUE ET CONTEXTE D'ETUDE **9**
PARTIE I - INTRODUCTION **10**
Chapitre 1 : Climats urbains et îlots de chaleur **11**
1.1. Les effets de la ville sur le climat **12**
1.1.1. Émergence et développement de la climatologie urbaine 12
1.1.2. Le climat urbain 13
1.1.2.1. Les échelles d'étude du climat urbain 13
1.1.2.2. Transferts d'énergie et bilan radiatif 15
1.2. Les types d'îlots de chaleur **18**
1.2.1. Les îlots de chaleur de surface 18
1.2.1.1. Définition 18
1.2.1.2. Méthodes d'observation 19
1.2.2. L'îlot de chaleur nocturne 20
1.2.2.1. Définition 20
1.2.2.2. Méthodes de mesure 21
1.2.3. L'îlot de chaleur urbain de la couche limite 21
1.3. Les causes des îlots de chaleur **23**
1.3.1. Carence en couvert végétal en ville 24
1.3.1.1. Evapotranspiration 24
1.3.1.2. Effet d'ombrage 25
1.3.2. Augmentation du stockage de la chaleur dans les surfaces 26
1.3.3. Formes et géométrie urbaine 28
1.3.3.1. La rugosité urbaine 28
1.3.3.2. Canyon urbain et piégeage radiatif 30
1.3.4. La chaleur liée aux activités anthropiques 33
1.3.4.1. Le flux de chaleur anthropique 34
1.3.4.2. La pollution atmosphérique 35

1.4. Les facteurs de variabilité 36
1.4.1. Influence de la couverture nuageuse et des précipitations 36
1.4.1.1. Influence de la fraction nuageuse 36
1.4.1.2. Influence des pluies 38
1.4.2. Influence du vent et de la brise côtière 38
1.4.2.1. Le vent synoptique 38
1.4.2.2. L'effet de brise côtière 39
Synthèse 41
Chapitre 2 : Vulnérabilités humaines face à la chaleur intense 42
2.1. La notion de vulnérabilité aux risque liés à la chaleur 44
2.1.1. Le récent changement de paradigme sur la notion de vulnérabilité 44
2.1.2. L'exposition à l'aléa comme premier facteur de vulnérabilité 47
2.1.3. La sensibilité, aspect passif de la vulnérabilité 51
2.1.4. La résilience, dimension active de la vulnérabilité 54
2.2. Les méthodes de mesure 58
2.2.1. Les méthodes participatives 58
2.2.2. Les indices d'évaluation spatialisés 59
2.3. La veille sanitaire face aux vagues de chaleur 61
2.3.1. Les systèmes d'alerte canicule-santé dans le monde 61
2.3.2. Le plan d'alerte-canicule français 63
Synthèse 66
Chapitre 3 : Présentation des terrains d'étude 67
3.1. Données socio-démographiques et socio-économiques 68
3.1.1. L'Eurométropole de Metz 68
3.1.1.1. Structure administrative 68
3.1.1.2. Un profil sociodémographique stable 70
3.1.2. Le Grand Casablanca 70
3.1.2.1. Structure administrative 71
3.1.2.2. Une croissance démographique exceptionnelle, soutenue par l'exode rural 72
3.2. Milieu physique 73
3.2.1. Cadre topographique 73
3.2.1.1. Le territoire de l'EMM 73
3.2.1.2. Le territoire du Grand Casablanca 74
3.2.1.3. La couverture du sol des deux terrains étudiés 76
3.2.2. Analyse comparée des principaux éléments du climat 77
3.2.2.1. La classification des climats selon Köppen-Geiger 78

