



HAL
open science

Choisir les sites minéraux urbains à végétaliser en priorité pour améliorer le confort thermique des habitants et réduire les risques sanitaires face aux vagues de chaleur

Emma Douguet

► To cite this version:

Emma Douguet. Choisir les sites minéraux urbains à végétaliser en priorité pour améliorer le confort thermique des habitants et réduire les risques sanitaires face aux vagues de chaleur. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. dumas-03454194

HAL Id: dumas-03454194

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03454194>

Submitted on 29 Nov 2021

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers CFR Rennes

<p>Année universitaire : 2020 - 2021</p> <p>Spécialité : Paysage</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) :</p> <p>Paysage : opérationnalité et projet</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de Montpellier SupAgro (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
---	--

Choisir les sites minéraux urbains à végétaliser en priorité, pour améliorer le confort thermique des habitants et réduire les risques sanitaires face aux vagues de chaleur

Par : Emma DOUGUET

Soutenu à Angers le 16 septembre 2021

Devant le jury composé de :

Président : JOLIET Fabienne

Maître de stage : BEAUJOUAN Véronique / HERPIN
Sophie

Enseignant référent : GALOPIN Gilles

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Patrimoine-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



CITATION

Citation : « En période de canicule, ce sont les arbres qui sont les plus à plaindre. Ils ne peuvent pas se mettre à l'ombre. » Denis Langlois

REMERCIEMENTS

Je remercie Sophie Herpin et Véronique Beaujouan, mes maitres de stage, qui ont su m'aiguiller durant ce stage et auprès de qui j'ai beaucoup appris.

Merci à Gilles Galopin, mon tuteur de stage pour ses conseils.

Merci beaucoup à l'entreprise IdVerde dont Antoine Girault, Cécile Chevalier, Garin Blaise et Jérôme Verguin. Merci à eux d'avoir financé ce stage et de m'avoir fait confiance lors de sa réalisation.

Merci à Christophe Migeon et Vincent Bouvier, mes responsables de master qui ont su m'aider tout au long de l'année

Un chaleureux merci à Dominique Lemesle et Lydia Brialix de m'avoir accompagné lors de l'installation des stations météorologiques. Merci à Laure Beaudet, Claire Veillard et l'équipe IRIGO, en particulier Noël Vignol.

Merci pour l'accueil et le temps accordé par Claire Bulot, Kridide Genivieve, Fabrice Guillet, Fabien Jonquière, François Mendes avec une mention particulière à la classe PTSI de première année.

Merci à Myriam Merraiouch, Capucine Réhault, Valérie Brunet, Isabelle Leulier-ledoux et Fanny Maujean. Vos expériences ont été une vraie valeur ajoutée à mon stage.

Merci à David Remond, François Ortiz et Sandrine Bonnan qui ont su m'accompagner durant ce stage.

Merci à Moemen Hachicha, Soline Butin, Lisa Restouex, Philomène Champy, l'équipe des stagiaires et doctorants d'EPHOR, Nathalie Carcaud, Léa Paly, Natalia Escar Otin, les M1 et L3 des pauses midi, mes amis et collègue de stage.

Un immense merci à ma famille, mon copain et à ceux avec qui j'ai passé de superbes années à AO !

SOMMAIRE

GLOSSAIRE	6
LISTE DES ABREVIATIONS	6
LISTE DES ANNEXES	7
LISTE DES FIGURES	8
LISTE DES TABLEAUX	9
AVANT-PROPOS	10
DES VAGUES DE CHALEUR AUX CONSEQUENCES DRAMATIQUES.....	11
1. FAIRE FACE AUX VAGUES DE CHALEUR POUR AMELIORER LE CONFORT THERMIQUE DES HABITANTS ET REDUIRE LES RISQUES SANITAIRES.....	12
1.1. ABSENCE DE CONSENSUS POUR DES NOTIONS COMPLEXES	13
1.2. ANALYSE DE LA NOTION D'EXPOSITION AUX ILOTS DE CHALEUR URBAINS.....	14
1.3. ANALYSE DE LA NOTION DE CONFORT THERMIQUE.....	15
1.4. ANALYSE DE LA NOTION DE SENSIBILITE.....	16
1.5. ANALYSE DE LA NOTION DE CAPACITE A FAIRE FACE ET DES SOLUTIONS ENVISAGEABLES..	17
1.6. CHOIX DE LA METHODE	18
2. OUTILS UTILISES POUR DETERMINER LES SITES MINERAUX URBAINS A VEGETALISER EN PRIORITE	19
2.1. CADRE SPATIO-TEMPOREL DE L'ETUDE : ANGERS ET SA PREMIERE COURONNE ; PRECISIONS SUR UN QUARTIER ANGEVIN.....	19
2.1.1. Le climat angevin	19
2.1.2. L'occupation du sol de la commune d'Angers et ses environs	19
2.1.3. Population de la commune d'Angers et ses environs	20
2.1.4. Expérimentations menées sur le lycée Chevrollier	20
2.1.5. Période étudiée	20
2.2. OBTENTION DES DONNEES	20
2.2.1. Données démographiques et sociales : données carroyées de l'INSEE	20
2.2.2. Données d'occupation du sol	20
2.2.3. Données météorologiques	22
2.3. DEMARCHE DU PROJET.....	26
2.3.1. Exposition à l'ICU : Cartographie des températures à grande échelle.....	26
2.3.2. Localisation des populations vulnérables à la chaleur	28
2.3.3. Etude du confort thermique à l'échelle du site.....	28
3. CARTOGRAPHIES DES SITES MINERAUX URBAINS A VEGETALISER EN PRIORITE.....	35
3.1. EXPOSITION AUX ILOTS DE CHALEUR A L'ECHELLE DE LA VILLE D'ANGERS.....	35
3.1.1. Cartographies des températures d'air	35
3.1.2. Analyse croisée entre les températures de surface et les températures d'air.....	39
3.2. VULNERABILITE : LOCALISATION DES POPULATIONS VULNERABLES A L'ECHELLE DE LA VILLE D'ANGERS.....	40
3.2.1. Etude de la sensibilité de la population aux vagues de chaleur.....	40
3.2.2. Etude de la capacité à faire face de la population	41

3.3. <i>ETUDE DU CONFORT THERMIQUE A L'ECHELLE DU SITE</i>	41
3.3.1. Etude du confort thermique grâce à un groupe d'individus	42
3.3.2. Etude du confort thermique à l'aide d'une campagne de mesures mobiles	44
3.3.3. Etude du confort thermique à l'aide d'un modèle déterministe	46
3.3.4. Modélisation d'une démarche de descellement et de végétalisation.....	48
4. PERMETTRE A LA POPULATION SENSIBLE DE FAIRE FACE A LA CHALEUR	50
4.1. <i>LES SITES LES PLUS SOUMIS AUX VAGUES DE CHALEUR SUR LA COMMUNE D'ANGERS</i>	50
4.2. <i>UN CONFORT THERMIQUE DIFFERENT A L'ECHELLE DU SITE</i>	51
4.3. <i>LA VEGETATION COMME SOLUTION DE LUTTE</i>	52
L'ESPACE URBAIN COMME ZONE FRAGILE	53
BIBLIOGRAPHIE	54
SITOGRAPHIE	56

GLOSSAIRE

Capacité à faire face : « Habileté des personnes, des institutions, des organisations et du système utilisant les outils disponibles, les valeurs, les croyances et opportunités pour corriger, gérer et surmonter les conditions négatives dans une période de court à moyen terme » (IPCC, 2014)

Capacité d'adaptation : « Habileté des systèmes, des institutions, des humains et des autres organismes à s'ajuster aux dommages potentiels, de prendre avantage des opportunités ou de répondre aux conséquences » (IPCC, 2014)

Facteur vue du ciel : « Rapport de la surface de ciel visible depuis une surface plane par rapport à la surface totale du ciel. » (Patriarche, 2017)

ICU de la canopée : Différence entre la température d'air contenu dans la couche de la canopée urbaine, couche située entre la surface urbaine et le niveau du toit, et la hauteur correspondante dans la couche proche de la surface de la campagne (Oke, 2017). (Traduit de l'anglais)

ICU de la couche limite : Différence entre la température de l'air dans la couche entre le sommet de de l'ICU de la canopée et le sommet de la couche limite urbaine, et celle à des altitudes similaires dans la couche limite atmosphérique de la région rurale environnante (Oke, 2017). (Traduit de l'anglais)

ICU de surface : Différences de température à l'interface de l'atmosphère extérieure avec les matériaux solides de la ville et l'équivalent interface air-sol en milieu rural. Idéalement, ces interfaces (Oke, 2017). (Traduit de l'anglais)

ICU souterrain : Différences entre les modèles de température du sol sous la ville et ceux du sol rural environnant (Oke, 2017). (Traduit de l'anglais)

LISTE DES ABREVIATIONS

AURA : Agence d'urbanisme de la région Angevine

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

ICU : Îlot de chaleur urbain

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

INSEE : Institut National de la Statistique et des Études Économiques

OCGE : Occupation du sol à grande échelle

PMV : Predicted Mean Vote

PPD : Predicted Percent Dissatisfied

SVF : Sky view factor

Tg : Température de globe

Tmrt : Température moyenne radiante

UTCI : Universal Thermal Climate Index

LCZ : Local Climate Zones

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I : Descriptif des données statistiques, d'occupation du sol et des données météo	p58
ANNEXE II : Classifications OSGE	p60
ANNEXE III : Classification utilisée par T. Rodier	p62
ANNEXE IV : Classification E.Dougnet d'après les données combinées par T.Rodier	p64
ANNEXE V : Description de la modélisation empirique (Unger)	p67
ANNEXE VI : Localisation des stations	p69
ANNEXE VII : Artificialisation des sols de la commune de Beaucouzé	p70
ANNEXE VIII : Illustrations des stations	p71
ANNEXE IX : Descriptions des sites des stations URBIO	p74
ANNEXE X : Etude du confort thermique	p75
ANNEXE XI : Droite de régression du modèle d'Unger	p76
ANNEXE XII : L'intensité annuelle de l'ICU sur la commune d'Angers selon le modèle d'Unger corrigé	p77
ANNEXE XIII : Sensibilité de la population angevine et ses indicateurs de sensibilité	p78
ANNEXE XIV : Capacité à faire face de la population sensible	p83
ANNEXE XV : Evolution sur la journée du 25 juin 2021 (Tg, Tmrt et UTCI)	p84
ANNEXE XVI : Modification du Tmrt selon les scénarios de végétalisation	p86

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Terminologie utilisée (Source : E.Douguet).....	13
Figure 2: Températures de surface le 26/08/2016 sur la commune d'Angers (Source : E. Douguet)	25
Figure 3: Démarche du projet (Source : E. Douguet).....	26
Figure 4: Localisation des différents sites étudiés (Source : E. Douguet)	29
Figure 5 : Les trois sites illustrés (Source : E. Douguet et S. Herpin)	29
Figure 6: Spatialisation des points d'intérêts (Source : E. Douguet)	33
Figure 7: Evolution de la température durant les journées du 26 et 27 août 2016 (Source: E. Douguet)	35
Figure 8: Différences de températures entre les stations URBIO et la station Météo France Chevrollier par rapport à la station Météo France Beaucouzé (Source : E. Douguet).....	36
Figure 9: L'intensité annuelle de l'ICU sur la commune d'Angers selon le modèle d'Unger.....	37
Figure 10: L'intensité annuelle de l'ICU sur la commune d'Angers selon le modèle d'Unger corrigé (Source E. Douguet).....	38
Figure 11: Classement des différents sites selon la température de surface (Données de l'AURA)	39
Figure 12: Classement des différents sites selon la température d'air (Source : E. Douguet).....	39
Figure 13: Sites où la population est sensible à la chaleur pour la commune d'Angers et sa première couronne (Source : E. Douguet).....	40
Figure 14: Importance des zones minérales contraignant la capacité à faire face à la chaleur	41
Figure 15: Réponses illustrées des participants (Source : E. Douguet).....	42
Figure 16: Intervalles de confiance à 95% des différences de perception, de préférence et d'évaluation (Source : E. Douguet).....	43
Figure 17: Illustration des UTCI calculés grâce aux données météo – Lycée Chevrollier	45
Figure 18: UTCI calculé par SOLWEIG, illustré de manière spatiale (Source : E. Douguet).....	48
Figure 19: Modification de l'UTCI selon différents scénarios d'aménagement - Lycée Chevrollier (Source : E.Douguet).....	49
Figure 20: Sites à modifier en priorité afin de réduire les risques sanitaires face aux vagues de chaleur (Source : E.Douguet).....	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Table de correspondance (Source : E. Douguet).....	21
Tableau 2: Description n°1 des sites pour chaque station (Source : E. Douguet).....	24
Tableau 3: Intervalles de valeurs à respecter pour chaque indicateur (Unger, 2006)	27
Tableau 4 : Description des sites (Chevrollier) – (Source : E. Douguet).....	29
Tableau 5: Paramètres renseignés pour la station Heat Shield (Source : E. Douguet).....	30
Tableau 6: Station de référence utilisée pour chaque site à un instant t (Source : E. Douguet).....	30
Tableau 7: Différentes données météo en données d'entrée (Source : E. Douguet).....	31
Tableau 8: Différents DSM en données d'entrée (Source : E. Douguet).....	32
Tableau 9: Différents SVF en données d'entrée (Source : E. Douguet)	32
Tableau 10: Prise en compte ou non de l'occupation du sol dans les données d'entrée	32
Tableau 11: Différents points d'intérêts en données d'entrée (Source : E. Douguet)	33
Tableau 12: Combinaison des différentes données d'entrée utilisées (Source : E. Douguet)	34
Tableau 13: Description des différents scénarios (Source : E. Douguet).....	34
Tableau 14: Calibrage du modèle d'Unger d'après la régression linéaire entre les résultats d'Unger et la différence de température mesurée (Source : E. Douguet).....	38
Tableau 15: Pourcentage actuel de personnes insatisfaites et le vote actuel moyen pour chaque site (Source : E. Douguet).....	42
Tableau 16: Valeur de p pour l'analyse de la variance entre les différents sites selon la perception, la préférence et l'évaluation (Source : E. Douguet).....	43
Tableau 17: Probabilité d'une absence de différence entre les sites (Source : E. Douguet).....	43
Tableau 18: Confort thermique selon les données mesurées par les stations (Source : E. Douguet)	44
Tableau 19: UTCI calculés grâce aux données météo (Source : E. Douguet)	44
Tableau 20: Correction du PMV d'après la régression linéaire entre le PMV obtenu et la moyenne des participants (Source : E. Douguet).....	45
Tableau 21: Correction du PPD d'après la régression linéaire entre le PPD obtenu et le pourcentage actuel de personnes insatisfaites (Source : E. Douguet).....	46
Tableau 22: Température moyenne radiante calculé par SOLWEIG pour chaque cas (Source : E. Douguet).....	46
Tableau 23: UTCI calculé par SOLWEIG pour chaque cas (Source : E. Douguet)	46
Tableau 24: Correction du TMRT calculé par SOLWEIG d'après la régression linéaire entre le TMRT calculé par SOLWEIG et le TMRT mesuré depuis les données du terrain (Source E. Douguet).....	47
Tableau 25: Correction de l'UTCI calculé par SOLWEIG d'après la régression linéaire entre l'UTCI calculé par SOLWEIG et l'UTCI mesuré depuis les données du terrain (Source E. Douguet).....	48

AVANT-PROPOS

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre d'un stage au sein des unités de recherche BAGAP (Biodiversité, AGroécologie et Aménagement du Paysage) et EPHor (Environnement Physique de la plante Horticole à Agrocampus Ouest Angers (Institut Agro) et financé par l'entreprise Idverde.

Les activités de recherche à Agrocampus Ouest sont organisées dans 13 unités de recherche labellisées, dont BAGAP et EPHOR. L'Unité Mixte de Recherche BAGAP associe 3 établissements, Agrocampus Ouest, l'École supérieure d'agricultures d'Angers (ESA) et l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE). L'UMR BAGAP étudie les multiples fonctions des paysages et la prise en compte des fonctions écologiques au sein des paysages anthropisés, qu'ils soient agricoles, urbains ou forestiers. L'unité propre de recherche EPHor développe des questions de bio-physique (compétences en sciences du sol, bioclimatologie) notamment sur les notions de transfert dans l'environnement du végétal en milieu contraint. Les 2 équipes participent à des travaux de recherche sur les territoires urbains.

L'entreprise Idverde se présente comme le leader européen de la création et l'entretien des espaces verts. Elle possède à ce jour plus de 8 000 collaborateurs répartis en France, mais aussi à l'étranger (Pays Bas, Irlande, Allemagne...).

Plusieurs acteurs du territoire angevin ont été associés à ce travail : l'Agence d'Urbanisme de la Région Angevine (AURA) ainsi que les services en charge de la planification urbaine et des espaces verts d'Angers Loire Métropole.

DES VAGUES DE CHALEUR AUX CONSEQUENCES DRAMATIQUES

Le dérèglement climatique est un sujet d'actualité, aux conséquences directes telles que les canicules, les grands froids, les inondations, la montée des eaux mais aussi indirectes par le biais de l'insécurité alimentaire, la dégradation de la qualité de l'air, la recrudescence des maladies infectieuses, la raréfaction et la pollution des eaux (Albert Levy 2016; Besancenot 2015). Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) énonce dans son rapport de 2021, trois scénarios possibles pour l'évolution de la température annuelle moyenne sur la terre (IPCC 2021). Les plus optimistes et les moins probables sont un réchauffement, par rapport à la période pré-industrielle, de 1,5°C suivi du scénario de 2°C. Ces scénarios nécessiteraient une diminution stricte des émissions cumulées de CO₂, des autres gaz à effet de serre et des émissions de CH₄ (IPCC 2021). La trajectoire actuelle des émissions nous conduit au contraire à un réchauffement de 4°C (IPCC 2021). Les événements extrêmes vont se multiplier pour chaque scénario, avec une fréquence et une intensité plus ou moins dramatique (IPCC 2021). Les vagues de chaleur font partie de ces événements extrêmes. Nous pouvons déjà observer en France métropolitaine l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur [1]. Des seuils de température sont prédéfinis par Météo France et l'Institut de Veille Sanitaire pour chaque département (Alonso [sans date]). Lorsque ces seuils sont atteints durant 3 jours et 3 nuits consécutives le terme de canicule est utilisé (Déry 2018). A titre d'exemple, le seuil est de 19°C pour le département du Maine et Loire en termes de moyenne sur 3 jours des températures minimales et de 34°C pour les températures maximales. Ces épisodes de fortes chaleurs sont d'autant plus marqués dans les zones urbaines dans lesquelles se développent des îlots de chaleur urbains (ICU). Un ICU se définit comme la différence de température entre une zone urbaine et ses environs (Oke et al. 2017) et varie spatialement au sein même d'une ville. L'ICU peut être étudié à différentes échelles on parle alors de l'ICU de surface (surface urban heat island) basé sur les températures de surface, de l'ICU de la canopée (canopy layer urban heat island) basé sur les différences de températures d'air, de l'ICU de la couche limite (boundary layer urban heat island) et de l'ICU souterrain (subsurface urban heat island) (Oke et al. 2017). Seulement deux types d'ICU seront étudiés dans la suite de ce mémoire, l'ICU de la canopée et l'ICU de surface. Les ICU sont impactés par le contexte géographique, les conditions météorologiques mais également par la forme urbaine, le couvert naturel, les matériaux et la production de chaleur anthropique (Recurt 2020), due par exemple aux transports et à la climatisation. « La densité de population a aussi un effet, direct par la chaleur émise par les métabolismes et indirect par l'utilisation de l'énergie, le nombre de bâtiments et de voitures » (Lareau, Baudouin 2015).

Dans la suite de ce mémoire, nous allons nous intéresser à la désimperméabilisation des sols et l'augmentation de la végétation comme solution, pour diminuer l'intensité de l'ICU de la canopée et l'ICU de surface. De nombreuses villes lancent des études sur le sujet pour identifier les quartiers à modifier en priorité et proposer des solutions à court ou long terme. De nombreuses agences d'urbanisme et de paysage sont interpellées sur cette question. Le phénomène d'ICU pourrait être considéré comme un avantage en période hivernale (Tremeac et al. 2020) mais il a des conséquences dramatiques en période estivale. Les épisodes de forte chaleur entraînent une dégradation du confort thermique des habitants. La température de confort extérieur optimal pour le fonctionnement du corps humain se situe entre 20 et 27°C. Au-delà de ces températures, le corps humain adapte sa chaleur corporelle grâce à la transpiration. Cependant ce mécanisme naturel ne suffit pas dans le cas de températures élevées prolongées (Perrin 2020). Les principaux risques pour l'être humain sont alors le coup de chaleur, la déshydratation et l'aggravation des pathologies préexistantes [2]. Certaines personnes sont donc plus sensibles aux fortes chaleurs et n'ont pas les mêmes capacités à

faire face, c'est-à-dire un accès différent aux îlots de fraîcheur tels que les espaces végétalisés. C'est sur ce dernier point que nous allons effectuer des préconisations en nous demandant comment choisir les sites minéraux urbains à végétaliser en priorité, pour améliorer le confort thermique des habitants et réduire les risques sanitaires face aux vagues de chaleur. Dans ce document, nous nous intéresserons uniquement à la ville d'Angers située dans le Maine et Loire. Afin de répondre à la problématique nous nous questionnerons sur plusieurs points : Est-il possible de déterminer la population angevine la plus vulnérable aux vagues de chaleur ? Peut-on déterminer les sites, de la commune d'Angers, les plus soumis aux îlots de chaleur ? Que nous montre la simulation d'un scénario de scellement et de végétalisation sur des sites tests ? Différentes cartes seront produites à l'échelle de la ville afin de localiser les populations vulnérables et de spatialiser les îlots de chaleur, dans l'objectif de connaître les sites les plus exposés. En parallèle, nous étudierons le confort thermique et nous simulerons une démarche de végétalisation et de scellement sur un site test, à l'échelle d'un quartier. Nous débuterons par une étude des travaux existants sur le sujet puis nous détaillerons la stratégie utilisée. Les résultats à l'échelle de la ville et du site test seront ensuite présentés et analysés puis discutés.

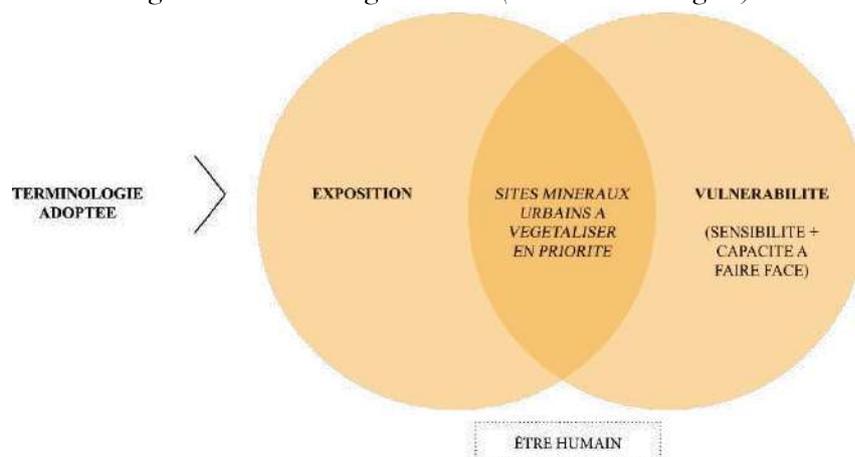
1. FAIRE FACE AUX VAGUES DE CHALEUR POUR AMELIORER LE CONFORT THERMIQUE DES HABITANTS ET REDUIRE LES RISQUES SANITAIRES

Pour commencer, nous allons préciser certaines thématiques déjà énoncées et prendre connaissance des différentes recherches effectuées sur le sujet. L'augmentation de la température due au changement climatique est déjà observable depuis la fin des années 80 sur notre territoire, la région autour d'Angers ne faisant pas exception (Bonnefoy et al. 2010). Les îlots de chaleur sont à l'origine d'une augmentation des températures en milieu urbain, parfois jusqu'à 11°C de plus qu'en milieu rural. Ils sont favorisés par différents facteurs comme la forte minéralisation des villes entraînant l'absorption de la chaleur par les matériaux possédant un faible albédo. Ces matériaux étant souvent imperméables, l'évapotranspiration est minime et ne permet pas de rafraîchir l'air ambiant (Bernard 2017). La géométrie urbaine est marquée par un indicateur nommé « facteur vue du ciel » ou plus connu sous le nom de « sky view factor » en anglais. C'est le « rapport de la surface de ciel visible depuis une surface plane par rapport à la surface totale du ciel » (Patriarche 2017). Le facteur vu du ciel étant souvent faible en ville, la chaleur a des difficultés à s'évacuer la nuit des villes (Perrin 2020) par rayonnement grandes longueurs d'ondes. La densification des habitats, actuellement favorisée, limite l'étalement urbain et l'artificialisation des sols (Fosse 2019) et apporte une réponse à la forte demande immobilière mais accentue par ailleurs cette notion de piégeage radiatif. De plus, les flux de chaleur anthropogéniques aggravent le phénomène d'îlot de chaleur. Les activités humaines auxquelles nous faisons ici référence sont les transports, les industries et la climatisation. La production de froid pour les espaces intérieurs nécessite d'importantes ressources énergétiques et rejette de la chaleur à l'extérieur du bâtiment (Perrin 2020). La stagnation de la chaleur dans les villes est à l'origine de la création d'un brouillard persistant appelé smog. Ce dernier se forme par réaction à la chaleur (notamment quand la température dépasse les 30°C), aux rayonnements et aux nombreux polluants présents en ville (Perrin 2020). Le risque sanitaire est donc important qu'il soit directement lié à la chaleur ou aux effets produits par cette dernière.

1.1. ABSENCE DE CONSENSUS POUR DES NOTIONS COMPLEXES

Les termes de « vulnérabilité », « risque », « sensibilité » et « exposition » sont définis différemment selon la communauté de chercheur. Ainsi, la communauté scientifique liée au changement climatique n'utilise pas les mêmes définitions que la communauté scientifique liée à l'étude des risques naturels (ADEME 2013). La communauté scientifique liée au changement climatique identifie la vulnérabilité comme dépendant « de la nature, de l'ampleur et du rythme de la variation du climat (alias l'exposition) à laquelle le système considéré est exposé et de la sensibilité de ce système à cette variation du climat. » (ADEME 2013). Le système étant « la population, les réseaux et équipements permettant les services essentiels, le patrimoine, le milieu écologique ... » (ADEME 2013). En parallèle, la communauté liée à l'étude des risques naturels considère la vulnérabilité comme « une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux qui prédisposent les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages » (ADEME 2013). Dans la suite de cette étude nous ferons un croisement entre ses deux terminologies. Nous considérerons la vulnérabilité comme la prédisposition des individus à subir des dommages englobant la notion de sensibilité et de capacité à faire face. Nous qualifierons la sensibilité comme le degré auquel l'espèce humaine est influencée négativement par les fortes températures. Nous considérons alors la capacité à faire face comme l'« Habileté des personnes, des institutions, des organisations et du système utilisant les outils disponibles, les valeurs, les croyances et opportunités pour corriger, gérer et surmonter les conditions négatives dans une période de court à moyen terme » (AR5 Synthesis Report, 2014). Comme expliqué par Jean-Simon Déry, nous ne prendrons pas en compte la notion de capacité d'adaptation car la période de temps durant laquelle les gens vont s'adapter est beaucoup plus longue que pour la capacité à faire face qui illustre une situation à un instant t (Déry, Jean-Simon 2018). La capacité d'adaptation étant l'« habileté des systèmes, des institutions, des humains et des autres organismes à s'ajuster aux dommages potentiels, de prendre avantage des opportunités ou de répondre aux conséquences » (AR5 Synthesis Report, 2014). Par ailleurs l'analyse de la notion d'exposition sera considérée comme l'évaluation des variations de températures liées aux îlots de chaleur, au sein d'une ville. La Figure 1 témoigne de la terminologie utilisée. Au vu de ce choix de terminologie, nous allons étudier comment la vulnérabilité et l'exposition sont mesurées ou cartographiées dans les autres études.

Figure 1: Terminologie utilisée (Source : E.Douguet)



1.2. ANALYSE DE LA NOTION D'EXPOSITION AUX ILOTS DE CHALEUR URBAINS

Plusieurs échelles peuvent être étudiées, mais nous nous intéressons ici à l'échelle micro-climatique (topographie de petites échelles). L'objectif est de quantifier différents paramètres pouvant être la cause ou le résultat de l'îlot de chaleur urbain. Les mesures de température de surface et d'air appartiennent à la phase de diagnostic (résultats de l'ICU). Les mesures d'air peuvent être fixes, mobiles ou suivant un suivi de flux. Les mesures mobiles peuvent se réaliser à vélo, à pied ou en voiture, elles couvrent une surface plus importante que les mesures fixes mais sont ponctuelles dans le temps (quelques journées d'expérimentations) et asynchrones. Des calculs doivent également être réalisés vis-à-vis de la vitesse et du pot d'échappement, si présence il y a. L'approche par suivi de flux d'air est moins courante et peut se réaliser grâce à un ballon suivant le flux d'air à un niveau de densité constant (Oke et al. 2017). Les données sont ici aussi, mesurées de manière ponctuelle et asynchrone. Par ailleurs, les mesures par réseau fixe permet un suivi temporel long-terme et synchrone de la température d'air au sein de la ville, mais le nombre de stations donc d'information spatiale est limitée. Les mesures de surface quant à elle, se font par imagerie satellitaire (Alonso [sans date]; Sy 2020) ou caméra thermique. L'utilisation des données de température de surface est souvent utilisée pour identifier des zones dites « plus chaudes ». Cependant la température de surface reste une donnée différente de la température d'air, qui est directement en lien avec le confort thermique. Néanmoins, d'après L'EPA une relation existe entre la température de surface de jour et la température de l'air de nuit, mais aussi avec la température intérieure des bâtiments (Lareau, Baudouin 2015). L'utilisation de la télédétection a pour avantage d'obtenir une cartographie complète des températures de surface réelles pour les zones étudiées, ce qui n'est pas le cas pour les mesures de température d'air. La carte obtenue est néanmoins représentative que d'une seule journée et d'un seul horaire dépendant notamment du créneau de passage du satellite. De plus, la résolution spatiale est limitée. Par exemple, la résolution des bandes thermiques du satellite Landsat 8 est de 60m [3].

Afin d'obtenir une cartographie spatialement continue sur un territoire donné des températures d'air, plusieurs méthodes de classification ou de modélisation sont utilisées (Bernard 2017). Ces méthodes dépendent fortement de l'étendue spatiale du territoire étudié, et de la résolution spatiale et temporelle attendue, et pour les modèles du caractère déterministe ou empirique de la méthode utilisée. La méthode par classification géoclimatique consiste à diviser le territoire en zones climatiques homogènes en lien avec les caractéristiques géo-morphologiques (ADEME 2017). Cette approche permet une analyse qualitative des différentes zones de la ville, mais ne permet pas de quantifier les écarts de température d'air. Stewart et Oke utilisent cette méthode et proposent d'utiliser les zones climatiques locales, nommé en anglais Local Climate Zones (LCZ) (Stewart 2011; Stewart, Oke 2012). Les LCZ composées des zones climatiques urbaines et rurales sont définies comme des régions de couverture de surface, de structure, de matériaux et d'activité humaine uniformes qui s'étendent sur des centaines de mètres voire des kilomètres (Stewart, Oke 2012). Par ailleurs, il existe les méthodes empiriques de régression géoclimatique, dans laquelle des variables explicatives sont identifiées. Une équation reliant les écarts de température mesurés sur une ville de référence à ces variables est établie en ajustant leurs coefficients (étape de calibration). Une étape de validation du modèle peut ensuite être conduite à l'aide de mesures réalisées sur d'autres villes. Une fois validés, ces modèles peuvent être utilisés pour d'autres villes, sans nouvelle campagne de mesure (Bernard 2017). Le modèle empirique d'UNGER en est un exemple, il n'a pas de fondements physiques, son équation est directement liée à l'occupation du sol et à la compacité des bâtiments (Unger 2006). Le modèle empirique de Balázs suit aussi la même méthode de

régression géoclimatique. Le modèle calcule la différence de température entre un site urbain et rural selon un ratio de surface couverte artificiellement (rues, chaussées, parkings, toits) et prend en compte ses extensions surfaciques (Balázs et al. 2009). De son côté Jérémy Bernard utilise un ensemble de modèles associant une approche temporelle et spatiale, afin d'analyser les îlots de chaleur urbains. Il utilise entre autres un modèle spatial des écarts de température moyens dépendant de l'indice de végétation par différences normalisées (NDVI) et de la densité de surface en eau (Bernard 2017). Certaines de ces méthodes nécessitent des données d'occupation du sol. Les données du type imperméable/perméable à l'eau ne sont pas encore très utilisées car ce sont des données qui sont difficiles à obtenir. En effet, certains matériaux sont de type minéral mais peuvent être perméables. C'est pourquoi nous parlerons, par la suite, de « sites minéraux » au lieu de parler de « sites imperméables ». La quatrième approche est la modélisation déterministe, basée sur des lois physiques. Le projet ANR VEGDUD (Musy et al. 2014) a notamment permis d'améliorer et de comparer plusieurs modèles déterministes du climat urbain, notamment sur la prise en compte du végétal dans ces modèles. A l'échelle de la ville, on peut citer notamment le modèle TEB-Surfex (Town Energie Balance) développé par Météo France (Masson 2000), et qui résout le bilan d'énergie sur un canyon urbain, avec une résolution spatiale allant de 200m à 1km. Ce modèle a notamment été utilisé pour des études sur les villes de Paris (de Munck et al. 2018), ou Nantes (Chancibault et al. 2015). A échelle spatiale plus fine (de l'aménagement au quartier), des modèles déterministes résolvent les équations de transport de masse et quantité de mouvement (approche de type CFD : computational Fluid Dynamics) ou des transferts radiatifs (modèles Solene (Hénon et al. 2012) ou SOLWEIG (Lindberg, Holmer, Thorsson 2008). Ces modèles déterministes sont plus complexes à mettre en œuvre que les modèles empiriques, et peuvent nécessiter des temps de calcul conséquents.

1.3. ANALYSE DE LA NOTION DE CONFORT THERMIQUE

Nous allons maintenant observer comment la vulnérabilité est habituellement cartographiée. Cependant, afin de bien comprendre l'enjeu pour les populations, nous allons au préalable définir le confort thermique et décrire les réactions de l'homme à la chaleur. Comme énoncé précédemment, la température de confort de l'air extérieur pour un être humain est comprise entre 20 et 27°C. Lorsque la température n'est pas comprise dans cet intervalle, le corps humain doit s'adapter pour maintenir sa température interne à 37°C (Perrin 2020), grâce notamment aux mécanismes de thermorégulation (vasoconstriction, vasodilatation, sudation). Le bilan thermique d'un être humain est plus complexe que la prise en compte de la seule température extérieure. En effet, le bilan thermique dépend de la production de chaleur du corps humain, du travail utile, de la chaleur stockée et des échanges thermiques par convection, rayonnement, évaporation en lien avec la peau et la respiration (Havenith 2005). Un bilan thermique global équilibré est synonyme de confort que l'on pourrait qualifier de confort théorique et non de confort thermique. Les indices de confort thermique sont basés sur le bilan thermique global du corps humain ou sur la modélisation des réactions physiologiques en réponse à l'environnement climatique (Grosdemouge 2020). Néanmoins, le confort thermique étant la « prévision de la sensation thermique générale et du degré d'inconfort (insatisfaction thermique) général des personnes exposées à des ambiances thermiques modérées » est plus subjectif [4] . Le facteur psychologique est donc un exemple de paramètre influençant la notion de confort thermique pour chaque individu. Leurs attentes face à la température sont différentes selon leurs expériences et la situation (Grosdemouge 2020). Ainsi, un bilan thermique neutre d'un individu ne signifie pas que ce dernier se sentira en confort thermique, notamment si

ses mécanismes de régulation (sudation par exemple) sont trop sollicités, ou bien en lien avec les facteurs psychologiques évoqués.

Il existe différents indices de confort thermique dont certains sont plus adaptés aux espaces intérieurs ou extérieurs. Nous pouvons citer l'indice PMV (Predicted Mean Vote), la température effective, la température standard équivalente, la température standard effective extérieure, la PET (Physiological Equivalent Temperature) et l'UTCI (Universal Thermal Climate Index) (Grosdemouge 2020). Nous nous intéresserons ici au PMV au PPD (Predicted Percent Dissatisfied) et à l'UTCI). Le PMV est « basé sur l'équation d'équilibre thermique de Fanger » et est « recommandé dans les normes (ISO 7730, 2005) et (ASHRAE, 2001) » pour connaître « la perception moyenne d'un groupe de personnes avec des facteurs individuels uniformes (habillement et métabolisme) dans un univers thermique défini (...) » (Grosdemouge 2020). L'indice PMV a été amélioré au fil des années pour être utilisé en extérieur et non uniquement en intérieur comme c'était le cas lors de sa construction (Grosdemouge 2020). Le PMV est désormais calculé depuis des données météorologiques et des données liées à l'individu (isolation de l'habillement, activité physique, efficacité musculaire). Malgré tout le PMV surestime la perception thermique des individus (Grosdemouge 2020). De son côté le PPD, comme son nom l'indique, témoigne du pourcentage d'individus insatisfaits par leur ressenti thermique. L'UTCI (Bröde et al. 2012) quant à lui, a été créé en tant qu'indice universel extérieur, il est basé sur un modèle physiologique du corps humain (Fiala et al. 2011). Il prend en compte les facteurs climatiques comme la vitesse du vent à 10m et la température moyenne radiante (T_{mrt}). La température moyenne radiante permet de « représenter les échanges radiatifs complexes entre un individu et son environnement en un seul indice qui a la dimension d'une température. » (Grosdemouge [sans date]). C'est une notion essentielle dans l'étude du confort thermique en milieu extérieur. Elle peut être mesurée à l'aide de capteurs météorologiques (globe noir, pyradiomètres ou bien modélisée à partir d'une résolution des transferts radiatifs) (Kántor, Unger 2011). Le processeur SOLWEIG d'UMEP permet ainsi de modéliser la température moyenne radiante et d'en déduire l'UTCI. Des données comme les données météo, les données d'occupation du sol et la place des arbres (hauteur, largeur, type) sont renseignées afin de faire fonctionner le modèle (Lindberg, Holmer, Thorsson 2008).

1.4. ANALYSE DE LA NOTION DE SENSIBILITE

Dans le cas de stress thermique important, la santé humaine est altérée. Les risques les plus importants sont alors la déshydratation et le coup de chaleur. Les pathologies préexistantes sont également révélées ou aggravées par la chaleur [2]. Certaines personnes sont plus sensibles que d'autres à la chaleur. Au vu de l'augmentation des températures, la situation sanitaire s'aggrave. La canicule 2003 a fait 70 000 morts en Europe dont 15 000 en France. Dans moins de 20 ans, un été aussi chaud que celui de 2003 sera considéré comme courant (Albert Levy 2016). Définir les personnes les plus sensibles est un sujet vaste et complexe. Plusieurs études se sont intéressées à ce sujet. Notamment, Jean Déry qui a analysé géographiquement la vulnérabilité de la population québécoise (Déry, Jean-Simon 2018). Il a recensé 13 indicateurs de sensibilité. Il cite néanmoins les personnes de 4ans et moins et de plus de 65ans comme étant les plus sensibles (Déry, Jean-Simon 2018). Plusieurs études épidémiologiques ont relevé que les personnes âgées ressortent comme les populations sensibles (Hémon et al. 2003; Lareau, Baudouin 2015). Lareau et Baudouin aussi cite les personnes âgées de 65 ans et plus comme les personnes les plus sensibles et ajoute que les personnes âgées vivant seules sont d'autant plus sensibles (Lareau, Baudouin 2015). Un autre indicateur de sensibilité selon Jean Déry est la proportion de logements construits avant 1980 aux aspects physiques et structurels spécifiques (Déry, Jean-Simon 2018). Cette donnée est notamment

disponible pour le territoire français grâce aux données carroyées de l'INSEE. En somme, les indicateurs de sensibilité sont liés, d'après Albert Levy à « la sensibilité de l'organisme (âge, maladies chroniques), la situation d'exposition (lieu de travail, habitat, précarité, activité extérieure), les relations sociales (voisinage, isolement), les habitudes de vie (conditions physique, consommation, addiction) » (Albert Levy 2016).

1.5. ANALYSE DE LA NOTION DE CAPACITE A FAIRE FACE ET DES SOLUTIONS ENVISAGEABLES

Comme énoncé au début de cette partie, les personnes sont d'autant plus soumises au risque lorsqu'elles habitent en ville (activités humaines, densité urbaine...). Les individus ne sont pas soumis à la même capacité à faire face. Les citadins ont certes un accès aux soins souvent meilleur (Albert Levy 2016) mais les îlots de fraîcheur tel que les forêts, les fleuves, les lacs sont peu nombreux voir absents. En moyenne, les villes françaises ont 31m² d'espace vert par habitant. Certaines villes comme Angers comptent 51m² d'espace vert par habitant (Albert Levy 2016). Encore faut-il que ces espaces soient accessibles au public et à moins de 10 minutes de marche. Des solutions existent donc, qu'elles soient individuelles (choix des vêtements, hydratation, fermeture des volets en journée, aération la nuit, adaptation de son alimentation, limitation de son activité physique... [2] ou à la démarche des aménageurs du territoire (agence d'urbanisme, de paysage d'architecture...) et des politiques. Ces derniers ont la possibilité de diminuer l'intensité des îlots de chaleur et d'améliorer la capacité à faire face de la population grâce à différentes solutions dans le secteur du transport, de l'énergie et de l'aménagement du territoire. Comme énoncé précédemment, la dé-densification des villes est un processus compliqué à suivre au vu de la valeur du foncier parfois important et de la limitation de l'artificialisation des sols. La manière de construire et de modifier l'existant doit être adapté en fonction du climat actuel et futur. Ainsi l'orientation par rapport aux vents dominants, aux rayonnements, la circulation de l'air et les matériaux doivent être réfléchis (Oke et al. 2017). Dans le cas des matériaux, la perméabilité, la couleur et l'entretien peuvent et doivent être pris en compte si la situation le permet. Il existe actuellement des revêtements de toiture clair au fort albédo conçu pour lutter contre le rayonnement [5] . Actuellement plusieurs revêtement perméables sont utilisés et expérimentés, comme les mélanges organo-minéraux et couverts enherbés, les revêtements meubles organiques, les revêtements meubles minéraux, les pavés drainants ou à joints poreux, les dalles alvéolées, les platelages bois, les bétons de résine drainants, les bétons drainants et les enrobés poreux (Plante&Cité 2021). Développer les mobilités douces et alternatives permet de diminuer la chaleur dégagée par les moteurs et les polluants émis. Par ailleurs, aménager l'espace de manière à favoriser la circulation de l'air permet de dissiper les polluants atmosphériques et la brise thermique (Oke et al., 2017). Des parcours fraîcheurs sont actuellement mis en place dans plusieurs villes comme Paris, Lille, Strasbourg, Nancy avec l'ouverture au public d'îlots habituellement inaccessibles (Perrin 2020). Ainsi, les horaires d'ouvertures des lieux frais comme les parcs parisiens sont allongés [6] .

Les trames vertes et bleues sont des outils majeurs dans la lutte contre la chaleur. L'eau, que l'on peut retrouver par exemple dans les noues, est en effet un élément efficace pour lutter contre les ICU. Par ailleurs, une bonne gestion des eaux pluviales permet de diminuer le coefficient de ruissellement bénéfique du point de vue de la pollution des sols et des inondations (Oke et al. 2017). La trame verte est la solution à laquelle nous allons nous intéresser. La végétation est reconnue pour améliorer la qualité de l'air, réduire le stress, augmenter l'activité physique, et réduire la chaleur (Beaudoin 2016). La végétation est d'ailleurs utilisée sous différentes formes selon les qualités recherchées. Dans le cadre de la diminution des températures d'air, les toitures végétalisées « ont

un effet énergétique faible pour les bâtiments bien isolés, mais jouent sur le confort thermique du dernier étage. Elles sont intéressantes pour des toitures basses entourées d'autres bâtiments plus haut » (Perrin 2020). Un toit exposé au soleil peut atteindre « une t de 80°C si sa couleur est foncée », de « 45°C si sa couleur est blanche » et de « 29°C si le toit est recouvert de végétaux » (Perrin 2020). De plus elles permettent, de manière limitée, le ruissellement (Kuoppamäki et al. 2016). Les murs végétaux quant à eux sont bénéfiques pour le confort thermique intérieur mais aussi extérieur grâce à l'évapotranspiration (Perrin 2020). La conception est néanmoins très importante pour assurer le bon fonctionnement du mur et minimiser au maximum l'arrosage. La végétation de type strate basse est bénéfique pour diminuer la chaleur mais la végétation de type strate haute est d'autant plus bénéfique qu'elle apporte de l'ombrage. Un arbre à haute tige peut-être à l'origine d'une diminution de 9°C d'UTCI à proximité immédiate (ADEME 2017). Des arbres d'alignement en confort hydrique dans une rue canyon orienté Nord-Sud permet la diminution de 8°C UTCI à la mi-journée (Mballo et al., 2021). Une forêt de moins de 2000m² peut permettre de diminuer l'UTCI de l'espace vert de 12°C et rafraichir à 20m aux alentours du parc (Perrin 2020). Un arbre réfléchi 30% du rayonnement solaire, en absorbe 50% et en transmet 20% sous sa canopée (APUR 2012). En plus de créer de l'ombrage, l'arbre rafraichit l'air grâce à l'évapotranspiration. L'infiltration de l'eau au pied de l'arbre a son importance. En effet, de nombreux arbres en ville sont implantés sur un sol scellé. L'eau ne s'infiltré pas et ruisselle. De plus « un arbre qui croît dans un sol tassé et recouvert peut avoir deux fois moins de feuilles et évaporer quatre fois moins. S'il occupe un espace restreint dans le sol, l'arbre n'atteindra pas sa taille maximale et sa durée de vie en sera écourtée » (Perrin 2020). Le choix des arbres nécessite une certaine réflexion comme en témoigne le programme SESAME (CHRETIEN et al. 2019). En effet, la capacité d'ombrage de chaque arbre est propre à chacun (forme, taille des feuilles, densité du feuillage...). L'arbre doit également résister au climat futur prévisionnel : augmentation de la température, fortes pluies, importants gels et nouveaux insectes (IPCC 2014). Certains arbres endommagent les routes par leurs racines et d'autres ont un potentiel allergisant important. D'autres au contraire ont un intérêt particulier pour la biodiversité, le stockage du carbone et contre la pollution atmosphérique (Perrin 2020). Ces facteurs sont aussi à prendre en compte. Aucune essence d'arbre possède tous les avantages, cela permet une plus grande diversité et donc une meilleure résilience aux intempéries, aux ravageurs... Les arbres reconnus comme bon régulateur du climat local sont : l'*Abies concolor* (Sapin du colorado), l'*Acer pseudoplasanus* (érable sycomore), l'*Aesculus hypocastanum* (Marronnier d'Inde) (CHRETIEN et al. 2019). L'étude a été notamment faite au vu de la persistance des feuilles, de leurs formes, de leurs rugosités et de la forme de l'arbre. L'organisation des arbres, la densité de plantation sur un espace est également importante afin de ne pas empêcher le vent de circuler (Perrin 2020).

1.6. CHOIX DE LA METHODE

Après avoir énoncé différentes études concernant l'analyse de l'exposition, de la sensibilité et de la capacité à faire face nous pouvons réfléchir à comment faire l'analyse croisée de ces notions. Il existe peu de recherche à ce sujet. Néanmoins, Lareau et Baudouin ont proposé « une méthodologie simple et reproductible, permettant de cartographier la distribution de la vulnérabilité thermique dans l'agglomération urbaine de Montréal » (Lareau, Baudouin 2015). Ils ont regroupé les trois facteurs pour leur étude, soit l'exposition, la sensibilité des populations et leur capacité d'adaptation. Ils ont identifié les ICU grâce à la télédétection, puis ils ont observé la proportion de personnes de plus de 65ans vivant seules ainsi que la défavorisation matérielle et sociale des habitants. L'utilisation de la température de surface est critiquable comme énoncé précédemment. Au vu de

leur étude, nous avons choisi d'analyser pour une ville française, l'ensemble de ces trois notions (exposition, sensibilité des populations et capacité d'adaptation) en privilégiant l'analyse des températures d'air, associée à la notion d'exposition. Les méthodes applicables à l'échelle d'un site ne sont pas toujours transposables d'un point de vue technique et de temps à l'échelle de la ville. C'est pourquoi il nous a semblé intéressant d'étudier le confort thermique en utilisant le modèle déterministe SOLWEIG nécessitant des relevés sur terrain et des temps de calcul conséquents, mais aussi en questionnant un groupe de participants (approche qualitative) et en réalisant une campagne de mesures climatiques. Au vu de la méthode choisie le partenariat avec les unités EPHOR et BAGAP est cohérent. En effet, ces unités sont impliquées dans des projets aux thématiques similaires. Par exemple, l'unité EPHOR est partenaire du projet DESSERT (2020 – 2023). Ce projet cherche à évaluer l'efficacité de la désimperméabilisation en termes de renaturation des villes [7]. En parallèle, l'unité BAGAP a été partenaire du projet URBIO (2013 – 2017) qui avait pour objectif de prendre en compte la biodiversité dans les aires urbaines notamment par le diagnostic d'îlots de chaleur urbain (Daniel et al. 2017). Certaines données du projet URBIO ont été remobilisées dans cette étude.

2. OUTILS UTILISES POUR DETERMINER LES SITES MINERAUX URBAINS A VEGETALISER EN PRIORITE

Afin de choisir les sites minéraux urbains à végétaliser en priorité deux notions ont été étudiées en parallèle : la notion d'exposition et la notion de vulnérabilité aux vagues de chaleur en milieu urbain. Dans ce chapitre nous étudierons plus en détail le cadre spatio-temporel utilisé puis nous décrirons les données nécessaires à l'étude et nous terminerons avec une explication de la démarche scientifique adoptée.

2.1. CADRE SPATIO-TEMPOREL DE L'ETUDE : ANGERS ET SA PREMIERE COURONNE ; PRECISIONS SUR UN QUARTIER ANGEVIN

2.1.1. Le climat angevin

La ville d'Angers est située à la limite entre le massif armoricain et le bassin parisien. La ville bénéficie d'un climat océanique altéré avec des écarts de températures entre l'été et l'hiver plus importants que dans un contexte de climat océanique [8]. La station Météo-France de référence pour Angers se situe à Beaucouzé, et les statistiques sur la période de référence 1981-2010 indiquent que le climat angevin se caractérise par de faibles périodes de gel et une pluviométrie moyenne annuelle de 693mm. En période estivale, les températures moyennes maximales et minimales journalières sont respectivement de 25.3° et de 14.2 °C en juillet et de 25.4°C et 14.1°C en août [9]. Des records de température ont été mesurés le 23 juillet 2019 avec 40,7°C battant les 39,8°C du 28 juillet 1947 [10].

2.1.2. L'occupation du sol de la commune d'Angers et ses environs

Angers s'est développée sur les berges de la Maine. Cette rivière se forme au confluent de la Sarthe et de la Mayenne et se jette dans la Loire. L'importance du nombre de zones inondables est à l'origine de plusieurs espaces verts au sein même de la ville. Cette dernière comptait en 2016, 51m² d'espace vert par habitant (Albert Levy 2016). La commune d'Angers d'une superficie de 42,7km² en 2018 [11] regroupe différentes typologies de forme urbaine : centre historique, faubourg du 19ème siècle, grands ensembles, zones pavillonnaires, zones d'activités économiques et commerciales. Angers et sa première couronne comptent notamment 52% de bâtiments construits entre 1945 et 1989 [12]. Par ailleurs, les terres agricoles du Maine et Loire ont diminué de 12 000ha

au profit notamment de l'artificialisation des sols (7000ha) entre 2006 et 2012 [13] . C'est dans ce contexte d'artificialisation des sols et de développement des communes voisines que nous nous intéressons aussi à la première couronne de la commune d'Angers. Nous prenons donc en compte les données d'Avrillé, de Cantenay-Épinard, d'Écouflant, de Verrières-en-Anjou, de Saint-Barthélemy-d'Anjou, de Trélazé, des Ponts-de-Cé, de Sainte-Gemmes-sur-Loire, de Bouchemaine et de Beaucouzé.

2.1.3. Population de la commune d'Angers et ses environs

Préfecture du département de Maine et Loire, Angers est la 2^{ème} plus grande ville en nombre d'habitants de la région Pays de La Loire (Insee Dossier Pays de la Loire 2017). En 2018, Angers comptait 154 508 habitants avec 3 617,6 habitants par km² [11]. A l'échelle d'Angers et de sa première couronne, la densité de population était de 2 061 individus par km² avec 206 555 habitants dont 19% de personnes âgées et 19% de personnes seules [12].

2.1.4. Expérimentations menées sur le lycée Chevrollier

A l'échelle du site, nous allons nous intéresser au Lycée Chevrollier situé au nord du quartier de La Roseraie et au sud du centre-ville d'Angers. Ce quartier est le deuxième quartier d'Angers possédant le plus d'habitants. On y retrouve principalement, de nombreuses barres d'immeubles et des lotissements [14] .

2.1.5. Période étudiée

Deux périodes ont été étudiées selon les dates des données disponibles. A l'échelle de la commune d'Angers et de sa première couronne c'est l'année 2016 qui est analysée. A l'échelle du site (avec une description spatiale plus fine) c'est l'année 2021 qui est étudiée. Dans les deux cas, la période estivale a fait l'objet d'une attention particulière.

2.2. OBTENTION DES DONNEES

Dans le cadre de l'étude, trois types de données étaient nécessaires, des données d'occupation du sol, des données météorologiques et des données démographiques et sociales. Les données ont été extraites de différentes bases de données existantes ou sont issues de données expérimentales produites dans le cadre de ce stage (Station Heat Shield, AOC). L'ANNEXE I présente un descriptif synthétique des données utilisées.

2.2.1. Données démographiques et sociales : données carroyées de l'INSEE

L'ensemble des données statistiques décrivant la population et les logements de la zone d'étude sont issues des données carroyées de l'INSEE de 2015. Grâce à cette base de données nous avons pu prendre connaissance selon un carroyage de 200m par 200m, du nombre d'habitants et donc de la densité, du nombre de personnes de plus de 65ans, du nombre de ménages isolés et du nombre de bâtiments construits entre 1945 et 1989. Néanmoins l'INSEE ne fournit pas le nombre de personnes de plus de 65ans qui sont isolées et ne renseigne pas des informations sur la santé des habitants. De plus, nous pouvons noter que l'INSEE ne diffuse pas les informations statistiques pour un nombre de ménages fiscaux inférieur à 11 ménages, par respect de confidentialité [12].

2.2.2. Données d'occupation du sol

Deux bases de données d'occupation du sol ont été utilisées : la base de données d'Occupation du Sol Grande Echelle (OCSGE) produite par l'IGN et une base de données appelée par la suite « base de Thomas Rodier » résultant de la fusion de bases de données existantes (la BD Topo, le registre parcellaire graphique (RPG) et l'indice de végétation (NDVI)). Par ailleurs, la BDTopo de l'IGN a permis d'avoir accès à la localisation des bâtiments ainsi qu'à leur hauteur.

2.2.2.1. Données d'occupation du sol grande échelle de l'IGN

La base de données OCSGE (2018) produite par l'IGN-F (à partir de données existantes extraites des bases de données de l'IGN, et de toutes autres données mobilisables issues de référentiels nationaux ou locaux) est souvent utilisée dans les études sur l'ICU, lorsqu'elle existe. L'étude de l'AURA (Agence d'urbanisme d'Angers) illustre ce propos (AURA 2020). La typologie utilisée permet de distinguer couverture et usage du sol (ANNEXE II). C'est la seule base de données produite par l'IGN permettant d'avoir une couverture continue ; cependant elle ne permet pas de distinguer les bâtiments individuellement (ils sont regroupés entre eux dans les zones denses) ni les zones de végétation herbacée (seule la végétation arborée y est cartographiée).

2.2.2.2. Occupation du sol détaillée de la « base de Thomas Rodier »

Durant son stage en 2020, au sein de l'UMR BAGAP, sous l'encadrement de Véronique Beaujouan et Hervé Daniel, Thomas Rodier a produit une carte d'occupation du sol pour tout le territoire Angers-Loire-Métropole suivant la méthode développée dans le programme URBIO. Comme pour la base OCSGE, des bases de données existantes ont été fusionnées BD TOPO 3-0 et RPG de 2018 puis enrichies par la création de polygones de végétation herbacée estimée par le calcul d'indice de végétation (NDVI) à partir d'images aériennes et satellitaires (Orthos IRC 2016 et SPOT6-7 de l'IGN) (Rodier 2020). La typologie utilisée pour la base de données créée est disponible ANNEXE III. Néanmoins, si cette carte différencie bien les surfaces non-végétalisées/ les surfaces végétalisées ligneuses/les surfaces végétalisées herbacées/ les surfaces d'eau, elle ne différencie pas complètement, au sein des surfaces non-végétalisées, les zones perméables (sol nu par exemple) des zones imperméables (revêtement scellé). De plus cette classification ne prend pas en compte la végétation isolée. La typologie utilisée a été analysée afin de définir les paramètres nécessaires aux différentes modélisations mises en œuvre dans ce mémoire : la table de correspondance présentée dans le Tableau 1 présente les choix retenus. La catégorie IP (niveau A) propose une classification des zones entre perméable et imperméable. La catégorie IP MVE (Niveau B) dissocie les zones végétales, des zones eaux et des zones minérales. La catégorie IP précision (Niveau C) est plus détaillée et différencie les zones bâties, des réseaux de transport, des ligneux, des zones herbacées et de l'eau.

Tableau 1: Table de correspondance (Source : E. Douguet)

CODE	Rodier	Niveau A : IP	Niveau B : IP MVE	Niveau C : IP précision
1.1.1.	bati agricole	impermeable	mineral	bati
1.1.2.	bati commercial	impermeable	mineral	bati
1.1.3.	bati résidentiel	impermeable	mineral	bati
1.1.4.	autre bati	impermeable	mineral	bati
1.2.1.	réseau routier	impermeable	mineral	reseau transport
1.2.2.	réseau ferré	impermeable	mineral	reseau transport
1.2.3.	réseau aérien	impermeable	mineral	reseau transport
1.3.0.	autre	non defini	mineral	autre
2.1.1.	forêt ferme de conifères	permeable	vegetal	ligneux
2.1.2.	forêt ferme de feuillus	permeable	vegetal	ligneux
2.1.3.	forêt mixte	permeable	vegetal	ligneux
2.2.1.	peupleraie	permeable	vegetal	ligneux
2.2.2.	verger	permeable	vegetal	ligneux
2.2.3.	vigne	permeable	vegetal	ligneux
2.3.1.	bois	permeable	vegetal	ligneux
2.3.2.	haie	permeable	vegetal	ligneux
2.3.3.	lande ligneuse	permeable	vegetal	ligneux
3.1.1.	culture	permeable	vegetal	herbace
3.1.2.	prairie temporaire	permeable	vegetal	herbace
3.1.3.	prairie permanente	permeable	vegetal	herbace
3.2.0.	autre	permeable	vegetal	herbace
4.0.0.	eau	permeable	eau	eau

Nous pouvons critiquer cette classification notamment concernant la classe 3.2.0, faisant référence à la végétation, qui est classée dans la catégorie perméable (IP). Comme énoncé dans l'état de l'art la base d'un arbre n'est pas forcément perméable surtout en milieu urbain. Le pied d'arbre est souvent non accessible dans les mesures par télédétection, ce qui explique que l'information ne soit pas disponible dans les bases de données d'occupation du sol. L'ANNEXE IV présente une carte pour chaque classification.

2.2.2.3. Bâtiments de la BD topo de l'IGN

Nous avons utilisé la couche de bâtiments de la BD Topo fournie par l'IGN en 2021. Cette base de données mise à jour régulièrement à partir des données du cadastre indique entre autres les caractéristiques morphologiques des bâtiments, telles que la hauteur et la surface de façades de chaque bâtiment, qui sont utiles pour la modélisation. Plusieurs erreurs au niveau de la hauteur des bâtiments ont été corrigées, certains bâtiments (particulièrement les logements rez-de-chaussée de type pavillonnaire) sont recensés comme ayant une hauteur « nulle » ou inférieure à 1m. Voir l'ANNEXE V pour plus de précisions.

2.2.3. Données météorologiques

Les données météo utilisées proviennent de différentes stations : les stations météo France de Beaucouzé et du lycée Chevrollier, la station de l'institut Agro, la station Heat Shield de l'institut Agro, le réseau de stations URBIO. Nous utiliserons également les données transmises par télédétection du satellite Landsat 8 traitées sous forme de températures de surface fournies par l'AURA. Les différentes stations sont localisées sur l'ANNEXE VI.

2.2.3.1. Station Météo France Beaucouzé

Une station Météo France est installée dans la commune de Beaucouzé depuis 1921 [9]. Cette station est une station de type 0 selon la classification Météo-France (station synoptique, acquisition à temps réel, expertise à J+1) et correspond à la station rurale de référence utilisée pour la région angevine. Les capteurs servant à mesurer les données de température et d'humidité sont situés à 1,5m du sol et à 10m pour les données liées au vent.

Beaucouzé était une commune de 820 habitants en 1846 (Mairie de Beaucouzé 2016) et 5298 habitants en 2018. La commune, situé à l'ouest d'Angers a connu une forte artificialisation des sols entre 1950 et 2005 [15]. L'ANNEXE VII illustre ce propos. Ainsi lors de l'installation de la station, cette dernière était implantée dans une zone rurale et non une zone urbaine. Aujourd'hui, la station est au cœur d'une zone péri-urbaine, avec une occupation du sol mixte entre végétal et minéral. Elle est donc possiblement impactée par l'îlot de chaleur urbain. Cette problématique n'est pas spécifique à la ville d'Angers, et concerne beaucoup de stations Météo-France confrontée à ce phénomène d'étalement urbain et d'artificialisation des sols. La station Météo France de Beaucouzé sera néanmoins conservée comme station rurale de référence dans notre analyse pour évaluer l'intensité de l'ICU sur la ville d'Angers. Nous noterons que son sky view factor est de 1. Les données météo étant sous redevance nous avons choisi de télécharger uniquement les données du 23 février 2015 0:00 au 12 janvier 2017 23:00, afin d'être en cohérence avec les données URBIO décrites dans la sous partie 2.2.3.5. Nous avons donc eu accès pour cette période, aux données horaires de hauteur de précipitation, à la température sous abri, à la température de chaussée, à la pression, à la vitesse et la direction du vent, à l'humidité relative, au rayonnement global et à la nébulosité. Chaque paramètre étant relevé à l'heure ronde sauf la direction et la vitesse du vent, la pluviométrie et le rayonnement. La direction et la vitesse du vent ont été moyennées sur les 10minutes qui précèdent chaque heure, tandis que la quantité de pluie et le rayonnement correspondent à un cumul sur

l'heure. Il faut noter que les stations Météo-France, et la station de Beaucouzé en particulier, ne mesurent pas la température de globe ou la température radiante, ce qui ne permet pas de calculer des indices de confort thermique.

2.2.3.2. Station Météo France Chevrollier

Une station Météo France a également été installée au lycée Chevrollier dans le cadre d'une activité de pédagogie avec Mme Bulot-Aubrée, enseignante de physique-chimie. La station Météo France installée depuis 2013 mesure depuis 2018 uniquement la température de l'air et la pluviométrie, avec des relevés toutes les heures de la température et du cumul de pluie tombée. Nous pouvons retrouver une illustration de la station en ANNEXE VIII. Nous noterons que le sky view factor de la station est 0,96.

2.2.3.3. Station Institut Agro Chevrollier

Une station, complémentaire à la station Météo France de Chevrollier, a été installée par nos soins du 18 juin 2021 au 13 juillet 2021 au sein de l'enceinte du lycée Chevrollier. La station est située à proximité de la station Météo France. Cette station, décrite en ANNEXE VIII, mesure la température de l'air, l'humidité, la température de globe, la vitesse et la direction du vent. Le seuil minimum de la coupelle, au-dessous duquel elle ne fonctionne pas, est de 1,6km/h.

2.2.3.4. Station Heat Shield

La station Heat Shield décrite en ANNEXE VIII, est une station portable qui permet de mesurer en temps réel des indices de confort thermique (PMV notamment). Certains critères sont renseignés au préalable des mesures expérimentales : l'isolation des vêtements porté par le sujet dont on veut connaître le confort thermique, le métabolisme de ce dernier et son efficacité musculaire. Des données climatiques sont ensuite mesurées : la température de globe, la vitesse du vent (anémomètre à fil chaud), la température de l'air et la température de thermomètre mouillé, l'humidité relative. Un relevé des différentes températures est effectué toutes les 10 secondes puis une moyenne est faite sur la minute. La vitesse du vent est quant à elle relevée toutes les secondes puis moyennée sur une minute. Cette station est utilisée dans le cadre de l'étude du confort thermique, décrite p28.