3.2.2.2. Les hauteurs de précipitations 78
3.2.2.3. La température de l'air 79
3.2.2.4. L'aridité 81
3.2.2.5. La durée d'insolation 81
3.2.2.6. Le vent 82
3.2.3. Les changements climatiques déjà « observables » 83
3.2.3.1. Evolution récente de la température : tendance décennale et vagues de chaleur 83
3.2.3.2. La pluviométrie et la sécheresse météorologique 85
3.2.3.3. Les tendances climatiques futures 86
Synthèse 87
PARTIE I - CONCLUSION 88
PARTIE II : OBSERVATION ET CARTOGRAPHIE DES ILOTS DE CHALEUR 89
PARTIE II - INTRODUCTION 90
Chapitre 4 : Les îlots de chaleur de surface à l'échelle de l'agglomération 91
4.1. Observation des températures de surfaces par télédétection 92
4.1.1. Principes de l'infrarouge thermique 92
4.1.2. La télédétection satellitaire 94
4.1.3. L'extraction des températures de surface 96
4.1.3.1. Les méthodes à canal unique 96
4.1.3.2. La méthode à fenêtre fractionnée (*Split-Window*) 97
4.1.3.3. L'algorithme de séparation Température-Émissivité (TES) 98
4.1.3.4. L'algorithme jour/nuit basé sur la physique 98
4.2. Détection et cartographie des températures de surface 100
4.2.1. Acquisition et description des données 100
4.2.1.1. Les données *Landsat* 100
4.2.1.2. Les données météorologiques 102
4.2.2. Méthodologie de prétraitement des images Landsat 102
4.3. Analyse spatio-temporelle des thermographies diurnes 107
4.3.1. Evolution sur le long terme 107
4.3.1.1. Cas du Grand Casablanca 107
4.3.1.2. Cas de l'Eurométropole de Metz 109
4.3.1.3. Comparaison des deux territoires d'étude 110
4.3.2. Distribution des Ts diurnes en fonction des classes LCZ 112
4.3.3. Impacts de certaines opérations de réaménagements sur les Ts 114
4.3.3.1. Les projets de réaménagement dans le Grand Casablanca 115
4.3.3.2. Les projets de réaménagement dans l'EMM 116

4.3.3.3. Résultats et discussion 117
4.4. Analyse spatio-temporelle des thermographies nocturnes 123
4.4.1. Les données *ECOSTRESS* 123
4.4.2. Acquisition des données *ECOSTRESS* 124
4.4.3. Spatialisation des Ts nocturnes du Grand Casablanca (*Landsat*) 124
4.4.4. Spatialisation des Ts nocturnes à l'échelle de l'EMM (*ECOSTRESS*) 126
4.4.5. Dynamique nocturne de l'ICUs dans les deux métropoles à partir des données *ECOSTRESS* 128
4.4.5.1. Dynamique nocturne de l'ICUs du Grand Casablanca 129
4.4.5.2. Dynamique nocturne de l'ICUs de l'Eurométropole de Metz 130
Synthèse 131
Chapitre 5 : Détection des températures de surface dans les espaces publics 133
5.1. Le développement de l'imagerie par drone 134
5.1.1. Aux origines de la télédétection aéroportée, la photographie aérienne 134
5.1.2. Les drones modernes, point de convergence d'évolutions technologiques multiples 135
5.1.3. La télédétection par drone aujourd'hui, un outil incontournable dans les sciences environnementales 138
5.2. La télédétection par drone : un intérêt technique certain, mais non dépourvu de limites 140
5.2.1. Des limites techniques non-négligeables 140
5.2.2. Des contraintes réglementaires lourdes 141
5.3. L'acquisition des images thermiques par drone 143
5.3.1. Les principes de l'imagerie thermique 143
5.3.2. Les types de caméras IRT disponibles 144
5.3.2.1. Les caméras IRT refroidies 144
5.3.2.2. Les caméras IRT non-refroidies 145
5.3.2.3. L'étalonnage radiométrique des données des caméras IRT non- refroidie et non-calibrée 146
5.4. Cas d'étude dans l'agglomération messine 148
5.4.1. Les sites ciblés 148
5.4.1.1. La place Mazelle 148
5.4.1.2. La cour de l'école Saint-Eucaire 149
5.4.1.3. Le parking 144 route de Thionville 150
5.4.2. La conception d'un protocole de mesure 151
5.4.2.1. Le matériel utilisé 151
5.4.2.2. Le protocole de correction radiométrique à l'aide des données de terrain 154