2.2.3.5. Réseau URBIO

Un réseau de 7 stations météo a été installé dans la ville d'Angers du 20 février 2015 au 12 janvier 2017. L'environnement pour chaque site est décrit en détail Tableau 2. L'ANNEXE IX présente pour chaque zone une photographie et le site vue du ciel. Ces stations ont été mises en place dans le cadre du programme URBIO et notamment de la thèse de J. Bernard (Bernard 2017). Elles relèvent toutes les 15 minutes (sans opération de moyenne) la température d'air et l'humidité relative.

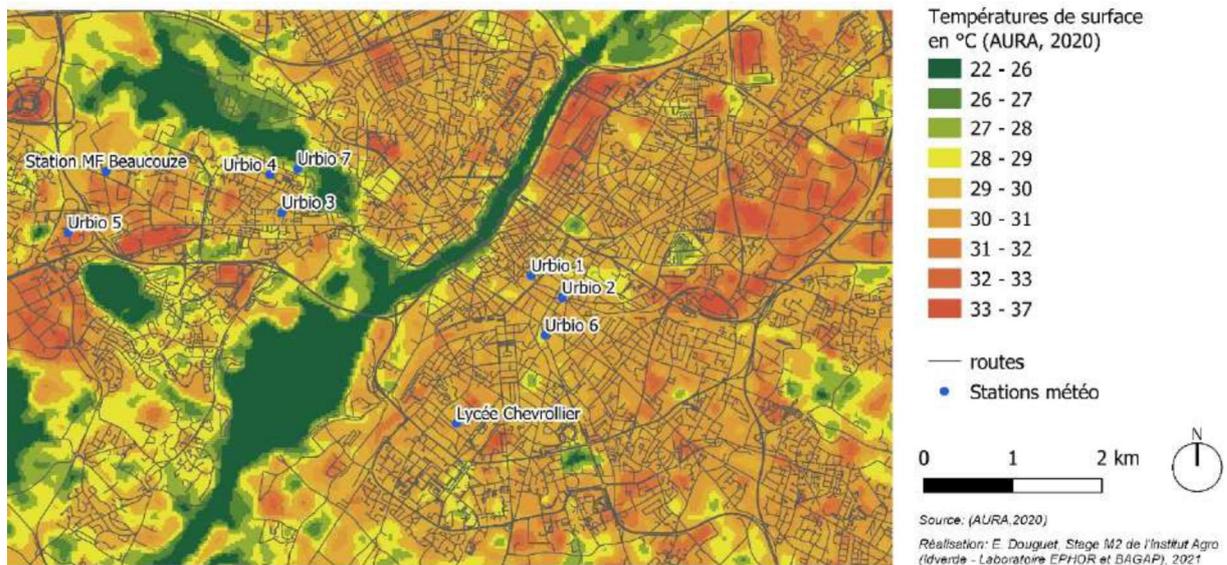
Tableau 2: Description n°1 des sites pour chaque station (Source : E. Douguet)

N° DE LA STATION	ADRESSE	DESCRIPTION GENERALE	A PROXIMITE	SVF
1	Rue Saint-Julien	En plein centre-ville, la station est située au cœur de bâtiments denses d'une hauteur d'environ 3 étages. On remarque la quasi-absence de végétation.	Le Boulevard Foch, qui est très animé du point de vue de l'affluence piétonne, se situe à 100m de la station.	0,78
2	Rue Hanneloup	En plein centre-ville, la station est située au niveau d'un carrefour de taille moyenne à côté d'un jardin privé composé de 3 grands arbres. Les bâtiments alentours sont hauts en moyenne de 2 étages.	Proximité à 250m du jardin du mail et de la voie ferrée.	0,87
3	Square du général Sikorski	La station est située en plein cœur d'un quartier résidentiel dans une rue à faible circulation. L'espace est composé de jardins et de bâtiments avec 1 étage maximum.	Proximité à 150m de l'avenue du Général Patton (avenue passante)	0,91
4	Rue Marthe Mourbel	La station est située dans un quartier résidentiel, quelques arbres sont présents et les bâtiments ont une hauteur de 4 étages.	Proximité à 100m d'un espace vert (d'environ 5500m ²) et proximité à 200m du parc Saint-Nicolas.	0,89
5	Rue du Landreau	La station est située en plein cœur d'une zone industrielle. L'espace est très imperméable, quelques haies d'1m de hauteur sont présentes. Les bâtiments sont d'une hauteur d'environ de 4m50. On imagine une faible affluence au vu de la localisation des rues avoisinantes (impasses)	Proximité à 300m d'un nœud routier et du bois de Fontaine. Le bois de Mollières, de plus grande surface, est situé à 500m de la station.	0,93
6	Rue Rabelais	La station est située dans une rue très empruntée par les voitures pour se diriger vers l'autoroute. Un grand espace vert bordé par des murs en pierre se situe à côté de la station. Les bâtiments ont une hauteur de 1 à 2 étages.	Proximité à 150m de la place André Leroy (grand carrefour routier très passant) et de l'université catholique de l'Ouest.	0,9
7	Avenue Notre Dame du Lac	La station est située dans un espace dégagé. On observe la présence de pelouse, d'arbres ainsi qu'un revêtement minéral.	Proximité à 100m du parc Saint-Nicolas et d'un quartier résidentiel avec des bâtiments de 2 à 3 étages en moyenne.	0,99

2.2.3.6. Landsat 8 – Télédétection

Par le biais d'une convention de licence d'utilisation de fichiers informatiques signée avec l'AURA (Agende d'urbanisme de la région angevine) dans le cadre de ce stage, nous avons eu accès aux températures de surface sur la commune d'Angers.

Figure 2: Températures de surface le 26/08/2016 (10h56 heure UTC) sur la commune d'Angers (Source : E. Douguet)

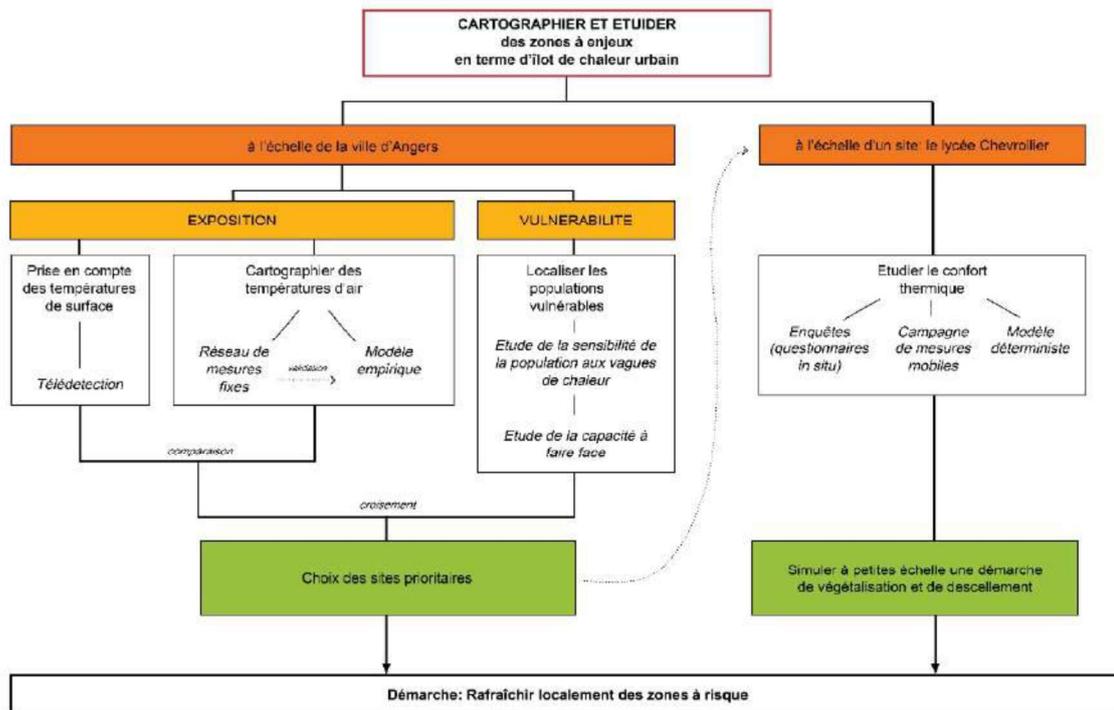


Ces données ont été produites lors du stage d'Amadou Sy, réalisé à l'AURA, en 2020 (Sy 2020). La réalisation de la carte de température de surface, de résolution 30m, a nécessité l'utilisation des images du satellite Landsat 8. Par souci d'accessibilité, de lisibilité et de cohérence des données A. Sy a utilisé l'image satellitaire du 26 août 2016 à 10h53. Ce jour correspond à un jour dit caniculaire pour l'année 2016. Il aurait été intéressant de traiter les données de température de surface de nuit, néanmoins cela ne correspondait pas à l'heure de passage du satellite durant cet épisode de canicule. Une correction, liée à l'absorption atmosphérique, a été apportée aux données du satellite Landsat 8. De plus, l'émissivité et le NDVI ont été pris en compte dans le calcul de la température de surface au sol (Sy 2020). Nous pouvons retrouver Figure 2 les températures de surface transmises par l'AURA et mises en forme par nos soins.

2.3. DEMARCHE DU PROJET

La Figure 3 résume la démarche globale du projet.

Figure 3: Démarche du projet (Source : E. Douguet)



2.3.1. Exposition à l'ICU : Cartographie des températures à grande échelle

Un des trois axes du projet est de cartographier les températures d'air d'après les réseaux de stations météo fixes et d'après le modèle empirique spatial d'ICU. Les températures de surface seront également prises en considération dans l'analyse croisée des données, afin de choisir les sites minéraux urbains à végétaliser en priorité.

2.3.1.1. Comparaison des températures d'air d'après les réseaux de mesures fixes

Les données de températures d'air du réseau URBIO, les données Météo France de Beaucouzé et de Chevrollier ont été comparées durant la canicule du 26 au 28 août 2016. Ce jeu de données a été lu et analysé grâce au langage python.

2.3.1.2. Modélisation empirique des différences de températures d'air à grande échelle : Le modèle d'Unger

Le modèle d'Unger (2006) fait référence au modèle utilisé par János Unger dans sa publication, Modelling of the annual mean maximum urban heat island using 2D and 3D surface parameters, datant du 26 avril 2006 (Unger 2006). L'objectif de son modèle est de quantifier l'intensité moyenne maximale de l'îlot de chaleur urbain (moyenne sur l'année de l'ICU maximum journalier), sur l'ensemble de la ville avec une résolution de 500m. Cette étude s'est déroulée à Szeged en Hongrie. Szeged est reconnue comme étant très sensible à la sécheresse. Le pays possède un climat continental avec de longues saisons chaudes, contrairement à Angers qui possède un climat océanique altéré. Unger étudie dans son article l'influence de chaque indicateur d'occupation et d'usage du sol sur l'ICU grâce à des mesures mobiles de température d'air réalisées à travers la ville. Ces mesures lui permettent de sélectionner les variables les plus pertinentes et de calibrer le modèle d'ICU en ajustant les coefficients attenants à chacune de ces variables. Unger a ensuite validé son modèle pour d'autres villes de Hongrie.

La formule finale qu'il sélectionne pour quantifier l'intensité moyenne de l'ICU est la suivante, avec un bon coefficient de détermination égal à 0.786:

$$\Delta T = 1.332 \cdot 10^{-2} \cdot B + 1.045 \cdot 10^{-7} \cdot C_v + 1.082 \cdot 10^{-2} \cdot W + 0.809$$

Unger prédéfini un carroyage et applique la formule pour chaque carreau. Le Tableau 3 présente chaque indicateur de la formule et précise les intervalles de valeurs à respecter afin que le modèle soit valide.

Tableau 3: Intervalles de valeurs à respecter pour chaque indicateur (Unger, 2006)

Abréviations	Traduit de l'anglais	Unités	Valeur la plus faible	Valeur la plus forte
ΔT	Différence de températures entre la zone étudiée et une zone lambda en milieu rural (moyenne annuelle)	°C	0.74	2.72
B	Ratio des zones construites	%	3.24	93.8
W	Ratio de la surface en eau	%	0	40.36
Cv	Compacité volumétrique pondérée	m ³	1849.54	7411700.05

Voici quelques informations précisant certains indicateurs. Le ratio des zones construites correspond à la surface cumulée des rues, des toits, des places de parkings (...) par rapport à la surface totale du carreau étudié. Par ailleurs, la compacité volumétrique pondérée caractérise le volume, la structure et le rôle thermodynamique des bâtiments (Unger, 2006). La compacité volumétrique correspond à la somme de « ("Surface du bâtiment" / "Surface d'un cube virtuel") * "Volume du bâtiment" » pour chaque carreau. Afin de garder une cohérence avec le modèle d'Unger nous avons réalisé un carroyage de 500m sur 500m sur la commune d'Angers. Suite au carroyage, les données d'occupation du sol décrites p20 ont permis l'évaluation des variables B, W, et Cv du modèle de Unger sur chaque carreau, puis le calcul de l'intensité annuelle de l'ICU ΔT pour chaque carreau de la ville d'Angers. L'ANNEXE V présente une description plus détaillée de chaque étape effectuée. La validité du modèle sur la ville d'Angers sera évaluée grâce aux données expérimentales disponibles sur le réseau Urbio et Météo-France, décrites p22.

2.3.1.3. Analyse croisée des données – prise en compte des températures de surface

Une analyse croisée des données est réalisée entre les données des stations météo fixes (stations urbio, Météo France Beaucouzé et Météo France Chevrollier) et les températures de surface transmises par l'AURA. L'analyse se base sur la canicule du 26 au 28 août 2016.

2.3.2. Localisation des populations vulnérables à la chaleur

Afin d'étudier la sensibilité de la population, nous avons sélectionné grâce à l'état de l'art (p12) les 4 indicateurs qui nous semblaient les plus pertinents du point de vue de la disponibilité des données et de leur importance. Les 4 indicateurs retenus, cités dans de nombreuses recherches, sont les suivants :

- Le nombre de personnes âgées de plus de 65ans,
- Le nombre de ménages individuels,
- Le nombre de logements construits entre 1945 et 1989,
- La densité de population.

L'ensemble des données sont issues des données carroyées de l'INSEE de 2015. Pour garder une cohérence avec ces jeux de données, la carte produite a pour unité des carreaux de 200m*200m. Les carreaux retenus comme sensibles sont les carreaux possédants :

- Plus de 23% de personnes de plus de 65 ans,
- Plus de 27% de ménages d'un seul individu,
- Plus de 3550 individus par km²,
- Plus de 50% de logements construits entre 1945 et 1989.

Ces seuils ont été choisis après avoir effectué une discrétisation par nombre égaux (quantiles). Pour le nombre de personnes de plus de 65 ans, le nombre de ménages d'un seul individu et le nombre de logements construits entre 1945 et 1989, nous choisissons un intervalle de données, dit intervalle critique, au vu des deux derniers quintiles de la discrétisation. Pour établir le seuil de densité, nous avons pris en compte que le dernier quantile de la discrétisation dans le but d'être plus discriminant et de garder une certaine cohérence vis-à-vis de la densité moyenne de la zone étudiée qui était de 2061 habitants par km² en 2015 [11].

La notion de capacité à faire face a également été étudiée. Nous nous sommes d'abord intéressés aux différents équipements présents sur le territoire pouvant servir pour faire face à la chaleur (Etablissements de santé, espaces aquatiques, espaces publics climatisés, espaces de promenade). Le choix des établissements à sélectionner étant sujet à de nombreuses discussions et souvent peu valorisables la nuit, nous avons décidé de nous intéresser uniquement à l'occupation du sol sur un rayon de 500m. Cette distance a été choisie car la vitesse d'un marcheur étant en moyenne de 3km/h en période de chaleur, il suffit de réaliser 10minutes en moyenne de marche pour parcourir 500m. Pour chaque zone, où la population a été recensée comme sensible à la chaleur, nous avons calculé le pourcentage de minéral couvrant le sol, selon la table de correspondance IP-MVE (voir Tableau 1) basée sur les données d'OS de T. Rodier. Plus l'espace possède un pourcentage de minéral important plus la capacité à faire face est faible, car la présence de l'eau ou du végétal est peu présent.

2.3.3. Etude du confort thermique à l'échelle du site

Dans le but d'étudier le confort thermique à une échelle plus fine, nous nous sommes intéressés au lycée Chevrollier. Ce site ressort comme étant un site chaud du point de vue des températures de surface mais également des températures d'air.

2.3.3.1. Campagne de mesures mobiles et enquêtes

Le confort thermique a été mesuré au lycée Chevrollier le 25 juin 2021, de manière quantitative et qualitative. Les 3 sites étudiés sont situés Figure 4, illustrés Figure 5 et décrits Tableau 4. Ces sites ont pour particularité d'avoir une occupation du sol contrastée.

Figure 4: Localisation des différents sites étudiés (Source : E. Douguet)



Figure 5 : Les trois sites illustrés (Source : E. Douguet et S. Herpin)



Tableau 4 : Description des sites (Chevrollier) – (Source : E. Douguet)

REF SITE	DESCRIPTION GENERALE	A PROXIMITE
1MF	Deux stations sont installées sur ce site (la station Météo France Chevrollier et la station fixe de l'Institut Agro). Le site est marqué par la présence d'une prairie fleurie tondu uniquement dans l'enclos des stations météo.	De grands arbres sont situés à environ 20m de la station, ils sont assez éloignés pour ne pas perturber les mesures des stations.
2P	Le site est entièrement imperméable (revêtement minéral) et exposé (absence d'arbres).	Le premier bâtiment et le premier grand arbre sont situés à environ 30m du point.
3TB	Ce point est situé au cœur d'un bosquet de feuillus de 900m ² .	Proximité à 15 m d'un terrain de basket entièrement minéral.

Pour obtenir des données qualitatives nous avons fait appel à un groupe de 17 étudiants âgés de 18 à 19ans en PTSI au lycée Chevrollier. Parmi eux, 15 étaient des hommes et 2 étaient des femmes. 3 expérimentateurs ont également répondu aux questionnaires mais n'ont pas été intégrés à l'analyse des résultats pour des critères de différences d'âge et de public averti. Pour chaque site étudié, les participants ont dû retranscrire leur ressenti thermique grâce à 3 échelles : une échelle de perception (Comment vous sentez-vous ?), une échelle de préférence (Comment trouvez-vous cela ?) et une échelle évaluative : (Comment préféreriez-vous être maintenant ?). Nous pouvons retrouver un détail de l'activité en ANNEXE X avec le questionnaire transmis à chaque participant. Afin de tester la fiabilité des réponses des participants nous avons l'analyse de la variance (ANOVA) suivie du

test de Tuckey. L'analyse de la variance permet ici d'étudier la variation de la moyenne (μ) du phénomène étudié (Perception/Préférence/Evaluation du confort thermique) noté Y, selon l'influence du facteur site. Le nombre de modalité du facteur site est de 4 niveaux (1MF,2P,1MF_AO_Ais,3TB). Nous supposons que Y suit une loi normale $N(\mu_i, \sigma^2)$ sur chaque sous-population i définie par les modalités du facteur site. Le but est de tester l'égalité des moyennes des 4 populations ce qui revient à tester l'hypothèse nulle : « $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ ». Si l'hypothèse nulle est validée cela voudrait dire qu'il n'y a pas de différence significative des scores moyens de perception, de préférence et d'évaluation entre les 4 sites étudiés (1MF,2P,1MFBis,3TB). Le test de Tuckey a également été utilisé afin de comparer les sites 2 à 2. L'analyse des comparaisons entre les 4 sites permet de déterminer les différences significatives entre les moyennes de groupe. La méthode de Tukey spécifie que la totalité des comparaisons présente un taux d'erreur famille de 0,05 soit un niveau de confiance simultané de 95 %. Suite au test de fiabilité des réponses des participants nous avons réalisé une comparaison entre leurs ressentis face à la température ambiante, et les conditions climatiques mesurées par la station.

Nous qualifions les données quantitatives comme étant les données que nous transmet la station Heat Shield décrite et les données de la station de l'Institut Agro. Ces données quantitatives nous permettent de mesurer le PMV. Un PMV de 0 correspond à un confort thermique dit « confortable », sans stress thermique pour un être humain (Zare et al. 2018). Les paramètres renseignés pour la station Heat Shield sont présentées Tableau 5. Le Tableau 6 indique la station de référence utilisée pour chaque site à un instant t et correspond au protocole mis en place.

Tableau 5: Paramètres renseignés pour la station Heat Shield (Source : E. Douguet)

ABREVIATIONS	NOM COMPLET (UNITES)	VALEURS RENSEIGNEES	CORRESPONDANCE
CLO	Isolation (clo)	0.6	Vêtements d'été : short, T-shirt
MET	Métabolisme – activité physique (MET)	1.2	Niveau d'activité faible, le participant reste debout presque immobile
ETA	Efficacité musculaire (-)	0.0	

Tableau 6: Station de référence utilisée pour chaque site à un instant t (Source : E. Douguet)

ID	SITES	HEURE	STATION DE REFERENCE	PRESENCE DES PARTICIPANTS A PROXIMITE DE LA STATION DE REFERENCE
1MF_HS_A	1MF	13h05	Station Heat Shield	OUI
1MF_AO_A	1MF	13h05	Station de l'Institut Agro	OUI
2P_HS_B	2P	13h21	Station Heat Shield	OUI
1MF_AO_B	1MF	13h21	Station de l'Institut Agro	NON
1MF_AO_C	1MF	13h28	Station de l'Institut Agro	OUI
3TB_HS_D	3TB	13h32	Station Heat Shield	OUI
1MF_AO_D	1MF	13h32	Station de l'Institut Agro	NON

L'objectif du protocole est multiple :

- Observer la présence ou non de différence entre les données mesurées par la station Heat Shield et la station fixe de l'Institut Agro (1MF_HS_A/1MF_AO_A).
- Comparer le confort thermique quantitatif mesuré sur le site 1MF avec celui mesuré sur les sites 2TB et 3TB, pour un instant t identique (1MF_AO_B/2P_HS_B, 1MF_AO_D/3TB_HS_D).
- Comparer le confort thermique quantitatif (stations météo) et qualitatif (participants) pour un instant t identique (1MF_HS_A/Participants, 2P_HS_B/Participants, 1MF_AO_C/Participants, 3TB_HS_D/Participants).

2.3.3.2. Modélisation déterministe à l'échelle locale du site : le modèle de SOLWEG

Dans le but de simuler le confort thermique à l'échelle du lycée Chevrolier nous avons utilisé le plugin nommé « UMEP », disponible dans QGIS. Nous avons entre autres utilisé le modèle SOLWEIG, qui signifie en anglais « SOLar and LongWave Environmental Irradiance Geometry model ». Il permet de modéliser les échanges radiatifs et d'estimer la température moyenne radiante (Tmrt). L'utilisation de SOLWEIG nécessite différentes entrées : des données météo formatées pour UMEP, le DEM (Digital Elevation Model), le DSM (Digital Surface Model), le SVF (Sky View Factor) et la hauteur et l'aspect des murs (Wall height et Wall aspect). Il existe d'autres données d'entrée mais qui ne sont pas obligatoires : le DSM de la canopée végétale (CDSM), le DSM des troncs (TDSM), l'occupation du sol (land cover grid) et les points d'intérêts pour le calcul d'indices de confort thermique tels que l'UTCI ou la PET Ce dernier nécessitant de renseigner des paramètres (âge, taille...) qui permettent de décrire l'humain modélisé. Nous avons comparé différentes modalités d'entrée décrites Tableau 7, Tableau 8, Tableau 9, Tableau 10 et Tableau 11.

Tableau 7: Différentes données météo en données d'entrée (Source : E. Douguet)

	ID	Sources des données utilisées	Période analysée
Données Météo	21MF_AO_A	L'ensemble des données proviennent de la station Météo France Beaucozé	Du 25/06/2021 00:00:00 au 25/06/2021 23:45:00
	21AO	L'ensemble des données proviennent de la station de l'Institut Agro fixe sauf les données de rayonnement et de pression qui proviennent de la station Météo France Beaucozé*	Du 25/06/2021 00:00:00 au 25/06/2021 23:45:00

*La pression reste plus ou moins équivalente au sein de la commune d'Angers. Le 25/06/2021 le plafond nuageux était uniformément réparti au sein de la commune ainsi le rayonnement est plus ou moins similaire pour cette même zone.

Tableau 8: Différents DSM en données d'entrée (Source : E. Douguet)

	ID	Noms	Descriptions	Emprise de la couche
DSM	DSM	Digital Surface Model	Le raster renseigne l'addition de la hauteur des bâtiments et du sol	Commune d'Angers
	CDSM	Canopy Digital Surface Model	Identique au DSM avec en plus le volume de la canopée des arbres pris en compte**	Lycée Chevrollier (carreau de 500*500m)
	TDSM	Trunk zone Digital Surface Model	Identique au DSM avec en plus le volume du tronc des arbres pris en compte**	Lycée Chevrollier (carreau de 500*500m)

**Des mesures ont été réalisées sur le site afin d'établir la hauteur des arbres, le diamètre et la hauteur des troncs ainsi que la largeur de la canopée. Un théodolite numérique accompagné de son prisme cible ainsi qu'un mètre ont été utilisés.

Tableau 9: Différents SVF en données d'entrée (Source : E. Douguet)

	ID	Descriptions des couches	Emprise de la couche
SVF	SVF_M	Le SVF ne prend pas en compte la présence du végétal	Commune d'Angers
	SVF_V	Le SVF prend en compte les arbres modélisés au préalable	Lycée Chevrollier (carreau de 500*500m)

Tableau 10: Prise en compte ou non de l'occupation du sol dans les données d'entrée (Source : E. Douguet)

	ID	Descriptions des couches	Emprise de la couche
Land cover	NanLC	Non prise en compte de l'occupation du sol	Commune d'Angers
	LC	L'occupation du sol est prise en compte selon une mise en forme préalable. Les données sont classées selon les types de surfaces : « paved », « buildings », « evergreen trees », « deciduous trees », « grass », « bare soil », « water ». ***	Lycée Chevrollier (carreau de 500*500m)

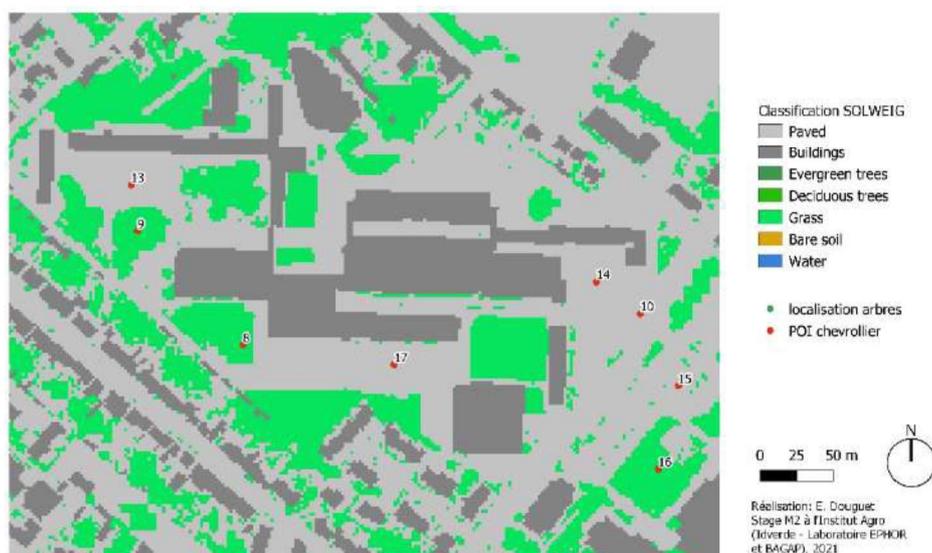
***Les valeurs par défaut d'émissivité et d'albédo des différentes surfaces, utilisées par le modèle de SOLWEIG, sont présentées en ANNEXE X.

Tableau 11: Différents points d'intérêts en données d'entrée (Source : E. Douguet)

	ID+	Descriptions du site	Commentaires
POI	1MF [Point 8]	Point situé au niveau de la station Météo France de Chevrollier [lycée Chevrollier]	Une campagne de mesures mobiles et des enquêtes ont été réalisées sur ces sites
	2P [Point 10]	Point situé au niveau du parvis d'entrée [lycée Chevrollier]	
	3TB [Point 9]	Point situé au cœur d'un bosquet à proximité d'un terrain de basket [lycée Chevrollier]	
	4PK [Point 14]	Point situé sur un parking où sont implantés des arbres faiblement développés [lycée Chevrollier]	Dans le cadre de cette étude, un scénario de descellement et de végétalisation a été modélisé sur ces sites.
	5AA [Point 17]	Point situé dans une allée arborée avec un sol minéral [lycée Chevrollier]	
	6BS [Point 13]	Point situé sur le terrain de basket	

La Figure 6 spatialise les points décrits dans le Tableau 11.

Figure 6: Spatialisation des points d'intérêts (Source : E. Douguet)



Le modèle SOLWEIG a ainsi fonctionné grâce à une combinaison de différentes données d'entrée utilisées qui sont présentées Tableau 12. L'objectif de la démarche était de comparer l'UTCI obtenu mais aussi le Tmrt pour chaque cas avec l'UTCI et le Tmrt calculé grâce aux données des stations météo. Un UTCI compris entre 9 et 26°C correspond à un confort thermique dit « confortable », sans stress thermique pour un être humain (Zare et al. 2018).

Tableau 12: Combinaison des différentes données d'entrée utilisées (Source : E. Douguet)

	Données Météo	SVF	DSM	Land cover	POI	Emprise	Date
Cas 2	21MF_AO_A	SVF_M	DSM	NanLC	POIC	Lycée Chevrollier	2021
Cas 3	21AO	SVF_M	DSM	NanLC	POIC	Lycée Chevrollier	2021
Cas 4	21AO	SVF_V	CDSM + TDSM	NanLC	POIC	Lycée Chevrollier	2021
Cas 5	21AO	SVF_M	DSM	LC	POIC	Lycée Chevrollier	2021
Cas 6	21AO	SVF_V	CDSM + TDSM	LC	POIC	Lycée Chevrollier	2021

L'ensemble des cas modélisent les échanges radiatifs et le confort thermique pour la journée du 25 juin 2021. Les cas 2 et 3 permettent de comparer les résultats avec les données météo d'entrée sur le site du lycée Chevrollier par rapport aux données météo d'entrée issues de la station de Beaucauzé. Le cas 4 permet de voir l'impact de la prise en compte de l'ombrage, généré par la végétation haute par rapport au cas 3. Le cas 5 permet de voir les différences qu'apporte la prise en compte de l'occupation du sol au niveau des propriétés radiatives de surface (émissivité, albédo). Le cas 6 est le plus complet puisqu'il prend en compte l'ombrage de la végétation haute et l'occupation du sol. C'est le cas 6 qui est ensuite utilisé pour observer l'impact d'un scénario de descellement et de végétalisation. Les couches land cover grid ainsi que le CDSM et le TDSM ont été modifiées pour modéliser les différents scénarios décrits dans le Tableau 13 et illustrés Figure 19. La dimension des arbres, pour les différents scénarios, a été choisi de manière aléatoire. L'UTCI obtenu pour chaque site selon les différentes simulations, nous permet de le comparer à l'UTCI obtenu par le cas 6, pour chaque site.

Tableau 13: Description des différents scénarios (Source : E. Douguet)

ID	DESCRIPTION
S1 [Point 14]	Le parking situé à l'intérieur du lycée a été modifié - une strate basse remplace le parking permettant aux arbres de mieux se développer. Ces 23 arbres ont désormais une hauteur totale de 14.5m, une hauteur de tronc de 3.5m, un diamètre de tronc de 40cm et un diamètre de canopée de 3m. Initialement ces arbres avaient une hauteur totale de 3m, une hauteur de tronc de 2m, un diamètre de tronc de 3cm et un diamètre de canopée de 2m
S2 [Point 17]	La cour bénéficie d'une pelouse - le sol minéral présent sous les pieds des arbres a ainsi été remplacé par une pelouse et un cheminement piéton aux matériaux perméables.
S3 [Point 13]	Les alentours des terrains de baskets ont été modifiés - Les espaces non utilisés par les terrains de baskets ont été remplacés par une pelouse.