5.4.3. L'acquisition des données aéroportées 155
5.4.3.1. La planification des vols 155
5.4.3.2. Le déroulement des vols 160
5.5. Traitement photogrammétrique des données et production des thermographies 162
5.5.1. La création des orthomosaïques optiques 163
5.5.1.1. L'alignement des images et l'extraction du nuage de points 163
5.5.1.2. La création du nuage de points denses 164
5.5.1.3. La construction du maillage 165
5.5.1.4. Les orthomosaïques optiques des trois sites survolés 166
5.5.2. La création des orthomosaïques thermiques 168
5.5.3. La correction radiométrique des images IRT 169
5.5.3.1. Les cas de la place mazelle et de la cour Saint-Eucaire 169
5.5.3.2. Le cas du parking route de Thionville 171
5.5.3.3. Synthèse méthodologique 172
5.6. Analyse des thermographies 172
5.6.1. La place Mazelle 172
5.6.2. La cour de l'école Saint-Eucaire 174
5.6.3. Le parking route de Thionville avant et après réaménagement 175
Synthèse 178
Chapitre 6 : L'îlot de chaleur nocturne à l'échelle de l'agglomération 180
6.1. L'observation de la température de l'air dans la canopée urbaine 181
6.1.1. Les réseaux de stations météorologiques urbaines 181
6.1.2. Les campagnes de mesure fixes 184
6.1.3. Guides et recommandations d'installation d'un réseau de mesure 185
6.2. Spatialisation et cartographie de l'ICU à l'aide de mesures fixes 187
6.2.1. L'interpolation spatiale 187
6.2.2. Les modèles de simulation numérique 188
6.3. Mise en place du réseau REMTHAM 188
6.3.1. Bilan de l'existant 189
6.3.1.1. La station de Metz-Frescaty 189
6.3.1.2. La station d'ATMO Grand-Est 189
6.3.2. Instruments de mesure 190
6.3.2.1. Les sondes HOBO 190
6.3.2.2. Les abris anti-radiations 190
6.3.2.3. La station météorologique 191
6.3.3. Déploiement du réseau REMTHAM 192
6.3.3.1. Choix des sites d'implantation 192

6.3.3.2. Choix des stations de référence 193
6.4. Traitements et analyse des données 195
6.4.1. Profil de l'ICU messin 195
6.4.1.1. Intensité de l'ICU messin 195
6.4.1.2. Dynamique journalière 197
6.4.1.3. Dynamique saisonnière 199
6.4.1.4. Test d'une modélisation simple de l'îlot de chaleur nocturne 201
6.4.1.5. Effet de site sur le rafraîchissement urbain : l'exemple de l'arbre en ville 203
6.4.1.6. Relation entre ICU et canicule 207
6.4.2. Spatialisation de l'ICU par régression multicritère sur le territoire de l'EMM 209
6.4.2.1. Prétraitement des données 210
6.4.2.2. Construction des modèles de régression 212
6.4.2.3. Validation des modèles établis 214
6.4.2.4. Cartographie de l'ICU 215
Synthèse 220
Chapitre 7 : L'îlot de chaleur nocturne à l'échelle du quartier 222
7.1. Principe de la méthode de mesure par transects mobiles 223
7.2. Protocole d'acquisition des données 224
7.2.1. Dispositif de mesure utilisé 224
7.2.1.1. Capteur météorologique 224
7.2.1.2. Vecteurs mobiles 225
7.2.2. Définition des itinéraires 226
7.3. Acquisition des données 228
7.3.1. Campagnes de mesure sur les deux terrains d'étude 228
7.3.2. Traitement des données recueillies 230
7.3.2.1. Correction des points de mesures 230
7.3.2.2. Correction temporelle des Ta 230
7.4. Analyse des résultats 232
7.4.1. Comparaison entre mobiles et mesures fixes 232
7.4.2. Amplitude de l'ICU à l'échelle intra-urbaine 233
7.4.2.1. Les transects de l'EMM 233
7.4.2.2. Les transects de Casablanca 237
7.4.3. Cartographie des zones climatiques des deux aires urbaines 239
7.4.3.1. La nécessité d'une classification climatique urbaine 240
7.4.3.2. La classification en zones climatiques locales (LCZ) 240