3. CARTOGRAPHIES DES SITES MINERAUX URBAINS A VEGETALISER EN PRIORITE

3.1. EXPOSITION AUX ILOTS DE CHALEUR A L'ECHELLE DE LA VILLE D'ANGERS

Les premiers résultats présentés font référence à l'exposition de la commune d'Angers aux îlots de chaleur urbain.

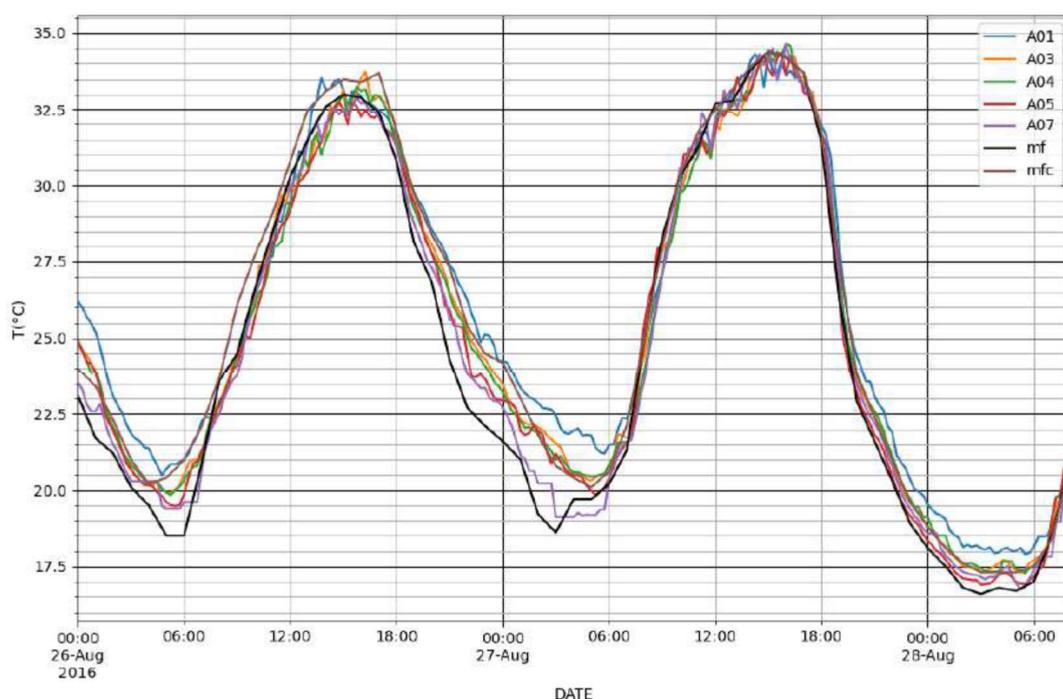
3.1.1. Cartographies des températures d'air

Les températures d'air sont cartographiées grâce au modèle empirique d'Unger validé ensuite par les données météo obtenues par un réseau de mesures fixes.

3.1.1.1. Analyse des températures d'air à l'aide d'un réseau de mesures fixes

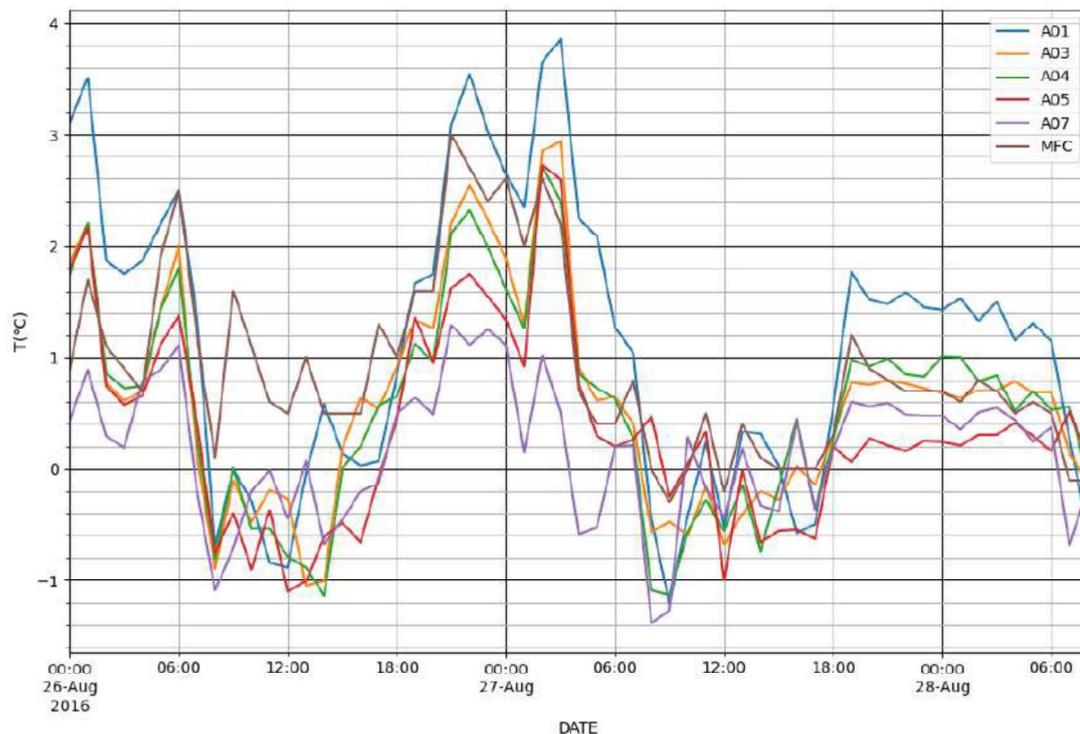
Comme énoncé dans la partie précédente, nous nous sommes intéressés à la période entre 2015 et 2017 afin d'être en cohérence avec les données de l'AURA, mais surtout car le réseau fixe URBIO a été installé uniquement sur cette période. Comme énoncé précédemment, Météo France et l'Institut de Veille Sanitaire ont établi que le terme de canicule est utilisé pour le département du Maine et Loire si le seuil minimal de température est de 19°C, durant 3 jours et 3 nuits consécutives. Pour la période entre 2015 et 2016, le 19 juillet 2016 est le seul jour où le seuil de température est compris entre 19 et 34°C (p11). Nous pouvons en déduire que la ville d'Angers, durant les étés 2015 et 2016, n'a pas été soumise à des canicules. Comme nous n'avons pas d'autres données météo URBIO à disposition nous avons cherché les jours où la température minimum est supérieure à 18°C. Les jours identifiés sont : 2015-07-01, 2015-07-04, 2015-07-20, 2015-07-21, 2015-08-11, 2015-08-12, 2015-08-13, 2015-08-30, 2016-07-19, 2016-07-20, 2016-07-28, 2016-08-03, 2016-08-26, 2016-08-27, 2016-09-05. Nous remarquons que la journée du 26 août 2016, journée utilisée par l'AURA pour analyser les températures de surface sur la commune d'Angers, est comprise dans la liste. La Figure 7 montre l'évolution de la température durant les journées du 26 et du 27 août 2016 d'après les données des stations URBIO, de la station Météo France Beaucouzé et de la station Météo France Chevrollier.

Figure 7: Evolution de la température durant les journées du 26 et 27 août 2016 (Source: E. Douguet)



Nous notons que les stations A02 et A06 n'ont pas mesurées de données pour le 27 août 2016. Nous observons nettement les différences de température entre le jour et la nuit. La station Météo France Beaucouzé possède les valeurs de température de nuit les plus basses ce qui s'explique par sa localisation, en dehors du centre d'Angers et donc moins soumis à l'îlot de chaleur urbain. Au contraire, la station 1 est la station où la température est la plus chaude la nuit, ceci peut se justifier par un SVF plus faible que pour les autres stations ($SVF_{U1}=0,78$). Un faible SVF induit en effet une plus faible capacité à relâcher la chaleur par rayonnement grande longueur d'onde la nuit. Les données URBIO et les données météo France possèdent des pas de temps différents. En effet, les stations URBIO font des relevés toutes les 15 minutes alors que les stations Météo France font des relevés toutes les heures. Cette différence a été résolue en ne conservant que les relevés à heure ronde des stations URBIO. La Figure 8 montre les différences de températures entre les stations URBIO et la station Météo France Chevrollier par rapport à la station Météo France Beaucouzé. Ce graphique permet de mieux observer les écarts de températures entre les différentes stations pour le 26 et 27 août 2016.

Figure 8: Différences de températures entre les stations URBIO et la station Météo France Chevrollier par rapport à la station Météo France Beaucouzé (Source : E. Douguet)

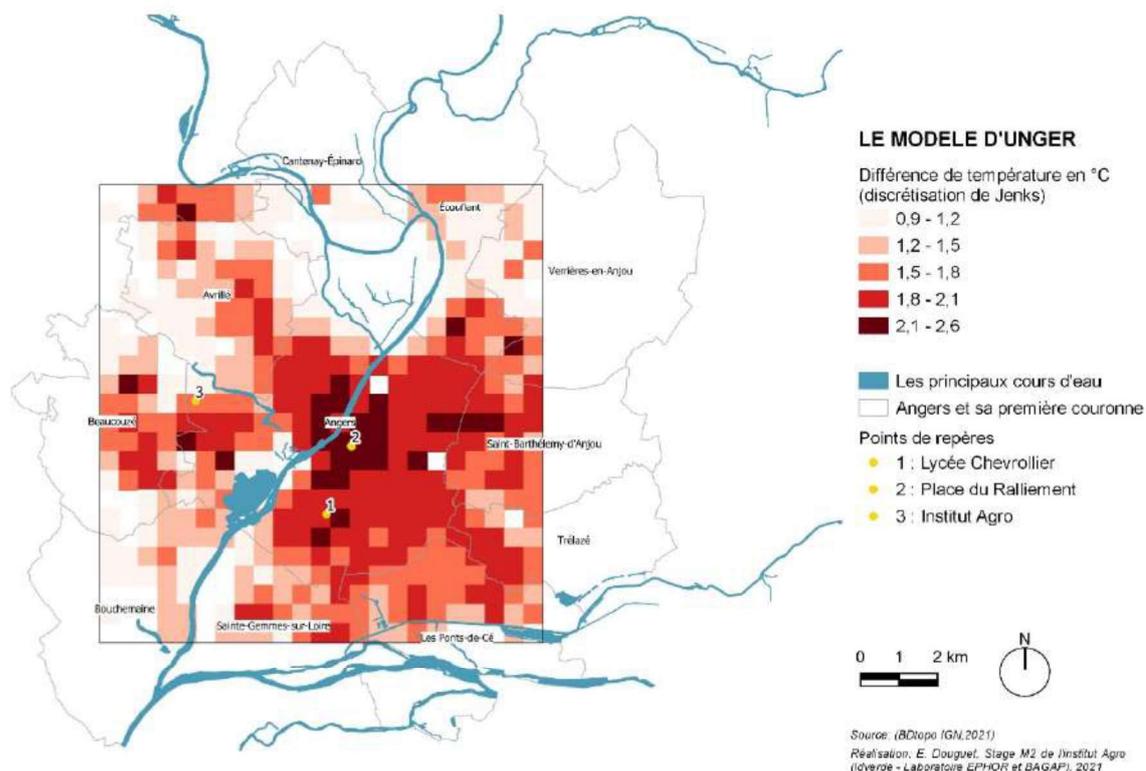


Nous observons sur ce graphique une différence notable entre le jour et la nuit. Le jour, la station Météo France Beaucouzé mesure généralement des températures plus élevées que les autres stations (différence de température inférieure à 0°C). En période de nuit, ce graphique permet de quantifier l'îlot de chaleur urbain plus aisément. La différence de température observée entre la station Urbio 1 par rapport à la station Météo France Beaucouzé est de $3,6^{\circ}\text{C}$ à 01h00 le 27 août 2021. Pour la même date et le même horaire, la différence de température est de $2,6^{\circ}\text{C}$ entre la station Météo France Chevrollier et la station Météo France Beaucouzé. Tandis que la différence la plus petite le 27 août 2021 à 01h00 est de 1°C entre la station Urbio 7 et la station Météo France Beaucouzé.

3.1.1.2. Cartographies des températures d'air à l'aide d'un modèle empirique

Comme énoncé p26, le model d'Unger a été utilisé pour créer la Figure 9, afin de montrer l'intensité annuelle de l'ICU sur la commune d'Angers.

Figure 9: L'intensité annuelle de l'ICU sur la commune d'Angers selon le modèle d'Unger
(Source : E.Douguet)



Nous observons que les différences de températures varient entre 0,9°C et 2,6°C. Les plus grandes différences de températures se situent majoritairement au niveau du centre-ville d'Angers. Nous remarquons que le lycée Chevroliier est aussi un site où les différences de températures sont importantes. Afin de valider le modèle nous avons utilisé les données de température d'air des stations fixes. Ainsi, nous avons utilisé les différences de températures mesurées par les stations Urbio et la station Météo France de Chevroliier vis-à-vis de la station Météo France Beaucouzé. Les données utilisées correspondent à la période annuelle du 19 novembre 2015 (00:00:00) au 18 novembre 2016 (23:00:00), et permettent de calculer l'intensité annuelle de l'ICU mesuré sur cette période. Les résultats peuvent ainsi être comparés au modèle d'Unger. Les stations Urbio 2, Urbio 3 et Urbio 6 ne font pas partie du calibrage car ces stations n'ont pas mesuré la température d'air sur l'ensemble de la période étudiée. Le Tableau 14 précise les points utilisés pour calibrer le modèle ainsi que l'écart de biais moyen et la racine de l'écart quadratique calculé.

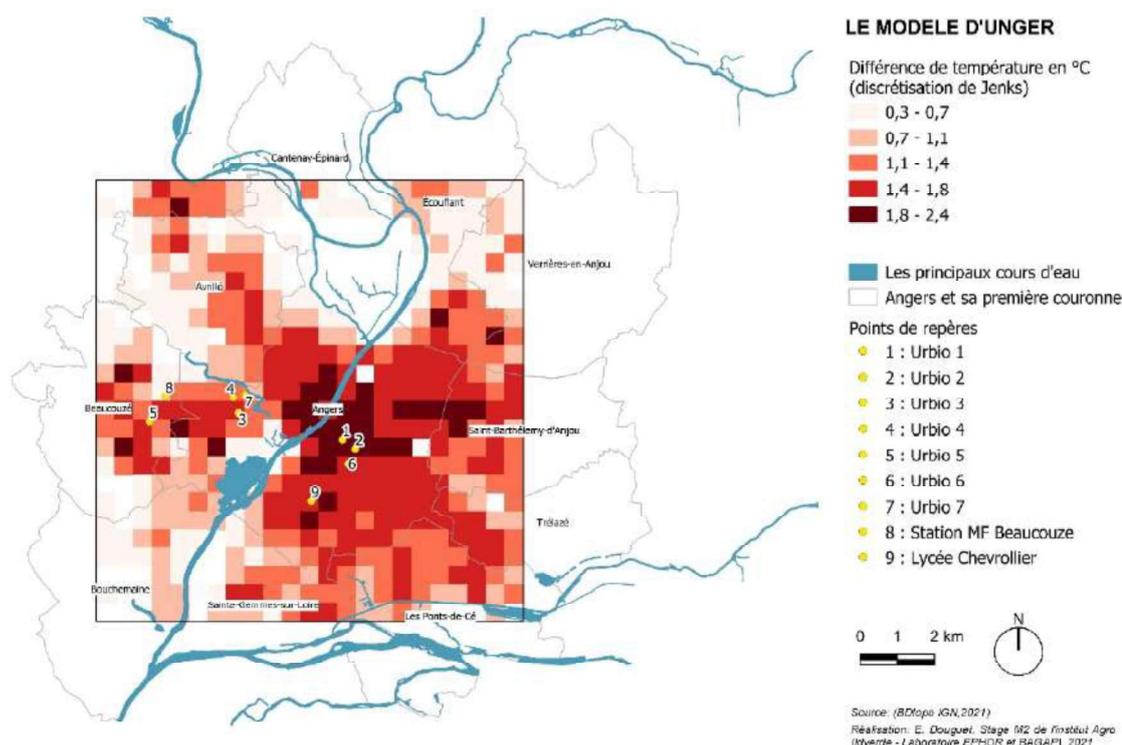
Tableau 14: Calibrage du modèle d'Unger d'après la régression linéaire entre les résultats d'Unger et la différence de température mesurée (Source : E. Douguet)

Stations	Unger (°C)	Différence de température mesurée (°C)	Unger calibré (°C)
Urbio 1	2,4	2,3	2,2
Urbio 4	1,5	1,4	1,1
Urbio 5	1,8	1,2	1,5
Urbio 7	1,4	0,9	1,0
Station MF Chevrollier	2	1,6	1,7
EBM (°C)	0,34		4,8E-05
REQM (°C)	0,40		0,19

L'écart de biais moyen (EBM) est de 0,34°C, tandis que la racine de l'écart quadratique moyen (REQM) est de 0,40 °C. Ce qui signifie qu'Unger a plutôt tendance à surestimer la température. La droite y créée « $y = 1,1914x - 0,6883$ » et présentée ANNEXE XI, nous permet de corriger l'erreur d'Unger. Nous notons que le coefficient de détermination (R^2) est de 0,83 ce qui signifie que la droite de régression est capable de déterminer 83% de la distribution des points, la qualité de la régression linéaire est jugée comme assez bonne. Le nouvel écart de biais moyen calculé est alors de 4,8E-05°C avec une racine d'écart quadratique moyen de 0,19°C. L'écart entre le modèle d'Unger corrigé et les données mesurées devient minime. La Figure 10 est ainsi produite grâce aux données obtenues par le modèle d'Unger corrigé. La figure est disponible en plus grande taille en ANNEXE XII. La nouvelle formule du modèle d'Unger est donc :

$$\Delta T = 1.587 \cdot 10^{-2} \cdot B + 1.245 \cdot 10^{-7} \cdot C_v + 1.289 \cdot 10^{-2} \cdot W + 0.2755$$

Figure 10: L'intensité annuelle de l'ICU sur la commune d'Angers selon le modèle d'Unger corrigé (Source E. Douguet)



3.1.2. Analyse croisée en journée entre les températures de surface et les températures d'air

Les températures de surface ont été présentées p24. Les températures de surface et les températures d'air sont deux types de données différentes. C'est pourquoi, les 7 sites (stations Urbio 1,3,4,5,7, station météo France Chevrollier et Beaucouzé) sont classés du site le plus chaud au plus frais, afin de pouvoir comparer les données de l'AURA du 26 août 2016 à 10h56 et les données mesurées par les stations fixes le 26 août 2016 à 11h. La Figure 11 témoigne du classement des données de température de surface tandis que la Figure 12 témoigne du classement des données de température d'air.

Figure 11: Classement des différents sites selon la température de surface – 26/08/2016 10h56 UTC - Données de l'AURA (Source : E. Douguet)



Figure 12: Classement des différents sites selon la température d'air - 26/08/2016 11h UTC (Source : E. Douguet)



Nous remarquons sans grande surprise que la classification des sites selon les données de température de surface (données de l'AURA) ne suit pas la même logique que la classification des sites selon les données de température d'air. Le site Urbio 5, avec une occupation du sol très minérale et possédant un sky view factor important ($SVF_{UI}=0,93$), est considéré comme un site chaud. Il en est de même pour le site Météo France Beaucouzé ($SVF_{MFB}=1$) dont l'occupation du sol n'est pas minérale mais correspond à un sol nu en été et a donc des propriétés similaires. Ainsi la température de surface ici mesurée durant la journée, est libérée la nuit. En parallèle, le jeu de données des températures d'air considère le site Météo France Chevrollier, le site Météo France Beaucouzé et Urbio 7 comme étant les sites ayant mesuré la température d'air la plus élevée à la même date et le même horaire. Cette classification évolue au cours de la journée et notamment la nuit comme l'indiquait la Figure 7.

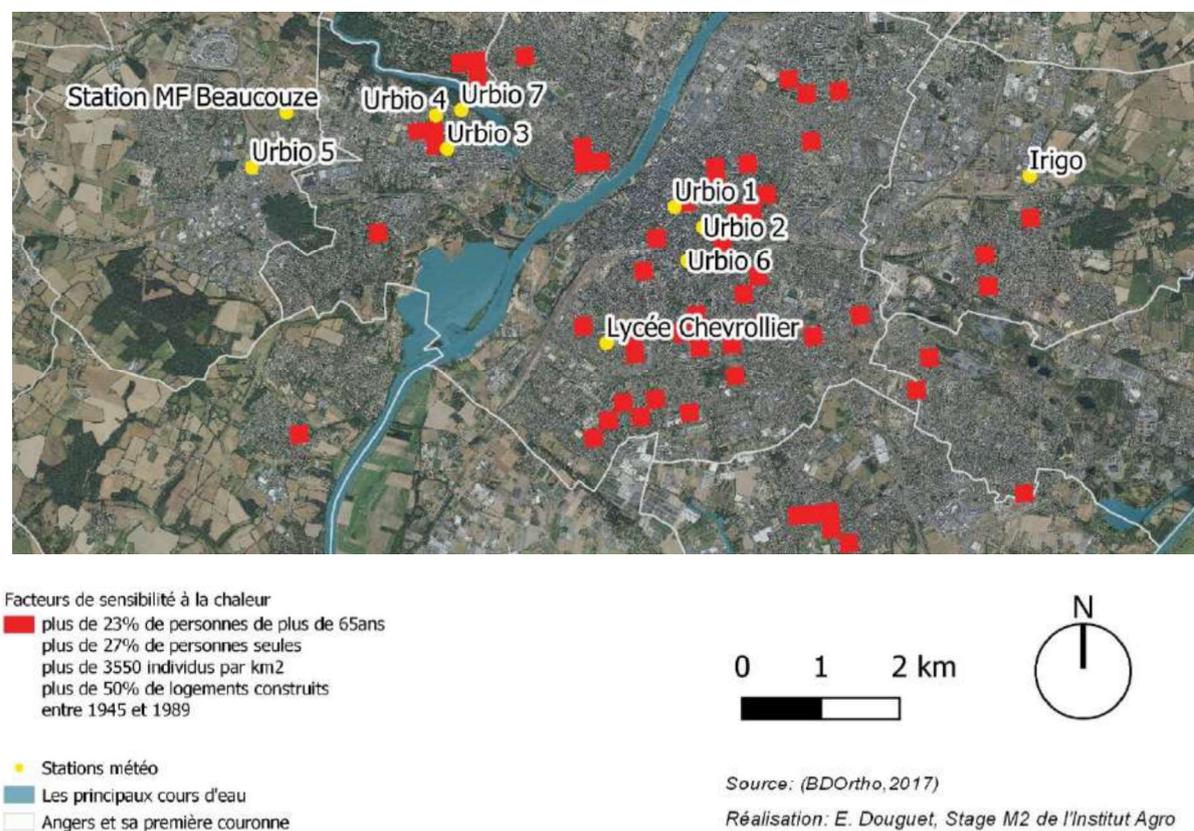
3.2. VULNERABILITE : LOCALISATION DES POPULATIONS VULNERABLES A L'ECHELLE DE LA VILLE D'ANGERS

Les résultats présentés ci-dessous permettent de localiser les populations les plus vulnérables aux vagues de chaleur, à l'échelle de la ville d'Angers.

3.2.1. Etude de la sensibilité de la population aux vagues de chaleur

Comme énoncé dans le chapitre précédent nous avons cartographié Figure 13, les sites où nous retrouvons une forte proportion de personnes âgées de plus de 65ans, de ménages individuels, de logements construits entre 1945 et 1989 et de densité de population importante. La Figure 13 est disponible en plus grande taille dans l'ANNEXE XIII.

Figure 13: Sites où la population est sensible à la chaleur pour la commune d'Angers et sa première couronne (Source : E. Douguet)



Les figures témoignant de chaque indicateur, selon le seuil choisi, sont disponibles ANNEXE XIII. Nous observons que Urbio 1, 3 et 4 ainsi que le lycée Chevrollier sont des lieux situés à proximité de sites où la population est sensible à la chaleur.

3.2.2. Etude de la capacité à faire face de la population

Comme énoncé précédemment, nous nous sommes intéressés uniquement à l'occupation du sol sur un rayon de 500m comme critère de capacité à faire face. Plus la zone de rayon de 500m possède un pourcentage de minéral important plus la capacité à faire face est faible, car la présence de l'eau ou du végétal est peu présent. La Figure 14 témoigne du pourcentage de minéral couvrant le sol dans un rayon de 500m, pour chaque site où la population est dite sensible à la chaleur. La Figure 14 est disponible en ANNEXE XIV.

Figure 14: Importance des zones minérales contraignant la capacité à faire face à la chaleur (Source : E. Douguet)



Nous observons que les sites préalablement cités (Urbio 1, 3 et 4 et le lycée Chevrollier) possèdent entre 73 et 89% de minéral couvrant le sol. Ce sont donc des sites où la capacité à faire face est faible et où des améliorations du point de vue de la désimperméabilisation et de la végétalisation sont possibles.

3.3. ETUDE DU CONFORT THERMIQUE A L'ECHELLE DU SITE

Nous allons maintenant nous intéresser au site du lycée Chevrollier afin de mener une étude du confort thermique et une simulation de descellement et de végétalisation. Nous observons que le lycée Chevrollier est situé à proximité d'habitants vulnérables et ressort comme étant un lieu où la température d'air est élevée, au vu du reste de la commune d'Angers. Nous allons nous intéresser à cet espace car il remplit d'autres critères nécessaires pour l'étude. Ce site pourrait suivre la tendance nationale actuelle de désimperméabilisation des cours d'école [16] et d'ouverture au public d'îlots habituellement inaccessibles (Perrin 2020). Le droit d'accès au site pour des expérimentations et la sécurité du matériel sont des arguments majeurs pour le choix de ce site. Une station météo complémentaire a ainsi pu être installée dans ce lieu, à proximité d'une station Météo France.

3.3.1. Etude du confort thermique grâce à un groupe d'individus

Le confort thermique a été étudié de manière qualitative grâce à un groupe de participants sur 3 sites différents décrits Tableau 4. La Figure 15 témoigne des réponses des participants pour chaque site concernant leur perception, leur préférence et leur évaluation de la température ressentie. De plus, le Tableau 15 renseigne le pourcentage actuel de personnes insatisfaites et le vote actuel moyen (AMV : Actual Mean Vote) pour chaque site.

Figure 15: Réponses illustrées des participants (Source : E. Douguet)

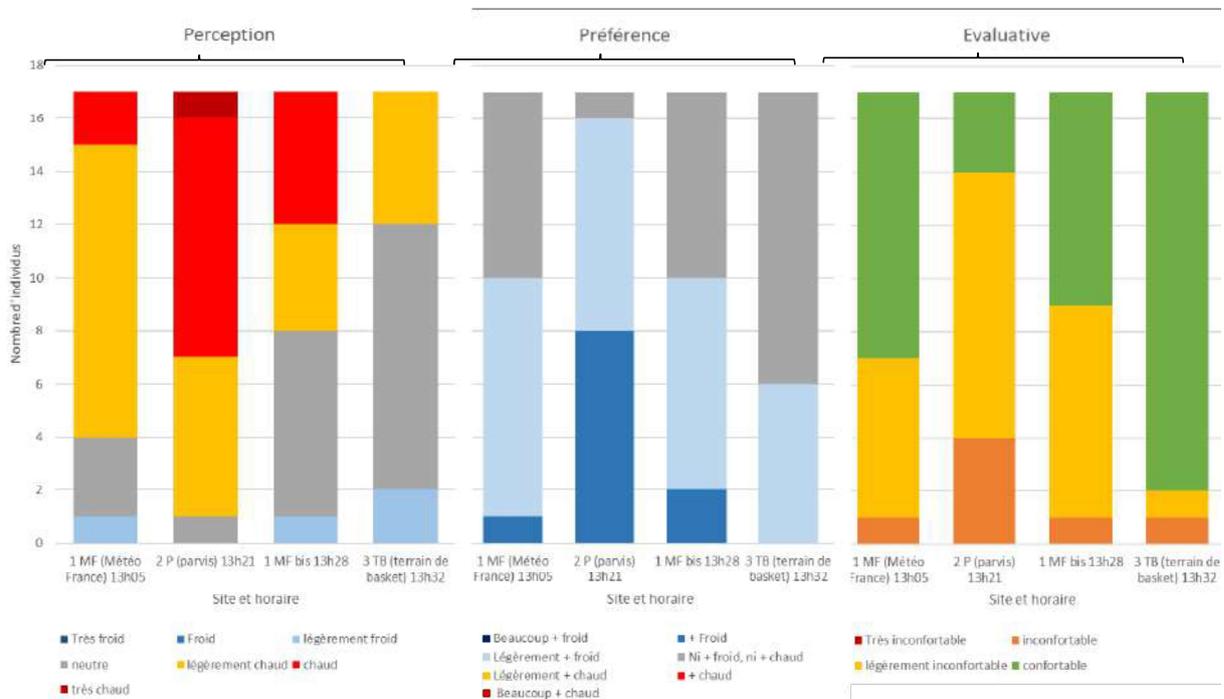


Tableau 15: Pourcentage actuel de personnes insatisfaites et le vote actuel moyen pour chaque site (Source : E. Douguet)

	1 MF 13h05	2 P 13h21	1 MFbis 13h28	3 TB 13h32
AMV	0,8	1,6	0,8	0,2
Pourcentage de personnes insatisfaites (%)	41	82	53	12

D'après les participants le parvis du lycée (site 2P) est le site où la température est perçue majoritairement comme la plus chaude et la plus inconfortable. Ils préféreraient avoir plus froid et évaluent la situation comme légèrement inconfortable. Au contraire, le bosquet à proximité du terrain de basket (site 3 TB) est le site où la majorité des participants ont perçu le moins de stress thermique. Ils s'y considèrent en état de confort. Le site 1MF est majoritairement mieux évalué que le site 2P, mais moins bien que le site 3TB, comme nous l'indique le pourcentage d'individus insatisfaits de 41% pour 1MF et 53% pour 1MFBis contre 82% pour 2P et 12% pour 3TB. L'analyse de la variance (ANOVA) suivie du test de Tuckey a permis de tester la fiabilité des réponses des participants. L'analyse de la variance nous a permis de rejeter l'hypothèse nulle : « $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ » selon laquelle il n'y aurait pas de différence significative des scores moyens de perception, de préférence et d'évaluation entre les 4 sites étudiés (1MF, 2P, 1MFBis, 3TB). En effet, la valeur de p pour la perception, la préférence et l'évaluation sont toutes inférieures à 0,05 comme nous le

montre le Tableau 16, ce qui permet de rejeter l'hypothèse nulle. Ainsi, nous pouvons conclure qu'il existe une différence significative dans la perception, la préférence et l'évaluation du confort thermique entre les différents sites.

Tableau 16: Valeur de p pour l'analyse de la variance entre les différents sites selon la perception, la préférence et l'évaluation (Source : E. Douguet)

	Perception ~ Site	Préférence ~ Site	Evaluation ~ Site
Valeur de p	2.62e-05	3.221e-05	0.0009521

Le test de Tuckey a également été utilisé afin de comparer les sites 2 à 2. Le test permet de calculer des intervalles de confiance à 95 % pour déterminer les différences significatives entre les moyennes de groupe. La Figure 16 témoigne des résultats obtenus, tandis que le Tableau 17 témoigne de la probabilité d'une absence de différence entre les sites.

Figure 16: Intervalles de confiance à 95% des différences de perception, de préférence et d'évaluation (Source : E. Douguet)

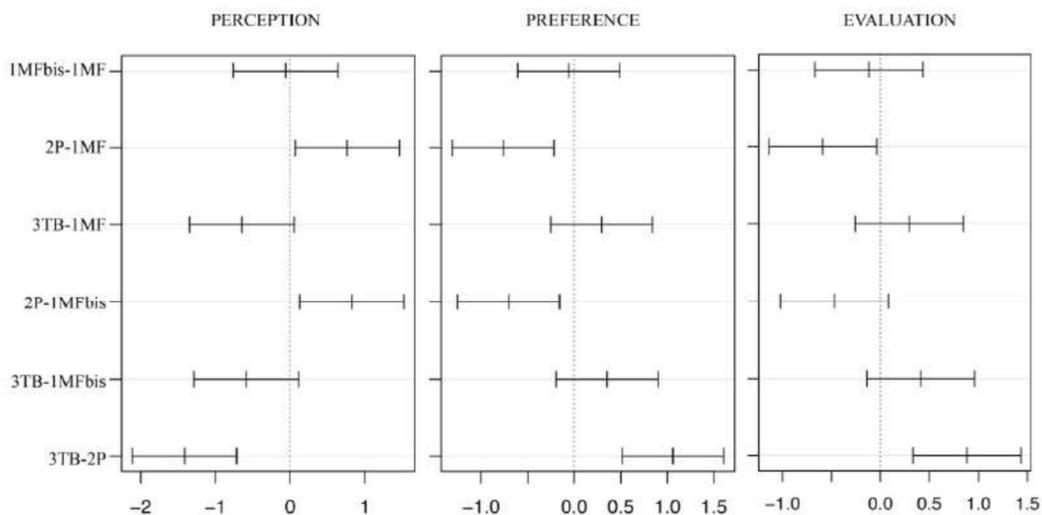


Tableau 17: Probabilité d'une absence de différence entre les sites (Source : E. Douguet)

Différences	Probabilité d'une absence de différence entre les sites		
	Perception	Préférence	Evaluation
1MFbis-1MF	99,6	99,2	94,3
2P-1MF	2,6	0,3	3,2
3TB-1MF	7,9	49,3	50,0
2P-1MFbis	1,4	0,6	12,1
3TB-1MFbis	12,8	33,1	21,0
3TB-2P	0,0	0,0	0,0

Nous observons sans grande surprise une très forte probabilité d'absence de différence entre le site 1MFbis et 1MF. Ce qui est rassurant car ce sont en effet les mêmes sites, mais évalués à deux reprises par le panel de participants, à des horaires légèrement différents (13h05 et 13h28). Les comparaisons 3TB et 2P, ainsi que 2P et 1MF sont au contraire considérés comme différents par les participants, démontrant l'impact significatif de la végétation haute (pour 3TB) et basse (pour 1MF) sur le confort thermique par rapport à un site complètement minéral (2P). La différence est

légèrement moins significative entre 2P et 1MFbis, notamment au regard de l'évaluation. De plus, nous notons une certaine indécision du point de vue de la préférence et de l'évaluation de la température entre le site 3TB et 1MF. Ainsi, nous observons une probabilité moyenne d'absence de différence entre ces deux sites (49,3% pour la préférence et 50% pour l'évaluation). Cette indécision reste cependant moins visible entre le site 3TB et 1MFbis, l'horaire de 1MFbis (13h28) étant plus proche de celui de 3TB (13h32). L'ambiance thermique a peut-être évolué ou bien les participants sont devenus plus critique sur leurs réponses. On peut également noter que ces deux sites sont végétalisés, la différence étant que 3TB présente une végétation haute alors que 1MF dispose d'une végétation basse. Or, durant la période où les mesures ont été réalisées, la couverture nuageuse était importante, et le rayonnement solaire principalement diffus, ce qui peut réduire le phénomène d'ombrage lié à la végétation haute.

3.3.2. Etude du confort thermique à l'aide d'une campagne de mesures mobiles

Le Tableau 18 témoigne des différentes données mesurées par la station mobile ou la station fixe (Tg, Ta, RH) grâce auxquelles nous avons calculé le PMV, le PPD et l'UTCI.

Tableau 18: Confort thermique selon les données mesurées par les stations (Source : E. Douguet)

SITE 25/06/2021	Tg (°C)	Ta (°C)	RH (%)	Va moy (m/s)	PMV	PPD	TMR (°C)	V 10m (m/s) moy	UTCI (°C)
1MF (13h05) station mobile	31,1	23,1	56,7	1,0	1,2	33,4	47,7	1,8	29,1
1MF (13h05) station fixe	31,0	22,7	55,4	1,1	1,1	29,9	49,1	1,9	28,8
2P (13h21) station mobile	33,3	23,7	53,8	1,8	1,9	71,4	58,6	3,0	30,4
1MF (13h21) station fixe	31,8	22,9	55,0	1,6	1,4	42,6	55,0	2,8	29,3
1MF_BIS (13h28) station fixe	32,3	23,0	57,1	1,5	1,5	51,9	55,4	2,6	29,8
3TB (13h32) * station mobile	24,1	22,5	58,7	0,4	-0,7	16,6	26,4	0,7	23,9
1MF (13h32) station fixe	32,3	23,0	57,1	1,5	1,5	51,9	55,4	2,6	29,8

*La température de globe a été modifiée car elle n'était pas encore stabilisée à 13h32. La température de globe utilisée correspond à la température de globe mesurée à 13h50.

Au vu de la différence de 0,22°C d'UTCI entre 1MF station mobile et 1MF station fixe nous arrondissons l'UTCI au degré près. Nous obtenons ainsi le Tableau 19, illustré Figure 17.

Tableau 19: UTCI calculés grâce aux données météo (Source : E. Douguet)

SITE 25/06/2021	UTCI (°C)
1MF (13h05) station mobile	29
1MF (13h05) station fixe	29
2P (13h21)	30
1MF (13h21) station fixe	29
1MF_BIS (13h28) station fixe	30
3TB (13h32) *	24
1MF (13h32) station fixe	30

Figure 17: Illustration des UTCI calculés grâce aux données météo – Lycée Chevrollier
(Source : E. Douguet)



En ayant conscience du temps écoulé entre les différentes mesures, nous pouvons observer que l'UTCI au point 3TB est plus bas qu'au point 1MF et 1MFbis qui est lui-même plus bas que l'UTCI au point 2P. Le PMV obtenu (Tableau 18) a été comparé avec la réponse moyenne des participants (AMV) concernant leur perception du confort thermique. Le Tableau 20 indique le PMV corrigé ainsi que l'écart de biais moyen et la racine de l'écart quadratique calculé.

Tableau 20: Correction du PMV d'après la régression linéaire entre le PMV obtenu et la moyenne des participants (Source : E. Douguet)

	PMV	AMV	PMV corrigé
1 MF (Météo France) 13h05	1,1	0,8	0,9
2 P (parvis) 13h21	1,9	1,6	1,2
1 MF bis 13h28	1,5	0,8	1,1
3 TB (terrain de basket) 13h32	-0,7	0,2	0,1
EBM	0,11		-6,6E-05
REQM	0,63		0,24

Il s'avère que majoritairement les données obtenues Tableau 18 surestime la réponse des participants. Une régression linéaire a été effectuée afin de minimiser la différence entre les deux jeux de données. Pour un échantillon de seulement 4 points, l'équation obtenue est : $y = 0,4325x + 0,4271$ avec un R^2 de 0,76 ce qui n'est pas optimal. Néanmoins l'écart de biais moyen (EBM) et la racine de l'écart quadratique moyen (REQM) ont fortement diminué suite à la correction du PMV comme le montre le Tableau 20. Le PPD obtenu (Tableau 18) a été comparé avec le pourcentage actuel de personnes insatisfaites de leur ressenti thermique. Le Tableau 21 indique le PMV corrigé ainsi que l'écart de biais moyen et la racine de l'écart quadratique calculé.

Tableau 21: Correction du PPD d'après la régression linéaire entre le PPD obtenu et le pourcentage actuel de personnes insatisfaites (Source : E. Douguet)

	PPD	Le pourcentage actuel de personnes insatisfaites	PPD corrigé
1 MF (Météo France) 13h05	32	41	34
2 P (parvis) 13h21	71	82	81
1 MF bis 13h28	52	53	58
3 TB (terrain de basket) 13h32	17	12	16
EBM	-4,0		0,0006
REQM	7,5		4,8

Il s'avère que majoritairement les données obtenues Tableau 18 sous-estime le pourcentage de personnes insatisfaites. Une régression linéaire a été effectuée afin de minimiser la différence entre les deux jeux de données. Pour un échantillon de seulement 4 points, l'équation obtenue est : $y = 1,2094x - 5,0036$ avec un très bon R2 de 0,96. L'écart de biais moyen (EBM) et la racine de l'écart quadratique moyen (REQM) ont diminué suite à la correction du PPD comme le montre le Tableau 21.

3.3.3. Etude du confort thermique à l'aide d'un modèle déterministe

L'utilisation du modèle SOLWEIG nous a permis d'obtenir la température de globe, la température moyenne radiante et l'UTCI pour chaque cas testé et présenté en détail dans la partie précédente p46. Le Tableau 22 et Tableau 23 témoignent des valeurs pour chaque site à 13h (heure civile) avec la présence des données présentées précédemment, qui sont issues de la campagne de mesure. L'ANNEXE XV présente l'évolution sur la journée de la température de globe, de la température moyenne radiante et de l'UTCI pour le site 1MF.

Tableau 22: Température moyenne radiante calculé par SOLWEIG pour chaque cas (Source : E. Douguet)

Sites	TMRT mesuré moyenné sur l'heure (°C)	TMRT 13h SOLWEIG (25/06/2021) V2 (°C)	TMRT 13h SOLWEIG (25/06/2021) V3 (°C)	TMRT 13h SOLWEIG (25/06/2021) V4 (°C)	TMRT 13h SOLWEIG (25/06/2021) V5 (°C)	TMRT 13h SOLWEIG (25/06/2021) V6 (°C)
1MF	52,5	50,6	51,6	50,5	51,0	50,0
3TB	31,3	50,6	51,7	27,7	51,1	27,3
2P	58,6	50,7	51,8	51,5	51,6	51,4

Tableau 23: UTCI calculé par SOLWEIG pour chaque cas (Source : E. Douguet)

Sites	UTCI mesuré moyenné sur l'heure (°C)	UTCI 13h SOLWEIG (25/06/2021) V2 (°C)	UTCI 13h SOLWEIG (25/06/2021) V3 (°C)	UTCI 13h SOLWEIG (25/06/2021) V4 (°C)	UTCI 13h SOLWEIG (25/06/2021) V5 (°C)	UTCI 13h SOLWEIG (25/06/2021) V6 (°C)
1MF	29,4	25,3	30,9	30,6	30,7	30,4
3TB	25,3	25,3	30,9	24,0	30,7	23,9
2P	30,4	25,4	30,9	30,8	30,9	30,8

Au vu de ces résultats les différents cas ont été comparés.

Cas 3 par rapport au cas 2 : Utiliser les données météo issues de Chevrollier (cas3) génèrent des TMRT plus élevées qu'avec les données de météo France Beaucozé (cas2). Ceci est certainement dû à un simple décalage lié aux températures d'air plus élevées à Chevrollier par rapport à Beaucozé.

Cas 4 par rapport au cas 3 : La prise en compte de l'ombrage lié à la végétation haute n'a pas d'impact sur la TMR et l'UTCI pour les sites dépourvus de végétation haute (1MF et 2P), mais induit une baisse de 24°C sur la TMR, et de près de 7°C sur l'UTCI du site arboré 3TB. La prise en compte de la canopée arborée est donc indispensable pour bien modéliser les échanges radiatifs et le confort thermique sur les sites arborés.

Cas 5 par rapport à cas 3 et cas 6 par rapport à cas 4 : la prise en compte de l'occupation du sol au niveau des propriétés radiatives (albédo, émissivité) induit une baisse de 0,6°C de la TMR sur les sites végétalisés (1MF et 3TB) en l'absence de la prise en compte de l'ombrage (cas 5 par rapport à cas 3). Avec la prise en compte de l'ombrage, cet impact de l'occupation du sol se réduit à 0.4°C sur le site 3TB (cas 6 par rapport à cas 4). Cette diminution de l'impact de l'occupation du sol avec la prise en compte de l'ombrage est cohérente avec ce qui a été observé par Lindberg (Lindberg et al 2016). Dans tous les cas, le site minéral 2P n'est pas impacté par l'occupation du sol, car les valeurs génériques par défaut d'émissivité et d'albédo (0.95 et 0.2 respectivement) du modèle sont proches des valeurs pour l'occupation du sol de type « asphalt sombre » du site 2P (0.95 et 0.18 respectivement).

Une régression linéaire a été effectuée afin de minimiser l'erreur de la température moyenne radiante entre les jeux de données obtenus grâce au model (V2, V3, V4, V6) et le jeu de données mesuré sur le terrain. Pour un échantillon de seulement 3 points, différentes équations ont été obtenues. Nous pouvons noter que le plus grand R2 obtenu est de 0,97 et correspond au cas 6. Nous continuerons donc la suite de l'étude en prenant en compte seulement la cas 6. Ce dernier sous-estime la température moyenne radiante déduite des données du terrain, mais semble être mieux corrélé avec les données du terrain. Ceci semble cohérent car le cas 6 prend en compte l'occupation du sol et l'ombrage de la végétation haute, ainsi que les données météo du site. Les nouvelles données, ajustées selon la formule suivante : $y = 1,0492x + 2,4859$, sont présentées Tableau 24. L'écart de biais moyen (EBM) et la racine de l'écart quadratique moyen (REQM) ont diminué.

Tableau 24: Correction du TMRT calculé par SOLWEIG d'après la régression linéaire entre le TMRT calculé par SOLWEIG et le TMRT mesuré depuis les données du terrain (Source E. Douguet)

	TMRT mesuré moyenné sur l'heure (données issues du terrain) (°C)	TMRT 13h SOLWEIG (25/06/2021) V6 (°C)	TMRT corrigé (°C)
Site 1MF	52,5	50,0	54,9
Site 3TB	31,3	27,3	31,1
Site 2P	58,6	51,4	56,4
EBM (°C)	4,6		-0,01
REQM (°C)	5,0		1,8

Une régression linéaire a également été réalisée entre l'UTCI obtenu grâce au cas 6 et l'UTCI issu du jeu de données, mesuré sur le terrain. L'équation obtenue pour un échantillon de 3 points est « $y = 0,693x + 8,6938$ » avec un R^2 de 0,98. Les nouvelles données ajustées ainsi que l'écart de biais moyen (EBM) et la racine de l'écart quadratique moyen (REQM) sont présentés Tableau 25.

Tableau 25: Correction de l'UTCI calculé par SOLWEIG d'après la régression linéaire entre l'UTCI calculé par SOLWEIG et l'UTCI mesuré depuis les données du terrain (Source E. Douguet)

	UTCI mesuré moyenné sur l'heure (données issues du terrain) (°C)	UTCI13h SOLWEIG (25/06/2021) V6 (°C)	UTCI V6 corrigé (°C)
Site 1MF	29,4	30,4	29,8
Site 3TB	25,3	23,9	25,3
Site 2P	30,4	30,8	30,1
EBM (°C)		-0,02	0,001
REQM (°C)		1,0	0,3

La Figure 18 permet d'illustrer l'UTCI obtenu de manière spatiale. Nous observons que l'UTCI du site 2P est légèrement plus élevé que celui du site 1MF, et est beaucoup plus élevé que le site 3TB.

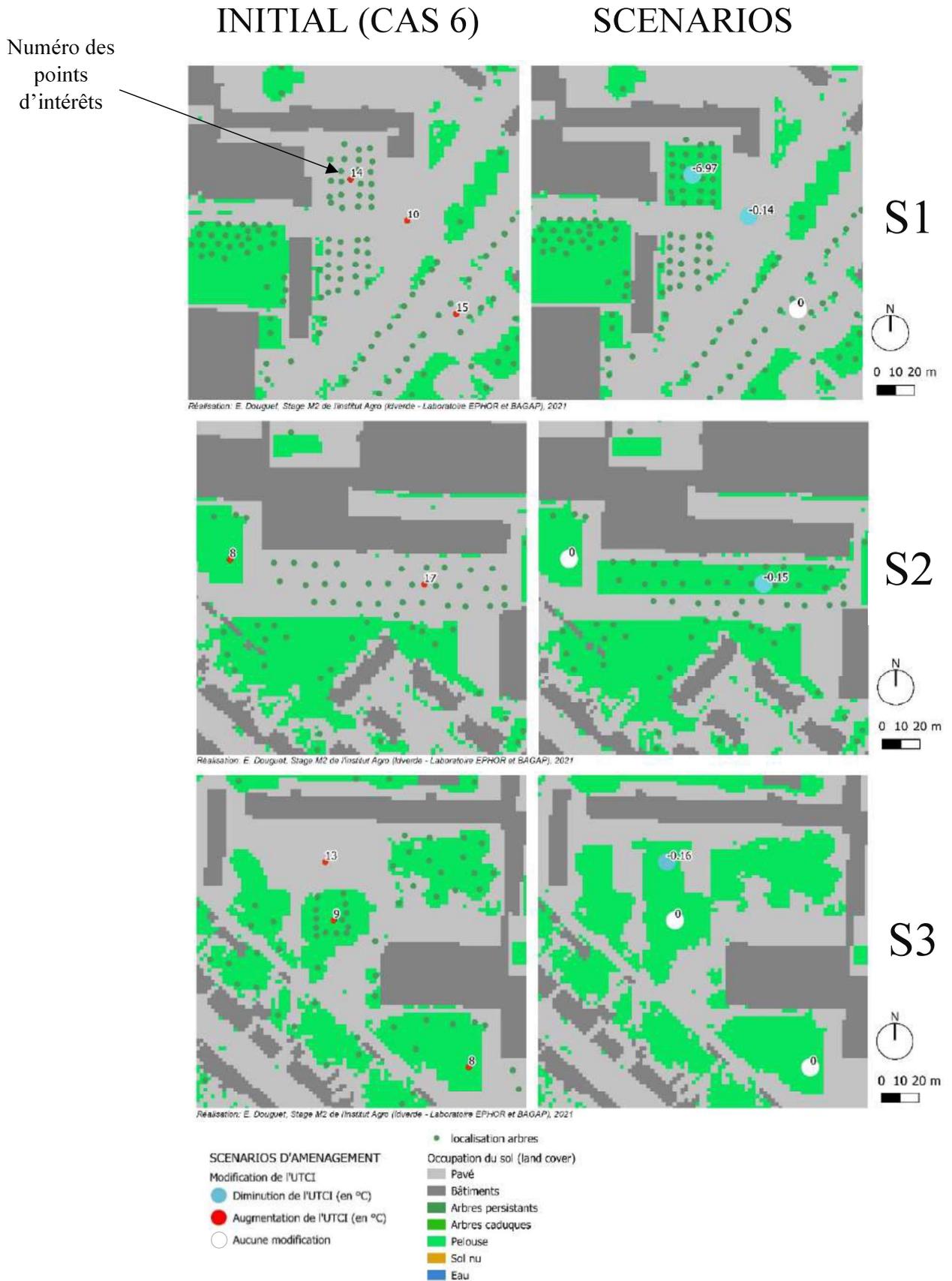
Figure 18: UTCI calculé par SOLWEIG, illustré de manière spatiale (Source : E. Douguet)



3.3.4. Modélisation d'une démarche de descellement et de végétalisation

Plusieurs démarches de descellement puis de végétalisation et parfois même de mise en place d'un espace d'eau ont été simulées, avec comme base de calcul la cas 6. Les 4 scénarios sont décrits p31. La Figure 19 montre la différence d'UTCI obtenue pour chaque scénario par rapport à l'aménagement actuel représenté par le cas 6. L'ANNEXE XVI informe la différence de température moyenne radiante obtenue pour chaque scénario, par rapport à l'aménagement actuel représenté par le cas 6.

Figure 19: Modification de l'UTCI selon différents scénarios d'aménagement - Lycée Chevrollier (Source : E.Douguet)



*Les arbres sont représentés de manière identique mais sont de dimensions différentes.

Le scénario 1 est à l'origine de la diminution de l'UTCI au point 2P (n°10) de $-0,14^{\circ}\text{C}$ et de $-6,97^{\circ}\text{C}$ au point 4PK (n°14). La proximité d'arbres bien développés et d'un couvert sol herbeux permet donc de diminuer l'UTCI sur la zone du point 2P (n°10) qui n'a pas subi d'aménagement. Le scénario 2 entraîne une diminution de l'UTCI au point 5AA (n°17) de $-0,15^{\circ}\text{C}$ tandis que le scénario 3 entraîne une diminution de l'UTCI au point 6BS (n°13) de $-0,16^{\circ}\text{C}$. L'ordre de grandeur de ces diminutions sont similaires à l'ordre de grandeur de la diminution obtenue dans le scénario 1. Par ailleurs, nous n'avons pas simulé la mise en place d'un étang ou d'un miroir d'eau qui permet de diminuer l'UTCI grâce à l'évapotranspiration. Le modèle SOLWEIG utilisé est purement radiatif et ne prend pas en compte la quantité de chaleur dissipée par évaporation. Au contraire, le modèle SOLWEIG pourrait évaluer cet espace comme ayant une absorption plus importante du rayonnement solaire au vu du faible albédo attribué à l'eau (0.05).

4. PERMETTRE A LA POPULATION SENSIBLE DE FAIRE FACE A LA CHALEUR

Nous allons maintenant mettre en relation les différents résultats obtenus et les mettre en perspective avec l'état de l'art.

4.1. LES SITES LES PLUS SOUMIS AUX VAGUES DE CHALEUR SUR LA COMMUNE D'ANGERS

Au vu de l'analyse comparée entre l'utilisation des températures de surface ou des températures d'air, nous choisissons d'utiliser la Figure 10 construite selon le modèle d'Unger et corrigée d'après les données du réseau Urbio et des stations Météo France. Malgré le fait qu'il existe une relation selon L'EPA entre la température de surface de jour et la température de l'air de nuit (Lareau, Baudouin 2015), la cartographie des températures de surface serait représentative uniquement d'une journée définie. Le modèle de Unger, initialement développé pour des villes de taille moyenne en Hongrie, avec un climat continental, et dont la validité pouvait être questionnée pour la ville d'Angers avec un climat océanique dégradé, a finalement montré une performance assez correcte sur la ville d'Angers avec un EBM de 0.34°C , un REQM de 0.4°C par rapport aux données expérimentales acquises avec le réseau URBIO et Météo France. Cette performance doit bien sûr être prise avec précaution, puisqu'elle n'a été pu être évaluée que sur 5 points du territoire, qui présentent néanmoins une occupation du sol et des facteurs de vue du ciel variés. Une recalibration du modèle a été effectuée à partir des données expérimentales, avec un ajustement linéaire dont le R^2 est de 0.83, ce qui permis de réduire l'EBM à $4,8^{\text{E}}-05^{\circ}\text{C}$ et le REQM à 0.19°C . En perspective, il serait intéressant de disposer d'un réseau complémentaire de mesure sur la ville, à des points différents. Les données de la station de type 0 de Marcé, située sur l'aéroport d'Angers-Loire à 25km au Nord-Est d'Angers, pourraient être mobilisées. Des mesures mobiles pourraient également être réalisées afin de pouvoir confirmer la validité de ce modèle. L'objectif étant d'établir les sites les plus exposés aux fortes températures dans la commune d'Angers, il aurait été aussi intéressant de comparer la cartographie de l'ICU obtenue avec le modèle d'Unger, avec d'autres modèles. Nous faisons ici référence au modèle de Balázs et au modèle de Bernard. Le modèle de Balázs présente l'avantage de prendre en compte, de façon plus large spatialement, l'impact de l'environnement sur l'intensité de l'ICU. Balázs étudie ainsi l'occupation du sol dans les carreaux voisins du carreau considéré, ainsi que la distance par rapport à la frontière de la ville. Le modèle de Bernard quant à lui, permet de modéliser spatialement et temporellement l'ICU selon des saisons. Il prend en compte des indicateurs géographiques ainsi que les conditions météorologiques. A l'échelle de la ville, une comparaison avec le modèle déterministe TEB (de Munck et al. 2018; Masson 2000) serait également intéressante à réaliser.

En parallèle, nous avons obtenu la Figure 13 montrant les sites où la population est la plus sensible à la chaleur. Cette carte est précisée par la Figure 14 montrant le pourcentage de minéral présent dans un rayon de 500m. Ces deux figures sont critiquables car la vulnérabilité de la population ne se résume pas en 5 indicateurs, c'est un sujet plus complexe qui aurait nécessité une plus longue étude. Néanmoins, nous nous basons sur les études de santé publique (notamment liées à la canicule de 2003) déjà existantes et les données démographiques disponibles afin de cibler au mieux la population angevine vulnérable à la chaleur. Parmi ces indicateurs, l'analyse de l'état de l'art a montré que les personnes âgées et isolées étaient les plus sensibles aux canicules. Cependant, les personnes âgées et les personnes isolées ont dû être considérées de façon séparée car les données de l'INSEE ne fournissaient pas le nombre de personnes âgées isolées par carreau. Finalement, nous mettons en perspective Figure 20, la Figure 10 avec la Figure 14 afin de déterminer les sites minéraux urbains à végétaliser en priorité.

Figure 20: Sites à modifier en priorité afin de réduire les risques sanitaires face aux vagues de chaleur (Source : E.Douquet)



Nous observons que c'est majoritairement le quartier du centre-ville, La Fayette, Eblé qui est concerné, avec notamment ses faubourgs du 19^{ème} siècle.

4.2. UN CONFORT THERMIQUE DIFFERENT A L'ECHELLE DU SITE

Le confort thermique au lycée Chevroliier a pu être étudié selon trois méthodes (participants, stations météo, modèle SOLWEIG) et par le biais de deux indicateurs (PMV et UTCI). Le jeu de données, obtenu grâce aux réponses des participants et analysé statistiquement, a montré un impact significatif de la végétation haute et basse sur le confort thermique exprimé par le groupe. Il ne faut pas oublier que le groupe de participants interrogé est homogène, comme le stipule le calcul du PMV (Grosdemouge 2020). Les participants sont tous âgés entre 18 et 19 ans, 88% d'entre eux sont de sexe masculin et ont un habillement plus ou moins similaire. Il aurait été intéressant de comparer leurs ressentis avec d'autres groupes homogènes mais avec par exemple, un âge différent telles que les personnes âgées plus sensibles aux risques de surmortalité lors des canicules. En parallèle, les données calculées depuis la formule du PMV à partir des données météo, dépendantes des données

du terrain, surestiment la réponse des participants. Grosdemouge affirme le même constat (Grosdemouge 2020). Une équation de régression avec un R^2 de 0.76 a pu être établie entre le vote moyen exprimé par le groupe et le PMV. Cette démarche est critiquable au vu du faible nombre de configurations étudiées (3 sites sur des temps assez proches). Par ailleurs la T_{mr} et l'UTCI est plutôt bien estimé par SOLWEIG (cas 6) par rapport à l'estimation basée sur les mesures météorologiques. Les trois méthodes s'accordent pour dire que le site 2P est le lieu où il fait le plus chaud, suivi du site 1MF et 1MFbis. Contrairement au site 3TB où il fait le plus frais. Comme l'évoque la littérature, la présence ou non de bâtiments et d'arbres, la densité et la hauteur de ces derniers ainsi que la circulation du vent et l'occupation du sol influent le confort thermique d'un humain. Les différences de confort thermique entre les sites 2P, 1MF/1MFbis et 3TB confirment ces propos.

4.3. LA VEGETATION COMME SOLUTION DE LUTTE

Différents scénarios, notamment de végétalisation, ont été simulés avec SOLWEIG. Les différences d'UTCI obtenues sont situées entre 0,1°C et 7°C. Le bénéfice obtenu est proche des données fournies par la littérature considérant une diminution de 8°C UTCI à proximité immédiate d'un arbre de haute tige (Perrin 2020). Néanmoins au vu des conditions météorologique du 25 juin 2020 (couverture nuageuse importante et rayonnement solaire principalement diffus) il serait intéressant de réaliser de nouveau le protocole. C'est-à-dire de remobiliser des participants, des stations météo et d'utiliser de nouveau le modèle de SOLWEIG durant un épisode de canicule. Une limite de l'approche utilisée par SOLWEIG est liée au fait qu'il s'agit d'un solveur radiatif, et que donc seul le bénéfice de l'ombrage apporté par les arbres, ou la modification des propriétés radiatives de surface liées à l'occupation du sol sont considérées. L'évapotranspiration, et la modification des échanges convectifs induits par la végétation ne sont pas pris en compte. Néanmoins, plusieurs études ont montré que les échanges radiatifs, et la température moyenne radiante étaient les variables les plus impactantes sur le confort thermique en journée (Grosdemouge 2020). L'étude réalisée avec SOLWEIG, bien que limitée, reste donc pertinente pour l'évaluation du confort thermique. L'utilisation d'autres modèles modélisant l'ensemble des variables microclimatiques permettrait cependant d'avoir une vision plus globale des différents scénarios.

L'ESPACE URBAIN COMME ZONE FRAGILE

Le dérèglement climatique est un sujet d'actualité qui va marquer nos vies dans les prochaines années. Nous pouvons déjà observer des événements climatiques intenses de plus en plus fréquents (inondations, feux de forêt, canicules, gels). Au vu des prévisions du GIEC, l'apparition des températures extrêmes arrivant 1 fois tous les 50ans dans un climat sans influence humaine, vont se multiplier. Actuellement, ces événements sont 4,8 fois plus fréquents. Les scénarios futurs sont encore plus catastrophiques. Le scénario de 1,5°C prévoit une fréquence de ces phénomènes à 8,6 fois plus, 13,9 fois plus pour le scénario à 2°C et 39,2 fois plus pour le scénario à 4°C (IPCC 2021). Les espaces urbains vont être particulièrement touchés par l'augmentation de ces phénomènes dont les conséquences pour l'homme, la faune et la flore sont graves voir mortelles.

Il est nécessaire d'adapter dès-maintenant ces espaces afin qu'ils soient plus résilients. Il s'agit donc, par exemple, de choisir les sites minéraux urbains à végétaliser en priorité, pour améliorer le confort thermique des habitants et réduire les risques sanitaires face aux vagues de chaleur. Grâce aux études existantes, il a été possible de déterminer la population angevine la plus vulnérable aux vagues de chaleur. La carte obtenue a été croisée avec l'exposition aux îlots de chaleur pour la commune d'Angers. C'est le quartier du centre-ville, la Fayette, Eblé qui est le plus touché avec ses faubourgs du 19^{ème} siècle et son ancien centre-ville fortifié dont il reste aujourd'hui que des vestiges. Le confort thermique étudié sur le site à risque du lycée Chevrollier met en avant un constat net. L'occupation du sol, la présence ou non de bâtiments et d'arbres, la densité et la hauteur de ces derniers ainsi que la circulation du vent sont autant d'éléments influençant le confort thermique d'un humain. Le parvis entièrement minéral du lycée est considéré par les individus comme étant plus chaud que le bosquet de feuillus, situé à côté d'un terrain de basket. Améliorer le confort thermique du lycée serait bénéfique pour ses occupants. De plus, ouvrir les portes du lycée au public en dehors des périodes scolaires, permettrait aux habitants des environs de bénéficier d'un îlot de fraîcheur. L'ensemble des méthodes utilisées dans cette étude, peuvent être mobilisées dans le cas d'une autre ville française car les données utilisées se basent sur des données de référence existantes et accessibles sur toute la France (IGN et INSEE). Néanmoins le protocole utilisé nécessite d'utiliser les données climatiques du site. Etudier plus en détail l'impact du type de végétation sur le confort thermique après la désimperméabilisation du sol serait un sujet à approfondir, ainsi que l'impact de la désimperméabilisation sur la qualité des sols.