7.4.3.3. Méthodes de classification 241
7.4.3.4. Cartographie LCZ des terrains d'étude 243
7.4.4. Variabilité thermique en fonction des classes LCZ 246
7.4.4.1. Variabilité inter-LCZ des Ta 247
7.4.4.2. Influence de la position relative des LCZ 248
7.4.5. Relation entre les températures de l'air et la distance au centre-ville 250
7.4.6. Relation entre les températures de l'air et la distance au centre- ville en fonction des classes LCZ 251
Synthèse 254
PARTIE II - CONCLUSION 256
PARTIE III : VULNERABILITE DE LA POPULATION ET ADAPTATION DES TERRITOIRES URBAINS AUX RISQUES LIES A LA CHALEUR 258
PARTIE III - INTRODUCTION 259
Chapitre 8 : Spatialisation de la vulnérabilité à la chaleur intense 260
8.1. Cadre théorique 261
8.2. Echelles et données 262
8.2.1. Echelle spatiale de travail 262
8.2.2. Données utilisées 262
8.3. Méthodologie 265
8.3.1. Prétraitements des données 266
8.3.2. Construction de l'indice 266
8.4. Cartographie de l'indice de vulnérabilité 268
Synthèse 270
Chapitre 9 : L'expérience sociale de la surchauffe urbaine 271
9.1. Méthodologie et protocole d'enquête 272
9.1.1. Définition des hypothèses 272
9.1.2. Adaptation du questionnaire au contexte géographique et socio-culturel 272
9.1.3. Élaboration du questionnaire 273
9.1.4. Stratégies de passation 276
9.1.5. Prétraitement des données recueillies 278
9.2. Analyse comparative des résultats 279
9.2.1. Composition des échantillons 279
9.2.2. Informations sur l'environnement et le lieu de vie des répondants 280
9.2.2.1. Le logement 280
9.2.2.2. Environnement de travail 281
9.2.3. Sujets de société et perception des risques d'origine climatique 281
9.2.3.1. Une préoccupation pour l'environnement plus forte en France 281

9.2.3.2. Sécheresse et épisodes caniculaires aux premiers rangs des sujets d'inquiétude liés aux dangers naturels 282
9.2.3.3. Une perception partagée sur l'augmentation de la chaleur en été 283
9.2.3.4. Une mémoire du risque plus vive côté français 283
9.2.3.5. Des positions contrastées au sujet de l'augmentation future du nombre de canicules 284
9.2.3.6. Une prise d'information importante 285
9.2.3.7. Les Messins mieux sensibilisés aux risques liés à la chaleur intense 287
9.2.3.8. Une confiance relative vis-à-vis des autorités publiques 288
9.2.4. Ressenti et perception des vagues de chaleur 289
9.2.4.1. Les Casablancais mieux adaptés à la chaleur 289
9.2.4.2. Le sentiment d'une santé plus impactée dans la population messine 289
9.2.4.3. Perception dissonante du ressenti thermique et cycle journalier 291
9.2.4.4. La chaleur intense mieux tolérée en journée 292
9.2.4.5. Un ressenti thermique modulé par la pollution atmosphérique et l'humidité de l'air 293
9.2.4.6. Des activités quotidiennes diversement affectées selon le territoire enquêté 293
9.2.5. Étude de la vulnérabilité aux vagues de chaleur 294
9.2.5.1. Le rôle modulateur de l'acclimatation 294
9.2.5.2. La sensation de vulnérabilité n'est pas l'apanage des personnes âgées . 295
9.2.5.3. Un sentiment de vulnérabilité très présent dans la catégorie élève/étudiant 296
9.2.6. Comportements et leviers d'action face aux vagues de chaleur 296
9.2.6.1. L'hydratation comme comportement phare en période de fortes chaleurs, la climatisation comme élément discriminant 296
9.2.6.2. La pratique des lieux comme marqueur spatial du comportement des habitants 297
9.2.6.3. La végétation, solution plébiscitée pour améliorer le confort thermique d'été 300
9.2.6.4. Une perception dissonante du levier d'action contre la surchauffe urbaine 301
Synthèse 302
Chapitre 10 : Enquête par entretien auprès des acteurs locaux 305
10.1. Méthodologie et contexte des entretiens 307
10.1.1. Le mode opératoire : les entretiens semi-directifs 307
10.1.2. La sélection des acteurs publics à interroger dans chaque territoire 308
10.1.2.1. Les acteurs messins 308
10.1.2.2. Les acteurs casablancais 309

10.1.3. L'élaboration des grilles d'entretien 310
10.1.4. Conditions de réalisation de entretiens 311
10.2. Traitement et analyse 313
10.3. Résultats 314
10.3.1. Enjeux soulevés 315
10.3.2. Prise en compte de la problématique de la surchauffe urbaine 317
10.3.3. Difficultés rencontrées 318
Synthèse 320
PARTIE III - CONCLUSION 321
CONCLUSION GENERALE 322
Axe 1 : diagnostic climatique et analyse géophysique de la surchauffe urbaine 322
Axe 2 : Evaluation du ressenti thermique et de la vulnérabilité aux risques liés à la chaleur 324
Retour d'expérience sur l'approche comparative 326
Apport de la thèse dans la planification urbaine 327
Perspectives 328
Bibliographie 330
Annexes 382
Liste des figures 429
Liste des tableaux 439
Table des matières 442
Résumé 451
Abstract 452