Au vu du dérèglement climatique et de nos émissions de CO₂ actuelles, nous sommes sûr de connaître dans les prochaines années l'augmentation de vagues de chaleur dramatiques. Certes il est important de localiser les zones les plus à risque mais il ne faut pas oublier que le type de population d'un site (personnes âgées, isolées...) évolue dans le temps. L'enjeu est donc d'agir partout et rapidement tout en réfléchissant à d'autres éléments comme l'accès à la nourriture ainsi qu'à l'eau, qui vont être fortement impactés par l'augmentation des températures. Créer une ville résiliente, faisant face à différents dommages tel que les fortes chaleurs, les incendies, les smogs mais aussi les inondations, les périodes de grand froid permettrait de limiter l'impact sanitaire sur la population et sur la biodiversité.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, 2013. *Indicateurs de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique*. 2013.
- ADEME, 2017. Diagnostic de la surchauffe urbaine. 2017.
- ALBERT LEVY, 2016. Changement climatique, îlot de chaleur urbain et impacts sanitaires : Paris et son urbanisme. *Environnement, Risques & Santé*. 1 juillet 2016. Vol. 15, n° 4, pp. 351-356. DOI 10.1684/ers.2016.0888.
- ALONSO, Lucille, [sans date]. Caractérisation des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains lyonnais à l'aide de mesures satellitaires, mobiles et participatives. Université Lyon. pp. 114.
- APUR, 2012. Les îlots de chaleur urbains à Paris. 2012. pp. 36.
- BALÁZS, Bernadett, UNGER, János, GÁL, Tamás, SÜMEGHY, Zoltán, GEIGER, János et SZEGEDI, Sándor, 2009. Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters *Meteorological Applications*. septembre 2009. Vol. 16, n° 3, pp. 275-287. DOI 10.1002/met.116.
- BEAUDOIN, Mélanie, 2016. One stone, two birds: benefits of urban heat island projects. *Environnement, Risques & Santé*. 1 juillet 2016. Vol. 15, n° 4, pp. 326-331. DOI 10.1684/ers.2016.0886.
- BERNARD, Jérémy, 2017. *Signature géographique et météorologique des variations spatiales et temporelles de la température de l'air au sein d'une zone urbaine*. École Centrale Nantes.
- BESANCENOT, Jean-Pierre, 2015. Climate change and health. *Environnement, Risques & Santé*. 1 septembre 2015. Vol. 14, n° 5, pp. 394-414. DOI 10.1684/ers.2015.0813.
- BONNEFOY, Cyril, QUENOL, Hervé, PLANCHON, Olivier et BARBEAU, Gérard, 2010. Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo* [en ligne]. 16 décembre 2010. N° 14. [Consulté le 23 août 2021]. DOI 10.4000/echogeo.12146.
- BRÖDE, Peter, FIALA, Dusan, BĹAŽEJCZYK, Krzysztof, HOLMÉR, Ingvar, JENDRITZKY, Gerd, KAMPMANN, Bernhard, TINZ, Birger et HAVENITH, George, 2012. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*. mai 2012. Vol. 56, n° 3, pp. 481-494. DOI 10.1007/s00484-011-0454-1.
- CHANCIBAULT ET AL., 2015. Scénarios de végétalisation de la ville de Nantes : évaluation énergétique, microclimatique et hydrologique. [en ligne]. 2015. [Consulté le 23 août 2021].
- CHRETIEN, Luc, CEREMA. CENTRE D'ÉTUDES ET D'EXPERTISE SUR LES RISQUES, l'environnement, DREAL GRAND EST. DIRECTION RÉGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT, de l'Aménagement et du Logement Grand Est, VO VAN, Cécile, SUAIRE, Rémi, DUFOURNET, Marylou, AUBRY, Nadia, DOUAY-BERTRAND, Cécile, BABIN, Juliette, PAILLOUX, Nadjwa, POIRIER, Mélanie et CEREMA. CENTRE D'ÉTUDES ET D'EXPERTISE SUR LES RISQUES, l'environnement, 2019. *SESAME. Services écosystémiques rendus par les arbres, modulés selon l'essence* [en ligne]. 2019. Cerema. Bron. [Consulté le 23 août 2021].
- DANIEL, Hervé, HÉDONT, Marianne, PROVENDIER, Damien et AIMÉ-SINTÈS, Marguerite, 2017. Coordination et animation du programme URBIO. . 2017. pp. 38.
- DE MUNCK, C., LEMONSU, A., MASSON, V., LE BRAS, J. et BONHOMME, M., 2018. Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. *Urban Climate*. mars 2018. Vol. 23, pp. 260-286. DOI 10.1016/j.uclim.2017.01.003.
- DÉRY, Jean-Simon, 2018. *Analyse géographique de la vulnérabilité de la population québécoise face aux vagues de chaleur accablante*. 2018.
- FIALA ET AL., 2011. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. [en ligne]. 2011. [Consulté le 23 août 2021]. Disponible à l'adresse : <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00484-011-0424-7>
- FOSSE, Julien, 2019. Objectif « zéro artificialisation nette » : quels leviers pour protéger les sols? [en ligne]. 2019. [Consulté le 23 août 2021].
- GROSDEMOUGE, Virginie, 2020. Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical. Contribution à la méthode nationale d'évaluation des ÉcoQuartiers. Université de la Réunion. 2020. pp. 324.
- HAVENITH, George, 2005. Temperature Regulation, Heat Balance and Climatic Stress. In : KIRCH, Wilhelm, BERTOLLINI, Roberto et MENNE, Bettina (éd.), *Extreme Weather Events and Public Health Responses* [en ligne]. Berlin, Heidelberg : Springer. pp. 69-80. [Consulté le 23 août 2021]. ISBN 978-3-540-28862-6. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/3-540-28862-7_7

- HÉMON, Denis, JOUGLA, Eric, CLAVEL, Jacqueline, LAURENT, Françoise, BELLEC, Stéphanie et PAVILLON, Gérard, 2003. Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 en France. *Bulletin épidémiologique Hebdomadaire*. pp. 5.
- HÉNON, Aurélien, MESTAYER, Patrice G., LAGOUARDE, Jean-Pierre et VOOGT, James A., 2012. An urban neighborhood temperature and energy study from the CAPITOUL experiment with the SOLENE model. *Theoretical and Applied Climatology*. 1 octobre 2012. Vol. 110, n° 1, pp. 177-196. DOI 10.1007/s00704-012-0615-0.
- INSEE, 2017. *Angers : 32 500 habitants dans les 8 QPV de l'agglomération*. mars 2017.
- IPCC, 2014. AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 — IPCC. 2014.
- IPCC, 2021. *AR6 Report: Climate Change 2021 — IPCC*. 2021.
- KÁNTOR, Noémi et UNGER, János, 2011. The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment — the mean radiant temperature. *Open Geosciences*. 1 mars 2011. Vol. 3, n° 1, pp. 90-100. DOI 10.2478/s13533-011-0010-x.
- KUOPPAMÄKI, Kirsi, HAGNER, Marleena, LEHVÄVIRTA, Susanna et SETÄLÄ, Heikki, 2016. Biochar amendment in the green roof substrate affects runoff quality and quantity. *Ecological Engineering*. 1 mars 2016. Vol. 88, pp. 1-9. DOI 10.1016/j.ecoleng.2015.12.010.
- LAREAU, Félissa et BAUDOIN, Yves, 2015. Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la chaleur dans l'agglomération de Montréal. *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*. 2015. Vol. 59, n° 2, pp. 234-245. DOI <https://doi.org/10.1111/cag.12166>.
- AURA, 2020. Les îlots de chaleur urbains. [en ligne]. 2020. [Consulté le 16 février 2021].
- LINDBERG, Fredrik, HOLMER, Björn et THORSSON, Sofia, 2008. SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*. 1 septembre 2008. Vol. 52, n° 7, pp. 697-713. DOI 10.1007/s00484-008-0162-7.
- LINDBERG, Fredrik, ONOMURA, Shiho et GRIMMOND, C. S. B., 2016. Influence of ground surface characteristics on the mean radiant temperature in urban areas. *International Journal of Biometeorology*. septembre 2016. Vol. 60, n° 9, pp. 1439-1452. DOI 10.1007/s00484-016-1135-x.
- MAIRIE DE BEAUCOUZÉ, 2016. *Beaucouzé son histoire ancienne contée par ses édifices* [en ligne]. septembre 2016.
- MASSON, Valéry, 2000. A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*. 1 mars 2000. Vol. 94, n° 3, pp. 357-397. DOI 10.1023/A:1002463829265.
- Mballo, S., Herpin, S., Manteau, M., Demotes-Mainard, S., & Bournet, P.E. (2021). *Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment*. *Urban Climate*, 37, 100844. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100844>
- MUSY, Marjorie, BOZONNET, Emmanuel, BRIOTTET, Xavier, GUTLEBEN, Caroline, LAGOUARDE, Jean-Pierre, LAUNEAU, Patrick, LEMONSU, Aude, MARO, Denis, RODRIGUEZ, Fabrice et SABRE, Maeva, 2014. *Rapport final Projet ANR- 09-VILL-0007VegDUDProgramme Villes Durables 2009* [en ligne]. Research Report. IRSTV FR CNRS 2488. [Consulté le 23 août 2021].
- OKE, T. R., MILLS, G., CHRISTEN, A. et VOOGT, J. A., 2017. *Urban Climates* [en ligne]. Cambridge : Cambridge University Press. [Consulté le 9 août 2021]. ISBN 978-1-139-01647-6.
- PATRIARCHE, Manolis, 2017. Mesure et modélisation de la lumière naturelle dans les canyons urbains. . 2017. pp. 391.
- PERRIN, Guillaume, 2020. *Rafraîchissement urbain et confort d'été. Lutter contre les canicules*. Dunod.
- PLANTE&CITÉ, 2021. Revêtements perméables des aménagements urbains : Typologie et Caractéristiques techniques. *calameo.com* [en ligne]. 2021. [Consulté le 23 août 2021].
- RECURT, Pauline, 2020. Dans quelles mesures les nouvelles techniques d'aménagement ont-elles un impact sur le climat urbain? . 2020. pp. 62.
- RODIER, Thomas, 2020. Place des espaces boisés dans la construction des villes. Institut Agro - Université Angers. 2020. pp. 114.
- STEWART, I. D. et OKE, T. R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*. décembre 2012. Vol. 93, n° 12, pp. 1879-1900. DOI 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

STEWART, Iain Douglas, 2011. *Redefining the urban heat island* [en ligne]. University of British Columbia. [Consulté le 23 août 2021].

SY, Amadou, 2020. *Rapport de stage Amadou final.pdf*. AURA, 2020.

TREMEAC, Brice, BENDADA, Mounia, NEFZAOU, Elyes et HENDEL, Martin, 2020. Consommations électriques et îlots de chaleur urbains : application à la ville de Paris. [en ligne]. 2020. [Consulté le 14 août 2021]. DOI 10.25855/SFT2020-081.

UNGER, J, 2006. Modelling of the annual mean maximum urban heat island using 2D and 3D surface parameters. *Climate Research*. 2006. Vol. 30, pp. 215-226. DOI 10.3354/cr030215.

ZARE, Sajad, HASHEMINEJAD, Naser, SHIRVAN, Hossein Elahi, HEMMATJO, Rasoul, SAREBANZADEH, Keyvan et AHMADI, Saeid, 2018. Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year. *Weather and Climate Extremes*. 1 mars 2018. Vol. 19, pp. 49-57. DOI 10.1016/j.wace.2018.01.004.

SITOGRAPHIE

[1] MÉTÉO FRANCE, [sans date]. Réchauffement climatique et vagues de chaleur, canicules - Météo-France. [Consulté le 25 août 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/impacts-du-changement-climatique-sur-les-phenomenes-hydrometeorologiques/changement-climatique-et-canicules>

[2] INRS, 2021. Travail à la chaleur. 2021. [Consulté le 23 août 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.inrs.fr/risques/chaleur/ce-qu-il-faut-retenir.html>

[3] EQUIPEX-GEOSUD, [sans date]. Images LandSat 8 - Portail de l'EQUIPEX-GEOSUD. [Consulté le 23 août 2021]. Disponible à l'adresse : <https://ids.equipex-geosud.fr/images-landsat-8>

[4] ISO, [sans date]. *ISO 7933*. [Consulté le 27 août 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.iso.org/fr/standard/39155.html>

[5] Adaptaville, 2021. CoolRoof : une peinture anti-chaleur pour améliorer le confort thermique. [Consulté le 23 août 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.adaptaville.fr/peinture-anti-chaleur-toit> CoolRoof est un revêtement de toiture qui permet d'éviter la surchauffe provoquée par les rayonnements solaires en été

[6] Adaptaville, 2021. Aménager les horaires d'ouvertures des lieux de fraîcheur lors d'une canicule. [Consulté le 23 août 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.adaptaville.fr/horaires-d-ouvertures-des-lieux-de-fraicheur>

[7] Institut Agro, [sans date]. Projets | Réseau Urbasol. [Consulté le 23 août 2021]. Disponible à l'adresse : <https://urbasol.agrocampus-ouest.fr/fr/projets>

[8] METEO France, [sans date]. Tout savoir sur le climat en métropole. [Consulté le 19 août 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climat-en-france/le-climat-en-metropole#>

[9] Données Publiques de Météo-France - Fiche climatologique, [sans date]. [Consulté le 19 août 2021]. Disponible à l'adresse : https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=117&id_rubrique=39

[10] MétéoFrance, 2019. Canicule : chaleur record au niveau national. [Consulté le 19 août 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.meteofrance.fr/actualites/74529640-canicule-chaleur-record-au-niveau-national>

[11] Insee, 2021. Comparateur de territoire. [Consulté le 19 août 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=COM-49007>

[12] Insee, [sans date]. Données carroyées – Carreau de 200m. [Consulté le 19 août 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4176290?sommaire=4176305>

[13] Préfet de Maine et Loire, 2014. Consommation d'espace (maine-et-loire). [Consulté le 19 août 2021]. Disponible à l'adresse : http://www.maine-et-loire.gouv.fr/IMG/pdf/CONSO_ESPACE_2014_cle26af1a-2.pdf

[14] Ville d'Angers, [sans date]. [Consulté le 19 août 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.angers.fr/vivre-a-angers/quartiers/roseraie/moi-et-mon-quartier/index.html>

[15] Remonter le temps, [sans date]. [Consulté le 20 août 2021]. Disponible à l'adresse : <http://remonterletemps.ign.fr> Consultation et impression de données anciennes et actuelles

[16] ALM, 2020. Angers Loire Métropole s'engage dans un Contrat de transition écologique. 2020. [Consulté le 24 août 2021]. Disponible à l'adresse : http://www.maine-et-loire.gouv.fr/IMG/pdf/cp_cte.pdf

AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers CFR Rennes

<p>Année universitaire : 2020 - 2021</p> <p>Spécialité : Paysage</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) :</p> <p>Paysage : opérationnalité et projet</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de Montpellier SupAgro (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
---	--

ANNEXES : Choisir les sites minéraux urbains à végétaliser en priorité, pour améliorer le confort thermique des habitants et réduire les risques sanitaires face aux vagues de chaleur

Par : Emma DOUGUET

Soutenu à Angers le 16 septembre 2021

Devant le jury composé de :

Président : JOLIET Fabienne

Maître de stage : BEAUJOUAN Véronique / HERPIN
Sophie

Enseignant référent : GALOPIN Gilles

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Patrimoine-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



ANNEXE I : Descriptif des données statistiques, d'occupation du sol et des données météo
Descriptif des données (Source : E. Douguet)

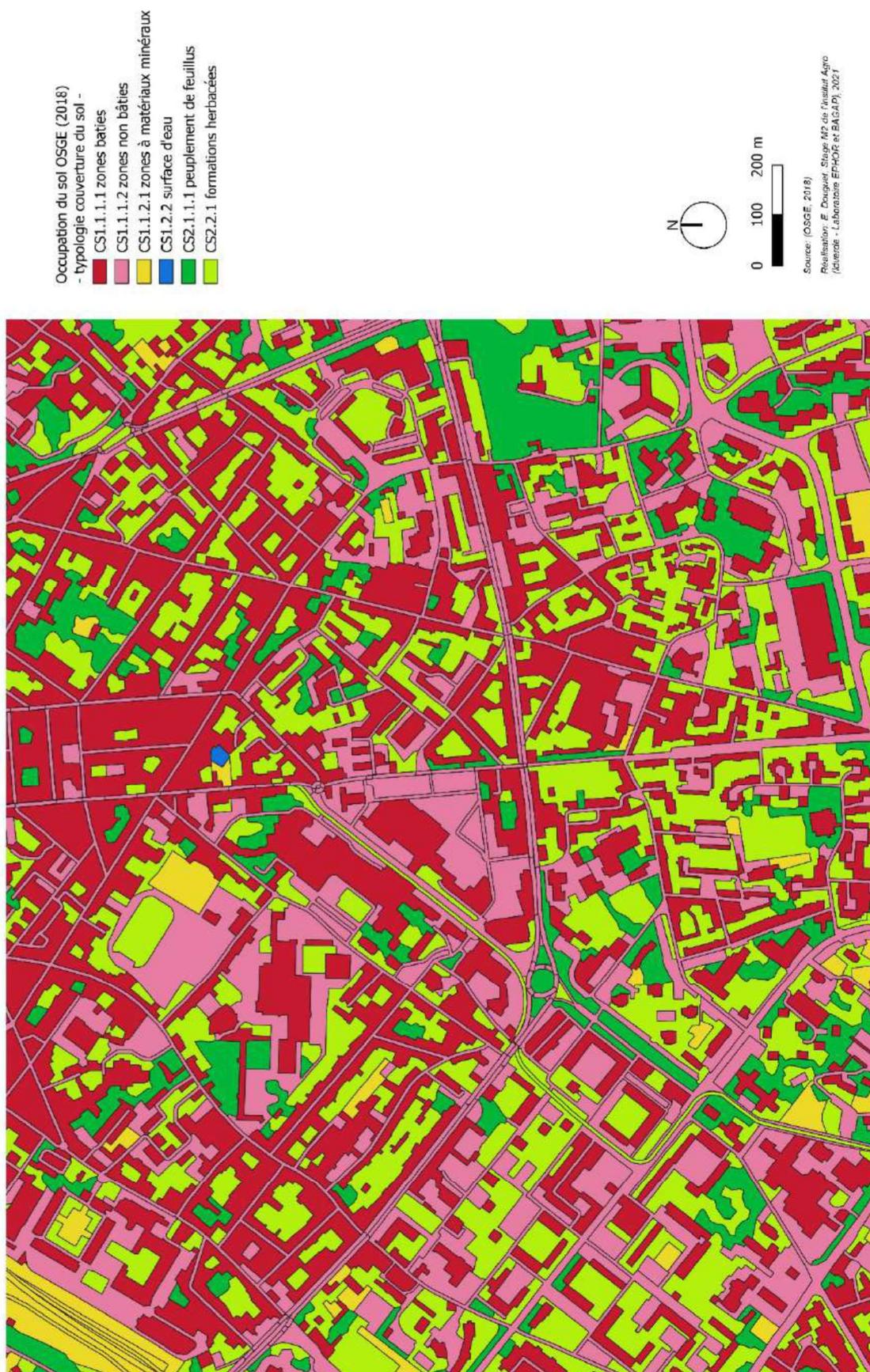
Types de données	Données	Date des données brutes	Données mesurées/utilisées	Résolution spatiale et/ou temporelle
Données statistiques	Données carroyées - Carreau de 200m – INSEE – 2015 – d'après les revenus localisés sociaux et fiscaux (FiLoSoFi).	2015	Nombre d'individus (Ind), Nombre de ménages (Men), Nombre de ménages d'un seul individu (Men_1ind), Nombre de logements construits avant 1945 (Log_av45), Nombre de logements construits entre 1945 et 1969 (Log_45_70), Nombre de logements construits entre 1970 et 1989 (Log_70_90), Nombre de logements construits depuis 1990 (Log_ap90), Nombre d'individus dont l'âge est inconnu (Log_inc), Nombre d'individus de 65 à 79 ans (Ind_65_79), Nombre d'individus de 80 ans ou plus (Ind_80p)	RS: 200m
Données topographique	MNT 5m 49 - composante topographique du référentiel à grande échelle - IGN	2019	Altitude	RS: 5m
Données d'occupation du sol	Thomas Rodier 2020 – Institut Agro – Université d'Angers. Données construites selon la BD Topo, le registre parcellaire graphique (RPG) et l'indice de végétation (NDVI)	2016-2019	<i>Voir classification de Thomas Rodier 2020</i>	Precision: 5m
Données d'occupation du sol	IGN - BD Topo 2021	2012-2021 (Données modifiées) Sinon 2006-2021 (Données créées)	Hauteur et surface des bâtiments	Precision: 5m
Données d'occupation du sol	IGN-F – OCSGE - 2018	2006 (données créées) - 2021 (données modifiées)	<i>Voir classifications IGN OCGE : couverture du sol et usage du sol</i>	Precision: 10m
Données météo	MF (Météo France Beaucouzé) – 2015/2017	Du 23 février 2015 0:00 au 12 janvier 2017 23:00 + 25 juin 2021 + Date de disponibilité 1921 – (...)	Date, précipitations (RR1), température (T), pression de station horaire (PSTAT), vitesse du vent (FF), direction du vent (DD), humidité relative (U), rayonnement global horaire (GLO)	RT : Toutes les heures <u>Infos complémentaires :</u> Relevé à heure fixe sauf pour la direction et la vitesse du vent moyenné sur les 10 minutes qui précèdent et la quantité de pluie et le rayonnement qui correspondent à un cumul sur l'heure
Données météo	MFC (Météo France Chevrollier) – 2015/2017	Du 23 février 2015 0:00 au 12 janvier 2017 23:00 + 25 juin 2021 + Date de disponibilité 2013 – (...)	Date, précipitations (RR1), température (T)	RT : Toutes les heures <u>Infos complémentaires :</u> Relevé à heures fixe sauf pour la quantité de pluie qui correspond à un cumul sur l'heure
Données météo *	AOC (Agrocampus Ouest Chevrollier) – 2021	Du 18 juin 2021 08:00:00 (UTC) au 13 juillet 2021 07:10:00" (UTC)	Température d'air (Ta), humidité relative (RH), température de globe (Globe), direction et vitesse du vent	RT : Toutes les 5 minutes <u>Infos complémentaires :</u> Relevés toutes les 5 minutes sauf pour la vitesse et la direction du vent relevés toutes les 10" et moyennées toutes les 5'

Données météo *	Station Heat Shield (Agrocampus Ouest Chevrollier) – 25/06/2021	<i>Site Météo France</i> : 25 juin 2021 de 12:32:00 à 13:07:00 <i>Site Parvis</i> : 25 juin 2021 de 13:13:00 à 13:23:00 <i>Site Bosquet terrain de basket</i> : 25 juin 2021 de 13:31:00 à 13:50:00	Date, température de globe (tg), température d'air (ta), humidité relative (rh), vitesse du vent (va), direction du vent, predicted mean vote (PMV), Predicted Percent Dissatisfied (PPD)	RT : Toutes les minutes Relevés toutes les 10'' puis moyenne sur la minute Mais pour vent relevé toutes les secondes puis moyenne sur la minute
Données météo	URBIO (Bernard) 2017	Du 20 février 2015 17:00:00 au 12 janvier 2017 12:15:00	Date, température d'air, humidité relative	RT : Toutes les 15 minutes Sans opérations de moyenne
Données météo	TS (AURA) – 26/08/2016 – d'après Landsat 8	26 août 2016 à 10h53	Température de surface	RT : Pour une date donnée RS : 30m

*Données produites dans le cadre du stage

ANNEXE II : Classifications OSGE

Le lycée Chevrollier et ses environs selon la classification d'OSGE (couverture du sol)



Le lycée Chevrollier et ses environs selon la classification d'OSGE (usage du sol)

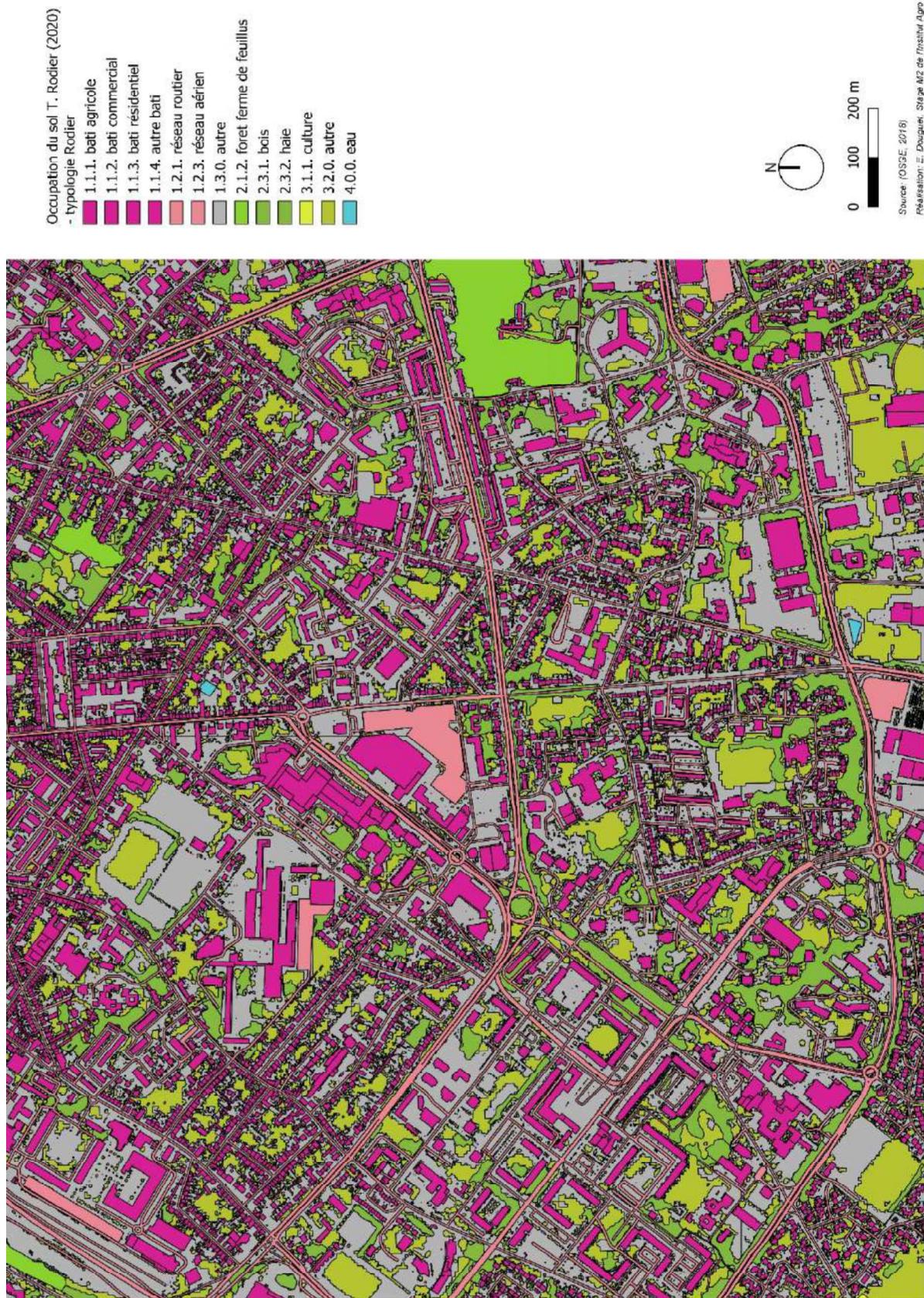


ANNEXE III : Classification utilisée par T. Rodier

Typologie hiérarchique de l'occupation du sol de la base de données de T. Rodier (Rodier,2020)

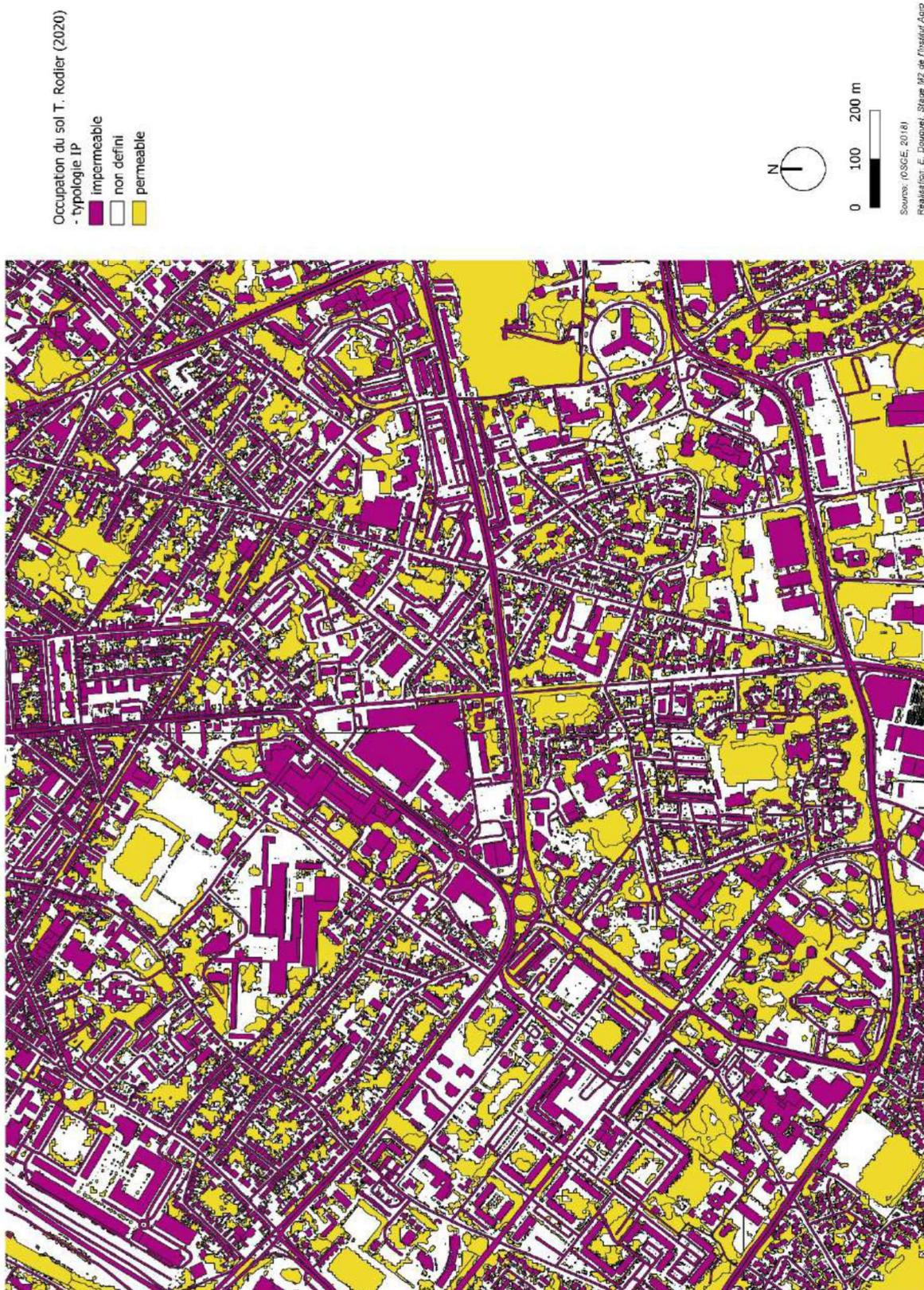
1 ^{er} niveau		2 ^{ème} niveau		3 ^{ème} niveau	
1.	Surfaces non végétalisées	1.1.	Bâti	1.1.1.	Bâti agricole
				1.1.2.	Bâti commercial, industriel ou de service
				1.1.3.	Bâti résidentiel
				1.1.4.	Autre bâti
		1.2.	Voirie	1.2.1.	Réseau routier
				1.2.2.	Réseau ferré
				1.2.3.	Réseau aérien
		1.3.	Autre	1.3.0.	Autre
		2.	Surfaces végétalisées ligneuses	2.1.	Forêt
2.1.2.	Forêt fermée de feuillus				
2.1.3.	Forêt fermée mixte ou ouverte				
2.2.	Formation ligneuse cultivée			2.2.1.	Peupleraie
				2.2.2.	Verger
				2.2.3.	Vigne
2.3.	Autre formation ligneuse			2.3.1.	Bois
				2.3.2.	Haie
				2.3.3.	Lande ligneuse
3.	Surfaces végétalisées non ligneuses	3.1.	Formation herbacée	3.1.1.	Culture
				3.1.2.	Prairie temporaire
				3.1.3.	Prairie permanente
3.2.	Autre	3.2.0.	Autre		
4.	Surfaces en eau	4.0.	Eau	4.0.0.	Eau

Le lycée Chevrollier et ses environs selon la classification de T. Rodier

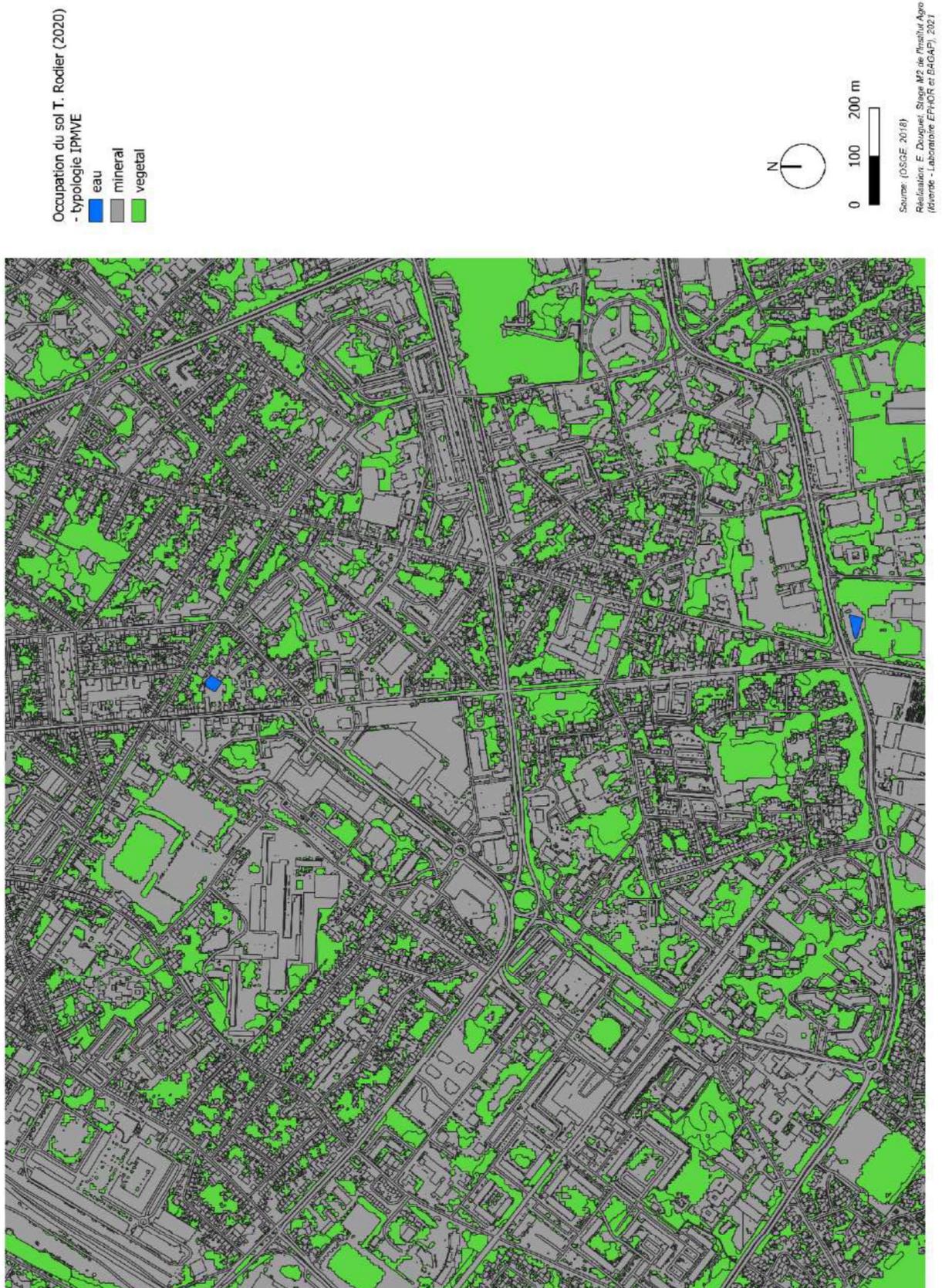


ANNEXE IV : Classification E.Douguet d'après les données combinées par T.Rodier

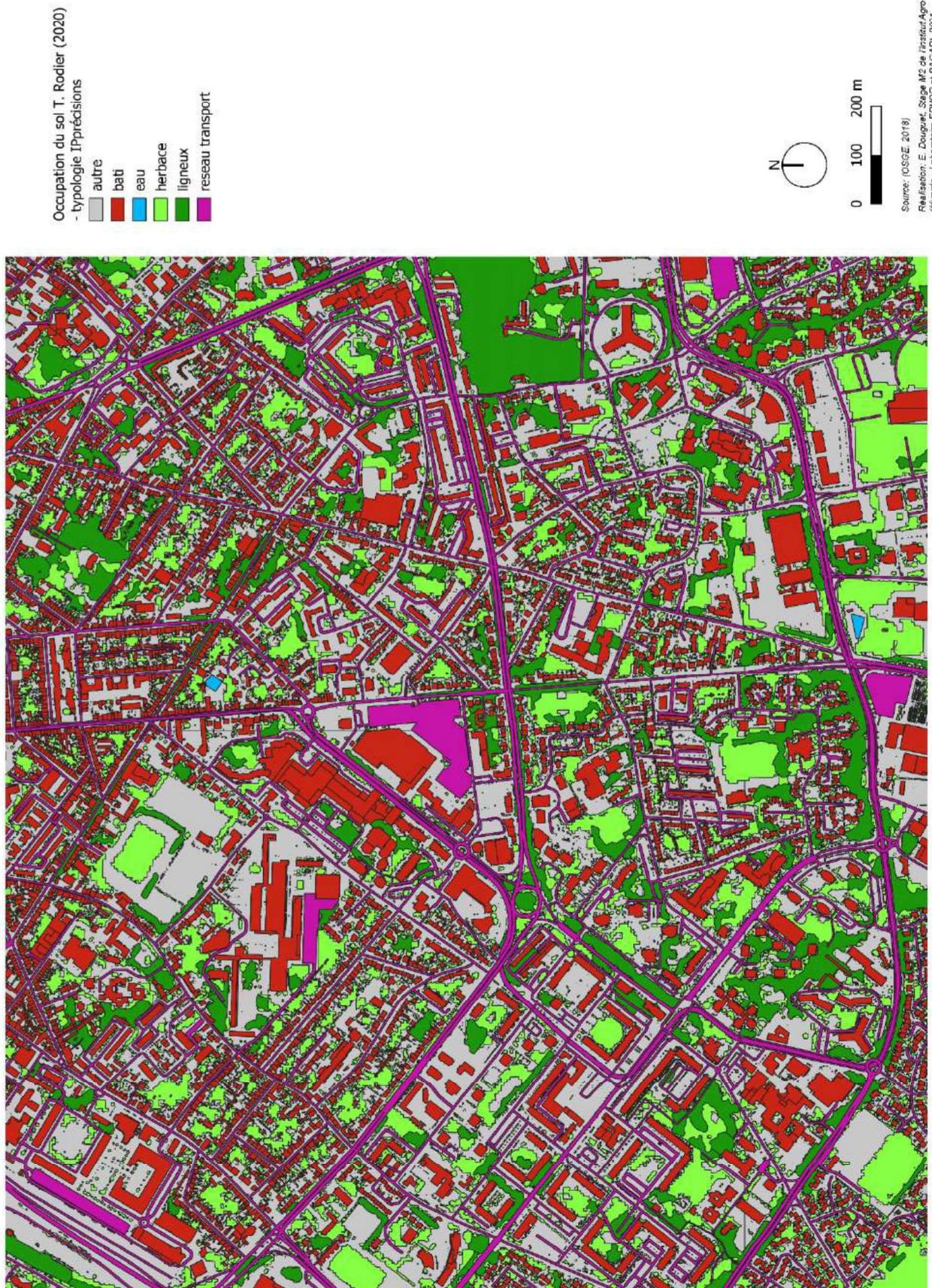
Le lycée Chevrollier et ses environs selon la classification de type IP



Le lycée Chevrollier et ses environs selon la classification de type IP MVE



Le lycée Chevrollier et ses environs la classification de type IP précisions



ANNEXE V : Description de la modélisation empirique (Unger)

A. Création de deux grilles

Création d'une grille de 2000m*11500m composée de carreaux de 500*500m couvrant entièrement la commune d'Angers [QGIS - Créer une grille...]. On nommera la grille « Unger_Grille ».

Création d'une couche Shapefile composée de 7 carreaux de 500*500m possédant chacun en son centre une station Urbio. On nommera cette grille « Unger_Stations_Grille ».

B. Calcul du ratio de la surface en eau

Les données d'occupation du sol de Thomas Rodier sont intersectées selon « Unger_Grille » préalablement créée [QGIS - Intersection]. Un nouveau champ est créé calculant l'aire des nouvelles surfaces intersectées par la grille [QGIS - Calculatrice de champ – « \$area »]. Ouverture de la nouvelle table d'attributs sur Excel, afin de créer un tableau croisé dynamique calculant la somme des surfaces « minéralisé », « eau », « végétalisé » selon l'identifiant de chaque carreau de la grille. La table de correspondance (figure XXX) donne plus de précisions concernant la classification « minéralisé », « eau » et « végétalisé ». Les nouvelles données, enregistrées sous un format texte ouvert (.csv), sont jointes avec la couche « Unger_Grille ». Création d'un nouveau champ calculant le pourcentage de surface en eau pour chaque carreau [QGIS – Calculatrice de champ – « "somme des surfaces en eau pour chaque carreau" / 250000*100 »]. Les données de surface en eau « NULL » ont été remplacées par la valeur « 0 ».

C. Calcul du ratio des zones construites

Comme précédemment un nouveau champ est créé, calculant le pourcentage de surface en de zones construites (« minéralisé ») pour chaque carreau [QGIS – Calculatrice de champ – « "somme des surfaces minéralisées pour chaque carreau" / 250000*100 »].

D. Calcul de la compacité volumétrique pondérée

La couche « bâti » issue de l'IGN est intersectée selon « Unger_Grille » [QGIS - Intersection]. La couche rencontre des erreurs au niveau de la hauteur des bâtiments. Voici les modifications faites :

Nombre d'entités concernées	Hauteur initiale	Hauteur après modification
1523	<1m	1m
1560	NULL	2,5m

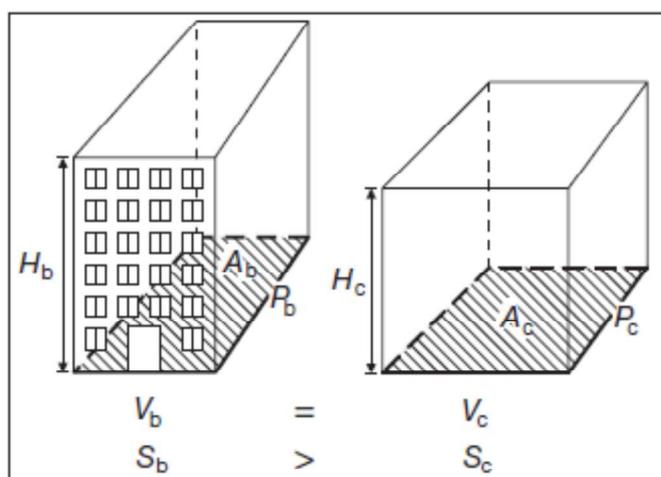
Nombre d'entités concernées	Entités de surface	Après modification
9	0	Entités supprimées

Les valeurs choisies, pour effectuer la modification des données, se fixent selon l'identification d'une dizaine d'entités concernées. 2,5m étant la hauteur approximative d'un bâtiment rez-de-chaussée dédié au logement.

Un nouveau champ est créé calculant l'aire des nouvelles surfaces intersectées par la grille [QGIS - Calculatrice de champ – « \$area »]. Ouverture de la nouvelle table d'attributs sur Excel, afin de créer un tableau croisé dynamique calculant la somme des surfaces selon l'identifiant de chaque carreau de la grille que l'on nommera « area ». Les nouvelles données, enregistrées sous un format texte ouvert (.csv), sont jointes avec la couche « Unger_Grille ».

Création de 5 nouveaux champs :

Abréviation	Nom complet	Formule
Sb	Surface du bâtiment	("area" * "hauteur") - "area"
Vb	Volume du bâtiment	"area" * "hauteur"
a	Longueur d'une arête du cube virtuel	("Vb") ^ (1/3)
Sc	Surface d'un cube virtuel	5*("a" ^ 2)
C'	Valeur lambda facilitant le calcul	((("Sb" / "Sc") * "Vb")



Source : (Rodier, 2020)

L'ouverture sur Excel de la nouvelle table attributaire contenant C' a permis grâce à un tableau croisé dynamique de calculer Cv. Cv correspond à la compacité volumétrique pondérée soit la somme de C' pour chaque carreau. Les nouvelles données enregistrées sous un format texte ouvert (.csv) sont jointes avec la couche « Unger_Grille ».

E. Calcul de la différence de température sur l'année

Suite aux calculs précédents, la différence de température (ΔT) est calculée grâce à la formule « $\Delta T = 1.332 \cdot 10^{-2} \cdot B + 1.045 \cdot 10^{-7} \cdot C_v + 1.082 \cdot 10^{-2} \cdot W + 0.809$ ».

Chaque indicateur (ΔT , B, Cv et W) doit respecter un intervalle de valeurs afin que le modèle soit respecté (Voir Figure INT VALEURS). Les 102 carreaux dont les indicateurs ne respectent pas ces intervalles ne sont donc pas étudiés.

Pour connaître les différences de températures autour des stations météo URBIO, les mêmes étapes B, C, D, E sont réalisées avec, cette fois ci, des intersections avec « Unger_Stations_Grille » au lieu de « Unger_Grille ».

ANNEXE VI : Localisation des stations

Localisation des stations Météo (Source : E. Douguet)



ANNEXE VII : Artificialisation des sols de la commune de Beaucozé

La station Météo France dans un contexte d'artificialisation des sols de la commune de Beaucozé
(Remonter le temps, s. d.)



ANNEXE VIII : Illustrations des stations

Illustration de la station Météo France de Chevrollier (10/06/2021 - Emma Douguet)

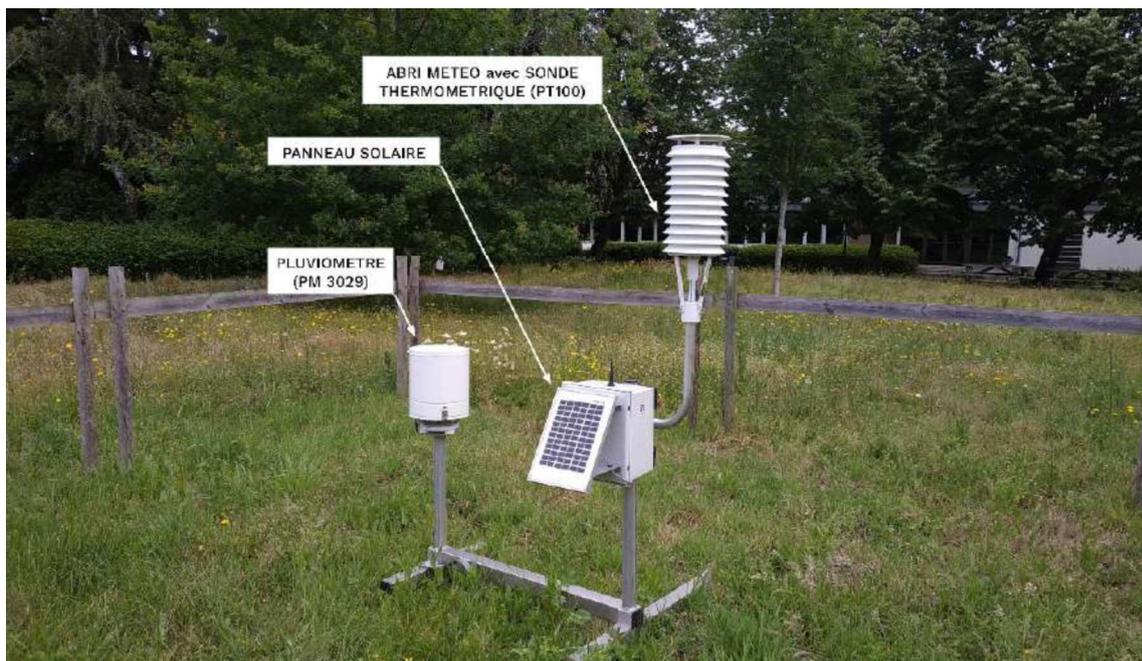
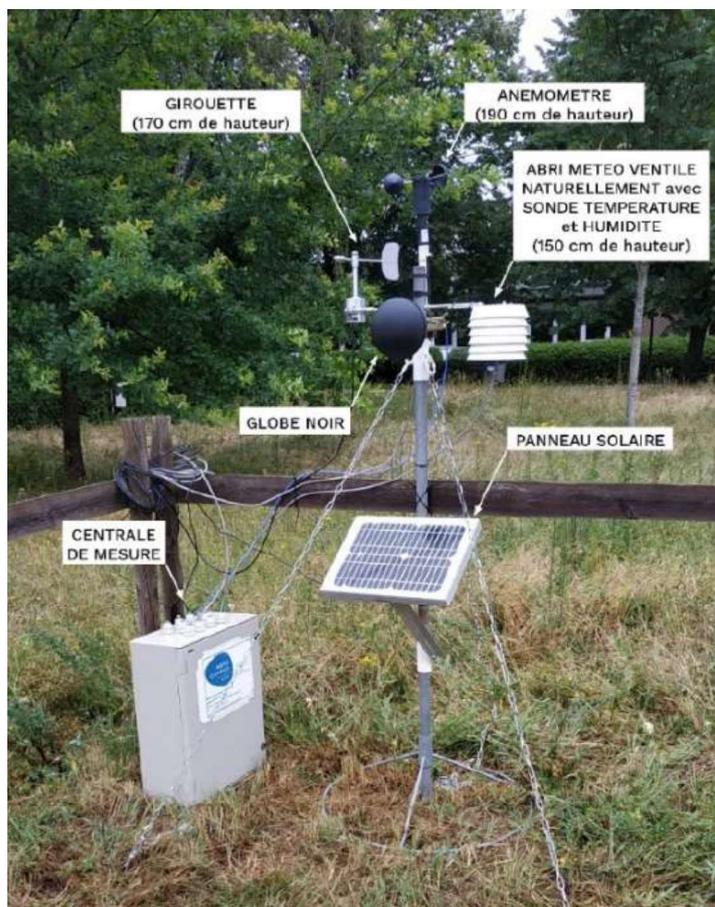


Illustration de la station de l'Institut Agro installée à Chevrollier (18/06/2021 – Emma Douguet)



Manuel du constructeur Station Heat Shield



www.lsi-lastem.it

LSI LASTEM S.r.l.
Via Ex S.P. 161 Dossò, n.8 - 20090 Settala (Piemonte) (MI) - Italia
Tel.: (+39) 02 95 41 41 **WEB:** <http://www.lsi-lastem.it>
Fax: (+39) 02 95 77 05 04 **CF/P. Num. (VAT):** IT-04407590150
e-mail: info@lsi-lastem.it **REA:** (100652) **Reg. Imprese:** (MI)0000170



Heat Shield

User's manual

1.2 Instruments description

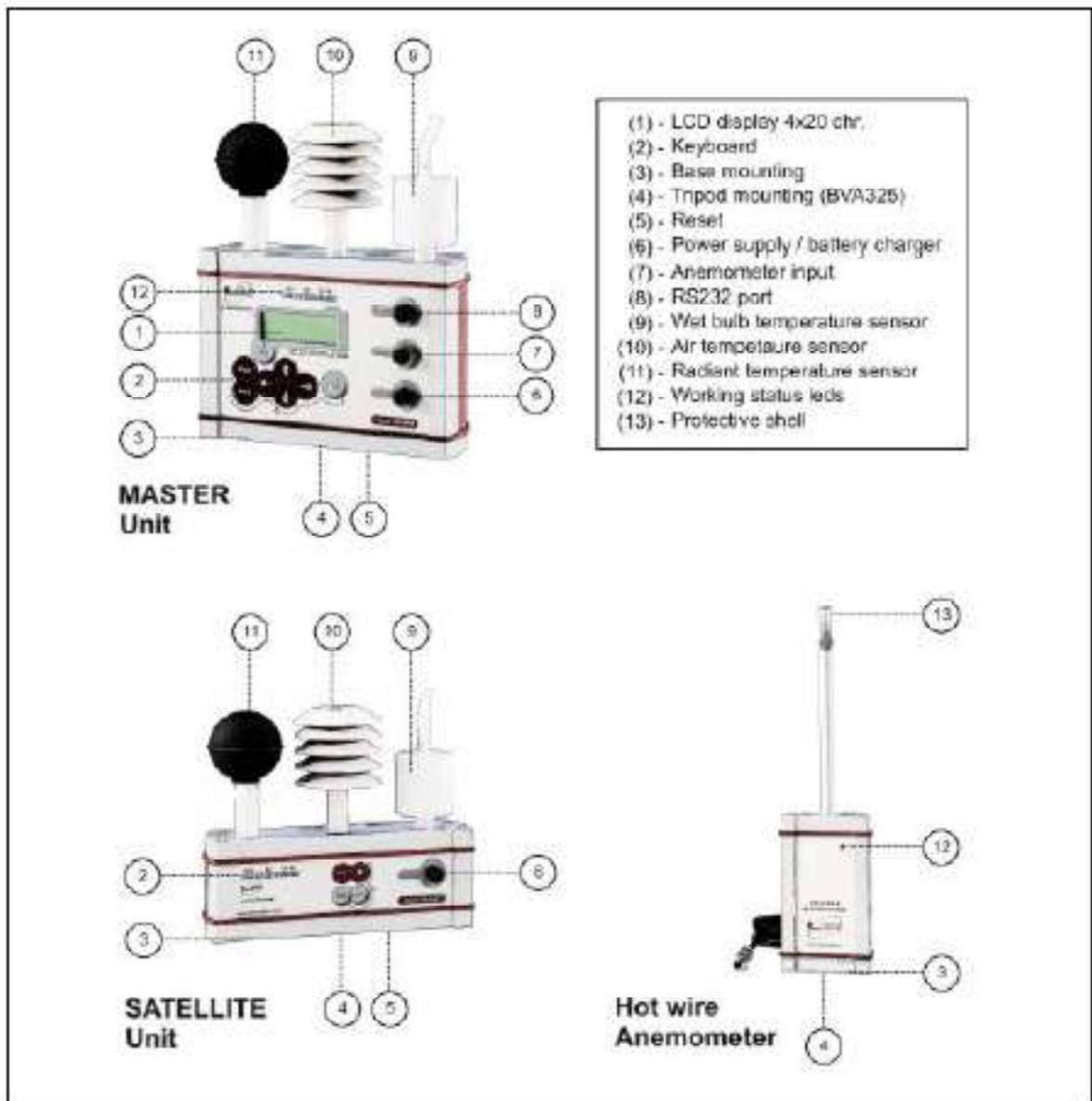


Fig. 1 – Instruments description.

ANNEXE IX : Descriptions des sites des stations URBIO

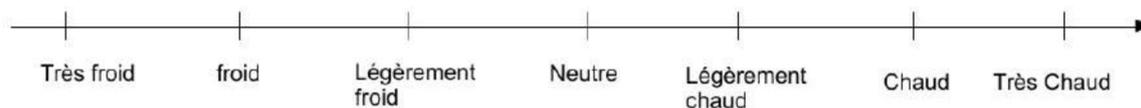
	PHOTOGRAPHIE	PHOTOGRAPHIE AERIENNE
URBIO 1		
URBIO 2		
URBIO 3		
URBIO 4		
URBIO 5		
URBIO 6		
URBIO 7		

Source: Google Maps

ANNEXE X : Etude du confort thermique

Questionnaires transmis aux participants

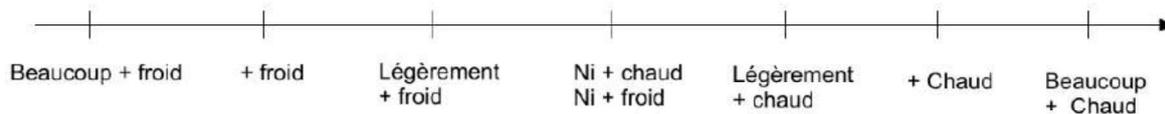
Echelle de perception (sensation thermique) : Comment vous sentez-vous ?



Echelle évaluative (confort) : Comment trouvez-vous cela ?



Echelle de préférence : Comment préféreriez-vous être maintenant ?



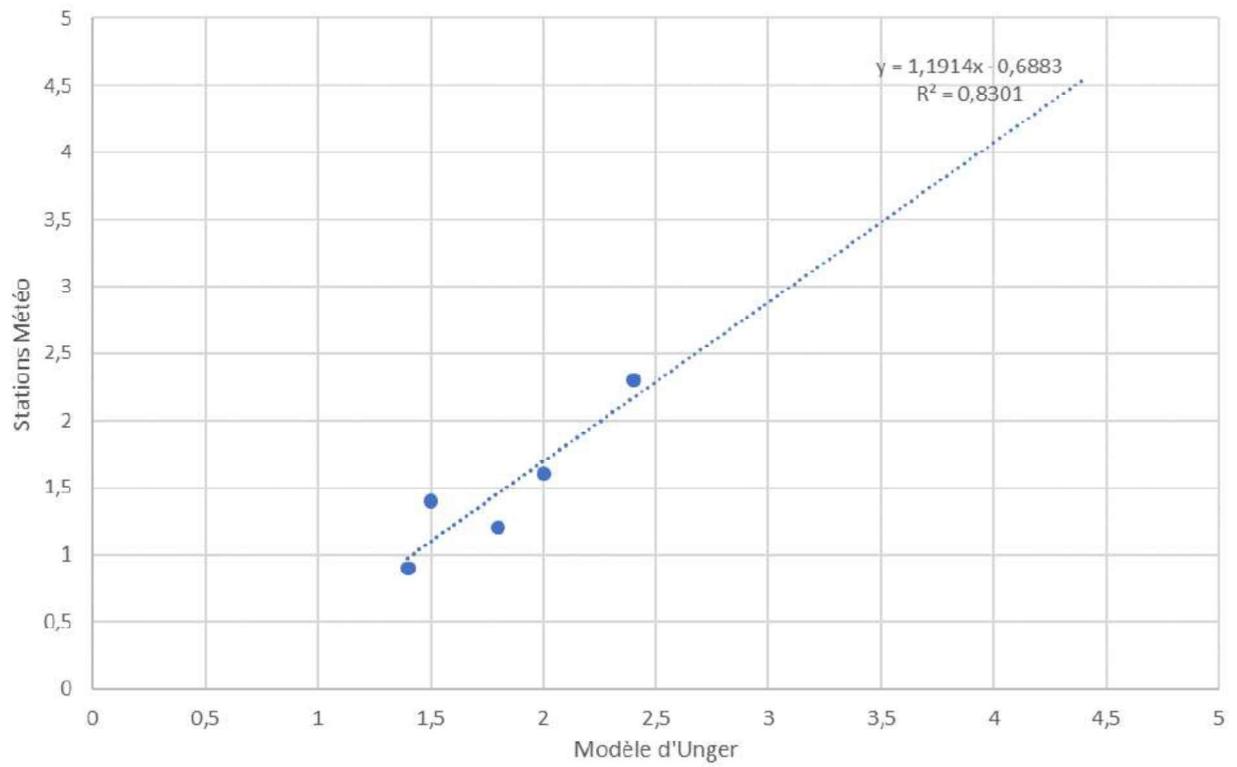
Herpin, S (2020). *Cours de climat urbain et qualité de l'air*. Agrocampus Ouest. Chapitre sur le confort thermique

Emissivité et albédo des différents matériaux, utilisés par le modèle SOLWEIG

	Albédo	Emissivité
Roofs(buildings)	0.18	0.95
Dark asphalt	0.18	0.95
Cobble stone	0.20	0.95
Water	0.05	0.98
Grass unmanaged	0.16	0.94
bare soil	0.25	0.94
Walls	0.20	0.90

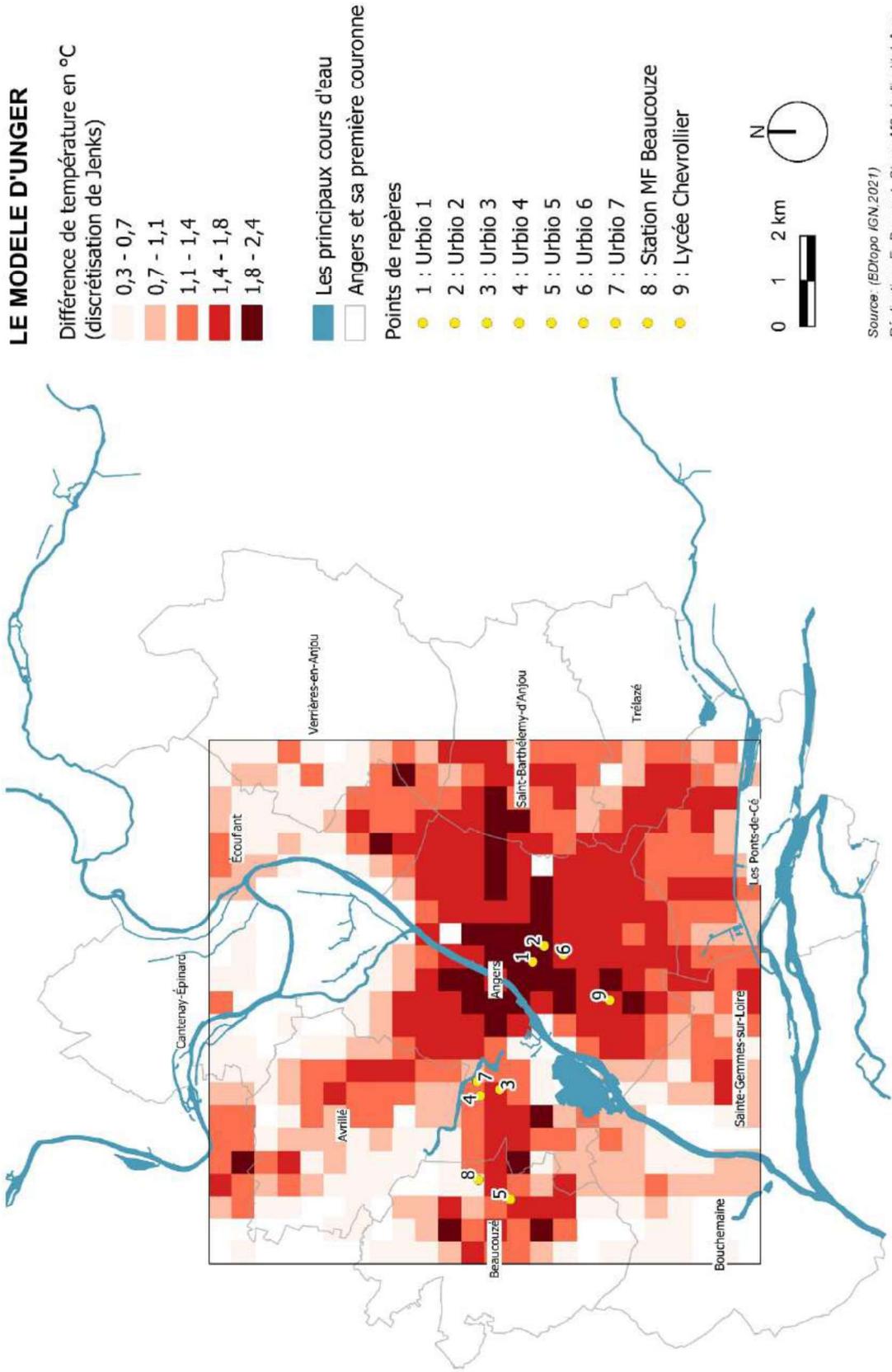
ANNEXE XI : Droite de régression du modèle d'Unger

Droite de régression permettant de calibrer le modèle d'Unger



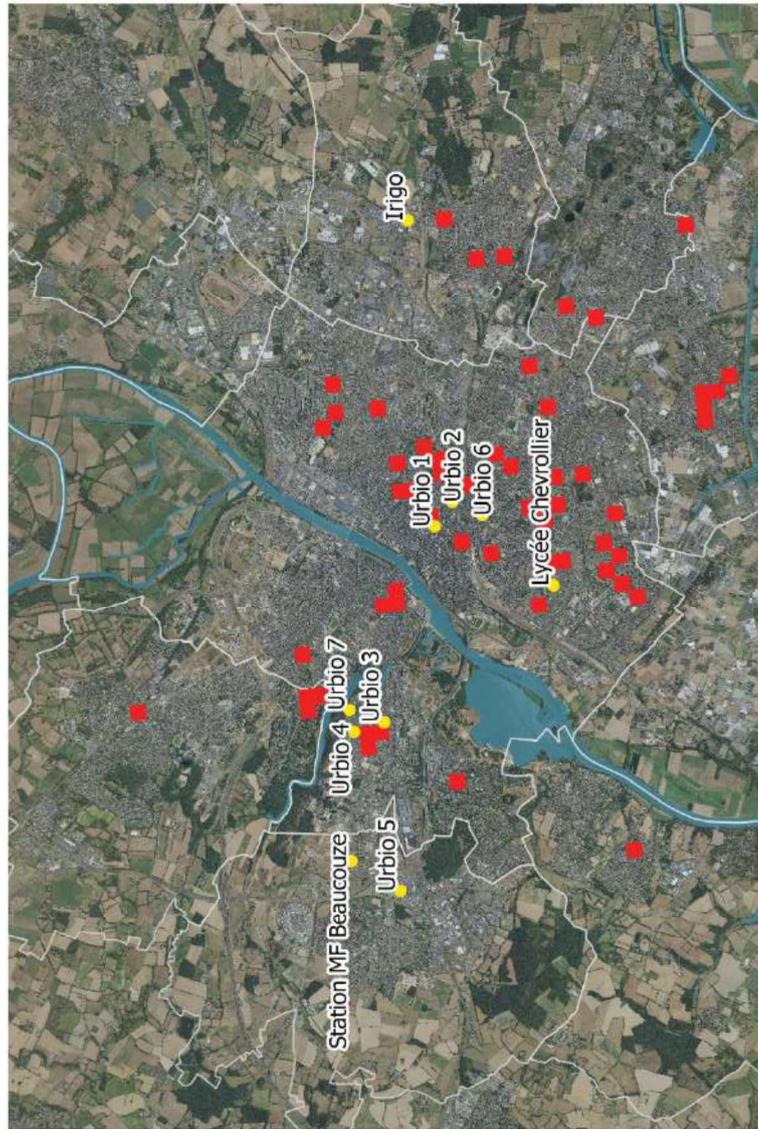
ANNEXE XII : L'intensité annuelle de l'ICU sur la commune d'Angers selon le modèle d'Unger corrigé