Résumé

Dans le contexte actuel de changement climatique rapide, les vagues de chaleur deviennent plus intenses et plus fréquentes. En ville, cette hausse des températures s'ajoute au phénomène de surchauffe urbaine qui se manifeste généralement par la formation d'un Ilot de Chaleur Urbain (ICU), ce qui fait peser des risques importants sur la santé et le bien-être des citadins. En prenant pour cas d'étude les deux territoires géo-climatiquement contrastés de l'Eurométropole de Metz et du Grand Casablanca, cette thèse se propose d'étudier la manière dont les îlots de chaleur se déploient sur la scène urbaine et interagissent avec les conditions environnementales et notamment la distribution spatiale des populations les plus vulnérables. Le travail de recherche est conduit selon deux axes : le premier axe porte sur l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des températures de surface en fonction des typologies d'occupation du sol et des formes urbaines dans les deux villes étudiées. Pour cela, nous mettons à profit les produits issus de la télédétection satellite afin de réaliser une analyse diachronique des îlots de chaleur de surface à l'échelle de l'agglomération, que nous complétons par des thermographies à l'échelle de l'espace public issues de l'imagerie aéroportée par drone. D'autre part, nous nous appuyons sur des données de terrain inédites issues d'un réseau de stations météorologiques déployées dans le territoire de l'Eurométropole de Metz assurant un suivi continu des températures de l'air au niveau de la canopée urbaine. Le traitement de ces relevés de terrains nous permet de spatialiser l'ICU à l'échelle de l'aire urbaine par le biais d'une modélisation statistique multicritère. Ce réseau est complété par des mesures mobiles effectuées sur des transects parcourant une diversité d'espaces urbains et de zones climatiques dans les deux villes étudiées. Le second axe examine la vulnérabilité par une approche intégrant des données quantitatives et qualitatives. Pour cela, un indice de vulnérabilité est produit au moyen d'une analyse statistique multivariée avec pour objectif d'identifier les populations vulnérables sur une échelle intra-urbaine. Les résultats sont complétés par une enquête de perception ciblant tout autant les habitants de deux villes en interrogeant leurs habitudes, leur ressenti thermique, et leurs stratégies d'adaptation aux fortes chaleurs (approche ascendante ou *bottom-up*), que les acteurs de l'aménagement et de la gestion des risques (approche descendante ou *top-down*).

Mots clés : îlot(s) de chaleur urbain(s), modélisation statistique, indice de vulnérabilité à la chaleur, stress thermique, perception, Eurométropole de Metz, Grand Casablanca, télédétection, station météorologique, enquête.

Abstract

In the current context of rapid climate change, heatwaves are on the rise in both intensity and frequency. Within urban areas, this upward temperature trend exacerbates the phenomenon of urban overheating, often culminating in the formation of Urban Heat Islands (UHI), thus posing substantial risks to the health and well-being of the city residents. Taking the two geo-climatically contrasting cities of Metz and Casablanca as case studies, this thesis aims to investigate how urban heat islands manifest in urban areas and interact with environmental conditions, with a specific focus on the spatial distribution of the most vulnerable populations. The research is conducted along two primary axes: the first axis involves an analysis of the spatiotemporal variability of surface temperatures in relation to land use typologies and urban configurations in the two cities. To achieve this, we make use of satellite remote sensing products to carry out a diachronic analysis of surface heat islands at the urban scale. This analysis is complemented by thermographic images at the scale of public spaces derived from airborne drone imagery. Furthermore, we utilize unprecedented field data from a network of weather stations deployed throughout the territory of the Metz metropolitan area, enabling continuous monitoring of air temperatures at the urban canopy level. The processing of these field measurements allows us to map the UHI at the scale of the urban area through a multicriteria statistical modeling approach. This network is complemented by mobile measurements conducted along transects covering a variety of urban spaces and climate zones in the two studied cities. The second axis examines vulnerability on the basis of an approach incorporating both quantitative and qualitative data. To this end, a heat vulnerability index (HVI) is constructed using multivariate statistical analysis with the objective of identifying vulnerable populations at an intra-urban scale. The results are supplemented by a perception survey targeting both city residents investigating their behaviors, thermal perceptions, and adaptive strategies in response to extreme heat (a bottom-up approach), as well as stakeholders in urban planning and risk management (top-down approach).

Keywords: urban heat island, statistical modeling, heat vulnerability index, heat stress, perception, Metz Eurometropolis, Greater Casablanca, remote sensing, weather station, survey.