DIFFERENCE DE TEMPERATURE SELON LE MODELE D'UNGER CORRIGE - ANGERS



ANNEXE XIII : Sensibilité de la population angevine et ses indicateurs de sensibilité

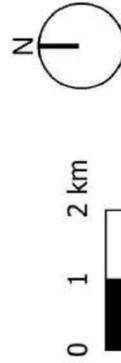
SITES OÙ LA POPULATION EST SENSIBLE À LA CHALEUR - ANGERS



DES SITES SENSIBLES - UN DEFI

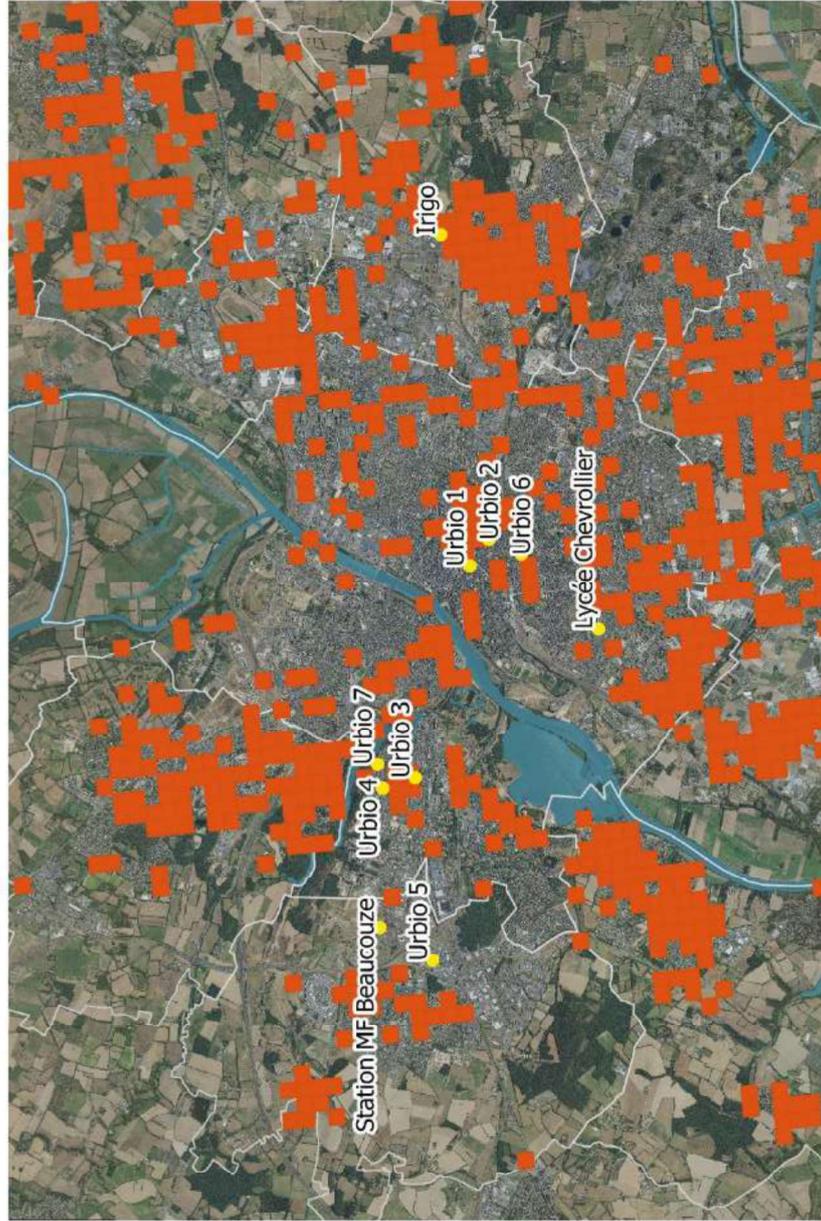
- Facteurs de sensibilité à la chaleur
- plus de 23% de personnes de plus de 65ans
 - plus de 27% de personnes seules
 - plus de 3550 individus par km²
 - plus de 50% de logements construits entre 1945 et 1989

- Stations météo
- Les principaux cours d'eau
- Angers et sa première couronne



Source : (BDOrtho, 2017)
 Réalisation : E. Douguet, Stage M2 de l'Institut Agro (Idverde - Laboratoire EPHOR et BAGAP), 2021

SITES OÙ LE NOMBRE DE PERSONNES DE PLUS DE 65 ANS EST IMPORTANT - ANGERS



DES SITES SENSIBLES - UN DEFI

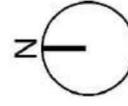
Pourcentage d'individus de plus de 65 ans
(discrétisation par quantile)

[23;77]% par carreau

Stations météo

Les principaux cours d'eau

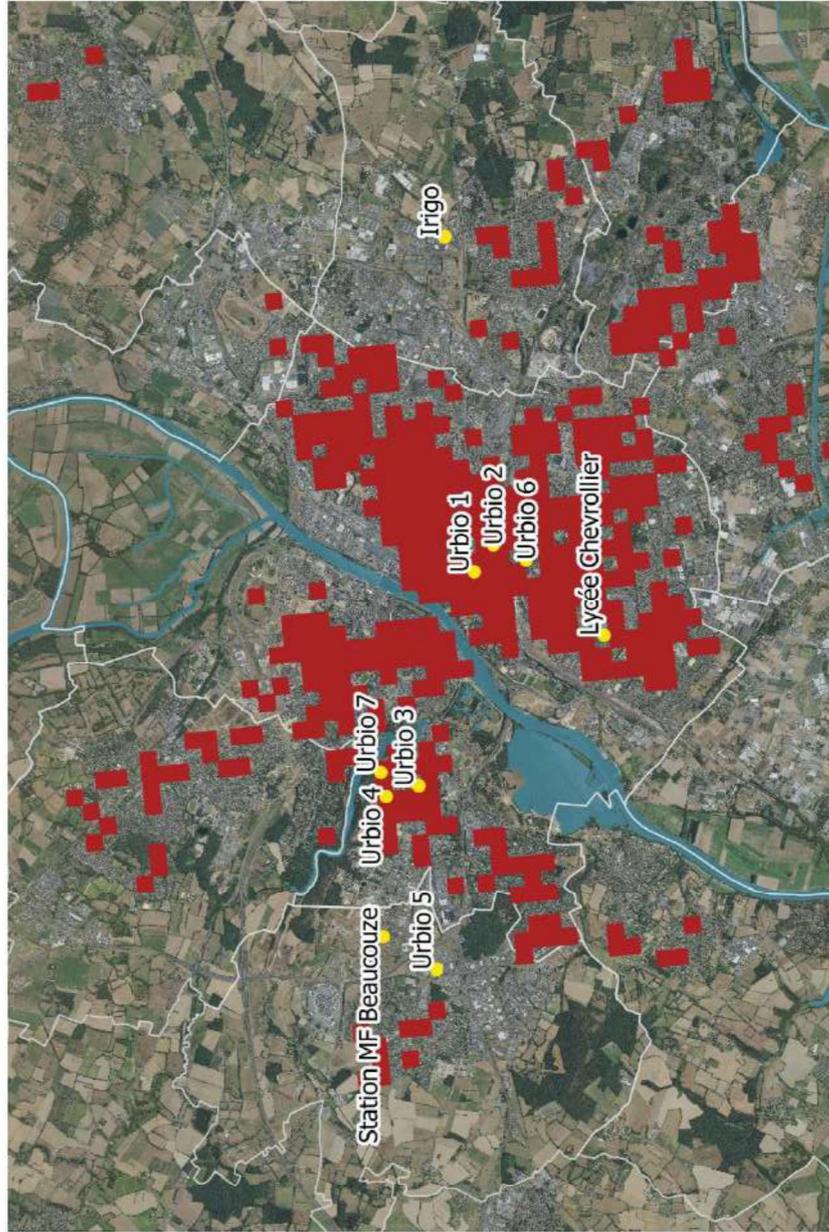
Angers et sa première couronne



Source : (BDOrtho, 2017)

Réalisation : E. Douguet, Stage M2 de l'Institut Agro
(dverde - Laboratoire EPHOR et BAGAP), 2021

SITES DENSEMENT PEUPLÉS - ANGERS



DES SITES SENSIBLES - UN DEFI

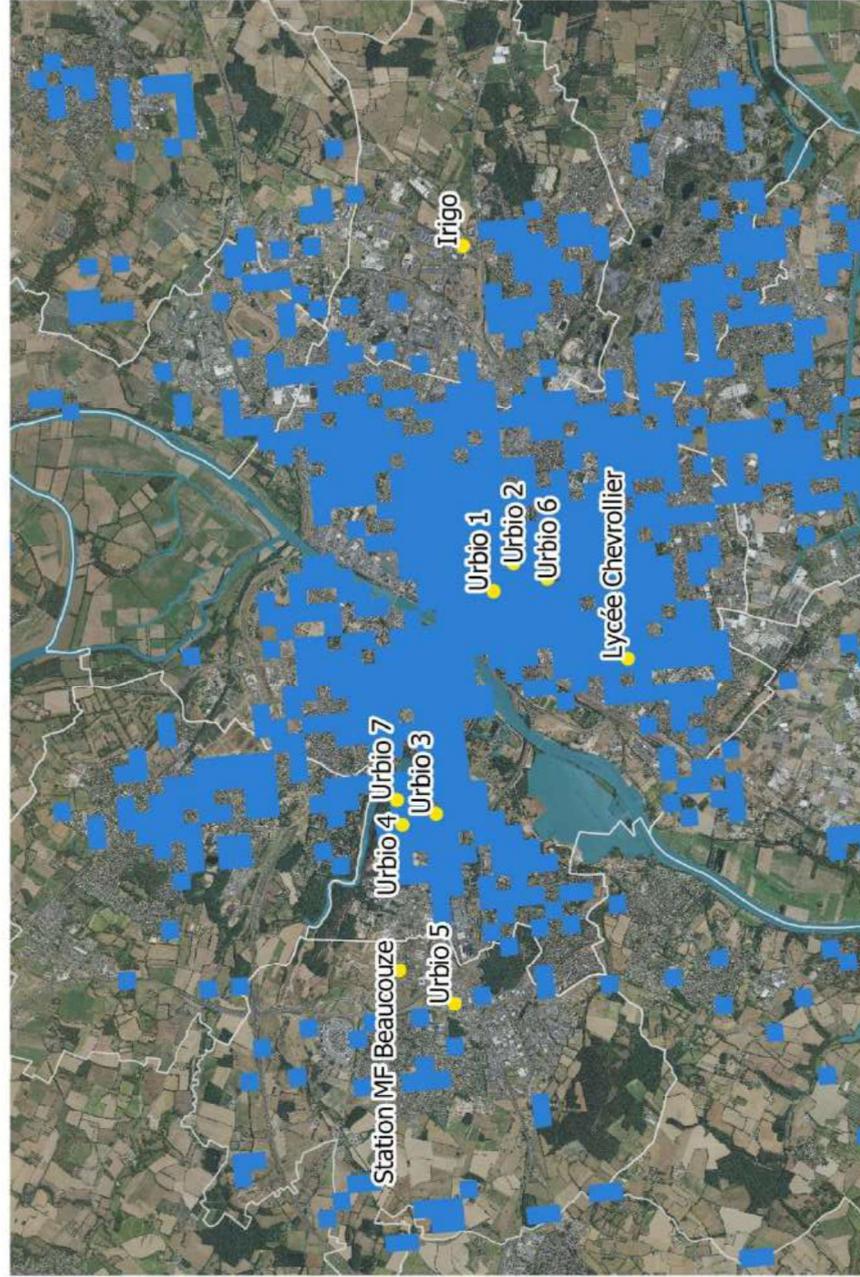
Densité de population
(discrétisation par quantile)
[3550;22425] individus par km²

- Stations météo
- Les principaux cours d'eau
- Angers et sa première couronne



Source: (BDOrtho, 2017)
Réalisation: E. Douguet, Stage M2 de l'Institut Agro
(Idverde - Laboratoire EPHOR et BAGAP), 2021

SITES OÙ LE NOMBRE DE PERSONNES SEULES EST IMPORTANT - ANGERS



DES SITES SENSIBLES - UN DEFI

Pourcentage d'individus vivant seuls
(discretisation par quantile)
■ [27 ; 94]% par carreau

● Stations météo

■ Les principaux cours d'eau

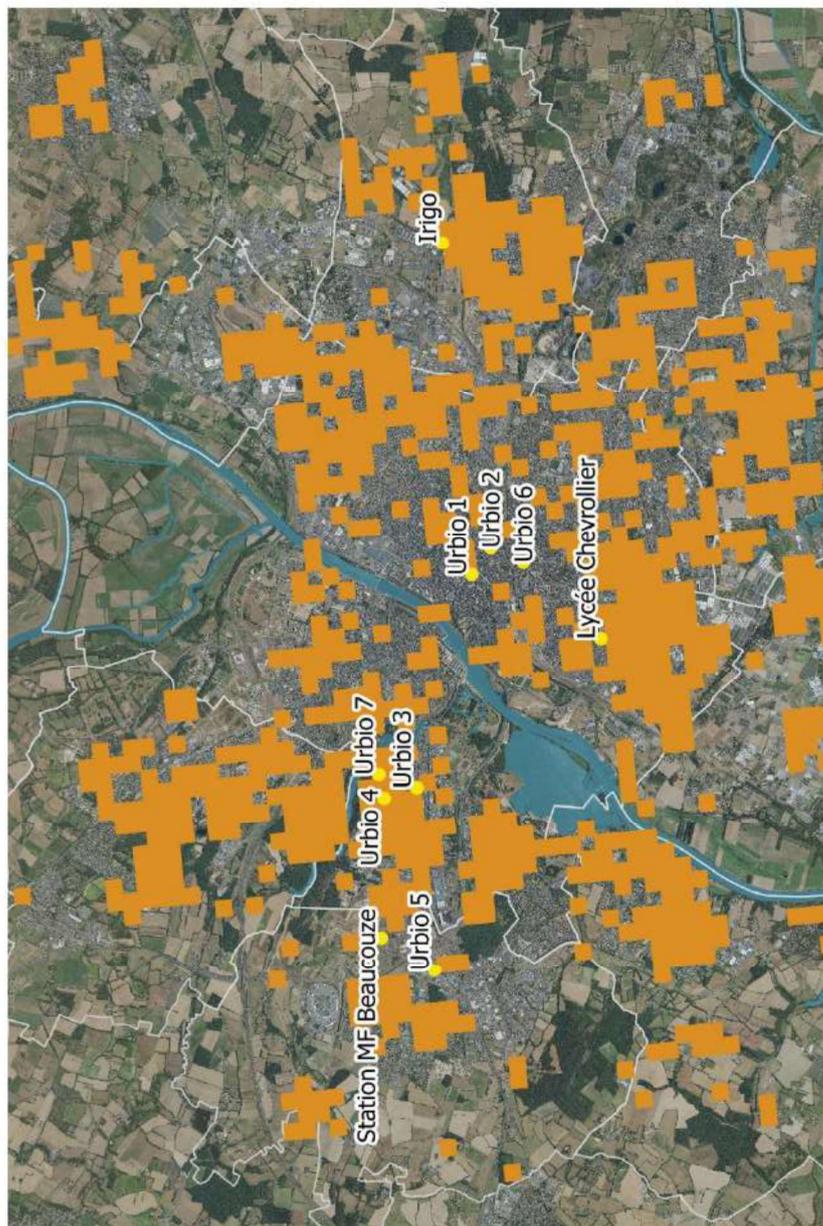
□ Angers et sa première couronne



Source: (BDOrtho, 2017)

Réalisation: E. Douguet, Stage M2 de l'Institut Agro
(Idverde - Laboratoire EPHOR et BAGAP), 2021

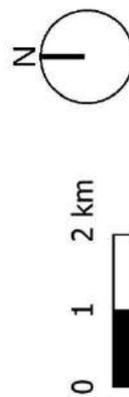
SITES OÙ LE NOMBRE DE LOGEMENTS CONSTRUITS ENTRE 1945 et 1989 EST IMPORTANT - ANGERS



DES SITES SENSIBLES - UN DEFI

Pourcentage de logements construits entre 1945 et 1989 (discrétisation par quantile)
[50 ; 100]% par carreau

- Stations météo
- Les principaux cours d'eau
- Angers et sa première couronne

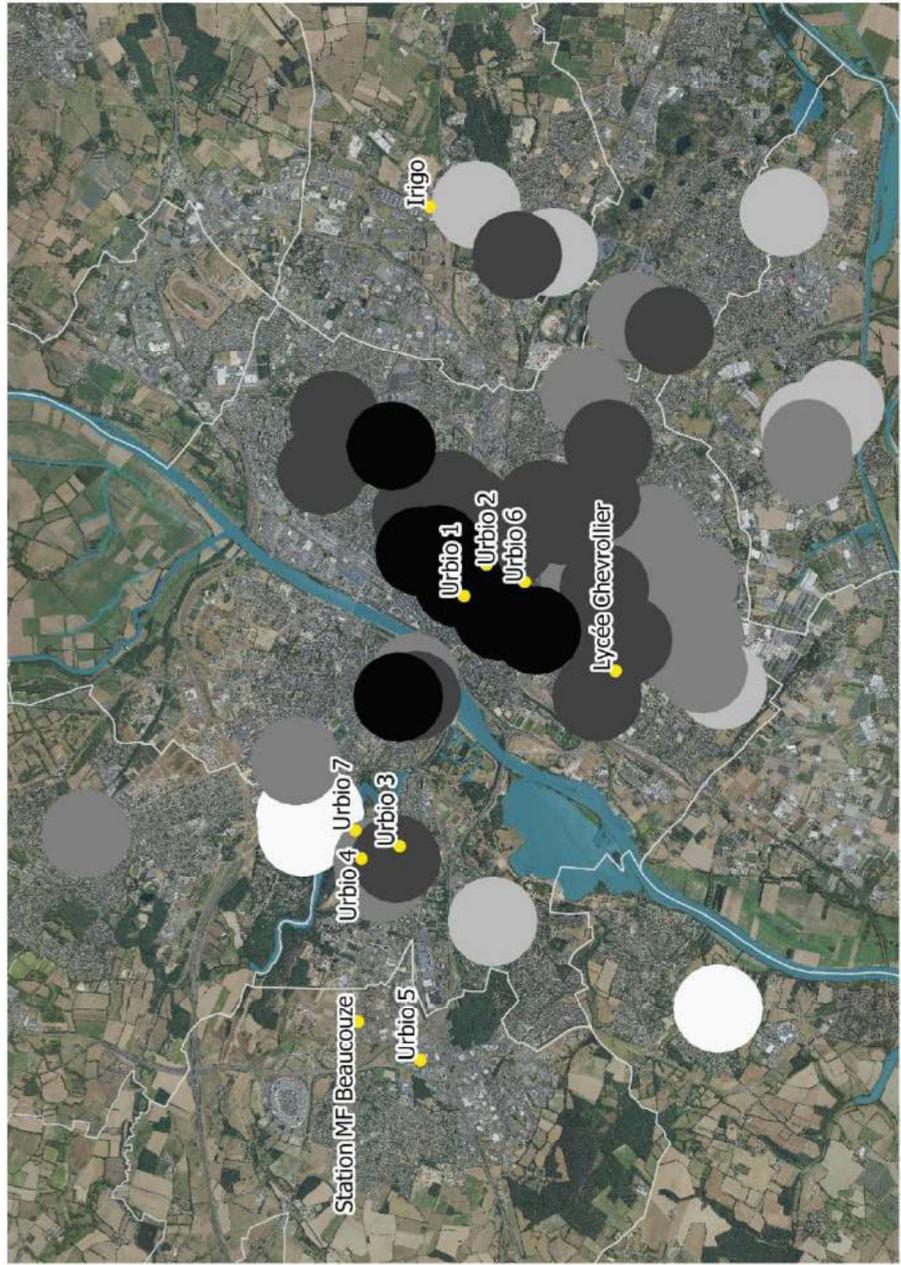


Source: (BDOrtho, 2017)

Réalisation: E. Douguet, Stage M2 de l'Institut Agro (Idverde - Laboratoire EPHOR et BAGAP), 2021

ANNEXE XIV : Capacité à faire face de la population sensible

IMPORTANCE DES ZONES MINÉRALES CONTRAIGNANT LA CAPACITÉ À FAIRE FACE À LA CHALEUR



OCCUPATION DU SOL POUR UNE POPULATION SENSIBLE À LA CHALEUR

Pourcentage de minéral dans un rayon de 500m

- [34 ; 44]
- [44 ; 65]
- [65 ; 73]
- [73 ; 81]
- [81 ; 89]

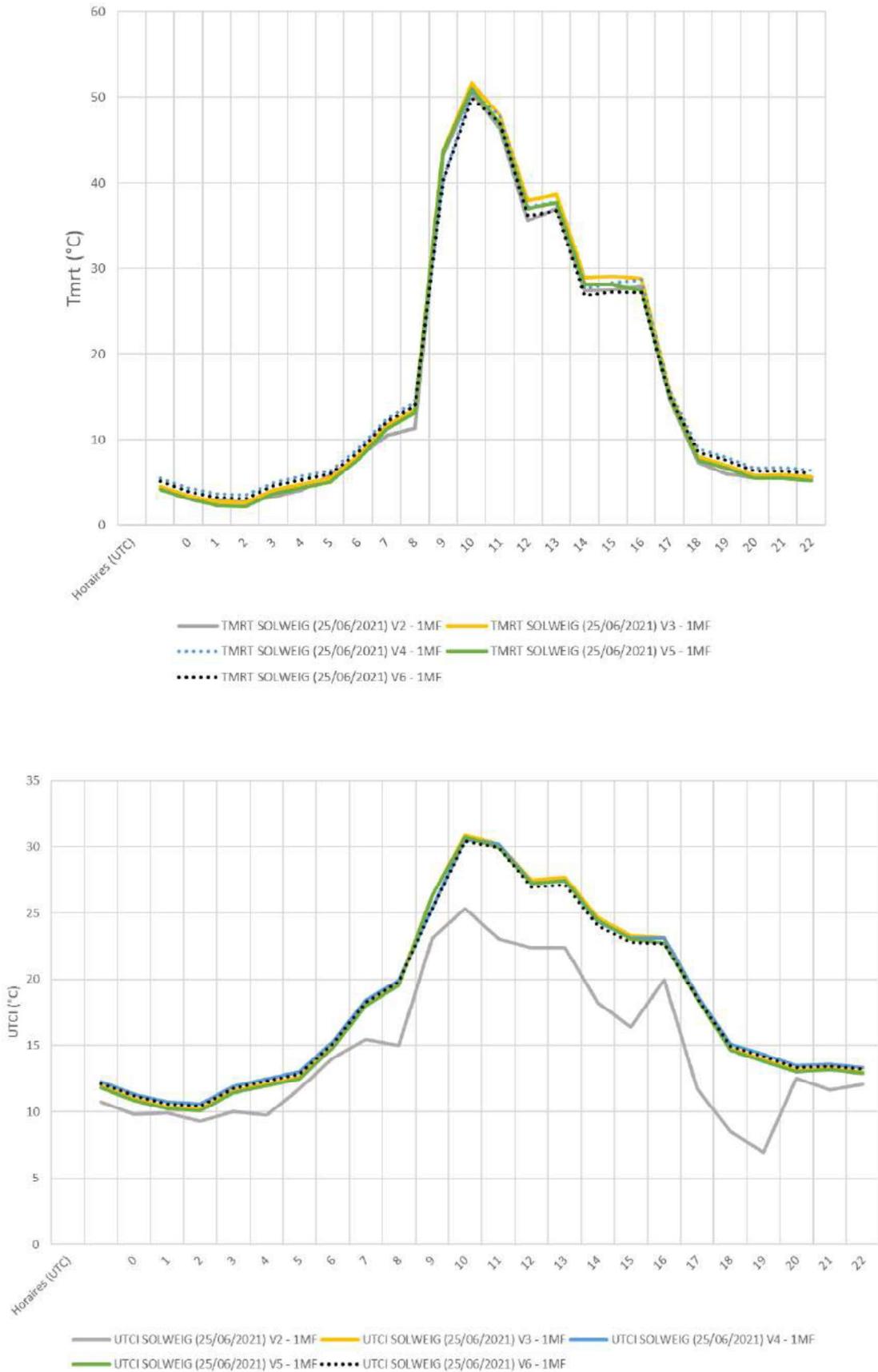
- Angers et sa première couronne
- Les principaux cours d'eau
- Stations météo

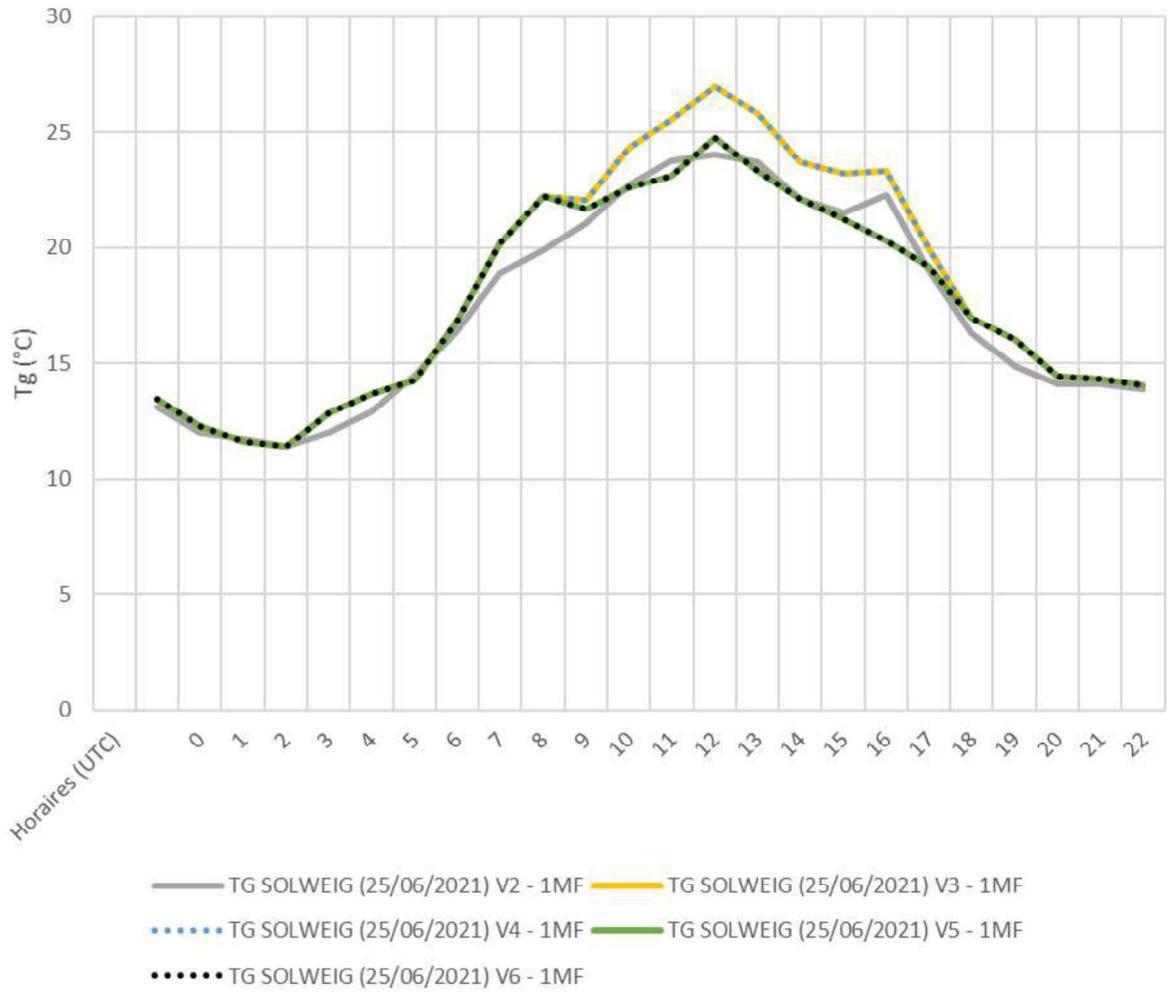


Source : (BDOortho, 2017)
 Réalisation : E. Dougnet, Stage M2 de l'Institut Agro (Idiverde - Laboratoire EPHOR et BAGAP), 2021

ANNEXE XV : Evolution sur la journée du 25 juin 2021 (Tg, Tmrt et UTCI)

Evolution sur la journée de la température de globe, de la température moyenne radiante et de l'UTCI pour le site 1MF





ANNEXE XVI : Modification du Tmrt selon les scénarios de végétalisation

*Modification du TMR selon différents scénarios d'aménagement - Lycée Chevrollier
(Source : E.Douguet)*

ID SITES (Numéro du site)	1MF (8)	3TB (9)	2P (10)	4PK (14)	5AA (17)	6BS (13)
S1	0	0	-0,5	-24,34	0	0
S2	0	0	0	0	-0,48	0
S3	0	0	0	0	0	-0,55

 	Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage Spécialité : Paysage Spécialisation / option : Paysage : opérationnalité et projets Enseignant référent : Gilles Galopin
Auteur(s) : Emma Douguet Date de naissance* : 14/11/1998	Organisme d'accueil : Idverde Adresse : 2 rue Henri Farman, 44360 Vigneux-de-Bretagne Maître de stage : Sophie Herpin, Véronique Beaujouan (Institut Agro)
Nb pages : 45 Annexe(s) : 29	
Année de soutenance : 2021	
Titre français : Choisir les sites minéraux urbains à végétaliser en priorité, pour améliorer le confort thermique des habitants et réduire les risques sanitaires face aux vagues de chaleur	
Titre anglais : Choosing the urban mineral sites to plant in order to improve the thermal comfort of inhabitants and reduce the health risks	
<p>Le dérèglement climatique est un sujet d'actualité qui va marquer nos vies dans les prochaines années. Nous pouvons déjà observer des événements climatiques intenses de plus en plus fréquents (inondations, feux de forêt, canicules, gels). Les espaces urbains vont être particulièrement touchés par l'augmentation des vagues de chaleur dont les conséquences pour l'homme, la faune et la flore sont graves voir mortelles. Il est nécessaire d'adapter dès-maintenant ces espaces afin qu'ils soient plus résilients. Il s'agit donc, par exemple, de choisir les sites minéraux urbains à végétaliser en priorité pour améliorer le confort thermique des habitants et réduire les risques sanitaires face aux vagues de chaleur. L'étude se base ici sur la ville d'Angers, située dans le Maine et Loire à l'Ouest de la France métropolitaine. Grâce aux études existantes, il a été possible de déterminer la population angevine la plus vulnérable aux vagues de chaleur. Ces données ont ensuite été croisées avec l'exposition aux îlots de chaleur, afin de connaître les sites les plus à risque. Le confort thermique étudié sur le site du lycée Chevrollier met en avant un constat net. L'occupation du sol, la présence ou non de bâtiments et d'arbres, la densité et la hauteur de ces derniers ainsi que la circulation du vent sont autant d'éléments influençant le confort thermique d'un humain. L'ensemble des méthodes utilisées dans cette étude, peuvent être mobilisées dans le cas d'une autre ville française avec néanmoins une campagne de mesure météorologique.</p>	
<p>Climate change will affect our lives in the coming years. We can already observe more and more frequent intense climatic events (floods, forest fires, heat waves, frosts). Urban areas will be particularly affected by the increasing rate of heat waves, which can have fatal consequences for humans, fauna and flora. It is necessary to adapt these areas now, so they could be more resilient. This means, for example, choosing the urban mineral sites to plant in order to improve the thermal comfort of inhabitants and reduce the health risks. The study is based here on the city of Angers, located in the Maine et Loire in western France. Thanks to existing studies, it was possible to determine the most vulnerable population to heat waves in Angers. Then, these data were cross-referenced with the exposure to heat islands in order to identify the sites most at risk. The thermal comfort study conducted on the Chevrollier high school site highlights a clear observation. The elements influencing the thermal comfort of a human being are for example, the occupation of the ground, the wind circulation, the presence or absence of buildings and trees and their density and height. All the methods used in this study can be used in the case of another French city with a meteorological measurement campaign.</p>	
Mots-clés : îlot de chaleur urbain (ICU), risque sanitaire, vulnérabilité, confort thermique Key Words: urban heat island (UHI), health risk, vulnerability, thermal comfort	

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires