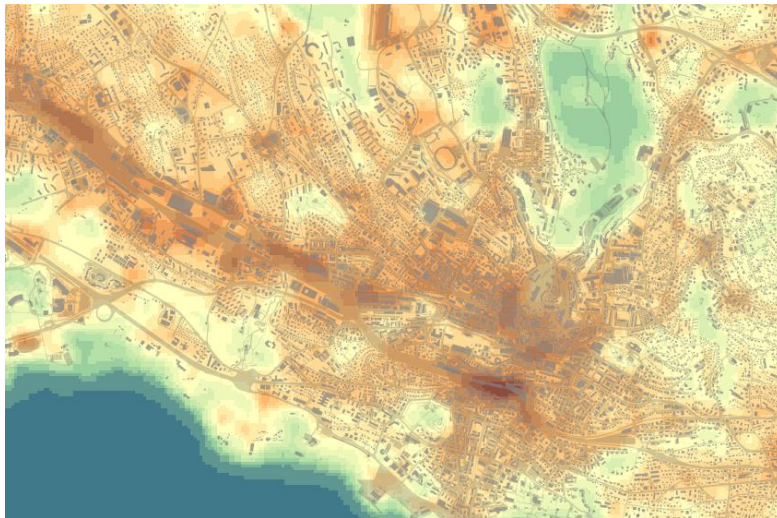


Ilots de chaleur urbains & végétation : Diagnostic et potentiels de réversibilité
Le cas de Lausanne

Coline Bovay

Sous la direction du Dre Muriel Delabarre, MER, et du Dr Christian Kaiser, MER
Sous l'expertise du Dr Jean-Michel Fallot, MER



Ce travail n'a pas été rédigé en vue d'une publication, d'une édition ou diffusion. Son format et tout ou partie de son contenu répondent donc à cet état de fait. Les contenus n'engagent pas l'Université de Lausanne. Ce travail n'en est pas moins soumis aux règles sur le droit d'auteur. A ce titre, les citations tirées du présent mémoire ne sont autorisées que dans la mesure où la source et le nom de l'auteur·e sont clairement cités. La loi fédérale sur le droit d'auteur est en outre applicable.

Illustration de couverture

Températures de surface moyennes durant l'été 2019 à Lausanne (Voir page 74) – Coline Bovay, 2020

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire et qui m'ont aidée de près ou de loin lors de sa rédaction.

Je voudrais dans un premier temps remercier ma directrice de mémoire, Dre. Muriel Delabarre, et mon directeur de mémoire, Dr. Christian Kaiser, pour leur expertise et leurs judicieux conseils qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie également Claude Thomas, Fanny Falconnet et Michaël Rosselet qui m'ont accordé de leur temps pour des entretiens et qui m'ont offert un précieux aperçu des enjeux lausannois en termes d'îlot de chaleur urbains.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à Julie, Alexis, Jason et mon papa, pour leur temps, leur savoir-faire et leur esprit vif et curieux. Merci également à Lucien pour sa connaissance des terrains de sport extérieurs de toute la région. Leur aide m'a confirmé que la discussion, le partage et l'interdisciplinarité sont indispensables pour avancer.

Un immense merci pour les formidables relectures et la bienveillance sans faille de Julie et de ma maman.

Merci à Romaine, Ligaya, Nelia et l'AEGE, pour leur soutien et surtout pour les rires indispensables.

Merci à mes parents et à mes sœurs. Pour tout.

Et parce que je ne la remercierai jamais assez : encore merci à Julie !

Résumé

Dans le contexte du changement climatique global, les villes peuvent être touchées par le phénomène d'îlots de chaleur urbains (ICU) qui génère des différences de température pouvant être supérieures à 10°C entre une ville et la région rurale adjacente. Les impacts et enjeux des ICU sur les systèmes urbains sont nombreux et questionnent ainsi les stratégies pour y faire face. Ce travail a pour but d'identifier la présence des ICU sur le territoire lausannois, de comprendre leur distribution spatiale en fonction des formes végétales urbaines présentes et de suggérer des pistes afin d'en diminuer l'effet. La méthode utilisée, mobilisant la télédétection, permet d'établir un premier diagnostic de l'effet d'ICU sur le territoire lausannois en le quantifiant et en établissant sa corrélation avec le NDVI. Les approches du projet urbain et de l'urbanisme végétal permettent d'analyser et de proposer des implantations de formes végétales sur les secteurs sujets aux effets d'ICU. Le besoin de politiques climatiques locales contextualisées et intégrant des stratégies d'adaptation est toutefois nécessaire pour exploiter les potentiels de réversibilité des espaces urbains au mieux.

Mots-clés

Changement climatique | Îlots de chaleur urbains | Ecologie urbaine | Adaptation | Végétation | Urbanisme végétal | Projet urbain | Réversibilité | Cartographie thermique | Télédétection | Lausanne

Table des matières

| | |
|--|----|
| Liste des abréviations et acronymes..... | 1 |
| Introduction..... | 1 |
| PREMIÈRE PARTIE – CHANGEMENT CLIMATIQUE, VILLE & NATURE..... | 5 |
| 1 Des problématiques climatiques et urbaines au projet urbain..... | 5 |
| 1.1 Changement climatique..... | 5 |
| 1.2 Système et métabolisme urbain..... | 8 |
| 1.3 Stratégies de réponse face aux enjeux climatiques et urbains..... | 9 |
| 1.3.1 Politiques d’atténuation et d’adaptation..... | 9 |
| 1.3.2 Résilience et ingénierie écologique..... | 11 |
| 1.3.3 Projet urbain et notion de réversibilité comme leviers d’action..... | 12 |
| 2 Ville et nature..... | 16 |
| 2.1 Ecologie(s) urbaine(s)..... | 16 |
| 2.2 Urbanisme végétal..... | 19 |
| 2.2.1 Urbanisme végétal et espace public..... | 21 |
| 2.2.2 Urbanisme végétal, qualité urbaine et habitabilité..... | 22 |
| 2.3 Nature(s) urbaine(s)..... | 23 |
| 2.3.1 Rôles de la végétation en milieu urbain..... | 24 |
| 2.3.2 Formes végétales urbaines..... | 26 |
| Résumé première partie..... | 30 |
| DEUXIÈME PARTIE – ILOTS DE CHALEUR URBAINS & STRATÉGIES..... | 31 |
| 3 Ilots de chaleur urbains (ICU)..... | 31 |
| 3.1 Climat urbain..... | 31 |
| 3.2 ICU : Définition..... | 33 |
| 3.3 Facteurs influençant les ICU..... | 35 |
| 3.3.1 Facteurs incontrôlables..... | 35 |
| 3.3.2 Facteurs contrôlables..... | 36 |
| 3.4 Impacts et enjeux..... | 38 |
| 3.5 Identification des ICU..... | 40 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.5.1 | Echelle spatiale | 41 |
| 3.5.2 | Echelle temporelle | 41 |
| 3.5.3 | Outils de mesure | 42 |
| 4 | Stratégies urbaines de mitigation des ICU | 46 |
| 4.1 | Implantation de végétation | 48 |
| 4.1.1 | Exemples d'implantation de formes végétales..... | 49 |
| | Résumé deuxième partie | 56 |
| 5 | Démarche et méthode | 57 |
| 5.1 | Question de recherche et hypothèses | 58 |
| 5.2 | Méthodologie | 59 |
| 5.2.1 | Analyse documentaire et entretiens semi-directifs | 60 |
| 5.2.2 | Cartographies par télédétection..... | 61 |
| 5.2.3 | Projet urbain | 65 |
| 6 | Résultats..... | 66 |
| 6.1 | Etat des lieux..... | 66 |
| 6.1.1 | Politique climatique suisse | 66 |
| 6.1.2 | Politique climatique lausannoise..... | 68 |
| 6.2 | Effets d'îlot de chaleur urbain à Lausanne' | 73 |
| 6.2.1 | ICU..... | 75 |
| 6.2.2 | ICU et réseau vert | 78 |
| 6.2.3 | Températures et NDVI..... | 79 |
| 6.3 | Analyse et propositions de secteurs réversibles' | 84 |
| 6.3.1 | Secteur de la gare..... | 85 |
| 6.3.2 | Voie de chemin de fer – Secteur de la déchèterie de Malley..... | 91 |
| 6.3.3 | Secteur de la place Grand-Saint-Jean..... | 97 |
| 7 | Discussion | 102 |
| 7.1 | Politiques climatiques : des orientations stratégiques au projet urbain | 102 |
| 7.2 | ICU et végétation : identification et caractérisation..... | 104 |
| 7.3 | Potentiels de réversibilité et stratégies d'adaptation : des dispositifs multiples..... | 106 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.4 | Limites méthodologiques | 109 |
| 7.4.1 | Recommandations et perspectives | 111 |
| | Conclusion | 113 |
| | Bibliographie | 116 |
| | Table des illustrations | 124 |
| | Tableaux..... | 124 |
| | Figures | 124 |
| | Annexes..... | 127 |
| | Analyse documentaire – Politiques climatiques suisses et lausannoises | 127 |
| | Guide d’entretien | 129 |
| | Code GEE | 130 |

Liste des abréviations et acronymes

| | |
|--------|--|
| ARE | Office fédéral du développement territorial |
| FSU | Fédération suisse des urbanistes |
| GEE | Google Earth Engine |
| GIEC | Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat |
| ICU | Ilot de chaleur urbain |
| LAT | Loi sur l'aménagement du territoire |
| TS | Températures de surface |
| NDVI | Indice de végétation normalisé (<i>normalized difference vegetation index</i>) |
| OFEV | Office fédéral de l'environnement |
| PDCom | Plan directeur communal |
| PGA | Plan général d'affectation |
| SPADOM | Service des parcs et domaine de Lausanne |

Introduction

La végétation urbaine, au travers de ses différentes formes, joue une multitude de rôles dans le milieu urbain. Les différents services écosystémiques qu'elle garantit répondent à divers enjeux, qu'ils soient écologiques, socioculturels, économiques ou urbanistiques (Blanc, 2010 ; Gaston et al., 2010 ; Koc et al., 2017 ; Musy, 2012 ; Sadler et al., 2010). D'un point de vue environnemental, les végétaux agissent sur la qualité de l'air, le sol, le cycle hydrologique, les vents, le rayonnement solaire, l'humidité relative de l'air et les flux de chaleur (Bouzou et Marques, 2016 ; Forman, 2014 ; Gaston et al., 2010 ; Koc et al., 2017 ; Musy, 2012 ; Sadler et al., 2010 ; Wu, 2014 ; Zhioua, 2017). En agissant sur ces éléments, les végétaux présents en ville influencent considérablement le climat urbain.

Dans un contexte de changement climatique global où les températures moyennes atmosphériques et océaniques augmentent (IPCC, 2014), tous les écosystèmes subissent des modifications et les systèmes urbains n'en sont pas épargnés. Cela pose la question de l'habitabilité de la ville, notamment liée au phénomène d'îlots de chaleur urbains (ICU). Cette « anomalie thermique » (Oke, 1982), provoquée par l'occupation du sol, la morphologie, les matériaux, les couleurs, les activités et le métabolisme linéaire des villes, génère des différences de température pouvant être supérieures à 10°C entre une ville et la région rurale adjacente (Fallot et Rebetez, 2008 ; Gaston et al., 2010 ; Masson, 2010). Les ICU suscitent des problématiques en termes de qualité de l'air, stress thermique, gestion des fortes précipitations, consommation énergétique et inégalités sociale et écologique. Il est possible d'en limiter l'effet en agissant sur les facteurs physiques et urbanistiques qui les influencent.

Qu'elle soit sous forme de couverture arborisée, de surface herbeuse, de toiture ou de façade végétalisée (Koc et al., 2017), la végétation urbaine permet de réguler la température. Elle représente ainsi un élément de réponse majeur aux ICU qu'il est important d'intégrer dans la conception de la ville et ses stratégies d'adaptation.

Les ICU, phénomènes réversibles (Gaston et al., 2010), nécessitent d'être abordés au travers du champs de l'écologie urbaine et celui de l'urbanisme végétal (Mollie, 2009). Le projet urbain, en tant que mode d'action (Ingallina, 2001 ; Pinson, 2005), possède un rôle prépondérant dans la réponse à cette problématique globale touchant les villes de toutes tailles. Transversal, il permet de lier études climatiques et enjeux urbanistiques afin d'amorcer la mise en œuvre des stratégies d'adaptation dont ont besoin les villes. Le projet urbain s'impose comme vecteur de réhabilitation et amène à la réversibilité des espaces urbains (Berdoulay et Soubeyran, 2002 ; Ingallina, 2001 ;

Pinson, 2005). Les principes de l'écologie urbaine et de l'urbanisme végétal font intrinsèquement partie de cette réflexion climatique urbaine.

Le changement climatique force à repenser les façons de consommer, d'habiter, d'organiser et d'utiliser le territoire. Le projet urbain, lié à une intégration du concept d'adaptation dans les politiques locales, permet d'intégrer les questions climatiques dans la conception de la ville.

Cette recherche aborde la problématique des ICU – témoins du changement climatique global et acteurs du changement climatique local –, les facteurs qui y participent et les potentiels de réversibilité des milieux urbains. Pour analyser ce sujet, ce travail a pour étude de cas la ville de Lausanne et pose la question générale de recherche suivante :

Dans quelle mesure la ville de Lausanne est-elle sujette au phénomène d'îlots de chaleur urbains et en quoi la végétation permet-elle d'en limiter l'effet ?

Ce travail a pour but d'identifier la présence des ICU sur le territoire lausannois, de les mettre en parallèle avec la végétation présente et d'établir les potentiels de réversibilité des secteurs sujets à ce phénomène, au travers du prisme de l'urbanisme végétal et de l'implantation de formes végétales : couverture arborisée, surface herbeuse, toiture ou façade végétalisée (Koc et al., 2017).

Trois hypothèses sont posées afin de structurer le travail et pour répondre à la question de recherche :

1. *Il existe des secteurs sujets aux effets d'ICU à Lausanne.*

L'effet d'ICU est inévitable dans une ville (Deilami et al., 2018) et la ville de Lausanne s'avère certainement sujette à des effets d'ICU pouvant atteindre 5 à 7°C (Fallot et Rebetez, 2008 ; Gehrig et al., 2018). Il s'agit ici de répondre à cette hypothèse en quantifiant la différence de température entre Lausanne et la zone rurale alentour.

2. *La distribution spatiale des ICU et celle de la végétation sont négativement corrélées.*

Au vu de la corrélation négative entre ICU et NDVI relevée par de nombreuses recherches, les ICU lausannois sont probablement localisés dans les endroits peu végétalisés. Cette hypothèse est testée en mettant en parallèle les présences d'ICU aux présences de végétation.

3. *Il existe des potentiels de réversibilité de l'effet d'ICU à la parcelle grâce à l'implantation de formes végétales.*

Les secteurs sujets aux ICU peuvent accueillir des formes végétales à la parcelle afin de mitiger l'effet d'ICU qui les incombe. En déterminant les composantes des ICU et surtout l'effet de la végétation lausannoise sur l'occurrence des ICU, il est possible d'établir les potentiels de réversibilité des secteurs sujets à ce phénomène, au travers du prisme de l'urbanisme végétal et de l'implantation de formes végétales. Le but est, finalement, de proposer « une recomposition de l'habitabilité alliant esthétique et écologie » (Blanc, 2010, p. 175). Les formes végétales urbaines permettant de développer la réversibilité des sites en question. L'exploitation des potentiels de réversibilité dépend toutefois des mesures d'adaptation conduites localement, elles-mêmes fortement liées aux implications politiques. En plus des informations issues des cartes des températures de surface et du réseau vert, un état des lieux de la politique climatique suisse et lausannoise est également sollicité pour répondre à cette hypothèse et va amorcer la démarche méthodologique de ce travail.

La première partie de l'état de l'art aborde les problématiques climatiques (IPCC, 2014 ; IPCC, 2018 ; NCCS, 2018 ; Quenault, 2013) et urbaines (Barles, 2002 ; Berdoulay et Soubeyran, 2002 ; Da Cunha, 2015 ; Forman, 2014 ; Lévy, 2010 ; Lhomme et al., 2010) globales ainsi que les thèmes ville-nature. Elle dresse un portrait des champs dans lesquels ces notions peuvent être examinées et met en exergue le besoin de lier les concepts d'atténuation, d'adaptation, de résilience et de réversibilité aux notions de projet urbain (Ingallina, 2001 ; Pinson, 2005), d'écologie urbaine et d'urbanisme végétal (Mollie, 2009).

La deuxième partie de l'état de l'art traite de la climatologie urbaine et plus précisément des ICU. Elle s'intéresse au phénomène d'ICU, aux facteurs qui l'influencent et aux façons dont il peut être identifié. Les stratégies urbaines de limitation des effets d'ICU sont également évoquées, l'accent est mis sur les stratégies impliquant l'implantation de formes végétales, faisant ainsi écho à la première partie de cette revue de la littérature.

Ensuite, sont exposées la problématique, la question de recherche et les hypothèses suivies de la méthodologie déployée pour y répondre. Cette dernière se veut transversale et consiste en une recherche qualitative basée sur des documents et des entretiens semi-directifs, ainsi qu'une recherche quantitative mobilisant des cartographies. Un état des lieux des politiques climatiques suisse et lausannoise est sollicité pour amorcer la démarche méthodologique de ce travail et

rendre compte de la situation de la ville en termes d'adaptation. L'évaluation de l'effet d'ICU se fait grâce aux informations issues de la cartographie thermique et de celle du réseau vert.

Pour finir, les données récoltées sont présentées. Ces éléments sont discutés au travers du cadre théorique pour répondre aux hypothèses, dans l'optique d'établir un premier diagnostic thermique et de rechercher des pistes d'intervention afin de limiter le phénomène d'ICU à Lausanne.

1 Des problématiques climatiques et urbaines au projet urbain

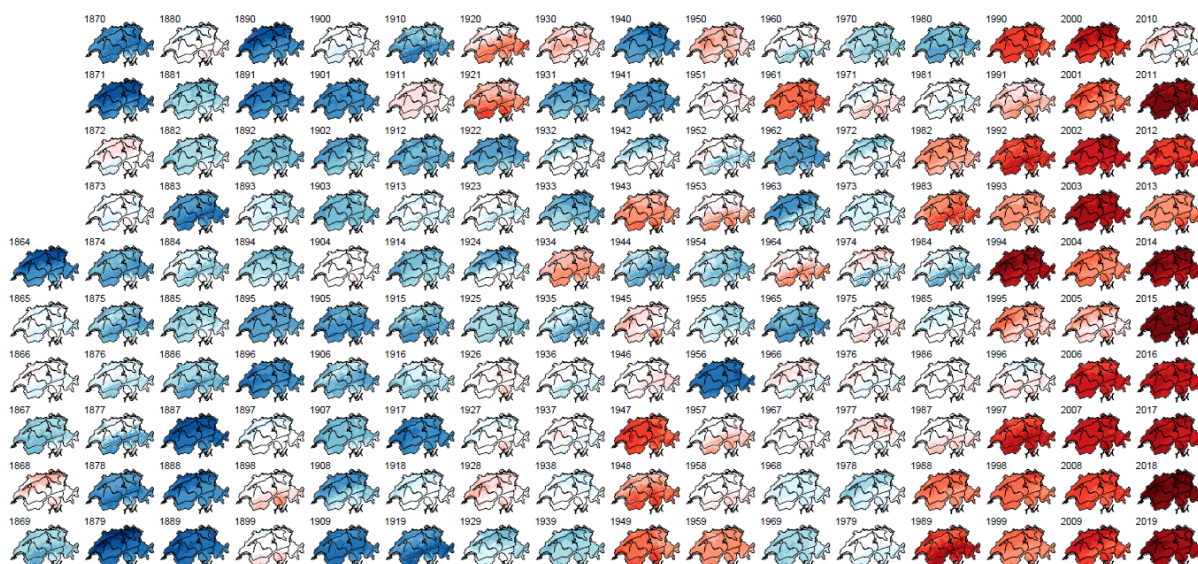


Figure 1 : Illustration des écarts de températures à la moyenne 1961-1990 en Suisse pour chaque année depuis 1864 (MétéoSuisse, 2020, meteosuisse.admin.ch)

1.1 Changement climatique

Depuis la deuxième moitié du XVIIe siècle, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et des océans, une diminution des quantités de neige et de glace ainsi qu'une élévation du niveau des mers sont observés (IPCC, 2014). D'ici à la fin du siècle, une augmentation de la température moyenne globale de la surface terrestre est annoncée et pourrait aller de 1,5 à 4,8°C – selon les scénarii exposés par le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (IPCC, 2014). Les modifications des précipitations et la fonte de la cryosphère altèrent les systèmes hydrologiques et biogéochimiques et les conséquences d'un tel changement climatique s'observent déjà : diminution des températures extrêmes froides et augmentation des températures extrêmes chaudes, élévation du niveau de la mer, acidification des océans, perte de la biodiversité, augmentation de certaines maladies parasitaires, bactériennes ou virales, ainsi que davantage d'événements extrêmes tels que les sécheresses, les vagues de chaleur, les inondations, les

cyclones et les incendies de forêts (Hunt et Watkiss, 2011 ; IPCC, 2014 ; IPCC, 2018). Ce changement global se répercute sur l'ensemble des systèmes planétaires en dégradant les écosystèmes et en menaçant les populations animales et humaines.

En Suisse, les températures moyennes ont déjà augmenté de presque 2°C ces 150 dernières années (Figure 2), ce qui représente une augmentation plus importante que la moyenne mondiale qui est de 0,9°C (NCCS, 2018). Cette tendance s'explique notamment à cause de la situation continentale de la Suisse (Fallot et Rebetez, 2008). A cela, s'ajoutent plusieurs modifications climatiques majeures illustrées sur la Figure 2.

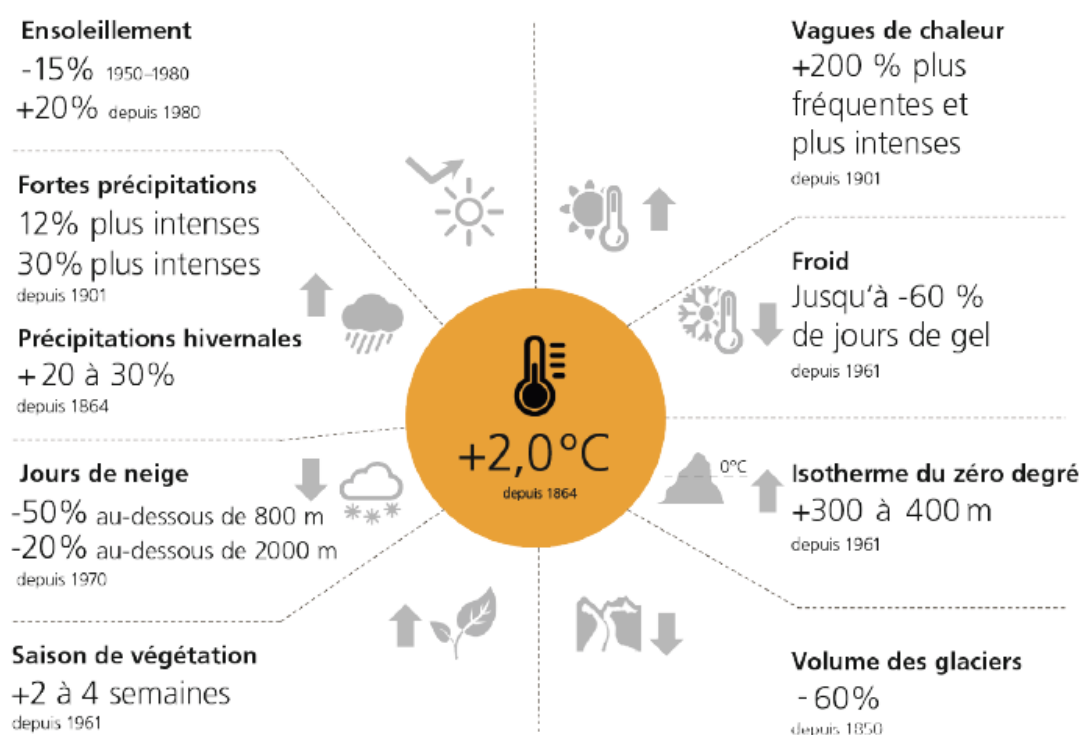


Figure 2 : Modifications climatiques observées en Suisse (NCCS, 2018)

Dans son rapport « CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse » (NCCS, 2018), le *National Centre for Climate Services* se base sur la période de référence 1981-2010 pour prédire les modifications climatiques que le pays va connaître d'ici 2060. Les conséquences principales du changement climatique global seront notamment des étés considérablement plus secs, de précipitations extrêmes plus fréquentes, des hivers peu enneigés et davantage de journées tropicales. Les températures estivales pourraient augmenter de 2,5 à 4,5°C. Jusqu'à 25% de pluie en moins est enregistré en été et la plus longue période de sécheresse durerait près de 20 jours (contre 11 aujourd'hui). Parallèlement, les précipitations extrêmes se feront plus fréquentes et

plus intenses, notamment en hiver, et les quantités de neige diminueront en moyenne de moitié pour l'ensemble de la Suisse d'ici 2100 – diminution qui sera plus grande à basse altitude et plus faible à haute altitude, l'isotherme du zéro montant de 650 mètres. Concernant les températures maximales, elles augmenteront davantage que les températures moyennes : le jour le plus chaud de l'année en 2060 sera plus chaud de 5,5°C par rapport à celui de 2018 ; et d'une moyenne d'une journée tropicale (+ de 30°C) par année sur la période 1981-2010, la Suisse aura droit à 18 jours de forte chaleur par an d'ici à 2060 (NCCS, 2018).

Les zones urbaines de basses altitudes sont et seront particulièrement touchées par les questions de stress thermiques (Hunt et Watkiss, 2011 ; NCCS, 2018). En effet, les villes sont des systèmes extrêmement vulnérables car elles concentrent individus, richesses et infrastructures. Elles représentent alors des risques conséquents en termes de vulnérabilités sociales, économiques et environnementales (Hunt et Watkiss, 2011).

Les villes subissent les effets et les risques du changement climatique tout en contribuant massivement à le renforcer, démontrant ainsi une relation certaine entre fonctionnement des espaces urbains et changement climatique (Barles, 2002 ; Quenault, 2013). En effet, comme détaillé dans le chapitre *1.2 Système et métabolisme urbain*, le fonctionnement des villes et les activités humaines exacerbent le changement climatique.

Les villes doivent alors faire face au changement climatique de deux manières différentes. D'une part, elles doivent pouvoir répondre aux perturbations « graduelles » impliquées par le changement climatique dans son ensemble (Quenault, 2013). D'autre part, elles doivent également appréhender toutes les perturbations « abruptes » liées aux phénomènes naturels qui vont se faire de plus en plus fréquents, au régime d'urbanisation, ainsi qu'aux enjeux sociaux et sociétaux (Lizarralde et al., 2017 ; Quenault, 2013 ; Thomas et Bleau, 2017). Au-delà des problématiques d'ordre climatique auxquelles les systèmes urbains doivent répondre, les pressions sociales appellent à s'intéresser à une vulnérabilité « urbaine » beaucoup plus large que la vulnérabilité associée uniquement aux aléas naturels. La vulnérabilité sociale est intensifiée par le changement climatique et les inégalités se font croissantes (Emelianoff, 2007 ; Lizarralde et al., 2017 ; Quenault, 2013 ; Thomas et Bleau, 2017). L'approche traditionnelle face aux perturbations naturelles recherche soit la maîtrise de l'aléa, soit la diminution de la vulnérabilité, généralement via des constructions de protection telles que des digues, par exemple. Cette vision techno-centrée du risque ne permet pas de prendre en compte tous les aspects sociaux, d'où la nécessité de changer la manière d'appréhender la gestion des risques (Quenault, 2013 ; Thomas et Bleau, 2017).

La volonté généralisée de réduction de la vulnérabilité face au changement climatique, de passer de la paire « vulnérabilité-protection » au duo « résilience-prévention », fait appel à un nouveau paradigme urbanistique qui serait capable de développer des systèmes urbains résilients (Emelianoff, 2007 ; Lizarralde et al., 2017 ; Thomas et Da Cunha, 2017). Afin de lier la notion de vulnérabilité à celles d'adaptation et de résilience, il est nécessaire de développer des outils analysant les phénomènes complexes issus du changement climatique informant de la vulnérabilité d'un territoire. Les systèmes d'information géographique (SIG) représentent en ce sens « *un outil puissant pour la compilation, les calculs, les analyses et la visualisation* » des impacts climatiques sur un espace donné et servent directement à la mise en place de politiques localisées (Thomas et Bleau, 2017).

1.2 Système et métabolisme urbain

Avec plus de la moitié de la population mondiale vivant en région urbaine (Wu, 2014), la ville constitue un système au cœur de la problématique environnementale et du changement climatique (Quenault, 2013). Elle représente également le lieu où se concentrent les activités économiques, les services publics et la majorité des flux de matière et d'énergie. Le régime d'urbanisation actuel et l'augmentation constante de la population impliquent une importante demande de sol, une forte importation et consommation de matières premières et d'énergie, des rejets considérables de polluants et une importante production de déchets (Barles, 2002 ; Da Cunha, 2015 ; Lévy, 2010 ; Lhomme et al., 2011).

Ce fonctionnement urbain, intrinsèquement lié au fonctionnement du système industriel, suppose d'abord une vaste utilisation de sol, ce dernier se retrouvant majoritairement artificialisé, imperméable, et ne générant que peu – voire pas – de matières premières (Barles, 2002 ; Da Cunha, 2015). L'écosystème urbain étant un écosystème artificiel hétérotrophe se voit alors dans l'obligation de puiser dans les ressources des écosystèmes alentours (campagnes, forêts, lacs, mers,...). Son support écologique est bien plus vaste que son propre périmètre. Les ressources qu'il utilise se dégradent et ses activités rejettent polluants et déchets. Le système urbain, ouvert, complexe et soumis aux lois de l'entropie, révèle une empreinte écologique conséquente et ne constitue pas une entité « durable » (Barles ; 2002 ; Da Cunha, 2015 ; Forman, 2014 ; Lévy, 2010 ; Lhomme et al., 2011).

La forme urbaine n'est pas sans conséquence sur l'empreinte écologique d'une ville (Quenault, 2013). La périurbanisation a largement pris part à l'extension des systèmes urbains. En effet, la

dispersion des infrastructures et la faible densité du bâti ont eu un effet net notamment sur l'utilisation et l'imperméabilisation massive du sol ainsi que sur la consommation énergétique et les rejets de polluants (liée d'une part à la mobilité qui ne cesse de s'amplifier et, d'autre part, aux bâtiments et aux ménages) (Da Cunha, 2015 ; Quenault, 2013).

Par conséquent, il existe un enjeu considérable en termes d'aménagement du territoire. Dans le but de diminuer les flux entropiques urbains et au vu de la pression anthropique croissante, il est urgent de penser à une nouvelle façon de modeler les espaces urbains, et la question de l'aménagement urbain est un vecteur primordial à prendre en compte. L'organisation du tissu bâti, des centralités, de la mobilité, des activités industrielles et des espaces publics est à intégrer à la question de la résilience urbaine (Da Cunha, 2015 ; Dureau et Lévy, 2010). Il est nécessaire, au travers de l'aménagement du territoire et du projet urbain, de passer d'un métabolisme linéaire à un métabolisme cyclique, c'est-à-dire passer d'un système urbain entropique à un système syntrophique « *aussi compact et autosuffisant que possible* » ; à l'instar des écosystèmes naturels (Erkman, 2004). L'influence de la forme urbaine sur l'utilisation de ressources, sur la génération de déchets ainsi que sur les rejets de polluants permet d'agir sur l'optimisation de ces éléments ainsi que de créer des symbioses diverses (Erkman, 2004). Le projet urbain semble alors indispensable pour agir sur l'empreinte écologique des villes (Da Cunha, 2015).

Dans cette optique, les politiques d'aménagement pour un développement urbain durable indiquent que la densification est une démarche à mettre en œuvre (Da Cunha, 2015 ; Emelianoff, 2007). Or, comme il en est traité dans le chapitre *3.3 Facteurs influençant les ICU*, le besoin de densifier s'oppose au besoin d'espaces verts, de courants d'air et de perméabilité des sols. Il est donc impératif de penser en termes de projet urbain afin de mettre en cohérence les objectifs d'adaptation au changement climatique et d'aménagement urbain (Da Cunha, 2015 ; Emelianoff, 2007).

1.3 Stratégies de réponse face aux enjeux climatiques et urbains

1.3.1 Politiques d'atténuation et d'adaptation

Face à l'ampleur du changement climatique et à la vulnérabilité croissante des villes et de leur population, plusieurs documents cadres sont rédigés par divers organismes. Dans la Convention-Cadre des Nations Unies sur le changement climatique (Nations Unies, 1992) adoptée au Sommet de la Terre à Rio, deux grandes stratégies ressortent : **l'atténuation** et **l'adaptation**. L'enjeu est, d'une part, d'atténuer le changement climatique, c'est-à-dire d'atténuer l'impact

humain sur le climat ; et, d'autre part, de s'adapter aux nouvelles conditions provoquées par le changement climatique (Thomas et Da Cunha, 2017).

En d'autres termes, les mesures d'atténuation défont les causes du changement climatique via diverses politiques sectorielles et génériques. Ces mesures sont implémentées à une échelle internationale et visent à réduire les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Leur objectif est de limiter l'impact anthropique sur le climat à une échelle planétaire (Thomas et Da Cunha, 2017).

Les mesures d'adaptation, quant à elles, font référence à la notion d'adaptation issue de la biologie et décrite dans les travaux de Darwin (1859) ; c'est-à-dire à la capacité des organismes à s'adapter aux conditions changeantes de leur environnement. Les mesures d'adaptation liées à la problématique du changement climatique sont davantage locales et contextualisées que les mesures d'atténuation ; leur but étant de réduire la vulnérabilité d'un territoire spécifiques en fonction des risques auxquels il doit faire face. Ensemble, ces mesures prodiguent aux écosystèmes urbains une capacité à se réorganiser en fonction de nouvelles conditions (Thomas et Da Cunha, 2017).

Dans les années 90, les organisations telles que le Sommet de la Terre à Rio ou l'ICLEI (le Conseil international pour les initiatives écologiques locales) génèrent la mise en place de diverses recommandations, de plans de réduction du CO₂, ainsi que la « campagne des villes pour la protection du climat » (Emelianoff, 2007). Ces actions sensibilisent les villes et les encouragent à mettre en place des politiques climatiques ; parmi elles, les premiers « plans climat » et « agendas 21 » (Emelianoff, 2007). Ces politiques sectorielles et génériques qui établissent des objectifs mondiaux ou nationaux sont des mesures d'atténuation cherchant à mener à la transition énergétique. Suite à cela et dans l'idée d'atteindre une résilience des systèmes urbains, des mesures d'adaptation sont énoncées afin de traduire spatialement les objectifs des mesures d'atténuation – il s'agit de politiques intégrées, transversales et contextualisées (Lizarralde et al., 2017 ; Thomas et Da Cunha, 2017). La notion d'*adaptation* constitue un nouveau paradigme dans le sens où elle relie la *vulnérabilité* à la *résilience* (Thomas et Bleau, 2017). Les mesures d'adaptation visent à réduire la vulnérabilité des territoires liée aux conséquences directes du changement climatique. Cette approche permet d'anticiper les modifications climatiques ainsi que leurs effets, et de s'y ajuster en améliorant les capacités de réponse des sociétés et de l'environnement. L'idée de l'adaptation est de vivre avec le risque plutôt que de lutter contre ses impacts. Par conséquent, la mutualisation des mesures d'atténuation et des mesures d'adaptation est inéluctable dans une perspective de renforcement de la résilience urbaine. Cependant, selon Emelianoff (2007), les cadres réglementaires et les politiques sont souvent inadaptés aux

problématiques urbaines et environnementales. Si les stratégies d'atténuation sont relativement présentes dans les politiques énergétiques locales, c'est peu le cas des mesures d'adaptation (Bertrand et Richard, 2015 ; Dugua et al., 2017) :

« On constate donc une distorsion entre une représentation complémentaire entre atténuation et adaptation portée dans les discours scientifiques et institutionnels et une dissociation manifeste dans les pratiques d'élaboration territoriales de ces deux volets des politiques climatiques. Et l'adaptation, aux échelles locales, demeure encore largement un objet flou, aux contours multiples, nécessitant d'être définie collectivement. » (Bertrand et Richard, 2015, p. 12).

Une planification urbaine proactive est nécessaire pour agir sur le métabolisme d'une ville et pourrait permettre d'atténuer l'impact des systèmes urbains sur le climat, mais également de les rendre plus adaptés aux perturbations climatiques (Bertrand et Richard, 2015 ; Dugua et al., 2017 ; Quenault, 2013 ; Thomas et Da Cunha, 2017). De plus, afin d'atteindre des systèmes urbains résilients, il est important d'appréhender la problématique avec une approche systémique et pluridisciplinaire, prenant en compte différentes échelles spatiales, temporalités et les intérêts d'acteurs publics et privés (Bertrand et Richard, 2015 ; Lhomme et al., 2010 ; Toubin et al., 2012). Il est indispensable de penser les politiques publiques et la planification urbaine sous l'angle de l'adaptation au changement climatique afin de donner aux villes la capacité de réagir aux conséquences de ce dernier.

1.3.2 Résilience et ingénierie écologique

Dans le dictionnaire, la résilience a plusieurs définitions selon le domaine d'application. En écologie, la résilience est la « *capacité (d'un écosystème, d'une espèce) à retrouver un état d'équilibre après un événement exceptionnel* » (Le Petit Robert, 2012, p. 2214). La résilience se traduit ainsi par l'aptitude d'un système à absorber une perturbation et ses conséquences, et parvenir à se réorganiser afin de récupérer ses fonctions (Lhomme et al., 2010 ; Thomas et Da Cunha, 2017, Toubin et al., 2012). Holling (1973) établit une différence entre la stabilité et la résilience. Pour lui, si la stabilité évoque la capacité d'un système à revenir à son état initial après une perturbation, la résilience représente la capacité d'un système à regagner un état d'équilibre, pouvant différer de l'état d'équilibre, lui permettant de persister.

Quenault (2013) ajoute qu'il faut prendre en compte deux dimensions lorsqu'est abordée la résilience : la dimension physique et la dimension sociale. En effet, la dimension physique fait appel à la capacité de résister ou de faire face à une perturbation, alors que la dimension sociale – ou dynamique – évoque la « *capacité d'un territoire urbain, d'une communauté, d'un ménage ou d'un individu à récupérer ou à se reconstruire grâce à des capacités adaptatives liées à l'organisation sociale, économique ou institutionnelle* » (p. 5). Cette vision de la résilience prenant en compte différentes dimensions indique le besoin d'une approche systémique, afin que la résilience puisse être appréhendée dans les différentes structures signifiant que la capacité à assimiler la perturbation elle-même soit inhérente au fonctionnement du système urbain, notamment via l'idée de la « *mémoire de la catastrophe* » (Quenault, 2013).

La résilience dont il est question dans ce travail est à la fois liée à l'idée d'anticipation des perturbations afin de mettre en place des actions qui permettront d'en limiter les impacts, et à l'idée d'adaptation face à des changements inattendus. La résilience est vue ici comme un concept à intégrer lors des questionnements liés à l'avenir des villes, mais aussi à leur présent, dans un contexte de changement climatique majeur.

Ce besoin de résilience fait écho au concept d'ingénierie écologique qui implique « *une intervention sur les écosystèmes à partir de la connaissance acquise de leur fonctionnement pour en modifier ou en réguler différents aspects* » (Delabarre, 2017). En liant techniques et sociétés, l'ingénierie écologique apporte des pistes de réponse à la volonté de rendre les systèmes urbains « résilients ». Les dispositifs d'ingénierie écologique, outillant le vivant et s'inspirant de la nature, peuvent être intégrés dans le projet urbain pour faire face aux perturbations sous l'angle de l'adaptation (Delabarre, 2017).

1.3.3 Projet urbain et notion de réversibilité comme leviers d'action

Après l'urbanisme fonctionnaliste des Trente Glorieuses et ses impacts écologiques négatifs sur le territoire, les logiques de l'écologie urbaine (Wu, 2014) et de l'urbanisme écologique (Arrif et al., 2011 ; Blanc, 2009) – ou l'urbanisme « durable » – s'imposent d'elles-mêmes et introduisent le terme de projet urbain dans les années 1970 (Berdoulay et Soubeyran, 2002 ; Da Cunha, 2015). Delabarre et Dugua (2017) posent trois postulats à propos du projet urbain, objet de controverse. Premièrement, le projet urbain est le « mode opératoire de la ville durable », en permettant d'intégrer les divers enjeux des villes et d'agir dessus en générant « de nouveaux dispositifs de gouvernance urbaine ». Deuxièmement, le projet urbain est « producteur de

connaissances » ; il permet en effet une réflexion territoriale utile à l'action publique, à la recherche, à l'enseignement, etc. Troisièmement, le projet urbain est considéré comme « levier d'un urbanisme épistémologique » ; il consiste dans ce sens en un outil capable de rétrospection et de prospection, permettant de prendre conscience des défis et d'y répondre de façon adaptée (Delabarre et Dugua, 2017).

Le projet peut être pensé à plusieurs échelles, qu'il s'agisse d'un projet urbain d'agglomération, de ville, de quartier ou d'un projet d'architecture à l'échelle d'un bâtiment (Ingallina, 2001). Selon Ingallina (2001), le projet urbain représente une réflexion globale à propos du territoire et de son développement, contrairement à la planification technocratique qui a dicté l'évolution des villes dans la deuxième moitié du XX^e siècle. Le projet urbain représente un instrument de l'action publique urbaine et se substitue à la notion de plan – qui sous-entend un but ultime à atteindre – en étant autant processus que résultat (Pinson, 2005). Cette approche met un point d'honneur à l'idée de faire avec l'existant et de s'inscrire dans le contexte territorial ainsi que tout ce que ce dernier implique en termes de contextes économique, social, environnemental et culturel (Da Cunha, 2015 ; Ingallina, 2001 ; Pinson, 2005).

Le projet traduit une intention politique tout en mobilisant la collectivité (Pinson, 2005). Contrairement à l'urbanisme fonctionnaliste qui se veut être une science d'experts, le projet urbain appelle à une collaboration entre tous les acteurs de la ville, et ce, à tous moments de réflexion et d'intervention (Ingallina, 2001 ; Pinson, 2005). Ceci permet d'appréhender les problèmes territoriaux de manière transversale, de valoriser les ressources locales et de créer des espaces répondant aux attentes des usagers (Pinson, 2005). Ces dialogues continus permettent innovation et créativité collective, tout en gardant les intérêts communs en ligne de mire.

De plus, les notions de souplesse et d'itération sont indissociables du terme de projet. La production de la ville par le projet urbain permet d'adapter les attentes au fur et à mesure, et remet ainsi en question la notion de plan tant que « produit fini » (Pinson, 2005). Selon Ingallina (2001), le projet « *ne précède pas le programme, mais il l'engendre grâce à sa capacité prospective* » (p. 76).

Avec sa volonté d'intervenir en respectant l'existant (Berdoulay et Soubeyran, 2002), le projet urbain fait preuve de résilience, notamment au travers de son processus itératif et de sa réversibilité. Cette dernière fait référence aux possibles transformations et ajustements constants que le projet permet :

« [...] la réversibilité urbaine implique l'idée de changement continu et s'oppose à l'irréversibilité et l'illusoire permanence d'une ville figée dans ses usages et

ses espaces. Elle est au principe des mécanismes de transformation des villes qui, dans leurs caractéristiques spatiales et sociales, ne reviennent jamais à un état préexistant. Par extension, le concept renvoie à l'opposition entre l'éphémère et le pérenne, le surgissement et l'organisé, l'incertitude et la certitude, l'exception et le quotidien et qualifie, a minima, les changements potentiels qui peuvent se produire dans le cours moyen des choses. » (Pradel, 2013, p. 238).

La réversibilité urbaine représente le fait de construire la ville face à un futur incertain (Gwiazdzinski, 2013). L'intégration de la notion de temps dans la conception des formes urbaines permet une souplesse et une adaptation permanentes qui font entièrement écho aux enjeux liés aux effets du changement climatique. En effet, même « *s'il est difficile de planifier l'incertain, (...avec) la souplesse et l'adaptation permanente du système urbain, il paraît possible de proposer des formes d'organisation permettant la mise en place des conditions optimales d'élaboration des futurs possibles* » (Gwiazdzinski, 2013, p. 215). Le concept de réversibilité suggère l'impermanence et offre l'opportunité d'imaginer de nouveaux usages ou nouveaux aménagements en fonction des besoins imposés par divers enjeux, par exemple par le changement climatique. La question du futur incertain peut s'insérer dans le projet dans des temporalités plus ou moins longues. L'équilibre entre le temps court et le temps long permet également d'agir lorsque les conditions sont les plus adéquates et non pas dans une urgence inopportune (Pinson, 2005). Selon Gwiazdzinski (2013), la réversibilité apparaît à trois niveaux dans la fabrique urbaine : au niveau du projet, en évitant le *tabula rasa* ainsi qu'en laissant l'opportunité de modifications constantes ; au niveau de la réalisation, qu'il s'agisse d'infrastructures modulables ou d'espaces mutables, « *dans la logique d'une ville non finie* » ; et finalement, au niveau des usages, en laissant la population une liberté dans l'utilisation des équipements et des espaces.

Le projet urbain, lié au besoin de résilience, via l'atténuation et l'adaptation, s'impose alors comme vecteur de réhabilitation et amène à la réversibilité des espaces urbains. Contrairement à ce que suggéraient les planifications technocratiques, les sites urbains ne doivent pas être considérés comme étant permanents, mais comme des entités transformables. Certains espaces urbains, tels que les friches ou les sites monofonctionnels, vestiges d'un urbanisme passé et sujets à divers enjeux – qu'ils soient locaux ou globaux –, apparaissent comme étant réversibles. Les villes sont donc des organismes, d'une part, sujets à des besoins d'adaptation et d'autre part, capables de le faire. Elles sont vulnérables, mais possèdent des potentiels de réversibilité.

Dans la situation actuelle d'incertitude face au futur climat, le projet urbain permet une analyse contextualisée et multidisciplinaire des enjeux. Il invite, au travers de sa réversibilité, à penser en terme d'adaptation et de résilience. Ce besoin d'une nouvelle manière de façonner la ville, sa forme et son métabolisme peut se faire en repensant l'espace public qui apparait comme composante principale de la mise en œuvre du projet urbain (Berdoulay et Soubeyran, 2002 ; Da Cunha, 2015). Par conséquent, il importe de penser au développement de formes environnementales pour faire face au changement climatique ainsi qu'aux îlots de chaleur urbains. Ces derniers sont d'ailleurs définis par Gaston et al. (2010) comme des phénomènes *réversibles*.

2 Ville et nature

2.1 Ecologie(s) urbaine(s)

Ce chapitre retrace l'histoire de l'écologie urbaine – ou des écologies urbaines – afin d'offrir un premier angle de vue sur la façon dont traiter cette recherche. En effet, les problématiques urbaines se sont déjà maintes fois inspirées de l'écologie générale afin de comprendre la complexité du système urbain et d'y apporter des éléments de réponse (Da Cunha, 2015).

L'écologie urbaine est une discipline à la croisée de plusieurs domaines de recherche (Gandy, 2015). De manière très large, l'écologie urbaine traite de l'interaction entre la société et la biosphère (Barles, 2010). Ce domaine a subi énormément de modifications et n'a cessé d'évoluer pour donner naissance, progressivement, à des écologies urbaines plurielles couplant une multitude de disciplines (traitées ci-après) et constituant un large champ d'analyse (Barles, 2010 ; Lévy, 2010).

Les origines de l'écologie urbaine prennent leurs sources dans le contexte de la ville industrielle du XIX^e siècle où l'exode rural des populations qui viennent s'installer en ville génère des conditions hygiéniques déplorables. Emergent alors les questions relatives à la santé publique et aux bienfaits de la nature pour pallier aux maux urbains (Emelianoff, 2000). Les auteurs tels que Olmsted (1822-1903), architecte-paysagiste et concepteur de Central Park à New York ; Howard (1850-1928), urbaniste initiateur des cités-jardins ; et Geddes (1854-1932), biologiste et sociologue intéressé à la relation ville-nature, alimentent tous une réflexion globale sur le rôle de la nature dans le développement des villes et dans l'amélioration de la qualité de vie urbaine (Emelianoff, 2000 ; Paquot, 2004). Ce qu'Emelianoff (2000) appelle le **projet urbain écologique**, c'est cette façon d'intégrer la nature à la conception de la ville et de la lier aux « *dimensions sociales, culturelles et politiques de la vie urbaine* » (p. 86).

Dans la deuxième moitié du XIX^e siècle, Haeckel donne au terme « écologie » son sens moderne d'**écologie scientifique**, qui désigne la science qui étudie les interactions entre les organismes vivants et leur environnement (Gandy, 2015). Dans les années 1920, cette écologie est utilisée par un groupe de sociologues de l'Université de Chicago à des fins de compréhension générale du fonctionnement des villes (Gandy, 2015 ; Wu, 2014). L'**écologie urbaine sociologique** développée par ces sociologues marque le courant de l'Ecole de Chicago qui extrait des notions et des lois des sciences de la vie pour expliciter les flux de personnes dans le milieu naturel de l'humain qu'est la ville. L'intérêt de cette discipline est axé sur des processus humains tels que la migration, la compétition, la ségrégation, la succession, etc. (Da Cunha, 2015 ; Emelianoff, 2000 ;

Gandy, 2015 ; Wu, 2014). Ce courant analyse l'environnement urbain comme un produit des interactions sociales, sans toutefois considérer l'interface avec le milieu écologique.

L'**écologie dans la ville** (*ecology in cities*) prend place dès la fin des années 1940 (Wu, 2014). Avant cette approche, les biologistes et écologistes s'intéressaient peu à l'écosystème majoritairement minéral qu'est la ville car ils considéraient qu'il y avait peu d'espèces végétales et animales. Cependant, certains botanistes et zoologistes commencent à vouloir comprendre quelles sont la flore et la faune rudérales de la ville (Gandy, 2015 ; Wu, 2014). L'idée générale reste toutefois que les villes ne sont pas des sujets d'étude pertinents pour les scientifiques de la nature (Wu, 2014).

La vision écologique urbaine qui émerge dans les années 1960 est l'**écologie de la ville** (*ecology of cities*) (Barles, 2010 ; Wu, 2014) ou l'**écologie urbaine naturaliste** (Emelianoff, 2000), qui considère la ville comme étant un écosystème dans sa globalité. Le métabolisme urbain est au centre de cette vision et est étudié au travers d'analyses des flux et des stocks de matière et d'énergie (Emelianoff, 2000 ; Wu, 2014). Ce sont notamment les travaux d'Odum (1953), de Wolman (1965) et de Duvigneaud (1974) qui façonnent cette nouvelle approche. En effet, Odum est le premier à considérer la ville comme un écosystème particulier en comparant l'écosystème de la ville à celui d'un lac, expliquant les flux entrants et sortants ainsi que la circulation de l'énergie dans les systèmes écologiques. Wolman, quant à lui, montre le caractère destructeur de la ville en pointant les déchets et pollutions qu'elle émet. C'est le premier qui introduit le terme de *métabolisme urbain*. Un peu après, Duvigneaud adapte la représentation odumienne et introduit la notion d'*écosystème « urbs »* (Barles, 2010). Si l'Ecole de Chicago se déleste des paramètres liés au milieu écologique et se concentre uniquement sur les dimensions socio-culturelles, le courant d'écologie urbaine naturaliste, lui, réduit la ville strictement à des facteurs physiques et biophysiques (Emelianoff, 2000). C'est de ces idées que s'inspire le concept d'ingénierie écologique qui appelle à une imitation des fonctionnements des écosystèmes naturels « *pour en modifier ou en réguler différents aspects* » (Delabarre, 2017).

De cette approche considérant la ville et son métabolisme découlent la bioéconomie, abordée notamment par Georgescu-Roegen (1979), et l'**écologie industrielle**, évoquée par Erkman (Barles, 2010 ; Da Cunha, 2015 ; Erkman, 1997). Cette dernière considère l'existence d'un écosystème industriel qui, avec tous ses flux – monétaires, matériels et énergétiques –, interagit avec la biosphère et l'affecte. Le but recherché par l'écologie industrielle est d'imiter le fonctionnement de la biosphère, en intégrant les principes de l'écologie scientifique à la théorie économique et au système industriel. L'idée est donc de concevoir des structures humaines qui ont un métabolisme cyclique et qui seraient compatibles avec le fonctionnement de la biosphère (Erkman, 1997).

Parallèlement, plusieurs événements permettent une prise de conscience environnementale (Barrow, 2006 ; Berdoulay et Soubeyran, 2002). En 1962, par exemple, Carson publie « Silent Spring » (Carson, 1962) qui dénonce les nuisances causées par les industries chimiques. En 1968, la première photo de la Terre « Earthrise » d'Anders¹ permet d'exposer la finitude de la Terre et de ses ressources. En 1972, le rapport Meadows « Limits to Growth » (Meadows et al., 1971) et la Conférence de Stockholm résonnent internationalement. A cela s'ajoutent des catastrophes écologiques, des réflexions quant aux diverses pollutions et aux déchets radioactifs (Barrow, 2006 ; Berdoulay et Soubeyran, 2002), ainsi que le rapport Brundtland (World Commission on Environment and Development, 1987). Ces faits amorcent le tournant auquel a droit l'écologie urbaine. En effet, le « Manifeste pour l'écologie urbaine » rédigé par Garnier et Mirénowicz (1984) réintègre l'humain au sein des écosystèmes et propose une alternative à l'urbanisme de l'époque. En 1992, le Sommet de Rio expose les risques liés au changement climatique et génère la volonté de créer des solutions opératoires. La mise en place de diverses réglementations à l'agenda politique mondial est alors observable, ainsi que des rencontres internationales – telles que Kyoto en 1996 – ou encore des documents directeurs – comme la charte d'Aalborg en 1994 (Berdoulay et Soubeyran, 2002).

Dans les années 1990, l'approche du paysage urbain via l'**écologie du paysage** apparaît également (Wu, 2014). Cette discipline cherche à comprendre comment les structures du paysage et l'organisation spatiale de l'urbanisation affectent les processus écologiques. Les principes constituant la base de l'écologie du paysage sont les formes environnementales paysagères – les tâches, les matrices et les corridors –, qui permettent d'analyser les mosaïques qui constituent les environnements paysagers (Forman, 1995 ; Wu, 2006).

L'**écologie pour la ville** (*sustainability of cities*) se développe dans les années 2000, lorsque l'intérêt se porte notamment sur les concepts tels que la résilience, le bien-être, la durabilité et l'habitabilité (Wu, 2014). Wu (2014) définit cette écologie comme étant un processus adaptatif visant à faciliter et maintenir un cycle entre les services écosystémiques et le bien-être humain par des actions écologiques, économiques et sociales qui soient coordonnées.

Da Cunha (2015) évoque l'approche de la **nouvelle écologie urbaine** qui se questionne toujours sur le dialogue entre ville et nature, en s'intéressant à la façon de relier « *le concept d'empreinte écologique à la notion de qualité urbaine* » (p. 7). La ville est dorénavant perçue à la fois comme une entité consommatrice de ressources matérielles et énergétiques, et comme support de diverses composantes. Au-delà de la simple analyse des flux de matière et d'énergie, la nouvelle

¹ Earthrise, 24 décembre 1968 : <https://www.nasa.gov/image-feature/apollo-8-earthrise>

écologie urbaine incorpore également les problématiques socio-culturelles et environnementales (Berdoulay et Soubeyran, 2002) afin de réduire l’empreinte écologique de l’écosystème urbain. Les leviers d’actions influençant ce métabolisme sont nombreux et les comportements des individus, le fonctionnement des institutions et les techniques utilisées, ainsi que « l’organisation de l’espace » entrent notamment en compte (Da Cunha, 2015).

Les perspectives de l’écologie urbaine ont fortement évolué durant le XX^e siècle et le champ d’étude devient de plus en plus interdisciplinaire (Wu, 2014). A une époque où l’urbanisation et les activités humaines affectent de manière généralisée les fonctions écosystémiques, l’écologie urbaine ou *les écologies urbaines* sont nécessaires pour apporter des solutions à ces problématiques (Gaston et al., 2010 ; Wu, 2014). En effet, cette dernière vision de l’écologie urbaine engage la nécessité de penser à un aménagement adapté, liant urbanisme, environnement et société :

« Ces rapports peuvent se qualifier sur le plan bio-géophysico-chimique, dans l’optique de l’aménagement urbain, ou encore dans une stricte perspective culturaliste en lien avec le développement de comportements orientés vers la prise en considération de la nature en ville. Il est nécessaire, quand l’objet d’étude participe ainsi à la fabrication d’un espace humain, d’élaborer une démarche interdisciplinaire. » (Blanc, 2009, p. 56).

L’écologie urbaine se base sur une approche écosystémique pour appréhender les problèmes urbains et tenter d’en limiter les externalités négatives en faisant appel à un **urbanisme écologique**, développant des modes de conception urbaine intégrant la nature, ses continuités territoriales et ses services écosystémiques (Arrif et al., 2011 ; Blanc, 2009). Le besoin de projet urbain apparaît comme une voie indispensable à la réalisation d’un tel dessein (Berdoulay et Soubeyran, 2002 ; Da Cunha, 2015).

2.2 Urbanisme végétal

De l’antique Babylone et ses jardins suspendus à la ville fordiste, en passant par les cités-jardins d’Howard, la nature a toujours fait partie de la ville. Sa place, ses usages et significations n’ont cessé de changer selon les époques et paradigmes. Son rôle est toutefois resté au second plan, au profit des fonctions urbaines telles que l’habitat, le commerce et la mobilité (Paquot, 2004 ; Zhioua, 2017).

L'histoire de l'urbanisme illustre l'évolution de la place du végétal dans la ville. A Babylone, les édifices pyramidaux couverts de végétation symbolise le lien entre Terre et Ciel. Dans les villes de Carthage et Rome, le végétal marque la structure de la ville ainsi que les portes et monuments. Les jardins sont le symbole d'un raffinement intellectuel et d'un retour aux origines. En somme, dans les villes antiques, le végétal, symbolique et mythologique, marque l'espace de la ville. Dans les villes médiévales, construites dans une logique d'économie d'espace, le végétal est peu présent, hormis un arbre monument se trouvant généralement au centre de la place du marché. La ville, structurée d'une maille fine qui accueille dans ses interstices éventuellement quelques plantes nourricières et médicinales, est entourée de remparts ; eux-mêmes entourés d'une ceinture maraichère, puis d'une ceinture agricole qui vont approvisionner la ville. Dans la ville de la Renaissance, les principes du jardin classique vont s'appliquer à l'espace urbain. La période du Romantisme dicte que ce qui est beau doit être naturel et pittoresque, et rejette ainsi la géométrie de la ville classique qui voulait transformer le paysage en jardin. L'idée ici est de transformer les jardins en paysages. Cependant, même si la recherche du point de fuite est abandonnée, cette nature idéale est artificielle. Le rôle d'embellissement et d'agrément du végétal est également de structurer la ville (Zhioua, 2017).

Dans la ville industrielle du XIX^e siècle, l'extension des villes et le développement des industries génèrent le recul des ceintures maraichères, des quartiers denses, de la pollution et des épidémies. Les problématiques hygiénistes voient le jardin public comme remède aux maux et insalubrités de la ville, en apportant purification de l'air, lumière et verdure réponse hygiéniste voit alors. L'urbanisme haussmannien prend pleinement en compte ces éléments et le jardin est un « reflet » de la ville. Suite à cela, les projets d'Olmsted (villes-parcs) et d'Howard (cités-jardins) proposent une réflexion globale sur le rôle de la nature dans la fabrique urbaine avec la vision que la ville entière peut devenir un jardin (Anquetil et al., 2014 ; Paquot, 2004 ; Zhioua, 2017). De plus, le système de jardins publics revêt le rôle de structure urbaine (Zhioua, 2017).

Lors de la période fonctionnaliste des Trente Glorieuses, le végétal n'est pas intégré dans l'aménagement des villes. En effet, l'importance est portée principalement sur les problématiques liées au logement et les espaces verts vont occuper une place résiduelle dans la ville. Les interstices et les espaces libres deviennent – un peu par défaut – des espaces verts ayant une fonction récréative (Anquetil et al., 2014 ; Mollie, 2009 ; Zhioua, 2017).

Les enjeux évoluant, la ville post-industrielle invite à la réflexion d'un urbanisme incluant la question de la transition écologique et permet d'imaginer un lien nouveau entre ville et nature afin de dépasser la vision qu'a prescrit l'urbanisme fonctionnaliste. L'urbanisme végétal montre que le végétal, dans toutes les formes qu'il peut prendre, fait partie intégrante de la composition urbaine.

De son rôle esthétique, il devient un outil de cohérence spatiale à l'échelle d'un territoire et permet de structurer et qualifier l'espace urbain (Mollie, 2009 ; Zhioua, 2017). Face aux problématiques environnementales qui touchent les villes, la nécessité de (re)prendre en compte les fonctions écosystémiques du végétal dans le projet urbain expose l'importance de l'urbanisme végétal. Mollie (2009) affirme que « *le végétal est une composante de l'art urbain, parfois même un préalable* ». Le projet urbain nécessite une prise en compte des végétaux, et pas uniquement en tant que « *solution de remplissage des vides interstitiels du tissu urbain* » mais comme véritables éléments à part entière du paysage urbain. Leur prise en compte dans le projet doit se faire tout au long du processus et de manière interdisciplinaire. C'est en générant des collaborations entre les différents corps de métiers, notamment entre les urbanistes et les jardiniers, que les compétences peuvent être mises à profit. Des réflexions doivent être faites en amont, qu'il s'agisse entre autres des conditions dans lesquelles les végétaux peuvent se développer ou de l'espace dont a besoin leur système racinaire (Mollie, 2009). Cet aspect de développement et d'adaptation des végétaux au fil du temps implique que les services écosystémiques qu'ils vont rendre vont également évoluer. L'implantation de végétation dans le projet urbain est donc un processus évolutif dans un plus grand processus évolutif.

Mollie (2009) peint un urbanisme végétal qui lie développement territorial au développement végétal, donnant ainsi de l'importance au patrimoine végétal déjà présent et aux futures formes qui pourraient être implantées.

Les divers types de formes environnementales urbaines citées par Forman (1995) – les tâches, les corridors et les matrices – constituent alors des outils d'aménagement du territoire ayant divers objectifs, qu'ils soient écologiques, sociaux ou économiques. L'urbanisme végétal est mis en œuvre via l'aménagement des **espaces publics**, dans le but de conférer une **qualité urbaine** à la ville.

2.2.1 Urbanisme végétal et espace public

La place de la végétation dans la fabrique de la ville n'a cessé d'évoluer, tout comme celle de l'espace public. Le paradigme fonctionnaliste impose la primauté des pleins sur les vides :

« Dans les interstices émerge la figure d'un espace libre et ouvert, neutre et homogène, vaste et disponible, étendu mais dépourvu de structure. On y trouve certes beaucoup d'espace vide mais peu d'espace public, de la verdure mais peu de composition végétale. » (Da Cunha, 2015, p. 15).

Désormais, l'approche écologique et l'urbanisme végétal invitent à réhabiliter les vides ; l'espace public devient composante principale de la mise en œuvre du projet urbain (Berdoulay et Soubeyran, 2002 ; Da Cunha, 2015). Ses nombreuses formes, du système viaire aux divers parcs et places, permettent au bâti, aux déplacements et aux interactions de s'implanter. En ces termes, il joue un rôle tant fonctionnel que social, et représente également la structure sur laquelle les ambiances urbaines peuvent prendre place (Da Cunha, 2015). En tant que support pour la végétation en milieu urbain et « *patrimoine collectif de tous les citoyens* » (Da Cunha, 2015), l'espace public consiste en un vecteur de la qualité urbaine (Berdoulay et Soubeyran, 2002 ; Da Cunha, 2015 ; Da Cunha et Guinand, 2014).

L'urbanisme végétal prenant place sur les espaces publics, leur végétalisation permet notamment de compléter la trame verte de la ville et d'offrir un accès à la nature et à ses services à la population urbaine.

2.2.2 Urbanisme végétal, qualité urbaine et habitabilité

La qualité urbaine est ce qui rend la ville habitable (Da Cunha et Guinand, 2014). Pour Blanc (2010), « *un lieu habitable est un lieu qui offre des possibilités suffisantes de création et d'adaptation aux individus pour se l'approprier [et] l'appropriation d'un lieu repose sur la connaissance fine des conditions de vie offertes à cet endroit* » (p. 169). Les conditions de vie dépendent d'éléments physiques, naturels, matériels et construits (Blanc, 2010), tels que le bâti, les espaces publics, la végétation, les équipements, les services sociaux et culturels, les services écosystémiques ou encore les usages. Dérivées en partie de ces éléments, les notions d'attractivité, d'esthétisme, de confort, de sécurité, de lisibilité et la perméabilité sont des composantes à prendre en compte dans le concept de qualité urbaine (Blanc, 2010 ; Da Cunha, 2015 ; Da Cunha et Guinand, 2014).

Les enjeux d'accessibilité et de pérennité de cette qualité d'habitat pour chacun sont primordiaux (Blanc, 2010). Des inégalités écologiques au sein des populations urbaines existent (Emelianoff, 2000). Il est alors essentiel d'intégrer les questions de qualité urbaine et d'habitabilité dans les planifications afin que chaque individu puisse y avoir accès de manière durable. *In fine*, ces concepts permettent d'apporter des éléments de réponse aux défis environnementaux ainsi qu'aux besoins collectifs et individuels (Da Cunha et Guinand, 2014). Delabarre (2013) explique que :

« [...] l'habitabilité préfigure de nouveaux modes d'actions. Sa prise en compte suggère de riches perspectives en direction de l'élaboration de politiques publiques actuelles : elle offrirait la possibilité de porter des projets de territoires dans une visée plus globalisante, en somme, davantage intégrante des problématiques ayant trait à notre environnement (en matière de santé et de bien être en ville, de changement climatique ou encore de pollution du ciel comme celle du sol – nous pourrions en citer d'autres). Elle appellerait donc à une valeur d'ensembliser, presque axiologique pour les futures politiques publiques et, ce faisant, plus en phase avec ce qui constitue « notre environnement » aujourd'hui. Là encore, il en va du caractère opératoire de la notion d'habitabilité et de son inscription dans une visée systémique. » (Delabarre, 2013, p. 513).

La nature urbaine, prenant place dans la ville en tant que forme environnementale et ayant des rôles écologiques et environnementaux, sociaux et culturels, économiques ou urbanistiques (traité ci-après au chapitre 2.3.1 *Rôles de la végétation en milieu urbain*), permet donc d'agir intrinsèquement sur la qualité urbaine (Da Cunha et Guinand, 2014).

2.3 Nature(s) urbaine(s)

La nature urbaine, comprenant la végétation, l'eau, le sol, la faune ou l'air, fait partie intégrante de l'écosystème qu'est la ville. Les composants relatifs aux végétaux, à l'eau ou au sol ont des configurations spatiales multiples appelées « formes environnementales » et jouent de nombreux rôles dans le milieu urbain :

« La notion de forme environnementale est mobilisée pour mettre en avant des configurations environnementales, idéelles ou matérielles, caractérisant l'espace public autant que les représentations mentales de la question environnementale. Les paysages, les trames vertes ou bleues, les corridors écologiques, le jardin (privé ou partagé), le bassin-versant, etc., sont autant de formes environnementales exprimant les rapports des citoyens à leurs lieux de vie et à la nature urbaine. » (Da Cunha et Delabarre, 2018, p. 17).

Ces formes de nature peuvent être « *plus ou moins anthropisées, artificialisées et artialisées* » (Da Cunha et Delabarre, 2018). Il existe trois types de formes environnementales dans le milieu urbain (Tableau 1), pouvant être minérales, aquatiques ou végétales :

Tableau 1 : Trois types de formes environnementales urbaines (adapté à partir de Forman (1995 & 2014))

| Formes environnementales urbaines | | |
|---|--|--|
| Tâche | Corridor | Matrice |
| Surface différente de son environnement | Surface linéaire différente de son environnement | Surface étendue dominante de fond (support) |
| Parc, jardin, point d'eau, place, ... | Chemin, rue, allée, voie de chemin de fer, rivière, canal, ... | Terres agricoles, forêt, trame verte, trame bleue, ... |

Ce travail se focalise sur les formes environnementales végétalisées. Ces dispositifs de nature ont divers rôles dans l'écosystème urbain et peuvent prendre plusieurs formes.

2.3.1 Rôles de la végétation en milieu urbain

La végétation a plusieurs fonctions dans l'écosystème qu'est la ville. Les services écosystémiques que remplit la végétation sont ordonnés dans différentes catégories (Blanc, 2010 ; Gaston et al., 2010 ; Koc et al., 2017) :

- **Services de support** : photosynthèse, formation des sols, cycle de l'eau, production primaire, vecteur d'activités économiques, lien social, ... ;
- **Services de régulation** : purification de l'air, purification de l'eau, régulation du climat, régulation des dangers naturels, ... ;
- **Services d'approvisionnement** : nourriture, matériaux, eau, ... ;
- **Services culturels** : diversité culturelle, valeurs religieuses et spirituelles, valeurs éducationnelles, relations sociales, valeurs esthétiques, espaces récréatifs, ...

Grâce à ces différents types de services, la végétation peut répondre à divers enjeux, qu'ils soient écologiques et environnementaux, sociaux et culturels, économiques ou urbanistiques.

2.3.1.1 Rôle écologique et environnemental

Ecologiquement, les végétaux sont actifs à différents niveaux. Ils agissent d'abord sur l'**air**, en capturant divers polluants et gaz. La végétation peut les capturer par absorption ou adsorption, et par dépôt des particules sur les feuilles. Elle représente également une façon de stocker le CO₂. Les végétaux limitent également l'érosion des **sols**, grâce à leur système racinaire, et les dépolluent via la phytoremédiation. Ils permettent le drainage et l'absorption des **eaux** de pluie, et

agissent sur la dépollution des eaux grâce à la phytoépuration. Le processus évapotranspiration impacte considérablement le cycle hydrologique et l'**humidité relative de l'air**. En outre, les végétaux permettent d'agir sur les **flux d'air**, en créant de la porosité et des brise-vents qui modifient ou atténuent les courants d'air ; sur le **rayonnement solaire**, grâce à l'ombre qu'ils procurent, ainsi qu'aux phénomènes d'absorption, réflexion, transmission et émission ; et sur la **chaleur**, grâce aux échanges par convection (Bouzou et Marques, 2016 ; Forman, 2014 ; Gaston et al., 2010 ; Koc et al., 2017 ; Musy, 2012 ; Sadler et al., 2010 ; Wu, 2014 ; Zhioua, 2017).

De plus, si elle est variée et indigène, la végétation favorise le maintien de la **biodiversité** dans son ensemble (Bouzou et Marques, 2016 ; Musy, 2012 ; Sadler et al., 2010).

2.3.1.2 Rôle social et culturel

Grâce à ses fonctions écologiques, la végétation génère un environnement plus sain pour les populations. Elle permet aussi, selon les individus, de se ressourcer, de se détendre ou d'y pratiquer des activités sportives. En effet, il a été observé que les végétaux ont des bienfaits thérapeutiques sur les populations humaines, tant au niveau de la **santé physique** que du **bien-être mental** (Bouzou et Marques, 2016 ; Sadler et al., 2010).

Outre les diverses activités sportives ou récréatives qui peuvent prendre place dans les espaces verts, la végétation représente une **valeur culturelle** et permet de créer du **lien social** ainsi que des **sentiments d'appartenance** (Bouzou et Marques, 2016 ; Musy, 2012 ; Wu, 2014 ; Zhioua, 2017). Les espaces verts offrent également un **aspect récréatif et ludique**, et sont un **support pédagogique** puisqu'ils offrent la possibilité aux individus de côtoyer la faune et la flore, ainsi que de remarquer et d'observer le rôle de ces espèces dans un écosystème et ainsi de les sensibiliser aux problématiques environnementales (Bouzou et Marques, 2016)

2.3.1.3 Rôle économique

En régulant l'environnement, la végétation possède également un rôle économique. En effet, dès lors qu'une amélioration du confort thermique est observée, il est possible de prédire une diminution de la consommation énergétique des bâtiments – qu'il s'agisse de consommation de climatisation et de chauffage – en les protégeant du soleil, en rafraichissant l'air alentour par effet d'évapotranspiration ou en régulant la circulation du vent autour des constructions (Zhioua, 2017). Des économies sur les dépenses liées aux soins médicaux sont également possibles puisque les

végétaux ont des bienfaits sur la santé (Bouzou et Marques, 2016). De plus, étant donné la qualité esthétique de la végétation, elle génère une valorisation du foncier et peut agir en tant qu'attracteur touristique (Bouzou et Marques, 2016). Finalement, elle permet la création d'emplois, liée notamment à la gestion et à l'entretien des espaces verts (Bouzou et Marques, 2016).

2.3.1.4 Rôle urbanistique

Grâce à ses fonctions écologiques, la végétation procure donc un **confort thermique** en régulant le climat urbain. De plus, elle apporte un **confort acoustique** dans les espaces public en réduisant les nuisances sonores (Bouzou et Marques, 2016 ; Zhioua, 2017 ; Wu, 2014).

De plus, les espaces verts ont un rôle d'**embellissement** de la ville ; l'aspect esthétique qu'ils apportent et les ambiances qu'ils créent sont non-négligeables. Enfin, la végétation offre une **lisibilité** à la ville, ce qui permet aux individus de s'orienter dans un milieu urbain. Elle permet de limiter les espaces, de les diversifier et de leur donner des identités propres. De plus, la lisibilité des axes principaux peut être renforcée grâce à des arbres d'alignement (Mollie, 2009 ; Musy, 2012 ; Stefulesco, 1997 ; Zhioua, 2017).

Les végétaux représentent, en termes de planification urbaine, un outil de **cohérence spatiale** qui peut aider à requalifier des territoires, à structurer l'espace et à contenir l'étalement urbain (Mollie, 2009 ; Musy, 2012 ; Stefulesco, 1997 ; Zhioua, 2017).

2.3.2 Formes végétales urbaines

La végétation urbaine peut être observée selon divers paramètres (Tableau 2). Un de ces paramètres est la « forme végétale ». Il existe quatre types de formes végétales se déclinant en différentes infrastructures végétales (Tableau 3).

Tableau 2 : Paramètres définissant les formes végétales urbaines (liste non-exhaustive d'après Koc et al., (2017) ; Pommier et al. (2014))

| Paramètres de classification | |
|------------------------------|---|
| Espèce | Attributs végétaux (taille, feuillage, propriétés thermiques,...) |
| Localisation | Domaine public ou privé |
| | Accessibilité |
| | Affectation |

| | |
|--------------------------------------|---|
| Échelle | Bâtiment Rue Quartier Ville |
| Strates | Herbacée Arbustive Arborée |
| Importance | Degré de protection |
| Origine | Naturelle ou anthropique Indigènes ou exotique |
| Mode de gestion et d'entretien | Gestion différenciée Mode extensif ou intensif |
| Valeurs | Socio-culturelles Économiques Environnementales Politiques |
| Fonctions et services écosystémiques | Approvisionnement Régulateur Culturel Support |
| Forme végétale | Couvertures forestières – Canopées Espaces verts ouverts Toitures vertes Systèmes de verdure verticaux |
| ... | |

Tous ces paramètres de classification sont importants à prendre en compte lors de l'implantation de végétaux dans la ville. McPherson (1994) soulève par exemple que la plantation de végétaux indigènes reflète la structure des communautés végétales locales et favorise ainsi un sentiment d'appartenance au lieu. D'un point de vue thermique, Musy (2012) relève que la végétation, lorsqu'elle est trop dense, peut bloquer la circulation de l'air où il y aurait justement besoin d'air pour réguler la température ambiante.

C'est pourquoi il est important de penser à l'implantation de végétation en prenant en compte tous les autres paramètres qui la qualifie, ainsi que la forme qu'elle prend sur le territoire urbain (Tableau 3). En effet, l'effet régulateur thermique d'un parc dépend des espèces des arbres, de la densité de la canopée mais aussi de ses propriétés physiques (grandeur et forme) (Feyisa et al., 2014). L'impact au sol, la taille, la forme et les connectivités des surfaces vertes entre elles sont primordiales afin d'en maximiser les effets (Deilami et al., 2018). Les parcs ayant des formes irrégulières ou étant allongés ont tendance à avoir un impact de refroidissement sur une plus

grande distance, contrairement aux parcs compacts qui créent un contraste thermique plus important avec leur environnement immédiat (Feyisa et al., 2014).

Tableau 3 : Formes et infrastructures végétales urbaines (d'après AIVF (Association des Ingénieurs des Villes de France), 1995, cité dans Bougé, 2009 ; Koc et al., 2017)

| Formes environnementales végétales urbaines | | | |
|---|---|-------------------------------|-------------------------------|
| Couvertures forestières - Canopées | Espaces verts ouverts | Toitures vertes | Systèmes de verdure verticaux |
| Types d'infrastructures végétales | | | |
| Ceintures arborées | Ceintures herbacées | Toits végétalisés (éco-toits) | Murs biologiques |
| Rues vertes | Voies vertes | Toits verts | Façades vertes |
| Parcs verts | Couloirs verts | Toits vivants | Murs vivants |
| Places vertes | Sentiers pédestres | Jardins sur les toits | Aménagement paysager vertical |
| Jardins verts | Espaces verts naturels | | Végétation verticale |
| Arbres Isolés, groupés, d'alignement,... | Espaces verts publics/privés/com-munautaires | | |
| Arbustes, haies, bosquets | Parcs, jardins, plantages, jardins familiaux,... | | |
| Vergers | Espaces verts aménagés | | |
| Forêts urbaines | Terrains de sport, golfs, places de jeux, camping,... | | |
| Parcelles forestières | Sols végétalisés | | |
| Bordures de voies | Gazons, pelouses, prairies,... | | |
| | Zones humides/tampons | | |
| | Noues,... | | |
| | Liaisons vertes | | |
| | Rails/voies ferrées, caniveaux,... | | |
| | Cimetières | | |
| | Friches | | |
| | Parcelles agricoles | | |
| | Bordures de voies | | |

La végétation urbaine se matérialise donc sous de nombreuses formes, pouvant devenir de véritables dispositifs d'ingénierie écologique (voir chapitre 4.1.1 *Exemples d'implantation de formes végétales*). Toutefois, il existe également des exemples utopiques d'urbanisme végétal, modelant de nouvelles formes végétales à l'échelle du quartier ou même de la ville, tels que les travaux des architectes belges Vincent Callebaut (Figure 3) et Luc Schuiten (Figure 4).



Figure 3 : Projet de Vincent Callebaut pour la densification des quartiers Praille-Vernets-Acacias à Genève (vincent.callebaut.org)



Figure 4 : « Vegetal City », dessin de Luc Schuiten (vegetalcity.net)

Les impacts environnementaux, sociaux et économiques de l'implantation de végétation en ville sont notables, mais il faut toutefois être conscients de l'impact de sa présence et de sa forme, ainsi que des enjeux qui peuvent en découler. En effet, les structures urbaines peuvent nuire à la croissance et à la vie des espèces végétales en fournissant notamment trop d'ombre, trop de chaleur, trop de polluants, trop de lumière, ou en ne laissant pas assez de place aux réseaux racinaires à cause d'un manque de pleine terre ou d'une trop forte densité de réseaux souterrains (canalisations, microfibres, etc.) (Forman, 2014 ; Musy, 2012).

La végétation et l'urbanisation doivent être pensés conjointement puisqu'ils s'influencent l'un l'autre (Mollie, 2009 ; Musy, 2012). Il est primordial que le projet urbain intègre la question des formes végétales afin de pouvoir en maximiser les bienfaits. En effet, en tant qu'être vivants, les végétaux se développent et s'adaptent. Leur forme, leur envergure ainsi que les services écosystémiques qu'ils vont rendre vont évoluer avec leur propre développement.

Résumé première partie

Dans un contexte où les villes sont autant impactées par le climat qu'elles ne l'affectent lui-même, les effets du changement climatique questionnent les processus de fabrication des systèmes urbains ainsi que les stratégies à adopter par ces derniers face aux enjeux climatiques. Les stratégies d'adaptation et d'atténuation, ainsi que le besoin de résilience urbaine suggèrent des pistes d'actions pour y répondre. Le projet urbain, intrinsèquement lié à l'idée de réversibilité, représente un instrument permettant une analyse et une conception contextualisées et multidisciplinaires du territoire. En y associant les théories issues des champs de l'écologie urbaine, le projet urbain s'impose comme vecteur d'adaptation au changement climatique. Le besoin d'ancrer les mesures d'adaptation dans les définitions collectives et dans les politiques locales est cependant encore à réaliser afin d'être pleinement intégré dans les pratiques urbaines.

La végétation, de par les multiples formes qu'elle peut prendre, remplit plusieurs rôles indispensables à l'échelle de la ville et agit sur plusieurs facteurs physiques et urbanistiques. Elle représente d'ailleurs un vecteur fondamental de la qualité urbaine et de l'habitabilité des villes, et agit dans les stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Il est alors question de penser à l'implantation de formes végétales au travers de l'urbanisme végétal et de l'intégrer dans le projet urbain dans le but de faire face au changement climatique ainsi qu'aux effets d'îlots de chaleur urbains.

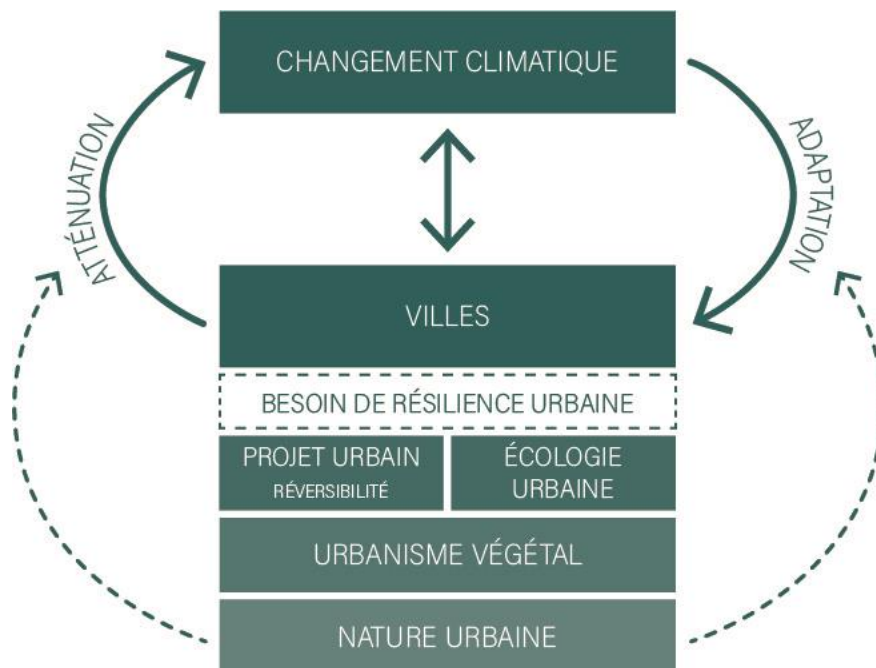


Figure 5 : Résumé des concepts mobilisés (Bovay, 2020)

DEUXIÈME PARTIE – ILOTS DE CHALEUR URBAINS & STRATÉGIES

3 Ilots de chaleur urbains (ICU)

3.1 Climat urbain

Si les villes ont un climat aussi différent que les régions non-urbanisées, c'est à cause de leur morphologie et de leur métabolisme. Une zone est dite « urbaine » lorsqu'elle est caractérisée par une forte densité de population et d'importantes surfaces imperméables (Wu, 2014). Toutefois, la notion d'« urbain » n'est pas reliée à une seule définition incontestable (Stewart et Oke, 2012 ; Wu, 2014). L'environnement des villes en est considérablement modifié : divers **facteurs urbains** (la forme urbaine, les structures bâties et naturelles, les matériaux, les activités anthropiques, la végétation, les plans d'eau, etc.) agissent sur des **paramètres physiques et climatiques** (Fallot et Rebetez, 2008 ; Forman, 2014, p. 162 et p. 216 ; Musy, 2012). Ces éléments sont résumés dans le Tableau 4 :

Tableau 4 : Altérations des paramètres physiques et climatiques en milieu urbain (d'après Fallot et Rebetez, 2008 ; Forman, 2014, p. 126 et p. 216 ; Musy, 2012)

| Paramètres physiques et climatiques | En milieu urbain (par rapport aux milieux non-urbains) | Facteurs urbains altérant les paramètres | |
|-------------------------------------|--|--|---|
| Radiation | Radiations UV | 25-90% moins | |
| | Radiations solaires | 1-25% moins | Ombre des structures urbaines |
| | Durée d'ensoleillement | 5-15% moins | |
| | Rayonnement infrarouge | 5-40% plus | Structures urbaines = beaucoup de surfaces exposées au rayonnement infrarouge |
| Chaleur et température | Température de l'air | 1-3°C de plus (moyenne annuelle) Jusqu'à 12°C lors de certaines occasions | Structure urbaine et matériaux à faible albédo |
| | Flux de chaleur sensible | 50% plus | |
| | Stockage de chaleur | 200% plus | |
| | | | |

| | | | |
|------------------|------------------------------|--|--|
| | Evapotranspiration | 50% moins | |
| Humidité et eau | Humidité relative en été | 8-10% moins | Matières imperméables |
| | Précipitations pluvieuses | 5-10% plus | Activités anthropiques (polluants et particules) |
| | Précipitations neigeuses | Moins | Chaleur urbaine |
| | Ruissellement | Plus | Matières imperméables |
| Flux d'air | Vitesse du vent (10m du sol) | 5-30% moins | |
| | Turbulences | 10-50% plus | Rugosité du bâti et canyons urbains |
| | Direction du vent | 1-10° altérée, et davantage dans les rues où les courants sont fortement canalisés | |
| Qualité de l'air | Pollution de l'air | 500-2500% plus | Activités anthropiques (polluants et particules) et rugosité du bâti |

Les structures urbaines, variant fortement en territoire urbain, il est possible de parler de microclimats urbains à l'échelle des quartiers (Masson, 2010). Forman (2014) identifie plusieurs types de structures urbaines, bâties et naturelles, ayant chacun une façon d'influencer le climat à son échelle (Tableau 5). Ces endroits peuvent modifier le gradient de température : les parcs ou points d'eau auront tendance à diminuer la température localement, alors que les activités industrielles ou centres commerciaux généreront des zones plus chaudes (Oke, 1982). La composition hétérogène des villes implique un climat urbain complexe, nécessitant des études météorologiques adaptées.

Tableau 5 : Types de structures urbaines (bâties et naturelles) influençant le climat urbain (Erell et al., 2011 dans Forman, 2014)

| Types de structures urbaines (bâties et naturelles) influençant le climat urbain | |
|--|--|
| Bloc de maisons | |
| Canyon urbain, rue, route, (segment d')autoroute, (section) de chemin de fer | |
| (Section de) rivage (lac, estuaire, mer), bord de rivière | |
| Cour/patio, placette/petit espace vert, grand espace vert ouvert | |
| Parking, toit, mur | |

3.2 ICU : Définition

C'est Howard, en 1833, dans « *Climate of London* », qui est le premier à introduire le concept d'îlot de chaleur urbain (ICU) en exposant que la température de l'air est généralement plus haute en ville que dans les zones rurales périphériques (Oke, 1982 ; Stewart, 2011). Depuis, beaucoup d'études à ce sujet ont documenté le phénomène d'ICU, notamment dans les villes d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Asie (Arnfield, 2003 ; Deilami et al., 2018 ; Oke, 1973 ; Oke, 1982 ; Zhou et al., 2019 ; Rizwan et al., 2008 ; Stewart, 2011).

Il existe un effet d'ICU lorsqu'un espace urbain est sujet à des températures plus élevées que les zones rurales alentours (Gaston et al., 2010 ; Oke, 1973 ; Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008). Cette « *anomalie thermique* » (Oke, 1982) peut générer des différences de température de plus de 10°C entre une ville et la région rurale adjacente (Fallot et Rebetez, 2008 ; Gaston et al., 2010 ; Masson, 2010). En été, l'ampleur des ICU des villes suisses peut atteindre 5 à 7°C (Fallot et Rebetez, 2008 ; Gehrig et al., 2018).

Les recherches traitant des ICU définissent qu'il existe deux catégories d'ICU en fonction des mesures de la température (Figure 6) (Deilami et al., 2018 ; Mirzaei, 2015 ; Zhou et al., 2019) :

- ICU atmosphériques

▪ ICU de limite urbaine (*Boundary layer UHI (BUHI)*)

Ce type d'ICU prend en compte la température de la couche d'air s'étendant de l'altitude des toits jusqu'à l'atmosphère.

▪ ICU de canopée (*Canopy layer UHI (CUHI)*)

Ce type d'ICU prend en compte la température de la couche d'air s'étendant du sol jusqu'au niveau des toits.

- ICU de surface (*Surface UHI (SUHI)*)

Ce type d'ICU est mesuré à partir de la température de la surface terrestre.

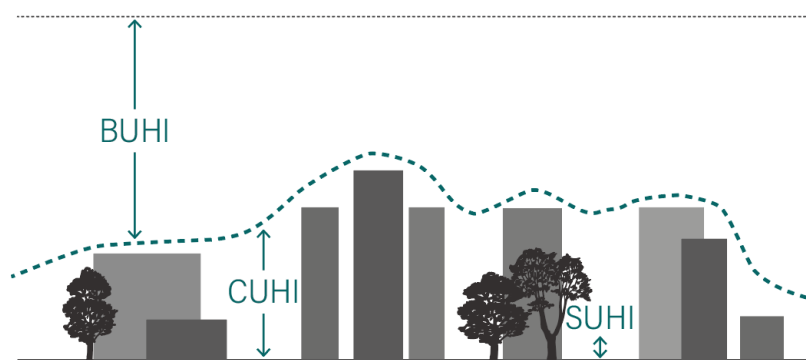


Figure 6 : Différents types d'ICU (Bovay, 2020)

L'effet d'ICU décrit des températures d'air et de surface diurnes significativement plus élevées en ville que dans les zones rurales alentours, et se rafraichissant difficilement pendant la nuit (Anquez et Herlem, 2011 ; Gaston et al., 2010 ; Oke, 1973 ; Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008).

En général, l'intensité d'ICU atmosphériques, soit la différence entre la température rurale et la température urbaine la plus élevée, est maximale environ 3 à 5 heures après le coucher du soleil, lors des nuits estivales, lorsque le ciel est dégagé et que les vents sont faibles (Anquez et Herlem, 2011 ; Gaston et al., 2010 ; Oke, 1973 ; Oke, 1982 ; Zhou et al., 2019). L'intensité d'ICU varie également selon les latitudes : « *dans les latitudes moyennes, l'ICU est plus prononcé par situation anticyclonique en hiver dans les grandes agglomérations et en été pour les moyennes et petites villes* » (Fallot et Rebetz, 2008). En effet, une partie du rayonnement solaire arrivant à la surface terrestre est utilisée pour chauffer l'environnement, alors que l'autre partie est stockée par les structures et matériaux sous forme d'énergie thermique, puis réémise en fin de journée, lorsque l'environnement se refroidit suite au coucher du soleil (Rizwan et al., 2008). En ce qui concerne les ICU de surface, leur intensité est maximale pendant la journée (Zhou et al., 2019).

En zone rurale, les surfaces ne stockent que peu d'énergie, la majorité étant utilisée pour l'évapotranspiration de la végétation qui est davantage présente qu'en ville (Masson, 2010). Lors du coucher du soleil, les surfaces réémettent l'énergie radiative stockée et la température baisse. En effet, elle peut descendre de 2 à 3°C par heure à ce moment de la journée, puis, au fil de la nuit, le taux de refroidissement diminue et se stabilise à environ 0,5°C par heure jusqu'au lever du soleil (Oke, 1982).

Les zones urbaines, où le taux de refroidissement est moins important, voient leur température rester significativement supérieures aux zones rurales alentours. Le bâti et les routes, représentant la majorité des surfaces urbaines, possèdent de faibles albédos et donc une importante capacité thermique ainsi qu'une haute conductivité thermique. Il en résulte une forte absorption et un important emmagasinement de chaleur issue de la radiation solaire pendant la journée. Cette chaleur est ensuite réémise, particulièrement durant la nuit, ce qui empêche les zones urbaines de voir leurs températures baisser de la même façon que les zones rurales alentours (Gaston et al., 2010 ; Matson et al., 1978).

Même si les effets d'ICU sont généralement discutés dans les grandes villes, les petits centres urbains sont également sujets à ces phénomènes (Matson et al., 1978 ; Stewart et Oke, 2012) et ce, qu'ils soient situés dans un climat chaud ou froid (Stewart et Oke, 2012). La corrélation entre la taille ou la densité de la ville et l'intensité des ICU est débattue (Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008).

Le terme d' « îlot de chaleur urbain » doit toutefois être utilisé avec prudence. En effet, toute différence significative de température entre ville et campagne n'est pas forcément due à un effet d'îlot de chaleur urbain, et n'est pas forcément une conséquence de l' « urbain » (Stewart, 2011). Il se peut qu'un écart de température soit uniquement lié à des causes météorologiques ou topographiques (Stewart, 2011). Il est primordial de pouvoir distinguer l'influence urbaine et l'influence non-urbaine sur des différences de températures.

3.3 Facteurs influençant les ICU

Comme expliqué dans le chapitre précédent, les facteurs principaux influençant les ICU sont relatifs à la chaleur issue du rayonnement solaire, lui-même étant un facteur « incontrôlable ». Les paramètres climatiques et physiques tels que la radiation, les flux de chaleur, d'humidité et d'air sont fondamentaux pour expliquer la formation d'ICU. Les processus d'évapotranspiration et de stockage de chaleur sont directement liés aux questions d'occupation du sol et de forme urbaine (Masson, 2010 ; Stewart et Oke, 2012), éléments sur lesquels il est possible d'avoir un contrôle. Toutefois, d'autres facteurs – incontrôlables et contrôlables – entrent également en compte lorsque les ICU sont abordés.

3.3.1 Facteurs incontrôlables

A une échelle globale, la latitude, le climat et les saisons sont des éléments qui influencent l'effet d'ICU. Ils ont des impacts directs sur la météorologie, la couverture du sol et sur l'activité métabolique des végétaux (Dahech et al., 2005 ; Deilami et al., 2018 ; Fallot et Rebetez, 2008 ; Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008). C'est en été que sont observés les ICU ayant les intensités les plus élevées puisque c'est à ce moment de l'année qu'il y a le plus de situations anticycloniques, un angle de rayonnement solaire optimal et une couverture du sol avec un faible albédo (Anquez et Herlem, 2011 ; Deilami et al., 2018 ; Gaston et al., 2010 ; Oke, 1973 ; Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008 ; Zhou et al., 2019). En effet, en hiver, si de la neige recouvre les surfaces, l'albédo est élevé et empêche le stockage d'énergie solaire.

La situation géographique à l'échelle locale se révèle également être un facteur agissant indirectement sur les ICU puisqu'elle impacte le climat local de par la topographie, la nature du sol ou encore la présence de points d'eau (Oke, 1982).

Les autres éléments météorologiques et climatiques, dépendant en grande partie des saisons et de la situation géographique citées précédemment, entrent également en compte. La vitesse du vent et la couverture nuageuse sont négativement corrélées avec les ICU ; le vent créant des transferts de chaleur et les nuages limitant le rayonnement solaire (Fallot et Rebetez, 2008 ; Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008). La direction du vent, la stabilité et l'humidité de l'air relèvent aussi de facteurs impactant les ICU (Dahech et al., 2005 ; Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008 ; Zhou et al., 2019).

3.3.2 Facteurs contrôlables

Les facteurs contrôlables sont intrinsèquement liés à la forme urbaine, à l'occupation du sol, aux matériaux, ainsi qu'aux activités anthropiques.

L'écosystème urbain est fortement minéralisé et cela agit à deux niveaux. Premièrement, l'imperméabilité du sol agit sur la chaleur : les flux de chaleur latente sont plus faibles en ville qu'en campagne, alors que les flux de chaleur sensible sont plus importants. En effet, l'addition d'un sol urbain majoritairement imperméable et d'une constatable perte du couvert végétal en ville a pour conséquences d'une part de générer le ruissellement des eaux de précipitations et, d'autre part, de limiter le phénomène d'évapotranspiration qui a la capacité de rafraîchir l'air en utilisant la chaleur latente pour évaporer l'eau. La mauvaise capacité hydrique des terrains urbains a une grande influence sur le stockage de chaleur sensible et donc sur le réchauffement de l'air par le soleil (Dahech et al., 2005 ; Fallot et Rebetez, 2008 ; Matson et al., 1978, Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008 ; Zhou et al., 2019). Deuxièmement, les propriétés thermiques des matériaux urbains agissent fortement sur la température, et cela est fortement lié à leur faible albédo qui permet une grande absorption du rayonnement solaire. Les structures urbaines stockent cette énergie sous forme de chaleur et la restituent (Dahech et al., 2005 ; Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008 ; Zhou et al., 2019). Il existe ainsi une corrélation positive entre les surfaces imperméables et les ICU (Deilami et al., 2018). En outre, une corrélation négative entre la végétation et les ICU est également documentée. Il s'agit spécifiquement de l'activité chlorophyllienne – calculée par télédétection grâce au *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) – des différentes surfaces végétalisées qui donnera plus ou moins de capacité au végétal à participer au phénomène d'évapotranspiration (Chen et al., 2006 ; Feyisa et al., 2014 ; Guha et al., 2018 ; Lo et al., 1997 ; Rizwan et al., 2008 ; Weng et al., 2004 ; Zhou et al., 2019). De plus, la morphologie urbaine, l'orientation des rues, la densité et la géométrie du bâti génèrent une rugosité urbaine qui influence la vitesse et la direction des vents, ainsi que la réflexion du rayonnement solaire (Dahech et al.,

2005 ; Matson et al., 1978 ; Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008 ; Zhou et al., 2019). En effet, le *sky view factor* (facteur de vue du ciel) a un impact sur les quantités de radiations solaires stockées. Les surfaces urbaines ayant peu de « vue du ciel » (les rues étroites par exemple) stockent plus de chaleur que les zones ouvertes où les radiations solaires peuvent être réémises (Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008). Il est alors nécessaire d'agir autant sur l'utilisation du sol et sa composition, que sur sa configuration spatiale (Deilami et al., 2018).

Finalement, les activités humaines ont un fort impact sur les ICU. Les pertes de chaleur issues des bâtiments, que ce soit en hiver à cause de l'utilisation de chauffage ou en été à cause de l'air conditionné. En effet, ces dispositifs consomment beaucoup d'énergie et rejettent de la chaleur qui contribue au réchauffement ambiant. Ce processus-là s'apparente vraisemblablement à un cercle vicieux. De plus, les activités industrielles ou encore le trafic urbain se ressentent fortement sur l'environnement extérieur (Dahech et al., 2005 ; Matson et al., 1978 ; Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008 ; Zhou et al., 2019). Les émissions de polluants et d'aérosols générées par les activités anthropiques favorisent une absorption du rayonnement solaire et une réémission du rayonnement de longues ondes, ce qui empêche le refroidissement de surface (Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008). Ce phénomène est appelé « *pseudo-greenhouse effect* » (Rizwan et al., 2008).

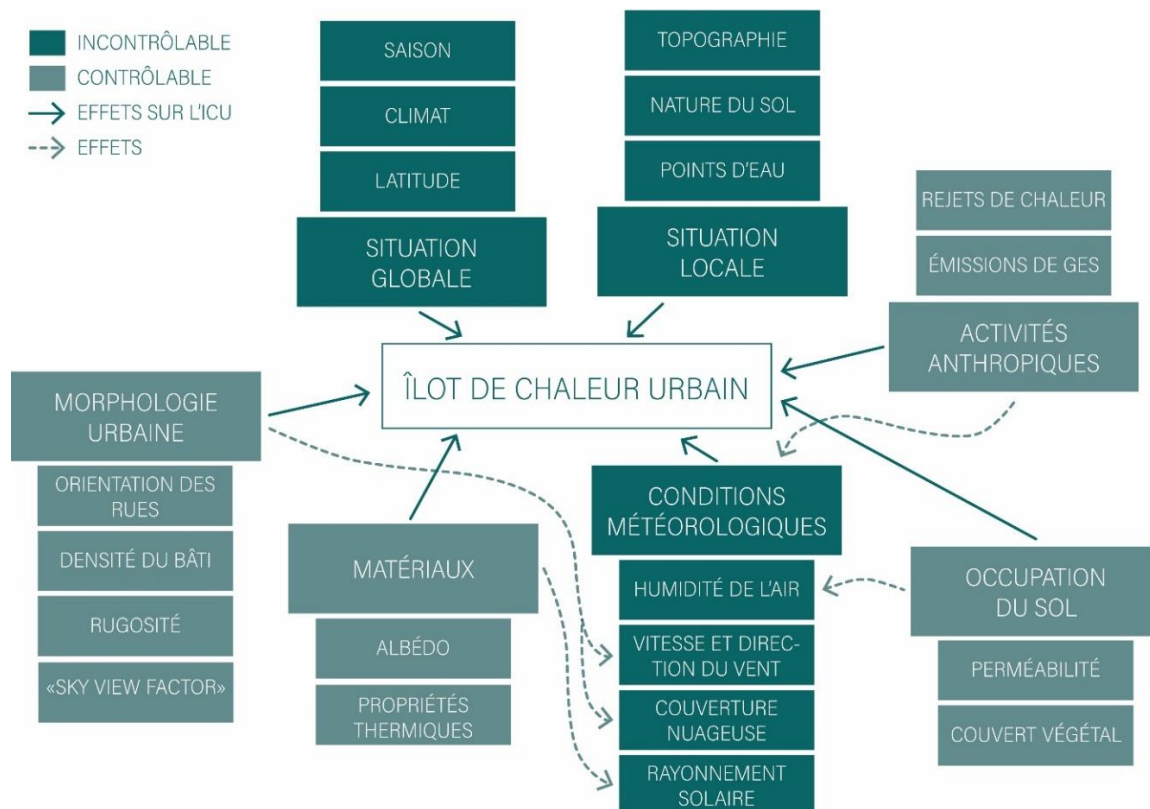


Figure 7 : Résumé des facteurs influençant les ICU (Bovay, 2020)

3.4 Impacts et enjeux

Les ICU ont divers impacts sur les écosystèmes urbains et leurs paramètres climatiques. Ces altérations génèrent des enjeux en termes de qualité de l'air, de stress thermique, de gestion des fortes précipitations, de consommation énergétique et d'inégalité sociale et écologique.

Concernant la ventilation, les ICU génère des ascendances d'air formant des « dômes urbains » au-dessus des villes qui piègent les polluants (Fallot et Rebetez, 2008). De plus, lorsqu'une importante pollution de l'air est liée à une augmentation de la température, la formation d'ozone est favorisée (Anquez et Herlem, 2011 ; Fallot et Rebetez, 2008), ainsi que la prolifération de bactéries et moisissures (Anquez et Herlem, 2011). En outre, au vu de la température supérieure qu'ils impliquent, les ICU provoquent des stress thermiques, augmentant ainsi la vulnérabilité des individus ainsi que le taux de mortalité (Anquez et Herlem, 2011 ; Champiat, 2009 ; Gaston et al., 2010 ; Masson, 2010 ; Rizwan et al., 2008 ; Stewart et Oke, 2012). Les ICU impactent donc la santé des populations urbaines en détériorant la qualité de l'air et en générant des stress thermiques. Les individus les plus potentiellement affectés sont les très jeunes enfants, les personnes âgées, atteintes de maladies, isolées, etc. (Anquez et Herlem, 2011). En 2003 par exemple, environ 30'000 décès ont été causés par la canicule en Europe (Quenault, 2013).

Les ascendances créées par les ICU engendrent la création de noyaux de condensation formés de particules et de polluants. Ce phénomène provoque une augmentation des précipitations de 5 à 10% (Fallot et Rebetez, 2008 ; Forman, 2014). Ceci soulève évidemment la question de la gestion des fortes pluies dans les milieux urbains, majoritairement imperméables, et des risques d'inondations.

Il est clair que les écosystèmes naturels des villes ne sont pas épargnés des effets des ICU. En effet, la faune et la végétation souffrent également des épisodes caniculaires, notamment lorsque les ressources en eau se font rares. De plus, la floraison et les dynamiques entre les espèces sont fortement altérées (Gaston et al., 2010 ; Rizwan et al., 2008).

En outre, il est présenté que les régions sujettes aux ICU utilisent intensément les systèmes de climatisation : il est possible d'y constater une importante consommation d'énergie fossile et donc une augmentation des émissions de gaz à effet de serre (Gaston et al., 2010 ; Rizwan et al., 2008 ; Stewart et Oke, 2012). En se basant sur les aspects cités dans le chapitre précédent traitant des facteurs impactant la formation d'ICU, il est possible d'observer des liens de cause à effet entre l'augmentation des effets d'ICU et l'utilisation de climatisation en ville (Nuruzzaman, 2015).

Au-delà des problématiques de confort et de bien-être dont il est question, les impacts des ICU représentent une inégalité sociale et écologique. En effet, la vulnérabilité aux ICU peut être liée à la présence plus ou moins importante de végétation dans un quartier. Or, la quantité et variété de végétation dans un quartier est fortement liée au statut socio-économique la population qui l'habite. Cette vulnérabilité – qui sera exacerbée par les changements climatiques à venir – souligne des inégalités sociales (Quenault, 2013). Revient alors la question de l'habitabilité urbaine et de l'accès aux services écosystémiques traitée par Blanc (2010).

L'exemple du Boulevard de l'Acadie (Figure 8), exposé par Terrin (2015), permet d'illustrer le phénomène d'ICU à Montréal et ses diverses composantes. Lors de journées d'été, il est possible de mesurer des différences de températures d'au-moins 6°C entre les deux côtés de la route qui sépare le quartier de Parc-Extension et la cité-jardin de Mont-Royal.



Figure 8 : Le quartier de Parc-Extension (en-haut) et la cité-jardin de Mont-Royal (en-bas), séparés par le boulevard de l'Acadie à Montréal (Terrin, 2015)

« Une observation plus minutieuse du site permet de constater que cette différence de température est pour une bonne partie due aux disparités du couvert végétal et de l'intensité de la circulation automobile de part et d'autre de l'artère. Mais elle est également influencée par des morphologies urbaines

distinctes et par la densité de leurs parcelles, par les revêtements de surface des bâtiments et des sols qui les composent ; elle l'est aussi par les populations qui habitent dans ces deux quartiers, par leurs activités, leurs modes de vie, leurs revenus, leur éducation, et en définitive leur culture urbaine. » (Terrin, 2015, p. 11-13).

Il faut toutefois relever que le phénomène d'ICU peut être perçu positivement selon le climat de la ville en question. En effet, Stewart et Oke (2012) exposent que pour une ville évoluant dans un climat froid, les ICU peuvent, d'une part, améliorer le confort thermique extérieur et intérieur, et ainsi diminuer les besoins en chauffage ou les dangers liés aux routes gelées ; et, d'autre part, offrir de meilleures conditions d'habitat pour la faune et la flore locale.

Finalement, les enjeux liés aux ICU sont nombreux et doivent être pris en compte dans les projets urbanistiques. Il est impératif d'identifier où les ICU se trouvent, afin de pouvoir y remédier à des fins environnementales, sociales et économiques, et de contribuer à améliorer la qualité de vie en ville, tout en rendant ce milieu – où vit plus de la moitié de la population mondiale – résilient face aux aléas imposés par le changement climatique.

3.5 Identification des ICU

Depuis des dizaines d'années, plusieurs méthodes ont été élaborées afin d'identifier les ICU. Dans ce chapitre, il sera question d'élaborer un spectre des différents outils et méthodes utilisés afin de localiser et quantifier les ICU. Pour rappel, le terme d'ICU s'applique lorsqu'un espace urbain est sujet à des températures plus élevées que les zones rurales alentours (Gaston et al., 2010 ; Oke, 1973 ; Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008). L'approche « conventionnelle » citée par Stewart et Oke (2012) pour établir la présence et l'intensité d'un ICU implique donc de **calculer la différence entre la température d'un site qualifié d'« urbain » et celle d'un site alentour qualifié de « rural »**.

De plus, il est nécessaire de définir un cas d'étude, en établissant une échelle spatiale et temporelle (Oke, 2004), car il est possible d'identifier différents types d'ICU en fonction de (Deilami et al., 2018 ; Rizwan et al., 2008 ; Stewart, 2011) :

- L'échelle spatiale
- L'échelle temporelle
- Les outils de mesure

3.5.1 Echelle spatiale

Echelle « Verticale » : La couche dont est mesurée la température

Les recherches traitant des ICU définissent qu'il existe trois types d'ICU en fonction de l'altitude des mesures de la température (Deilami et al., 2018 ; Mirzaei, 2015 ; Zhou et al., 2019) :

- **ICU atmosphériques :**
 - **ICU de limite urbaine :** Ce type d'ICU prend en compte la température de la couche d'air s'étendant de l'altitude des toits jusqu'à l'atmosphère.
 - **ICU de canopée :** Ce type d'ICU prend en compte la température de la couche d'air s'étendant du sol jusqu'au niveau des toits.
- **ICU de surface :**
 - **ICU de surface :** Ce type d'ICU est mesuré à partir de la température de la surface terrestre.

Echelle « Horizontale » : Le territoire pris en compte

Il est possible de traiter la question climatique sur des plus ou moins grandes surfaces territoriales (Aguilar et al., 2003 ; Deilami et al., 2018 ; Mirzaei, 2015 ; Oke, 2004) :

- **Echelle méso** (>30 km) qui prend en compte l'influence de la ville sur son propre climat ainsi que des éléments alentours, tels que les points d'eau, les cultures, les forêts, la topographie, etc. ;
- **Echelle locale** (1 à quelques km) qui inclut les effets des éléments paysagers tels que la topographie et les éléments morphologiques de la ville à l'échelle de ses quartiers (type de couverture du sol, densité, activités anthropiques, etc.) ;
- **Echelle micro** (<100 m) qui s'intéresse au microclimat généré par chaque surface ou chaque objet. Chaque structure bâtie et chaque arbre est donc pris en considération.

3.5.2 Echelle temporelle

Comme déjà traité précédemment, l'intensité d'ICU est maximale en situation anticyclonique, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de nuage et pas de vent. L'intensité d'ICU atmosphérique est la plus grande lors des nuits estivales, environ 3 à 5 heures après le coucher du soleil (Anquez et Herlem, 2011 ; Gaston et al., 2010 ; Oke, 1973 ; Oke, 1982 ; Rizwan et al., 2008), alors que celle des ICU de surface est maximale pendant la journée (Zhou et al., 2019). Cela indique que **la saison, le jour**

(en fonction de situation météorologique) et l'**heure** auxquels sont mesurées les températures vont influencer l'intensité d'ICU.

3.5.3 Outils de mesure

En fonction de l'échelle spatiale et temporelle désirées, l'identification d'ICU peut être réalisée grâce à différentes outils et méthodes. L'utilisation d'un outil ou d'un autre va évidemment également être influencée par le budget et le temps alloués à la recherche en question. Dans tous les cas, Stewart (2011) promeut l'étude d'un petit jeu de données plutôt que de ne pas maîtriser une trop grande quantité de paramètres.

3.5.3.1 Mesures *in situ*

Les mesures *in situ* regroupent les façons de mesurer les températures via des capteurs au sol et vont surtout servir à mesurer les ICU atmosphériques. Les mesures peuvent être mobiles ou fixes :

- **Mobiles** (via un véhicule) : Cette méthode consiste à effectuer des parcours urbains avec un véhicule sur lequel est fixé un capteur afin de connaître les températures tout au long du trajet. Il est ensuite possible d'utiliser une classification des sites urbains pour extrapoler les résultats à toute la ville. Ce système a beaucoup de succès, mais demande beaucoup de travail et de temps (Stewart, 2011).
- **Fixes** : Cette méthode comprend des mesures fixes de températures d'air – et éventuellement d'autres paramètres – et permet d'étudier la variabilité temporelle du phénomène d'îlot de chaleur urbain, en plus de la variabilité spatiale en plus de la variabilité temporelle. Ce procédé est connu comme étant plus simple à mettre en place et plus clair à expliquer (Stewart, 2011), mais représente un coût financier important et, ne couvrant pas l'entier du territoire, ne donne pas assez de détails à propos de l'aménagement du territoire à une échelle micro (Zhou et al., 2019).

Les ICU de limite urbaine sont souvent mesurés via des capteurs fixés sur des hautes plateformes, sur des tours par exemple, tandis que les ICU de canopée sont déterminés grâce à des capteurs liés à des stations météorologiques ou fixés sur des véhicules (Zhou et al., 2019). Afin de documenter l'ampleur et l'extension des ICU dans l'atmosphère au-dessus des toits, des mesures *in situ* dans la dimension verticale existent également et peuvent être réalisées par radiosondages

atmosphériques à l'aide de ballons météo emportant des sondes de mesures, ou par avion, hélicoptère, drone ou satellite.

3.5.3.2 Télédétection

La télédétection est une technique permettant l'acquisition d'informations sur un objet ou phénomène à l'aide d'un instrument de mesure sans contact physique. Souvent, il s'agit de capteurs aéroportés, fixés sur des avions ou des satellites, qui génèrent un ensemble de mesures servant à construire une image. Dans l'étude des ICU, il s'agit de capteurs passifs recevant, d'une part, les ondes courtes réfléchies sur les bandes spectrales (domaine visible) et, d'autre part, les ondes longues émises par la surfaces terrestre et l'atmosphère sur les bandes thermiques (domaine infrarouge) (Oke, 2004 ; Zhou et al., 2019). Les images satellites ou aériennes permettent d'obtenir les températures de brillance. En connaissant l'émissivité des matériaux, il est alors possible de calculer les températures de surface. Les outils de télédétection dans l'infrarouge thermique vont ainsi servir à mesurer les ICU de surface (Rizwan et al., 2008 ; Zhou et al., 2019).

Les images de télédétection sont pratiques car elles permettent à la fois de calculer la température de la surface du sol et de qualifier l'utilisation du sol pour une ville entière par le traitement d'un seul jeu de données. De plus, elles peuvent fournir des observations récurrentes de la surface de la Terre, ce qui permet d'étudier l'environnement thermique et les paramètres de surface à différentes échelles spatiales (de l'échelle locale à l'échelle mondiale) et temporelles (diurne, saisonnière et interannuelle) (Matson et al., 1978 ; Rizwan et al., 2008 ; Zhou et al., 2019).

L'utilisation des données satellite dans les recherches sur les ICU de surface a débuté au début des années 1970 et, au vu des progrès dans le domaine de la télédétection, elle n'a cessé d'augmenter (Zhou et al., 2019). Zhou et al. (2019, p. 9) décrivent trois méthodes qui découlent de l'utilisation de données satellites :

- **L'utilisation de la température de la surface du sol comme indicateur de l'effet d'ICU**, qui permet de se rendre compte des variations de températures à l'échelle d'une ville ou d'un quartier. Cette méthode offre une vue d'ensemble sur les facteurs urbains qui influencent les températures et aide les aménagistes urbains à émettre des stratégies d'atténuation des ICU. Toutefois, ne comparant pas la température du milieu urbain à celle de la zone rurale alentour, elle ne permet pas d'établir une intensité d'ICU et ne donne donc pas lieu à des comparaisons avec d'autres villes (Zhou et al., 2019).

- **Le calcul de l'intensité d'ICU grâce à la différence entre la température de la surface du sol de la zone urbaine et d'une autre zone alentour de référence**, qui se fait en deux temps. Premièrement, il s'agit de définir et de délimiter, à partir de l'utilisation du sol, les zones urbaines et les zones de références adjacentes. Il peut s'agir des zones rurales alentours, mais également d'autres types de couverture du sol, tels que des plans d'eau, des forêts, etc. Deuxièmement, la différence de température entre la température moyenne de la surface du sol en zone urbaine et la température moyenne de la surface du sol de la zone ou des zones de référence est calculée afin d'obtenir l'intensité d'ICU (Zhou et al., 2019).
- **Les modèles statistiques**, comme, par exemple, un modèle de surface gaussien, une matrice de convolution ou une fonction de régression linéaire entre la température de surface du sol et les surfaces imperméables. Ces modèles statistiques permettent d'éviter certains biais liés au choix des pixels.

Plus de la moitié des études concernant les ICU de surface se sont basées sur des données issues du programme Landsat² – notamment Landsat 8, étant muni d'un capteur infrarouge thermique (*Thermal Infrared Sensor (TIRS)*) – suivies par les données des capteurs MODIS et ASTER³ (Deilami et al., 2018 ; Zhou et al., 2019). La popularité de Landsat s'explique notamment parce que, lancé en 1972, il est le plus ancien programme ininterrompu d'observation de la Terre ; qu'il couvre l'entier de la surface terrestre à une relativement bonne résolution ; que ses images sont accessibles gratuitement et ne nécessitent pas énormément de temps de traitement et d'outils informatiques pour fournir des cartes exploitables (Deilami et al., 2018 ; Parastatidis et al., 2017 ; Zhou et al., 2019). De plus, les satellites de Landsat capturent la surface terrestre selon un cycle répétitif de 16 jours et balayent une surface suffisamment grande pour permettre de traiter une seule image pour toute une ville. Cette résolution temporelle offre une période raisonnable pour refléter les changements des ICU de surface ainsi que les changements d'utilisation du sol d'une ville (Zhou et al., 2019). Dans leur revue de la littérature, Zhou et al. (2019) remarquent que les recherches traitant des ICU via la télédétection doivent toutefois faire un compromis entre la résolution spatiale et la résolution temporelles des données. En effet, la résolution spatiale des images satellites en libre accès n'est pas la plus optimale pour observer les détails des ICU (Deilami et al., 2018). La série Landsat et le capteur ASTER ont par exemple une bonne résolution spatiale (entre 15 et 120 m) mais ne fournissent pas de données nocturnes. Si les données sont effectivement issues d'un satellite héliosynchrone, l'heure à laquelle elles datent ne coïncide

² Le programme Landsat est un programme spatial d'observation de la surface de la Terre lancé par la NASA (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

³ Ces deux capteurs sont des instruments embarqués sur le satellite Terra, une mission satellite également lancée par la NASA (<https://terra.nasa.gov/>).

généralement pas avec l'heure où l'intensité de l'ICU est maximale. Inversement, l'utilisation de satellites géostationnaires est pratique pour observer les cycles journaliers des ICU, mais n'ont pas une résolution spatiale suffisamment bonne pour les spatialiser (Deilami et al., 2018 ; Zhou et al., 2019).

Il existe également quelques limitations à l'utilisation de la télédétection pour l'identification des ICU : il est notamment parfois complexe d'obtenir des images sans nuages et certains biais liés aux mesures de l'émissivité peuvent être observés à cause de différents facteurs tels que le bruit généré par le capteur lui-même ou les effets de l'atmosphère (Deilami et al., 2018).

3.5.3.3 Modélisation

Finalement, la modélisation implique l'utilisation de modèles statistiques qui met en corrélation des données issues de mesures *in situ* et de mesures résultant de la télédétection. Cette méthode induit la simulation de situations via la construction de modèles statistiques croisant plusieurs indicateurs, et qui permet finalement d'établir une cartographie des ICU à l'aide d'un SIG.

Cette méthode est utile afin de représenter la complexité du climat urbain car elle permet d'intégrer une multitude d'indicateurs différents tels que la température (température de l'air (via des mesures *in situ*), température de surface (via la télédétection infrarouge thermique), température souterraine), la pression atmosphérique, l'humidité, la vitesse et la direction du vent, les précipitations, le rayonnement solaire, la durée d'ensoleillement, la visibilité, l'humidité du sol, la nébulosité, la composition atmosphérique, la couverture du sol, les formes urbaines, les matériaux urbains, les rejets de chaleur anthropiques, la rugosité, etc. (Masson, 2010 ; Oke, 2004 ; Rizwan et al., 2008). Cependant, cela nécessite d'avoir accès à de grandes bases de données, issues des stations météorologiques locales, de mesures mobiles et d'imagerie satellite.

La réalisation de modèles météorologiques à l'échelle régionale et locale permet également de calculer les effets de la ville sur plusieurs paramètres météorologiques.

4 Stratégies urbaines de mitigation des ICU

Depuis toujours, les populations sont tributaires du climat et pensent à leur établissement en fonction de ce dernier, qu'il soit chaud ou froid. Terrin (2015) l'exprime en préambule de l'ouvrage « Villes et changement climatique » :

« Certes, les villes ont longtemps su se prémunir contre la chaleur, et plus globalement se penser avec le climat. Vitruve l'énonçait déjà : « Quand on veut bâtir une ville, la première chose qu'il faut faire est de choisir un lieu sain », c'est-à-dire, une implantation déterminée par la géographie et qui permette une bonne orientation des édifices et des espaces publics. » (Terrin, 2015, p. 10).

Il suffit de s'intéresser par exemple aux villes méditerranéennes et aux médinas d'Afrique du Nord pour remarquer que leur agencement ainsi que leur architecture ont été pleinement réfléchis en fonction du climat. L'orientation des rues favorisent les flux d'air ; les bâtiments blancs confèrent un albédo élevé à la ville ; les patios, fontaines et jardins représentent des microclimatiseurs dans les interstices de la trame urbaine (Terrin, 2015). Ces approches « bioclimatiques » de l'urbanisme refont surface avec les champs de l'écologie urbaine et de l'urbanisme végétal, appelant notamment à une intégration des éléments naturels dans la fabrique urbaine afin de s'adapter au changement climatique et ses effets, dont les ICU.

Comme expliqué dans le chapitre *1.3.1 Politiques d'atténuation et d'adaptation*, les éléments pouvant lutter contre l'effet d'ICU entrent dans une démarche d'adaptation. Contrairement aux mesures d'atténuation qui cherchent à diminuer les causes des changements climatiques, les mesures d'adaptation sont destinées à surmonter les conséquences territoriales de ces changements (Thomas et Da Cunha, 2017). Le besoin de s'adapter aux effets du changement climatique est impératif et comme les ICU sont des phénomènes réversibles (Gaston et al., 2010), il est possible d'en réduire leur occurrence et leur intensité. Afin d'aborder la problématique des ICU et de mettre en œuvre des stratégies, les villes ont besoin d'une approche transdisciplinaire (Terrin, 2015) et de politiques publiques adaptées (Deilami et al., 2018). Les mesures d'adaptation nécessitent « *une représentation collective du problème climat et de ses implications* » (Bertrand et Richard, 2015, p. 12).

Dans le chapitre *3.3.2 Facteurs contrôlables*, il a été exposé que les facteurs principaux influençant la formation d'ICU sont relatifs à la forme urbaine, son occupation du sol et ses matériaux, ainsi qu'aux activités anthropiques (Stewart et Oke, 2012 ; Rizwan et al., 2008). Ces

éléments, pris en considération dans le projet urbain et la conception urbaine, peuvent être modifiés afin de changer leur impact sur le climat local.

Les buts urbanistiques recherchés dans une visée de réduction de l'effet d'ICU sont les suivants :

- **Diminuer le stockage de chaleur sensible et augmenter les flux de chaleur latente :**
 - **En augmentant la perméabilité des sols** via des chaussées drainantes, des toitures et façades végétalisées et en remplaçant des surfaces minéralisées par de la pleine terre (Nuruzzaman, 2015 ; Rizwan et al., 2008) ;
 - **En augmentant la capacité d'évapotranspiration**, en végétalisant, en augmentant la présence d'eau et en humidifiant les sols (aspersion et rétention) (Nuruzzaman, 2015 ; Rizwan et al., 2008 ; Yamamoto, 2006) ;
 - **En augmentant l'albédo** via les matériaux (Allegrini et Carmeliet, 2018 ; Nuruzzaman, 2015) et les couleurs (Rizwan et al., 2008) ;
 - **En limitant le rayonnement solaire** en créant des ombres via la végétation (Gaston et al., 2010 ; Nuruzzaman, 2015).
- **Augmenter la ventilation urbaine**, en agissant sur la forme urbaine (orientation des rues, densité et géométrie du bâti), en diminuant la rugosité urbaine qui influence la vitesse et la direction des vents (la création de couloirs de ventilation doit favoriser les brises de campagne mais ne doit pas favoriser l'arrivée d'autres polluants, ou du froid en hiver), en réfléchissant à la réflexion du rayonnement, en créant des espaces ouverts et aérés (Nuruzzaman, 2015 ; Rizwan et al., 2008).
- **Réduire les rejets de chaleur, de polluants et de gaz anthropiques**, en limitant les activités qui dégagent chaleur, polluants et gaz et en augmentant la végétation qui permet d'absorber du CO₂ et de limiter les besoins énergétiques des bâtiments liés au chauffage et à la climatisation (Nuruzzaman, 2015 ; Rizwan et al., 2008).

Il est donc possible d'agir sur les bâtiments, la voirie, la gestion des eaux pluviales, les matériaux, les couleurs, les activités anthropiques, etc. Toutefois, l'augmentation de la végétation semble être l'une des mesures la plus exploitée et efficace dans l'atténuation des effets d'ICU (Deilami et al., 2018 ; Nuruzzaman, 2015 ; Rizwan et al., 2008).

4.1 Implantation de végétation

Musy (2012) statue que « *la végétation est certainement un des facteurs clés pour l'élaboration de réponses qui permettent d'anticiper le réchauffement climatique dans les villes denses* ». En effet, il existe d'une part une corrélation positive entre les surfaces imperméables et les ICU (Deilami et al., 2018) et, d'autre part, une corrélation négative entre la végétation (spécifiquement par l'activité chlorophyllienne des différentes surfaces végétalisées, calculée grâce au NDVI) et la chaleur (Chen et al., 2006 ; Feyisa et al., 2014 ; Guha et al., 2018 ; Lo et al., 1997 ; Rizwan et al., 2008 ; Weng et al., 2004).

Sous ses différentes formes, la végétation peut agir à plusieurs niveaux afin de diminuer la température urbaine (Bouzou et Marques, 2016 ; Forman, 2014 ; Gaston et al., 2010 ; Koc et al., 2017 ; McPherson, 1994 ; Musy, 2012 ; Rizwan et al., 2008 ; Sadler et al., 2010 ; Wu, 2014 ; Zhioua, 2017) :

- Réduction de la chaleur sensible en l'utilisant pour l'évapotranspiration ;
- Augmentation de la climatisation latente en humidifiant l'air via l'évapotranspiration ;
- Réduction de la chaleur issue du rayonnement solaire grâce aux ombres ;
- Favorisation de la circulation de l'air par convection ;
- Réduction des surfaces réfléchissantes ;
- Limitation de l'imperméabilisation des surfaces ;
- Réduction des besoins de climatisation ;
- Dispersion des polluants atmosphériques.

Les espaces verts, même petits, peuvent être d'importants climatiseurs urbains (Gaston et al., 2010). Les grands parcs urbains permettent de réduire la température ambiante jusqu'à 5-6°C (Forman, 2014 ; Musy, 2012). Les parcs moyens (entre 30 et 500 ha) sont en moyenne plus frais de 3°C que leurs environs, et les petits parcs (<30 ha) enregistrent en moyenne 1°C de moins (Forman, 2014 ; Rizwan et al., 2008).

Dans leur recherche sur les effets de mitigation des parcs à Addis-Abeba (Ethiopie), Feyisa et al. (2014) relèvent que l'intensité de refroidissement d'un parc est considérable puisqu'ils ont calculé une différence de température maximale diurne de 5,8°C entre un parc et ses alentours minéralisés. Il n'est pas sans rappeler que l'effet de régulateur thermique d'un parc dépend de ses propriétés physique (grandeur et forme), des espèces des arbres, de la densité de la canopée et de la morphologie urbaine alentour (Feyisa et al., 2014).

De plus, dans la perspective de la diminution des rejets de chaleur anthropiques via la consommation d'énergie des systèmes de climatisation et de chauffage, l'implantation de végétation est un atout considérable pour rendre les températures plus supportables et réduire la consommation d'énergie fossile des bâtiments (Gaston et al., 2010). Si par exemple un bâtiment utilise beaucoup de chauffage et est exposé à des flux d'air froid en hiver, une haie ou des arbres denses à feuillage persistant peuvent être plantés pour faire brise-vent. De même manière, des arbres caduques plantés au sud d'un bâtiment vont apporter de l'ombre en été et laisser passer le rayonnement solaire en hiver, pouvant diminuer la demande de climatisation et de chauffage jusqu'à 80% (McPherson, 1994 ; Musy, 2012). Dans leur article, Rizwan et al., (2008) mentionnent une recherche qui montre, via des simulation numériques, que le fait de végétaliser autour des bâtiments permet de réduire la température jusqu'à 1,2°C et, de ce fait, de réduire la demande d'énergie pour climatiser jusqu'à 40%.

Afin de maximiser les effets climatiseurs de la végétation en ville, il est recommandé d'augmenter le taux de couverture arborée, d'optimiser la taille et la forme des parcs, et de réfléchir aux espèces à planter (Feyisa et al., 2014).

4.1.1 Exemples d'implantation de formes végétales

Lorsqu'un endroit est susceptible d'être sujet à des effets d'ICU, la réintroduction de formes végétales en ville est à évaluer. Il existe beaucoup de types d'infrastructures végétales urbaines (cf. chapitre 2.3.2 *Formes végétales urbaines*) qui peuvent prendre place à des fins de régulation thermique. Divers paysages urbains peuvent atténuer le réchauffement urbain et mitiger l'effet d'ICU. Plusieurs exemples de conception, impliquant certaines des formes végétales exposées dans le Tableau 3, ont vu le jour dans des buts de réduction de l'effet d'ICU. Les exemples qui suivent montrent des implantations de végétation dans des secteurs qui bénéficient de leur effet climatiseur.

L'**arborisation** est envisagée dans de nombreux cas. Beaucoup de villes, telles que Lyon⁴ et Montréal⁵, ont adopté des plans « canopée », qui misent sur les arbres pour répondre au phénomène d'ICU. L'indice de canopée aide les villes à prendre en compte le couvert végétal dont elles bénéficient et elles se fixent des objectifs de végétalisation à partir de ceci. La plantation d'arbre est indispensable dans cette visée, et le type de configuration dans lequel l'arbre est planté

⁴ Grand Lyon : <http://www.capitale-biodiversite.fr/sites/default/files/Ateliers/documents/1-grand-lyon.pdf>

⁵ Ville de Montréal :

https://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7377,91101652&_dad=portal&_schema=PORTAL

peut être varié (cf. Tableau 3 : *Couvertures forestières – Canopées*), comme dans une coulée verte à Paris (Figure 9) ou une forêt urbaine à Tokyo (Figure 10).

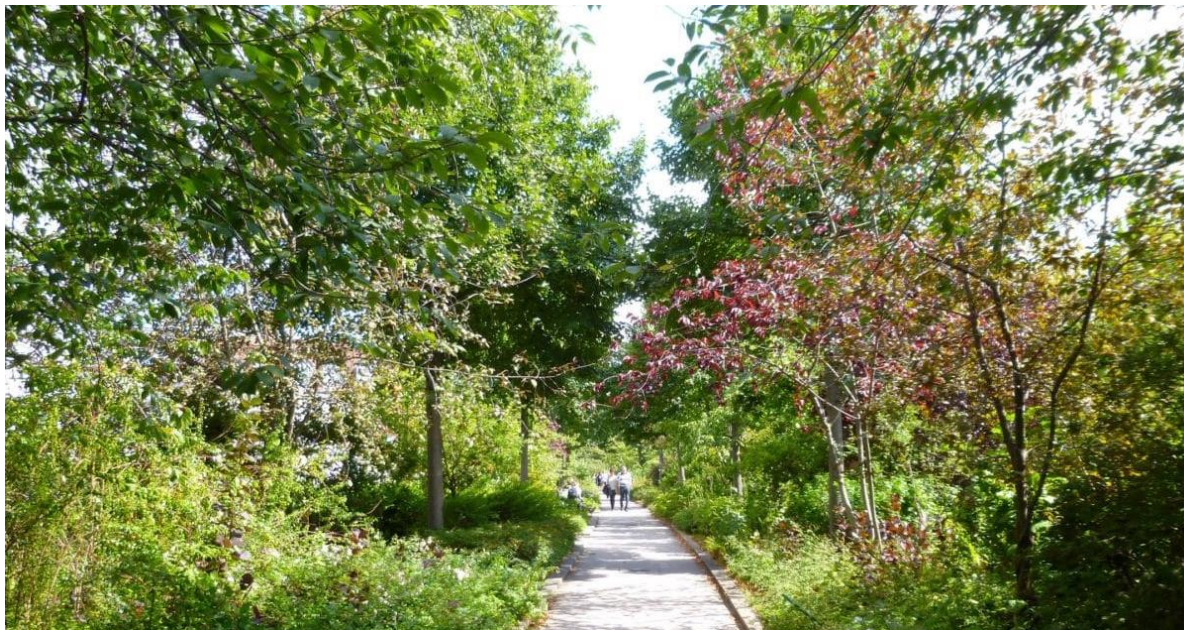


Figure 9 : Coulée verte René-Dumont, Paris (monparisjoli.com/2014/08/29/la-coulee-verte-une-promenade-bucolique-de-bastille-a-vincennes/)



Figure 10 : Forêt urbaine à Tokyo (lemonde.fr/economie/article/2019/07/25/les-forets-urbaines-font-sens-dans-les-villes-denses_5493101_3234.html)

Des plantations d'arbres plus ponctuelles, en tant qu'arbre d'alignement, peuvent être envisagées le long des rues, des canyons urbains, ou sur des allées minérales ; comme c'est le cas sur le cours Roger Bonvin (Figure 11) à Sion, dans le cadre du programme *Acclimatation*. Dans les canyons urbains, les arbres hauts et étroits réduisent l'irradiation des façades et du sol, généralement minéral (McPherson, 1994).



Figure 11 : Plantation d'érables le long du cours Roger Bonvin, Sion (sion.ch/acclimatation)

Les **toitures** (Figure 12 et Figure 13) et les **façades** (Figure 14) végétalisées sont des formes qui peuvent à la fois de réguler la température ambiante extérieure ainsi qu'à l'intérieur des bâtiments. Elle permettent donc de diminuer les rejets de chaleur anthropique en réduisant l'utilisation de climatisation en été et de chauffage en hiver.



Figure 12 : Végétalisation de toiture à Lausanne (lausanne.ch)



Figure 13 : Végétalisation de toiture à Bâle (climate-adapt.eea.europa.eu)



Figure 14 : Mur végétalisé à Avignon (murvegetalpatrickblanc.com)

Sur le territoire de l'agglomération lausannoise, des projets architecturaux intègrent déjà la végétation. A Lausanne, le bâtiment sur la Place de l'Europe qui couvre l'interface de transports publics est un exemple de toiture et de façade végétalisées sur du bâti en secteur public (Figure 15). Le petit immeuble résidentiel « Les Fleurs d'Edhen », à Renens, présente une façon d'intégrer un système de verdure vertical à une construction en domaine privé (Figure 16).



Figure 15 : Bâtiment des TL et de l'interface de transports publics à la Place de l'Europe à Lausanne (dra4.ch/dra2/projets/1152/interface-des-transports-publics-centre-clientele-tl-transports-lausannois/)



Figure 16 : Immeuble résidentiel à Renens (dvkarchitectes.ch/fr/realisations/les-fleurs-dehden)

A Sion, dans le cadre du programme *Acclimatisation*, un **jardin** végétalisé a été aménagé sur le toit d'une école (Figure 17). Dans ce cas-là, en plus des impacts thermiques de la présence de la végétation, la création d'un jardin peut également apporter une plus-value sociale et éducative à l'école.



Figure 17 : Création d'un jardin sur le toit d'une école primaire, Sion (sion.ch/acclimatisation)

Les **places de stationnements**, éléments majoritairement minéralisés, peuvent être également repensées en y implantant de la végétation (Figure 18). Cela permet d'augmenter l'albédo et de créer de la perméabilité. L'effet d'ICU est donc réduit par diminution du stockage de chaleur et par utilisation de la chaleur pour l'évapotranspiration. Des avantages en termes de gestion de l'eau de ruissellement sont également possibles grâce à ce type d'infrastructure.



Figure 18 : Végétalisation de places de parking (ecovegetal.com/realisations)

A l'image de la végétalisation des surface de stationnement, la ville de Stuttgart a végétalisé les rails d'un ligne de tram (Figure 19).



Figure 19 : Végétalisation des zones de rails de trams à Stuttgart (climate-adapt.eea.europa.eu)

Finalement, de nouvelles formes végétales semblent émerger en milieu urbain, comme à Madrid où des toitures de bus ont été végétalisées (Figure 20).



Figure 20 : Bus avec toits végétalisés à Madrid (urbanews.fr)

Résumé deuxième partie

Le climat urbain dépend de divers facteurs propres à l'écosystème qu'est la ville (l'occupation du sol, la morphologie urbaine, les matériaux, les activités anthropiques, les formes végétales urbaines, les points d'eau, etc.) agissant sur des paramètres physiques et climatiques. En raison de ces facteurs, le phénomène d'ICU peut survenir dans certaines zones urbaines. Cette « *anomalie thermique* » (Oke, 1982) se traduit par des températures significativement plus élevées dans un espace urbain par rapport aux zones rurales alentours. Plusieurs facteurs – incontrôlables et contrôlables – sont responsables de l'occurrence d'ICU. Les facteurs principaux influençant les ICU sont relatifs aux flux de chaleur issus du rayonnement solaire, lui-même étant un facteur « incontrôlable », alors que d'autres facteurs, liés à la forme urbaine, l'occupation du sol et ses matériaux, ainsi qu'aux activités anthropiques, sont contrôlables et peuvent être modifiés pour mitiger l'effet d'ICU.

Les ICU ont plusieurs impacts sur les écosystèmes urbains et leurs paramètres climatiques. Ces altérations génèrent des enjeux en termes de qualité de l'air, stress thermique, gestion des fortes précipitations, consommation énergétique et inégalités sociale et écologique. L'identification des ICU est primordiale pour tenter de palier à ces problématiques et différents outils permettent d'étudier ce phénomène thermique.

Les stratégies de mitigation des ICU peuvent agir sur différents paramètres. Elles visent notamment à diminuer le stockage de chaleur sensible, augmenter les flux de chaleur latente, augmenter la ventilation urbaine et réduire les rejets de chaleur, de polluants et de gaz anthropiques. L'augmentation de la végétation semble toutefois être l'une des mesures la plus exploitée dans la limitation des effets d'ICU et de nombreuses recherches ont établi qu'il existait une corrélation négative entre la végétation (spécifiquement par l'activité chlorophyllienne des différentes surfaces végétalisées, calculée grâce au NDVI) et la chaleur. En effet, grâce à ses diverses formes urbaines, la végétation peut agir à plusieurs niveaux afin de modifier la température, ce qui en fait un excellent climatiseur.

5 Démarche et méthode

Force est de constater que les villes sont autant impactées par le climat qu'elles ne l'affectent lui-même. Les effets du changement climatique questionnent l'habitabilité de la ville et impliquent plusieurs enjeux, notamment ceux relatifs aux ICU. Cette « anomalie thermique » (Oke, 1982) génère des différences de température pouvant être supérieures à 10°C entre une ville et la région rurale adjacente (Fallot et Rebetez, 2008 ; Gaston et al., 2010 ; Masson, 2010) et a de sérieux impacts sur l'écosystème urbain. Les villes, leur occupation du sol, leur morphologie, leurs matériaux, leur métabolisme linéaire et les activités qui y prennent place, alimentent et accentuent les ICU.

Face à ces injonctions, les villes doivent se prémunir de stratégies d'atténuation et d'adaptation. Des documents cadres ont déjà vu le jour au niveau mondial depuis la fin du XX^e siècle et des stratégies davantage localisées avancent les prémices de mesures contextualisées pour appréhender ces enjeux complexes, à la fois environnementaux, sociaux et économiques. Le concept de résilience prend peu à peu le dessus sur celui de vulnérabilité et fait appel à un nouveau paradigme urbanistique qui serait capable de développer des systèmes urbains dont la réversibilité serait mise en avant.

Afin d'appréhender ces questions climatiques urbaines, des études météorologiques sont nécessaires. Divers facteurs, à la fois physiques et urbanistiques, impactent le climat des villes. En identifiant les potentiels ICU, il est possible d'agir sur certains des facteurs contrôlables et de réfléchir à la construction des villes de demain. L'urbanisme végétal, au travers du projet urbain, apparaît donc comme ayant un rôle majeur dans la réponse à cette problématique globale, touchant les villes de toutes tailles, autant dans les climats chauds que froids.

La végétation, au travers de ses multiples formes, remplit plusieurs rôles indispensables à l'échelle de la ville et représente un élément de réponse aux ICU. Il est alors question de l'intégrer dans le projet urbain et dans les stratégies d'adaptation au changement climatique et de mitigation des ICU. En effet, la corrélation négative entre ICU et végétation a déjà été prouvée (Chen et al., 2006 ; Feyisa et al., 2014 ; Guha et al., 2018 ; Lo et al., 1997 ; Rizwan et al., 2008 ; Weng et al., 2004).

Cette recherche aborde la problématique des ICU de surface à l'échelle d'une ville suisse. En effet, la grande majorité des études relatives aux ICU se sont intéressées aux grandes villes. Cependant, les moyens et petits centres urbains (ayant des populations inférieures à 1 million d'habitants) abritent plus de la moitié de la population urbaine mondiale et sont tout autant sujets

aux effets d'ICU (Zhou et al., 2019). La ville de Lausanne compte plus de 145'400 habitants en 2018, sur une superficie de 41,8 km² (Ville de Lausanne, juin 2019). La ville, en pente et en paliers, est exposée au Sud et s'étend entre le lac Léman, à 370 mètres, jusqu'aux forêts du Jorat, à 870 mètres d'altitude⁶. Lausanne est établie sur les collines de la Cité, le Bourg et Saint-Laurent, entre lesquelles s'insère un réseau hydrologique, comprenant notamment le Flon, la Louve et la Vuachère. Située sur le plateau occidental suisse, elle bénéficie d'un climat continental tempéré.

Ce travail a pour but d'identifier la présence des ICU sur le territoire lausannois, de comprendre leur distribution spatiale en fonction des formes végétales urbaines présentes et de suggérer des aménagements végétaux afin d'en diminuer l'effet.

5.1 Question de recherche et hypothèses

Afin d'aborder la problématique des ICU – témoins du changement climatique global et acteurs du changement climatique local –, les facteurs qui y participent et les potentiels de réversibilité des milieux urbains, la question générale de recherche suivante est formulée :

Dans quelle mesure la ville de Lausanne est-elle sujette au phénomène d'îlots de chaleur urbains et en quoi la végétation permet-elle d'en limiter l'effet ?

Trois hypothèses sont posées pour répondre à la question de recherche :

1. *Il existe des secteurs sujets aux effets d'ICU à Lausanne.*

L'effet d'ICU est inévitable dans une ville (Deilami et al., 2018) et la ville de Lausanne s'avère certainement sujette à des effets d'ICU pouvant atteindre 5 à 7°C (Fallot et Rebetez, 2008 ; Gehrig et al., 2018). Il s'agit ici de répondre à cette hypothèse en quantifiant la différence de température entre Lausanne et la zone rurale alentour.

2. *La distribution spatiale des ICU et celle de la végétation sont négativement corrélées.*

Au vu de la corrélation négative entre ICU et NDVI relevée par de nombreuses recherches, les ICU lausannois sont probablement localisés dans les endroits peu végétalisés. Cette hypothèse est testée en mettant en parallèle les présences d'ICU aux présences de végétation.

⁶ Lausanne Tourisme : <https://www.lausanne-tourisme.ch/fr/Z5635/geographie>

3. *Il existe des potentiels de réversibilité de l'effet d'ICU à la parcelle grâce à l'implantation de formes végétales.*

Les secteurs sujets aux ICU peuvent accueillir des formes végétales à la parcelle afin de mitiger l'effet d'ICU qui les incombe. En déterminant les composantes des ICU et surtout l'effet la végétation lausannoise sur l'occurrence des ICU, il est possible d'établir les potentiels de réversibilité des secteurs sujets à ce phénomène, au travers du prisme de l'urbanisme végétal et de l'implantation de formes végétales. Le but est, finalement, de proposer « une recomposition de l'habitabilité alliant esthétique et écologie » (Blanc, 2010, p. 175). Les formes végétales urbaines permettant de développer la réversibilité des sites en question. L'exploitation des potentiels de réversibilité dépend toutefois des mesures d'adaptation conduites localement, elles-mêmes fortement liées aux implications politiques. En plus des informations issues des cartes des températures de surface et du réseau vert, un état des lieux de la politique climatique suisse et lausannoise est également sollicité pour répondre à cette hypothèse et va amorcer la démarche méthodologique de ce travail.

5.2 Méthodologie

Afin de répondre aux trois hypothèses de ce travail, une méthodologie en trois phases a été établie. Premièrement, une analyse documentaire et des entretiens semi-directifs ont été nécessaires afin d'établir un état des lieux de la prise en compte de la question climatique dans la ville de Lausanne et des mesures d'adaptation déjà en place. Deuxièmement, des cartographies à l'échelle de la ville de Lausanne ont été réalisées : une cartographie thermique illustrant les températures de surface et une cartographie du réseau vert indiquant l'activité végétale. Troisièmement, trois secteurs ont été identifiés comme endroits particulièrement touchés par l'effet d'ICU et ont été traités sous l'angle de l'urbanisme végétal pour imaginer des aménagements permettant une mitigation de l'effet d'ICU.

5.2.1 Analyse documentaire et entretiens semi-directifs

Afin de rendre compte de la situation lausannoise quant à la problématique des ICU, une recherche documentaire⁷ a été faite et des entretiens semi-directifs ont été menés auprès d'acteurs de l'institution lausannoise. Ce premier niveau d'analyse tend à mettre en lumière la position de la ville face au changement climatique, et plus précisément face aux enjeux des ICU, en établissant un état des lieux des instruments mis en œuvre en réponse à cette problématique.

Un examen des actions et politiques climatiques existantes au niveau suisse⁸ et au niveau lausannois a été fait, et le rapport-préavis N°2019/30 de la Municipalité de Lausanne a été analysé. Ce document, datant du 15 août 2019, expose la stratégie municipale en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'adaptation aux changements climatiques. Il répond également à trois postulats abordant les notions de « plan climat » et d'« urgence climatique ».

Les entretiens semi-directifs permettent de comprendre les avis et préoccupations des acteurs eux-mêmes et précisent certains aspects de l'analyse documentaire. Ces entretiens semi-directifs ont pour but de connaître les enjeux et la vision politique à propos de la problématique des ICU à Lausanne. Trois entretiens semi-directifs⁹ ont ainsi été conduits avec les personnes suivantes :

- **Claude Thomas**, ingénieur en environnement, Délégué à l'environnement à la Direction du Logement, de l'environnement et de l'architecture
- **Fanny Falconnet**, biologiste, Cheffe Division Nature au Service des parcs et domaines (SPADOM)
- **Michaël Rosselet**, paysagiste, Responsable du patrimoine arboré au Service des parcs et domaines (SPADOM)

⁷ Liste et références des documents analysés en annexe (Analyse documentaire – Politiques climatiques suisses et lausannoises)

⁸ Pour cette analyse, des documents officiels et les présentations dispensées par plusieurs conférenciers lors de la Conférence centrale 2019 de la FSU (22 novembre à Lucerne) ont été mobilisées.

⁹ Guide d'entretien en annexe

5.2.2 Cartographies par télédétection

La période retenue pour cette recherche est l'été 2019 (juin-juillet-août). En effet, c'est le moment de l'année où les l'intensité d'ICU est en principe la plus élevée (cf. chapitre 3.5.2 *Echelle temporelle*). De plus, il s'agit des mesures estivales les plus récentes et il est apparu que la période juin-juillet-août 2019 est le troisième été le plus chaud depuis le début des mesures en 1864 (MétéoSuisse, 2020).

Afin d'identifier des ICU, plusieurs méthodes peuvent être employées (cf. chapitre 3.5 *Identification des ICU*). Il est nécessaire d'avoir une approche flexible afin de créer une méthode qui soit cohérente en termes de résultats désirés, de temps et de moyens techniques (Oke, 2004). Au vu des ressources à disposition, la télédétection est apparue comme un bon outil. Les ICU dont il est question dans cette recherche sont les ICU de surface. Etant donné les avantages de Landsat 8 (cf. chapitre 3.5.3.2 *Télédétection*), c'est cette imagerie qui a été utilisée pour établir à la fois la cartographie des températures de surfaces et celle de la végétation via l'activité chlorophyllienne, c'est-à-dire en représentant le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

L'imagerie satellite a été obtenue sur la plateforme Google Earth Engine (GEE), les images ont été traitées également sur GEE¹⁰ et les cartes finales ont été réalisées sur QGIS. L'imagerie Landsat 8 a été filtrée en fonction des dates (du 01.06.2019 au 31.08.2019), en fonction de la région lausannoise, et en fonction de la couverture nuageuse (seulement les images avec une couverture nuageuse inférieure à 20% ont été retenues). Sept images sont ressorties de cette sélection, sur 5 jours différents, entre 10:00 et 11:00¹¹. Elles ont ensuite été réduites en une image en calculant la moyenne de toutes les valeurs de chaque pixel. C'est cette image moyenne de l'été 2019 qui a finalement été utilisée pour la cartographie des températures de surface et pour la cartographie du NDVI.

Des données cadastrales de Lausanne au format Shape¹² ont également été utilisées pour finaliser les cartes sur QGIS afin de spécifier le bâti et d'apporter une autre approche pour l'identification du réseau vert, en plus du NDVI. Ces fichiers ont été obtenus via le serveur de géodonnées UnilGis.

¹⁰ Code GEE en annexe

¹¹ 2019-06-13 10:22:30 / 2019-06-13 10:22:54 / 2019-06-29 10:22:35 / 2019-06-29 10:22:59 / 2019-07-24 10:16:54 / 2019-08-09 10:17:00 / 2019-08-25 10:17:05 /

¹² Cadastre – MO et NPCS – ShapeFile (Administration cantonale vaudoise) – Mis à jour 01.12.2017 (MOVD = Mensurations officielles du canton de Vaud / NPCS = Numérisation du plan cadastral simplifiée)

5.2.2.1 Cartographie du réseau vert – NDVI

L'identification du réseau vert s'est faite par calcul du NDVI qui permet de bien capturer la phénologie des végétaux et leur distribution spatiale (Parastatidis et al., 2017). Cet indice est calculé par télédétection, et des données cadastrales recensant les divers espaces verts viennent appuyer certaines cartes.

Le calcul du NDVI est utile à la fois pour établir une cartographie de l'activité chlorophyllienne – sa capacité à participer à l'évapotranspiration – et pour le calcul des températures de surface. En effet, le NDVI est utilisé pour estimer l'émissivité de surface. Ces calculs sont explicités au chapitre 5.2.2.2 *Cartographie thermique – Températures de surface*.

Les données des bandes optiques 4 (Red (R), 0.64-0.67 µm) et 5 (Near Infrared (NIR), 0.85-0.88 µm) de Landsat 8, toutes deux ayant une résolution de 30 mètres, ont été utilisées :

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

5.2.2.2 Cartographie thermique – Températures de surface

La cartographie des températures de surface a été réalisée grâce aux images satellites de Landsat 8 obtenues sur GEE et dont les données sont fournies, traitées et corrigées par l'USGS (Institut d'études géologiques des États-Unis). La mission Landsat 8 OLI/TIRS est particulièrement intéressante pour ce travail car, en plus de posséder la réflectance de surface orthorectifiée grâce au traitement des bandes dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge à ondes courtes, elle bénéficie un *Thermal InfraRed Sensor* (TIRS) (bande 10, 10.6-11.19 µm ; et bande 11, 11.5-12.51 µm) qui récolte des données thermiques (°Kelvin) avec une résolution de 100 m. Ces données thermiques sont traitées pour obtenir une température de luminosité orthorectifiée, puis rééchantillonnées à 30 m^{13,14}.

La méthode pour calculer les températures de surface a été reprise des recherches de Aslan et Koc-San (2016), Guha et al. (2018), Ranagalage et al. (2018) et Sobrino et al. (2004) et a été effectuée sur GEE :

¹³ USGS (<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>)

¹⁴ Google Earth Engine Data Catalog (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C01_T1_SR)

- **L'émissivité de surface** (E) est établie à partir du NDVI, calculé précédemment au chapitre 5.2.2.1 *Cartographie du réseau vert – NDVI*. Le NDVI sert à calculer la proportion de végétation (P_v) pour chaque pixel :

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2$$

où $NDVI_{min} = 0,2$ (NDVI d'un sol nu) et $NDVI_{max} = 0,5$ (NDVI de végétation saine) (Sobrino et al., 2004).

L'émissivité de surface (E) est ensuite calculée :

$$E = 0,004 P_v + 0,986$$

- **Les températures de surface** en °Kelvin sont calculées :

$$LST = \frac{BT}{\left(\frac{1 + \lambda \sigma BT}{(hc) \ln(E)} \right)}$$

où BT = températures de luminosité °K (bande 10 de Landsat 8) ;

λ = longueur d'onde effective pour la bande 10 de Landsat 8 = 10,9 μm ;

σ = constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K ;

h = constante de Plank = $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js ;

c = vitesse de la lumière dans le vide = $2.998 \cdot 10^8$ m/s.

Les températures de surface (TS) sont converties de °Kelvin en °Celsius.

5.2.2.3 Identification des ICU et relation avec le réseau vert

Afin d'établir l'occurrence d'effet d'ICU, les types de d'occupation du sol ont été déterminés sur l'ensemble de la zone d'étude à l'aide d'une classification supervisée par arbre de décision (Breiman et al., 1984) sur GEE. Quatre classes ont été identifiées à l'aide de points d'entraînement : eau, forêt, urbain et rural. L'information des bandes spectrales a été utilisée pour attribuer chaque pixel individuellement à une des quatre classes selon sa signature spectrale. Cette cartographie est utile afin de pouvoir établir quelle est la température moyenne pour chacune des classes, et de comparer plus spécifiquement les températures « urbaines » avec la moyenne de température de la zone rurale avoisinante.

Dans l'optique d'estimer la relation entre l'effet d'ICU et la présence de végétation, la TS et le NDVI ont été mis en relation. La plage de valeurs du NDVI allant de -1 à 1 et les valeurs inférieures à 0 représentant les surfaces d'eau, ces dernières ont été supprimées afin de mieux établir la relation entre température et végétation pour chaque pixel (30x30m). Une tendance générale se dégage de la Figure 21, et un coefficient de corrélation de -0.77 est calculable entre la TS et le NDVI. Il y a cependant beaucoup de pixels qui possèdent un NDVI relativement bas (entre 0 et 0.45) ainsi qu'une basse température (entre 20 et 29°C) et qui semblent diverger de la courbe de tendance. Pour comprendre ce que représentent exactement ces pixels, les images raster de la TS et du NDVI ont été vectorisées, puis l'algorithme « moyenne mobile » de QGIS a été appliqué. Une fenêtre mobile de forme elliptique de 300x300m a été utilisée autour de chaque point pour rechercher les valeurs et faire la moyenne de toutes les données des points dans cette fenêtre.

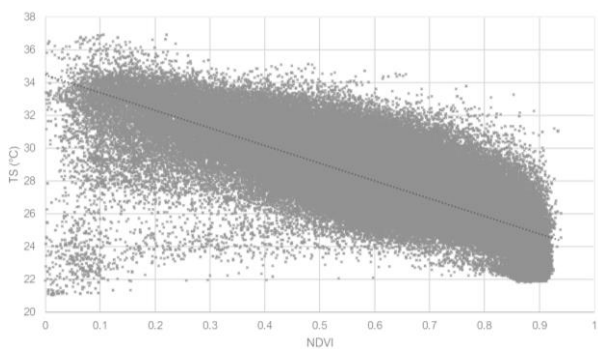


Figure 21 : TS en fonction du NDVI

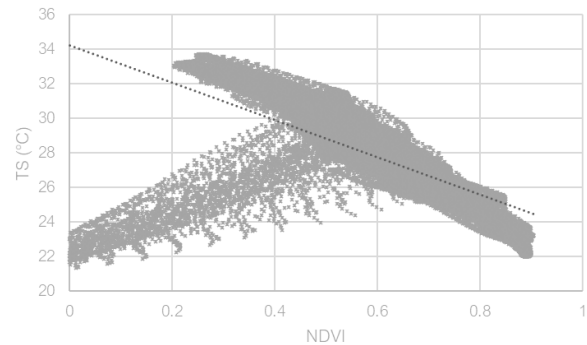


Figure 22 : TS en fonction du NDVI, avec une moyenne établie avec une fenêtre de 300x300m

Sur la Figure 22, malgré une courbe de tendance toujours identique, un deuxième phénomène apparaît. Lorsque les points ayant un NDVI entre 0 et 0.45 et une basse température entre 20 et 29°C sont sélectionnés et représentés sur le territoire lausannois grâce à leurs coordonnées, il est possible d'observer qu'ils sont tous localisés sur les rives du lac Léman (Figure 23) sur une largeur variant entre 250 et 400m. Sur cette largeur, 150 à 200 m se situe sur le lac – probablement à cause de la présence d'algues et particules qui font que le NDVI n'est pas systématiquement inférieur à 0 malgré que cela soit de l'eau – et 100 à 200 m se trouve sur les rives, ce qui explique le fait que ces points aient un NDVI ainsi qu'une TS relativement bas, et ne suivent par conséquent pas la logique de la courbe de tendance.



Figure 23 : Localisation des points ayant un NDVI et une TS bas

Afin d'établir une droite de régression qui illustre davantage le premier phénomène (la corrélation négative entre NDVI et TS), les points répondant a priori au deuxième phénomène ont été écartés. Le coefficient de corrélation atteint dans ce cas -0.81. La droite de régression a été utilisée pour calculer les TS prévues (TSP) en fonction du NDVI. Les TSP ont été soustraites aux TS effectivement mesurées pour donner la différence de température, qui a ensuite été cartographiée afin d'indiquer les endroits dont la température ne correspond pas à ce qui est attendu en fonction du NDVI – qu'elle soit supérieure ou inférieure.

5.2.3 Projet urbain

Dans le but d'estimer les potentiels de réversibilité des secteurs sujets à l'effet d'ICU ainsi que d'apporter des éléments de réponses spatialisés à la problématique des ICU à Lausanne, l'approche du projet urbain est mobilisée. Les secteurs sont analysés et traités au travers du prisme de l'urbanisme végétal et de l'implantation de formes végétales. Ce premier diagnostic thermique cherche à énoncer des éventuelles pistes d'intervention afin de limiter le phénomène d'ICU à Lausanne.

6 Résultats

6.1 Etat des lieux¹⁵

6.1.1 Politique climatique suisse

A l'image de la Convention-Cadre des Nations Unies sur le changement climatique (Nations Unies, 1992), la politique climatique suisse repose également sur les deux stratégies que sont l'atténuation et l'adaptation. En Suisse, les principales bases légales abordant les changements climatiques sont la loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂ et l'ordonnance sur le CO₂ – qui s'apparentent toutes deux à des mesures d'atténuation. Cependant, il n'existe pas de loi spécifique sur les risques climatiques ainsi que sur la question de l'adaptation (Desthieux et Joerin, 2019 ; Gicquel, 2019 ; OFEV, 2015¹⁶). En 2014, il y eut une proposition pour inscrire les risques climatiques dans la LAT, mais rien n'a été établi à ce jour (Gicquel, 2019).

S'il n'existe pas encore de loi couvrant la question climatique sous l'angle de l'adaptation, la Suisse bénéficie de plusieurs projets innovants. D'abord, divers rapports ont une visée informative et documentent les changements climatiques que subit le pays au travers des exemples et des chiffres. Ensuite, plusieurs documents abordent spécifiquement le concept d'adaptation. En 2012, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) édite le premier volet de la stratégie du Conseil fédéral concernant l'adaptation aux changements climatiques. Ce document présente les enjeux climatiques auxquels la Suisse va être confrontée et décrit les différents objectifs et principes qui devront être suivis. En 2014, le Conseil fédéral approuve le second volet de la stratégie d'adaptation aux changements climatiques, qui contient un plan d'action pour 2014-2019 décrivant les mesures à prendre par les divers offices fédéraux afin d'atteindre les objectifs d'adaptation. En 2015, l'OFEV publie le guide « Adaptation aux changements climatiques » qui s'adresse aux instances cantonales. Il promeut une coordination entre les cantons et la Confédération dans un but d'« *adaptation intersectorielle aux changements climatiques* » et présente les documents-clés de référence sur les changements climatiques ainsi que des exemples de mesures prises dans ce sens par certains cantons.

¹⁵ Informations issues de l'analyse documentaire (liste et références des documents analysés en annexe (Analyse documentaire – Politiques climatiques suisses et lausannoises)), des présentations dispensées par plusieurs conférenciers lors de la Conférence centrale 2019 de la FSU (22 novembre à Lucerne) et des entretiens semi-directifs

¹⁶ Référence en annexe (Analyse documentaire – Politiques climatiques suisses et lausannoises)

Parallèlement à ces rapports et pour mettre en action sa stratégie d'adaptation, la Confédération a lancé le programme pilote « Adaptation aux changements climatiques » qui vise à soutenir techniquement et financièrement des projets novateurs mis en place par les cantons ou les communes illustrant de bonnes pratiques pour s'adapter concrètement au changement climatique. La première phase du programme pilote s'est déroulée de 2013 à 2017, impliquant 31 projets, et la deuxième phase du programme a débuté en 2018. Elle prendra fin en 2022 avec 50 nouveaux projets.

C'est en 2018 qu'est édité le rapport « Quand la ville surchauffe », conçu par l'OFEV et l'Office fédéral du développement territorial (ARE). Ce document aborde le changement climatique sous l'angle de la planification urbaine et se consacre pleinement – comme son nom l'indique – à la problématique de la chaleur en ville. Il expose les bases d'un développement urbain adapté au changement climatique et des exemples d'aménagements suisses ou étrangers pour mitiger l'effet d'ICU. Un rapport similaire destiné aux aménagistes avait déjà été rédigé par l'ARE en 2013. Il était cependant plus concis et modeste en termes d'exemples exposés.

En résumé, la politique climatique suisse est tournée à la fois vers l'atténuation, via des lois et des stratégies énergétiques, et vers l'adaptation. Les outils de la Confédération en termes d'adaptation sont majoritairement de nature informative (avec des diagnostics chiffrés et des exemples de bonnes pratiques) et incitative (avec le programme pilote) ; le but étant de stimuler des actions territorialisées à toutes les échelles. Cependant, ces documents représentent davantage des principes généraux que des mesures contraignantes, et ils appellent donc à la responsabilité des cantons et des villes afin de mettre en œuvre des mesures opérationnelles. Les avis des intervenants de la Conférence centrale de la Fédération suisse des urbanistes (FSU)¹⁷, tous acteurs dans le domaine de l'aménagement du territoire ou de la question climatique, se rejoignent pour statuer que l'adaptation au changement climatique n'est pas suffisamment formalisée dans les politiques suisses. Cela adhère au propos d'Emelianoff (2007) qui affirme que les cadres réglementaires sont souvent inadaptés aux problématiques urbaines et environnementales.

¹⁷ Conférence du 22 novembre 2019 à Lucerne

6.1.2 Politique climatique lausannoise

La ville de Lausanne engage une politique d'atténuation des impacts climatiques depuis plusieurs années. Elle a par exemple obtenu le label « Cité de l'énergie » en 1996, une démarche axée sur la consommation énergétique des communes suisses. En 2009, elle signe la Convention des maires qui visait à réduire les émissions de CO₂ de 20% d'ici 2020. Depuis les années 2000, plusieurs rapport-préavis mobilisent également la question énergétique.

Dans le plan directeur communal (PDCoM) datant de 1996 et actuellement en vigueur, les enjeux liés au changement climatique tels que les ICU ne sont pas du tout abordés. Toutefois, ce plan est en cours de révision et sa version consultable de février 2019 indique que ces éléments sont dorénavant à l'agenda politique. Selon Claude Thomas, c'est la première fois que des mesures liées à l'adaptation au changement climatique apparaissent dans les lignes directrices de développement de la ville.

La volonté d'agir de la ville est présente puisqu'elle a déposé des projets lors des deux phases du programme pilote « Adaptation aux changements climatiques » de la Confédération. Ces projets n'ont malheureusement pas été retenus.

Le 15 août 2019, la municipalité de la ville de Lausanne publie le rapport-préavis « Stratégie municipale en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'adaptation aux changements climatiques » où elle annonce « *s'engager résolument dans la lutte contre le réchauffement climatique en proposant une politique structurée, cohérente et portée par l'ensemble des directions municipales* ». Elle y explicite ses volontés en termes de mesures à prendre face au changement climatique et répond à trois postulats s'intéressant à la question climatique et énergétique.

Par le biais de ce rapport-préavis, la municipalité cite les domaines sur lesquels elle souhaite agir immédiatement pour faire face aux enjeux climatiques. Les « **domaines prioritaires en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre** », représentant les **mesures d'atténuation**, englobent la politique énergétique, la politique de la mobilité, la politique de développement immobilier sur les terrains publics et l'assainissement du parc immobilier. Elles suivent et complètent les objectifs des actions déjà mises en œuvre depuis la moitié des années 1990 dans le but d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2030. De plus, la politique de développement immobilier sur les terrains est citée ici comme action pouvant avoir des impacts dans l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, les principes qu'elle promeut, tels que la définition d'une certaine morphologie urbaine, la limitation de surfaces minérales, la valorisation des surfaces de pleine terre et des analyses d'ensoleillement et d'ombrage pour le développement

du futur bâti, entrent également dans le cadre des actions *d'adaptation* au changement climatique. Conjointement, les « **domaines prioritaires en matière d'adaptation aux changements climatiques** » incluent notamment la politique de nature en ville et la politique pour le patrimoine arboré et forestier. La municipalité entend promouvoir la végétalisation et maximiser les surfaces perméables via le contrôle des pertes de surfaces de pleine terre. Les points liés à l'adaptation font largement écho aux enjeux développés dans la « Stratégie municipale pour le patrimoine arboré et forestier lausannois » de janvier 2019. Ce document présente la volonté de valoriser, préserver et développer le patrimoine arboré de la ville.

L'aménagement du territoire est reconnu par la ville comme étant un domaine prioritaire dans la question climatique :

« La planification du territoire définit le cadre dans lequel s'inscrit le développement de la ville. Il précise les possibilités de construire mais aussi la façon de le faire. Les impacts de ce secteur sur les questions climatiques sont considérables, tant sur le plan des mesures de réduction des émissions que d'adaptation aux changements climatiques. » Rapport-préavis N° 2019 / 30, page 7.

La révision du plan général d'affectation (PGA) apparaît ainsi comme un instrument important du cadre général d'application des mesures d'atténuation et d'adaptation. En effet, Claude Thomas explique la volonté de la ville d'y introduire des articles réglementaires en termes d'adaptation. La question de la quantité et la qualité de pleine terre ainsi que l'établissement de quotas ou d'indices dans le PGA sont abordés. Un indice de verdure est envisageable, comme c'est déjà le cas dans certains plans – par exemple dans le plan partiel d'affectation de l'écoquartier des Plaines-du-Loup. Le fait d'intégrer également des réglementations relatives à la protection des arbres est possible. En effet, le PGA a un pouvoir intéressant afin d'avoir un certain droit de regard sur les projets privés. Michaël Rosselet explique qu'« effectivement, construire des bases légales fortes au niveau local est important pour la pondération des enjeux ».

La volonté d'établir un plan climat d'ici la fin de l'année 2021 est un point important du rapport-préavis du 15 août 2019. Ce plan représente également un instrument gouvernemental « *stratégique, transversal et opérationnel qui favorise la convergence et la mise en cohérence des politiques publiques sectorielles au regard des enjeux climatiques* ». Il aura pour but d'établir un état des lieux et d'élaborer un programme d'actions et d'instruments pour mettre en place et assurer le suivi de mesures d'atténuation et d'adaptation. Des coordinations entre le plan climat et le PGA sont abordées.

La visée de la neutralité carbone à l'horizon 2030 fait partie des objectifs du plan climat :

« Le plan d'action [climat] doit en premier lieu permettre de mesurer les émissions à gaz à effet de serre. Le plan contiendra ensuite des objectifs de réduction précis (quantitatifs et/ou qualitatifs) par domaines, un système de monitoring et d'évaluation. » Rapport-préavis N° 2019 / 30, page 15.

Si la notion d'atténuation semble a priori ressortir davantage que la notion d'adaptation dans les explications du contenu du plan climat, un volet social indique la volonté d'instaurer des mesures adaptatives en identifiant les vulnérabilités sociales face au changement climatique. L'annonce de possibles études spécifiques qui pourraient s'inspirer d'autres villes – telles que des cartographies thermiques, des modèles de circulation des masses d'air ou l'identification d'espaces où des mesures de perméabilisation des sols seraient possibles – suggère également la prise en compte du concept d'adaptation dans sa vision.

Claude Thomas explique que la frontière n'est pas très nette entre atténuation et adaptation. En effet, les mesures pour limiter les émissions de gaz à effet de serre peuvent aider à s'adapter aux impacts du changement climatiques et inversement. Initialement, dans le domaine de l'urbanisme, les mesures étaient davantage apparentées à de l'adaptation – face à la chaleur ou aux épisodes pluvieux par exemple –, mais il est clair que ces actions peuvent aussi limiter les besoins énergétiques, entre autres.

La ville de Lausanne est consciente de la difficulté de mettre en place des mesures climatiques en l'absence d'un cadre juridique, comme c'est le cas notamment pour les questions liées à l'aménagement du territoire ou à la nature et la biodiversité, qui trouvent un cadre légal au niveau fédéral :

« Les actions à envisager peuvent concerner souvent des domaines où les compétences communales sont insuffisantes pour développer pleinement les projets. Ceux-ci dépendent alors de l'établissement préalable ou de la modification d'un cadre légal fédéral ou cantonal ». Rapport-préavis N° 2019 / 30, page 5.

Cependant, étant donné l'importance et l'urgence de la situation, la ville reconnaît aussi qu'il est primordial d'entreprendre des actions immédiatement.

En plus des instruments cités précédemment (coercitifs ou réglementaires, tels que le PGA ; ou stratégiques et directeurs, tels que le PDCom), d'autres outils sont également utilisés pour gérer la question climatique : des instruments incitatifs et informatifs en font partie. Le concept directeur

« Nature en ville » propose un système de subventions pour la mise en place de toitures végétalisées pour les privés depuis 2016. Des subventions pour la plantation d'arbres ou de prairies fleuries existent depuis janvier 2020. En plus de ces aides financières, le SPADOM se tient à disposition pour tout conseil concernant ces aménagements. Pour une conduite efficace de ces systèmes de subventionnements, Fanny Falconnet constate le besoin d'une bonne communication avec la population. En effet, l'information et la sensibilisation font aussi partie intégrante de la politique climatique. Claude Thomas révèle que des discussions ont lieu dans le but de rendre l'accès public aux données environnementales. Fanny Falconnet explique que le SPADOM se charge également de sensibiliser la population aux enjeux liés à la nature en ville. Il est d'ailleurs prévu que le plan climat ait une fonction informative auprès de la population.

6.1.2.1 Prise en compte des ICU

L'effet d'ICU est abordé dans le concept directeur « Nature en ville » de septembre 2018, dans la « Stratégie municipale pour le patrimoine arboré et forestier lausannois » de janvier 2019 ainsi que dans le rapport-préavis traitant de la stratégie municipale en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'adaptation aux changements climatiques. Ces trois documents exposent les enjeux liés aux ICU et abordent les façons de les mitiger.

Selon Fanny Falconnet, trois objectifs doivent être suivis : la plantation d'arbres, la désimperméabilisation des sols et la mise en place d'ouvrages végétalisés, comme les toitures, les façades et les prairies extensives. Elle perçoit un enjeu majeur face à l'utilisation du sol. En effet, elle relève le besoin de « mutualiser les services du sous-sol » qui est fortement exploité par les infrastructures d'eau et d'énergie, et dont la capacité d'accueillir des arbres est limitée. De plus, Michaël Rosselet soulève l'importance de dialogue entre politique et technique afin d'apporter des « solutions pragmatiques » et le besoin d'arboriser pour rendre la ville supportable. Dans cette optique, le besoin d'espèces d'arbres aptes à se développer dans un climat évolutif est primordial.

Selon Michaël Rosselet, la prise en compte de la question de la végétalisation dans les politiques et les projets lausannois se fait de plus en plus, ainsi que les collaborations entre techniciens et politiques à ce sujet. La « Stratégie municipale pour le patrimoine arboré et forestier lausannois » vise justement une augmentation de l'arborisation, en parallèle de sa préservation. Ces deux aspects doivent évidemment être pensés simultanément avec les questions de densification « qualifiée » de la ville. En outre, le SPADOM s'efforce de prendre connaissance des projets entrepris dans d'autres villes afin d'en apprendre des expériences techniques externes,

notamment en ce qui concerne la plantation d'arbres, la gestion des eaux et les choix d'espèces dans un contexte de changement climatique.

D'après Claude Thomas, aucune cartographie effective des ICU n'a été établie à l'échelle de Lausanne. Malgré le fait qu'il n'y ait pas d'endroits spécifiquement identifiés comme étant problématiques en termes d'ICU, les éléments liés à la chaleur urbaine sont pris en compte dans les développements urbains. Ils représentent notamment des critères importants lors des mises au concours (par exemple pour le projet Riponne-Tunnel). Michaël Rosselet ajoute qu'il existe un manque de relevés de température localisés. De même, il explique la nécessité de créer des cartographies et d'avoir des données concernant la canopée, la végétation, la pleine terre, la température et les flux d'air. Ces aspects ont peu fait l'objet de compilation jusqu'à aujourd'hui, mais ils commencent à être étudiés et quantifiés. En effet, d'après des données Lidar et issues d'orthophotos, le taux de canopée lausannoise a été évalué en décembre 2019 et s'élèverait à environ 19%. De telles données sont nécessaires afin d'identifier les enjeux et opportunités de la ville face au changement climatique.

6.2 Effets d'îlot de chaleur urbain à Lausanne^{18,19}

Les températures de surface (TS) calculées et cartographiées laissent deviner l'utilisation grossière du sol lausannois (Figure 24). Les formes environnementales dites de tâches (cf. Tableau 1) de niveau macro et méso telles que le lac Léman, le Bois du Jorat et quelques parcs sont identifiables grâce à leur TS considérablement plus fraîches que les endroits urbanisés. La surface du lac est à environ 20°C et celle du Bois du Jorat se situe entre 20 et 22°C. Leur influence sur les zones adjacentes est bien visible. Tout le long des rives du lac, un gradient d'environ 4°C est observable sur 100 à 200 m sur les quais. La surface du lac vers les rives est également plus chaude qu'au large. Le lac a certainement un impact sur la TS des quais et les quais sur la TS du lac.

Les corridors végétaux et fluviaux, tels que celui de la Venoge à l'Ouest, ainsi que ceux de la Sorge et de la Mèbre de part et d'autre de Crissier, sont également identifiables grâce à leur TS plus basse. La TS de la matrice urbaine est visiblement plus élevée que les espaces ruraux et forestiers alentours, et le centre-ville dense affiche une TS encore plus importante. Le corridor méso que représente la voie de chemin de fer est également perceptible avec une TS distinctement plus chaude que la moyenne.

Les espaces verts ouverts et les zones boisées de Lausanne ressortent également comme des tâches tels des îlots de fraîcheur dans la matrice : le parc de Milan et la colline de Montriond, l'esplanade de Montbenon, la Vallée de la Jeunesse, le parc de Valency, ou encore le parc de Mon Repos sont tous des endroits identifiables grâce à la cartographie des TS (Figure 24).

¹⁸ Tous les résultats présentés dans cette section font référence aux données issues de la moyenne des sept images Landsat sélectionnées pour représenter l'été 2019.

¹⁹ Toutes les données cadastrales représentées dans cette section sont issues des ShapeFile MO et NPCRS de l'Administration cantonale vaudoise) obtenus via le serveur de géodonnées UnilGis.

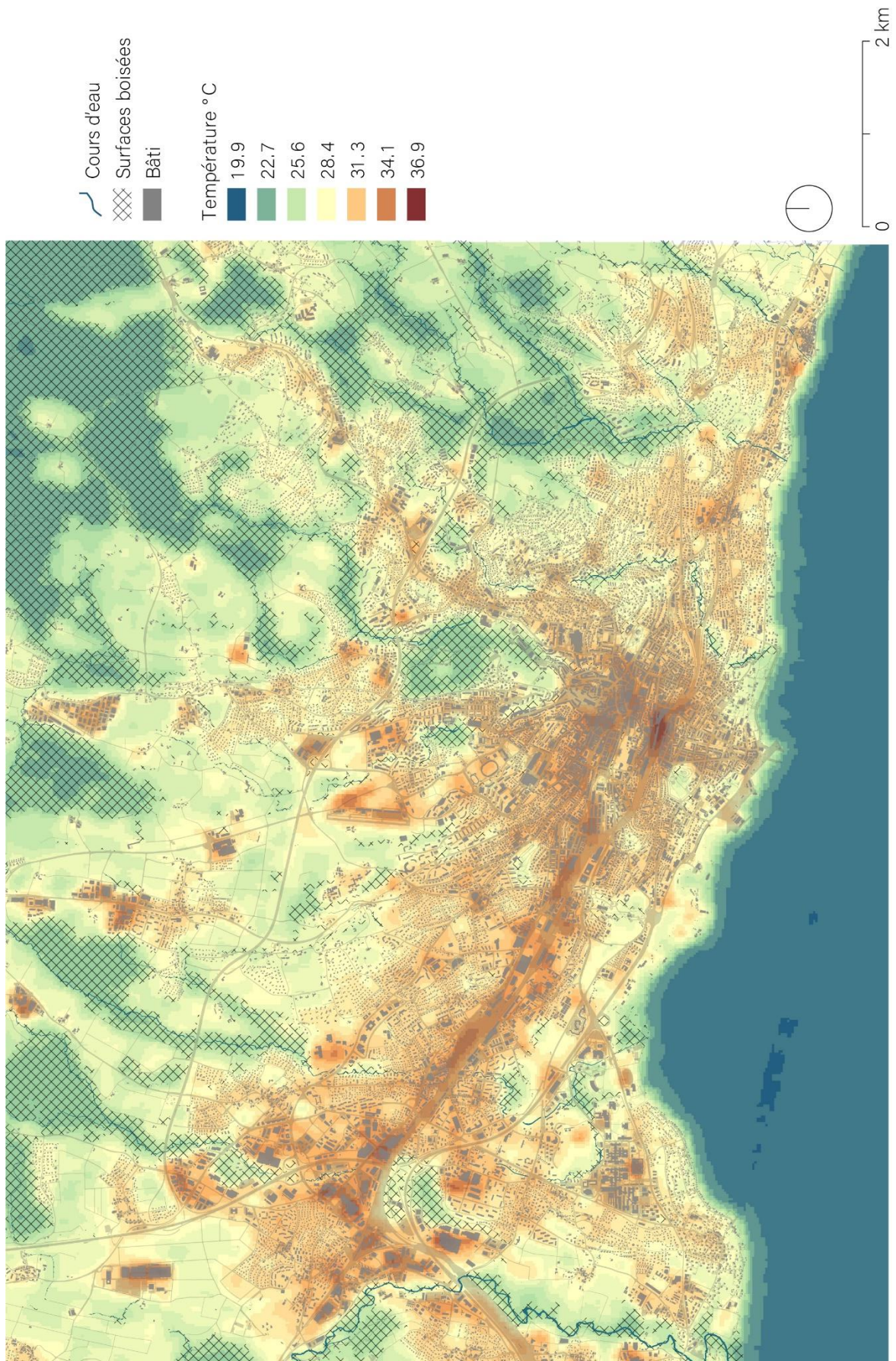


Figure 24 : Températures de surfaces

6.2.1 ICU

En calculant la température moyenne de chacun des types d'utilisation du sol (Tableau 6), il est possible de distinguer une tendance générale. La température moyenne de la zone rurale est utilisée comme température de référence afin d'établir la présence d'ICU sur le territoire lausannois. Au vu de la température moyenne de la zone rurale (26,71°C) et de la température maximale en milieu urbain (36,95°C), trois degrés d'ICU ont été établis et cartographiés (Figure 25) :

- ICU de degré 1 : 6°C de plus qu'en zone rurale
- ICU de degré 2 : 8°C de plus qu'en zone rurale
- ICU de degré 3 : 10°C de plus qu'en zone rurale

Tableau 6 : Température de surface moyenne (°C) par type d'occupation du sol

| Température de surface moyenne (°C) par type d'occupation du sol | | | |
|--|-------|-------|--------|
| Eau | Forêt | Rural | Urbain |
| 20,78 | 23,68 | 26,71 | 30,18 |

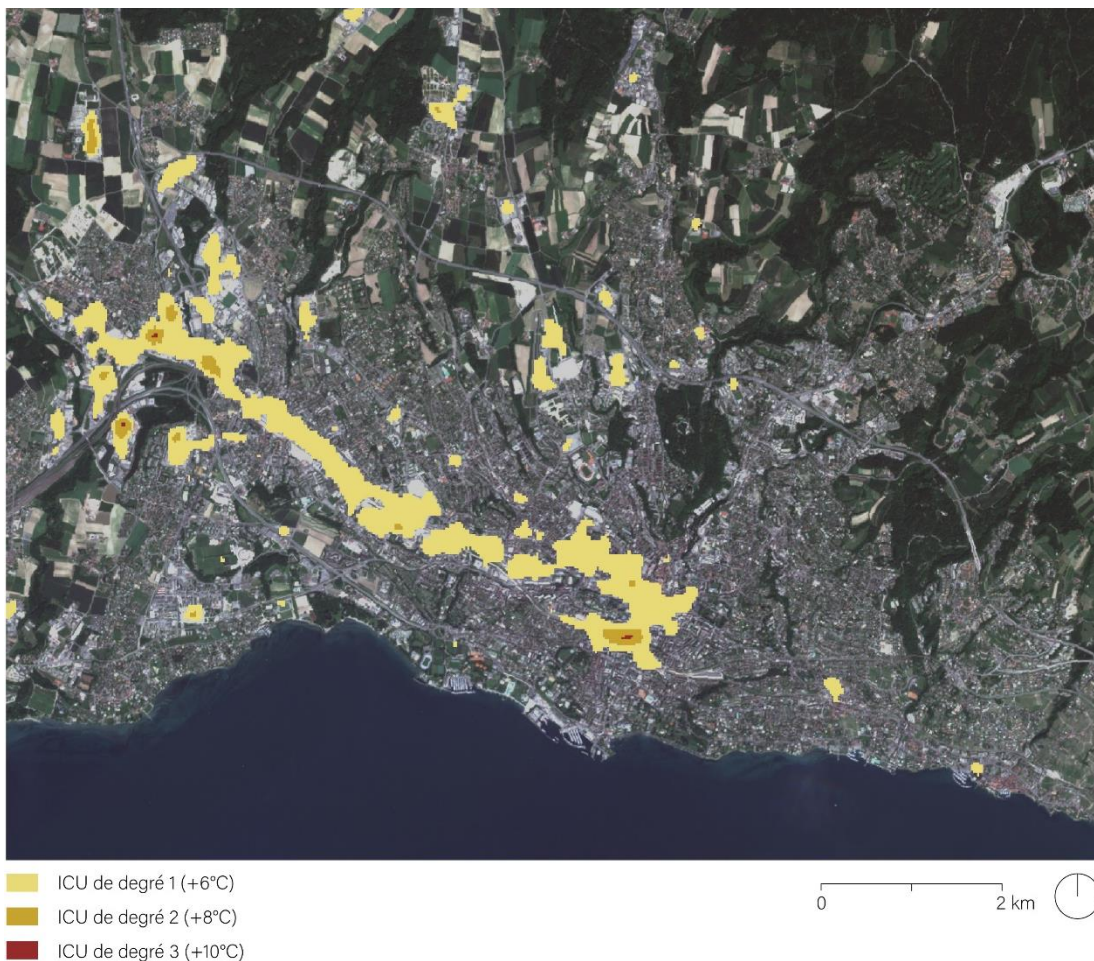


Figure 25 : Localisation des différents degrés d'ICU (Fond de carte : www.geo.vd.ch)

Il est possible d'observer que la plupart des ICU se trouvent dans la matrice urbaine. Certains ICU se situent en milieu davantage rural, au Nord de la ville, mais ces ICU sont systématiquement identifiés au niveau d'une structure bâtie (Figure 25).

L'ICU de degré 3 le plus important en termes de chaleur et de surface (environ 4000 m²) est situé au niveau de la gare de Lausanne (Figure 25), plus particulièrement sur les voies ferrées où la température de surface est de 36,95°C. Cette zone possède la température la plus élevée du territoire lausannois, soit plus de 10°C de plus que la moyenne rurale et 6°C de plus que la moyenne urbaine. Autour de cet ICU de degré 3, la température décroît de 3-4°C dans un rayon de 150 à 200 m (Figure 24).

Les deux autres ICU de degré 3 identifiés sur la Figure 25 (entre 1500 et 2000 m²) se trouvent sur les territoires des communes de Bussigny et d'Ecublens, sur les toits de larges bâtiments en zone industrielle (Figure 25). Plusieurs espaces de ces communes, ainsi que certains de la commune de Crissier, sont sujets à des ICU de degré 2 et de degré 1. Il s'agit majoritairement de zones industrielles et commerciales, ainsi que des zones de voies de chemin de fer entre Bussigny et Malley (Figure 25). Un ICU de degré 2 est repéré sur le bâtiment du Rolex Learning Center sur le campus de l'EPFL, avec une température atteignant 34,9°C. Un des ICU de degré 2 présents à Ecublens se situe exactement sur deux terrains de sport synthétiques. Cet ICU d'environ 0,6 ha prend place sur un large ICU de degré 1 (environ 10 ha) comprenant une zone commerciale composée de larges bâtiments au toit plat minéral et de parkings, ainsi que du centre sportif accueillant un terrain de sport herbeux et les deux terrains de sport synthétiques inclus dans l'ICU de degré 2. Ce micro-effet d'ICU sur des terrains de sport extérieurs synthétiques est repérable à cinq autres endroits sur le territoire cartographié : sur le terrain de Dorigny du campus de l'UNIL, sur l'unique terrain synthétique de Chavannes (entouré de 14 autres terrains herbeux dont les TS mesurées sont d'environ 2°C plus bas), sur les terrains synthétiques du stade de la Tuilière, et encore sur deux autres terrains, au-dessus de Sauvabelin et à Grand Vennes.

Un ICU de degré 2 touche deux bâtiments de l'entreprise Bobst à Mex sur près de 400 m de long. De part de d'autre de cet ICU, s'étend un ICU de degré 1 recouvrant deux autres bâtiments, recouverts de panneaux solaires. Beaucoup d'ICU de degré 1 sont localisés hors du tissu dense de la ville, dans des zones industrielles ou encore au niveau de l'aéroport de Lausanne.

Dans le tissu urbain, des ICU de degré 1 sont également visibles sur le vaste parking du Vélodrome, sur de larges bâtiments au toit plat et de couleur grise ainsi que sur certains secteurs en zone résidentielle.

Un large ICU de degré 1 se situe dans une grande partie du centre-ville dense de Lausanne (Figure 25), et un ICU de degré 2 est observable au niveau de la place Grand-Saint-Jean – entre la ruelle Grand-Saint-Jean, l'Eglise Saint-Laurent et la rue Saint-Laurent – avec une température atteignant 34,7°C (Figure 26).

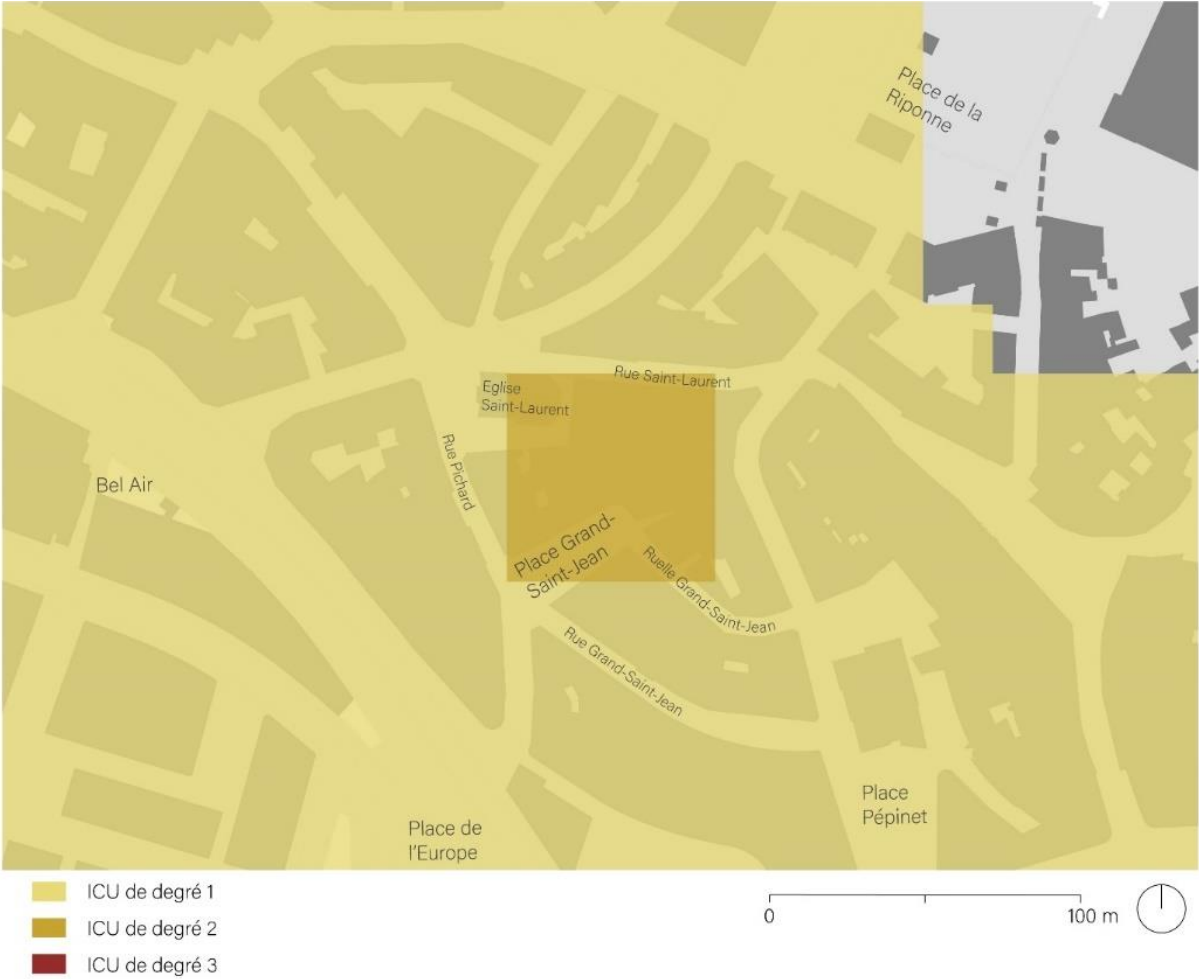


Figure 26 : ICU de la place Grand-Saint-Jean

6.2.2 ICU et réseau vert

Le but est ici d'examiner comment le végétal, illustré par le NDVI, agit sur la présence d'ICU.

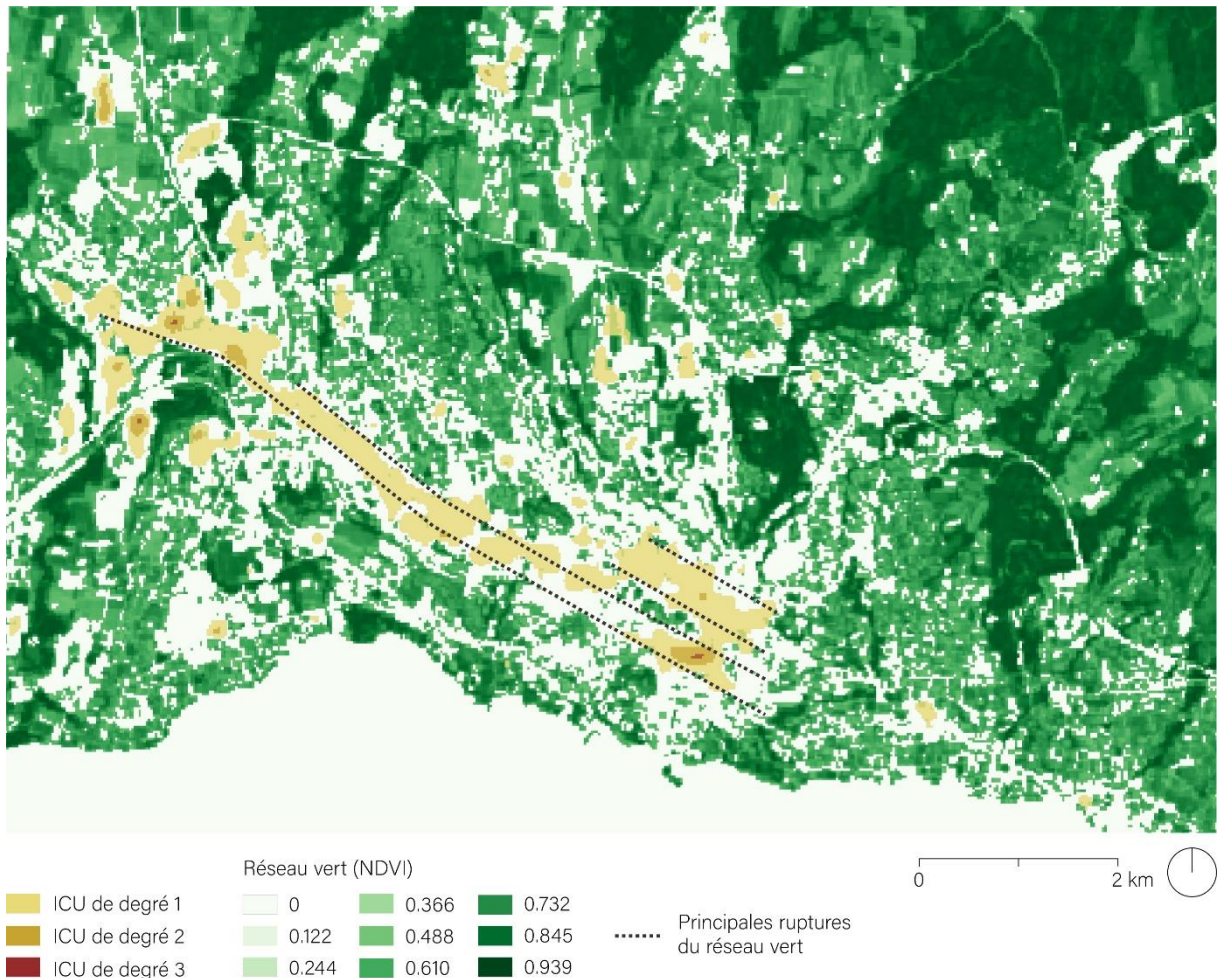


Figure 27 : ICU et NDVI

En comparant les ICU et l'activité végétale représentée par le NDVI, il est possible de constater que leur répartition est inverse (Figure 27). Les voies de chemin de fer et les zones majoritairement industrielles et commerciales qui les longent – où la végétation est quasi absente – sont largement touchées par l'effet d'ICU et la présence de végétation leur fait défaut. C'est le cas également pour le centre-ville dense de Lausanne, ainsi que pour certaines parties des quartiers du Flon et de Sévelin (Figure 28). Ces secteurs créent des ruptures dans le réseau vert lausannois et sont ainsi sujets à l'effet d'ICU. Les grands axes viaires consistent aussi en des corridors minéralisés créant des ruptures linéaires dans le réseau vert, comme le montre la Figure 27, notamment avec l'axe autoroutier au Nord de la ville.

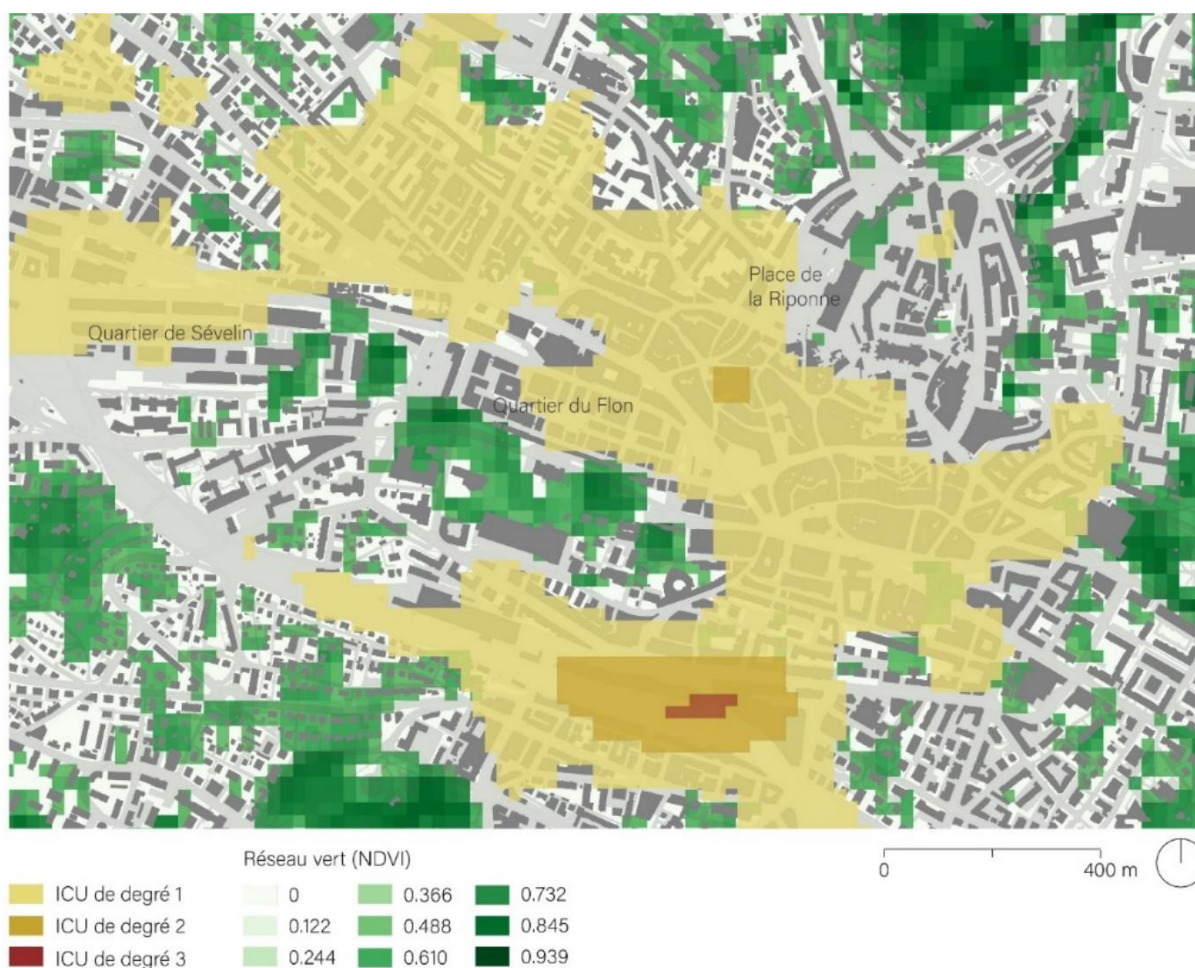


Figure 28 : ICU et végétation (selon NDVI) au centre-ville

De manière générale, les endroits les plus chauds identifiés par les différents degrés d'ICU se situent là où il n'y a pas de végétation. Cependant, quelques rares secteurs affichant une activité végétale sont malgré tout touchés par l'effet d'ICU (Figure 27), comme les terrains de football herbeux de la Tuilière ou certains cordons boisés. Inversement, certains secteurs dont l'activité végétale est très limitée ne sont pas touchés (Figure 27), c'est par exemple le cas du campus de l'EPFL.

6.2.3 Températures et NDVI

Afin d'illustrer le phénomène mentionné ci-dessus et de signifier plus largement le lien entre température et végétation sur le territoire lausannois, la TS et la valeur de NDVI de chaque point sont mises en relation. Comme expliqué dans le chapitre 5.2.2.3 *Identification des ICU et relation avec le réseau vert*, les deux éléments indiquent une corrélation négative (-0.81). La régression

linéaire issue de cette corrélation permet de calculer, pour chaque point, la TS prévue en fonction du NDVI. La différence de température entre la TS mesurée par télédétection et la TS prévue est ensuite calculée et cartographiée (Figure 29), ce qui permet d'indiquer les endroits dont la TS ne correspond pas à ce qui est attendu en fonction du NDVI.

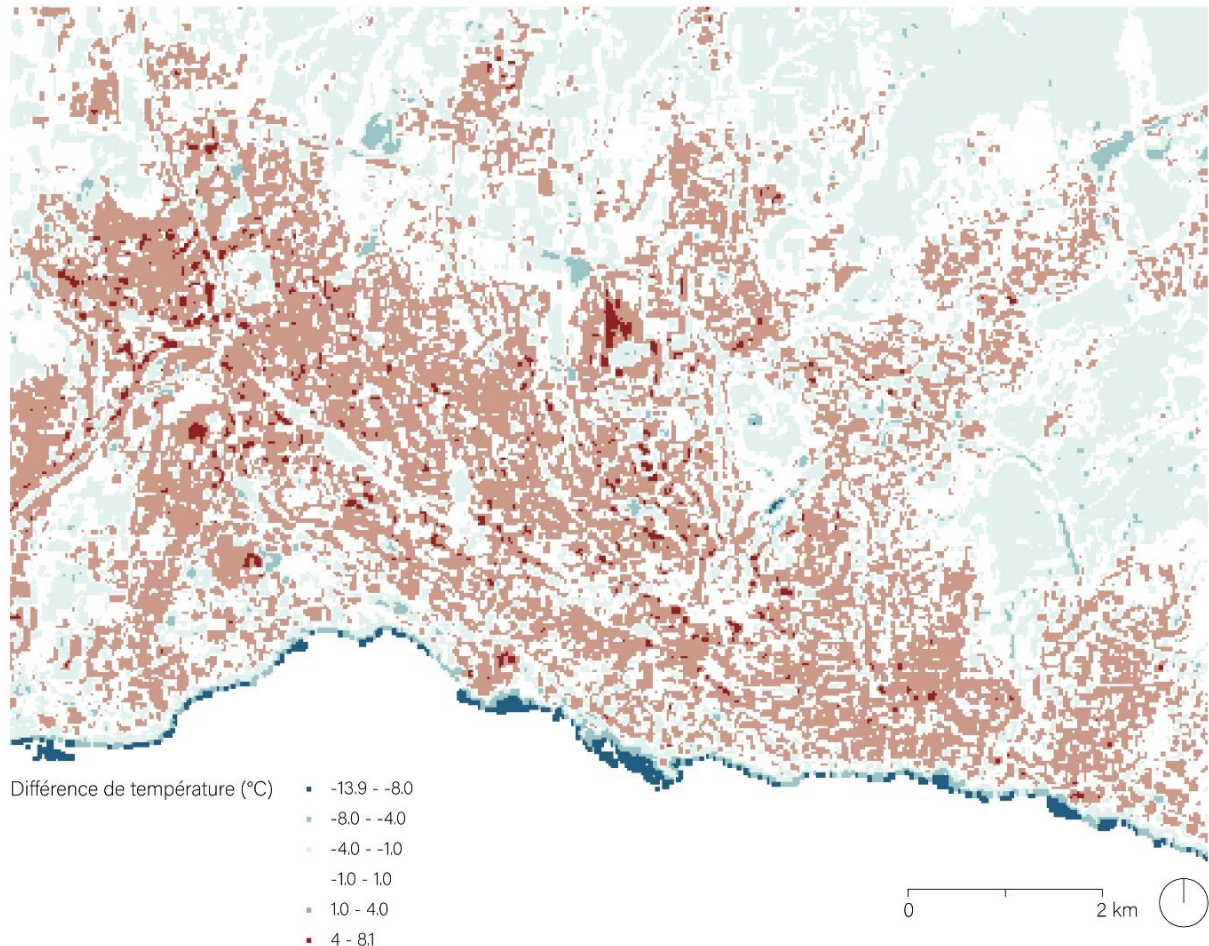


Figure 29 : Différences de température entre les TS mesurées et les TS prévues selon le NDVI

Grâce à cette carte, il est possible de situer, en blanc, les secteurs dont la TS mesurée correspond à 1°C près à ce qui était prévu en fonction du NDVI. La plupart des zones rurales et forestières au Nord de la ville ont 1 à 4°C de moins (en bleu clair) que ce qui était attendu, alors que la plupart des zones urbaines peu denses ont 1 à 4°C de plus (en rouge clair). Le centre-ville dense sujet à l'effet d'ICU montre une TS qui concorde majoritairement à $\pm 1^\circ\text{C}$, avec des zones plus chaudes de 1 à 4°C.

Les secteurs affichant une TS de moins de 8°C que le prévoit leur NDVI sont des zones minérales adjacentes à des points d'eau ainsi qu'une surface ayant un albédo élevé et étant complètement entourée de végétation.

De manière générale, les secteurs plus frais de 4°C ou plus (en bleu et bleu foncé sur la Figure 29) que ce que leur NDVI le prévoit se trouvent être :

- **Les rives du lac**, sur 100 à 200 m ;
- **Les endroits où se trouvent des points d'eau**, tels que le lac de Sauvabelin, la piscine de Montchoisi et la piscine de Renens ;
- **Les surfaces ayant un albédo élevé** comme les toitures blanches, les zones de chantiers qui semblent sableuses ou composées de grès – notamment le chantier du Vortex sur le campus de l'UNIL –, et une carrière, **ET étant à proximité immédiate d'une zone affichant un NDVI élevé.**

Pour revenir au cas du campus de l'EPFL cité en tant que secteur montrant un manque d'activité végétale homogènement mais n'étant pas touché par l'effet d'ICU (Figure 27), la zone indique modèle spatial hétérogène en ce qui concerne la différence entre TS et TS prévues (Figure 29). En effet, si certains endroits présentent une TS de $\pm 1^\circ\text{C}$ que ce qui était prévu par le NDVI, certains autres endroits affichent une TS de $\pm 4^\circ\text{C}$ de ce que prévoyait le NDVI et trois espaces, dont l'albédo est élevé, sont plus frais de 4 à 8°C. A cette échelle, il est complexe d'analyser les éléments qui influencent la TS de façon si hétérogène. La place de la Riponne, réputée pour être vaste et minérale, apparaît également comme secteur montrant un manque d'activité végétale mais n'est pas complètement atteint par l'effet d'ICU. Le Sud-Ouest de la place, avec plus de 34°C, est à la limite de l'ICU de degré 1 englobant une grande partie du centre de Lausanne, alors que le cœur de la place indique 31°C (Figure 24). Il affiche en effet 1 à 4°C de moins que ce que ne laissait prévoir son (manque d')activité végétale. Sa proximité avec l'îlot de fraîcheur qu'est le parc de Sauvabelin et une bonne aération peut consister en une piste pour expliquer le phénomène. De plus, la végétation présente le long du Palais de Rumine, surplombant la place de la Riponne, n'est pas visible dans la cartographie du NDVI avec une telle résolution mais impacte la TS, ce qui fausse probablement les résultats.

Les secteurs plus chauds de 4°C ou plus (en rouge foncé sur la Figure 29) que ce que leur NDVI prévoit sont :

- **Les espaces verts ouverts**, dont :
 - des jardins et parcs privés et publics ;
 - des terrains de sport herbeux, dont :

- à la Tuilière, où le secteur subi également un ICU de degré 1 (Figure 25 et Figure 27) ;
- à Ecublens, où est repéré un ICU de degré 1 sur la Figure 25, et dont les deux terrains synthétiques attenants sont recouverts d'un ICU de degré 2 ;
- à Chavannes, sur les terrains herbeux à proximité immédiate de l'unique terrain synthétique qui est le seul qui soit sujet à l'effet d'ICU de degré 1 (Figure 25) ;
- **Les espaces arborisés étroits** (ne constituant toutefois pas une couverture forestière) situés entre deux endroits dont la température est plus élevée, liée au type d'occupation du sol (autoroute, zone industrielle, etc.).

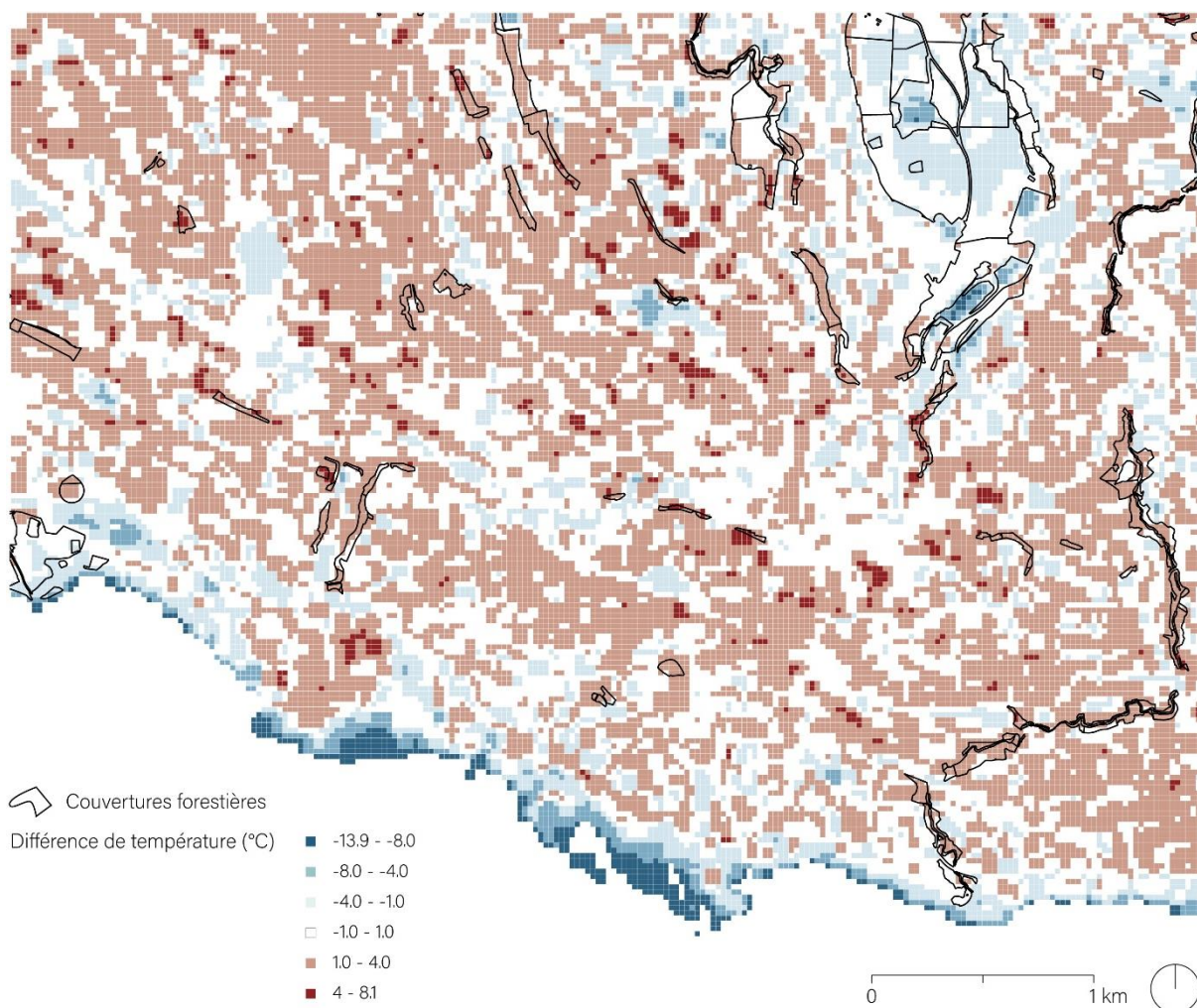


Figure 30 : Différences de température entre les TS et les TS prévues et couvertures forestières

Beaucoup d'espaces verts ouverts et de micro-espaces arborisés sont en effet plus chauds de 4 à 8,1°C par rapport à la valeur prévue à l'aide du NDVI, et, de manière générale, les cordons boisés et petits parcs ayant une couverture forestière ont une TS plus chaude de 1 à 4°C (Figure

30). Seules les surfaces boisées assez vastes comme le Bois de Sauvabelin et le Parc Bourget indiquent une TS similaire ou inférieure à ce que leur NDVI l'annonce : il est possible d'observer une zone tampon en périphérie de leur surface où la TS est $\pm 1^\circ\text{C}$ celle prévue selon le NDVI, et une zone plus fraîche en leur centre.

Dans ces espaces arborisés où le NDVI est élevé mais qui affichent des TS plus élevées que prévues, il est possible d'identifier la canopée du parc de Milan et de la colline de Montriond qui indique une TS plus chaude de 1 à 4°C (Figure 30). Cet espace représente toutefois un îlot de fraîcheur considérable dans le tissu urbain (Figure 31). Situé à 600 m de l'ICU de degré 3 du secteur de la gare, une température de 26°C est observée au centre, c'est-à-dire 4°C de moins que la moyenne urbaine et 10°C de moins que sur la place de la gare. Les 30°C moyens de la ville sont perceptibles quasiment immédiatement aux limites du parc.

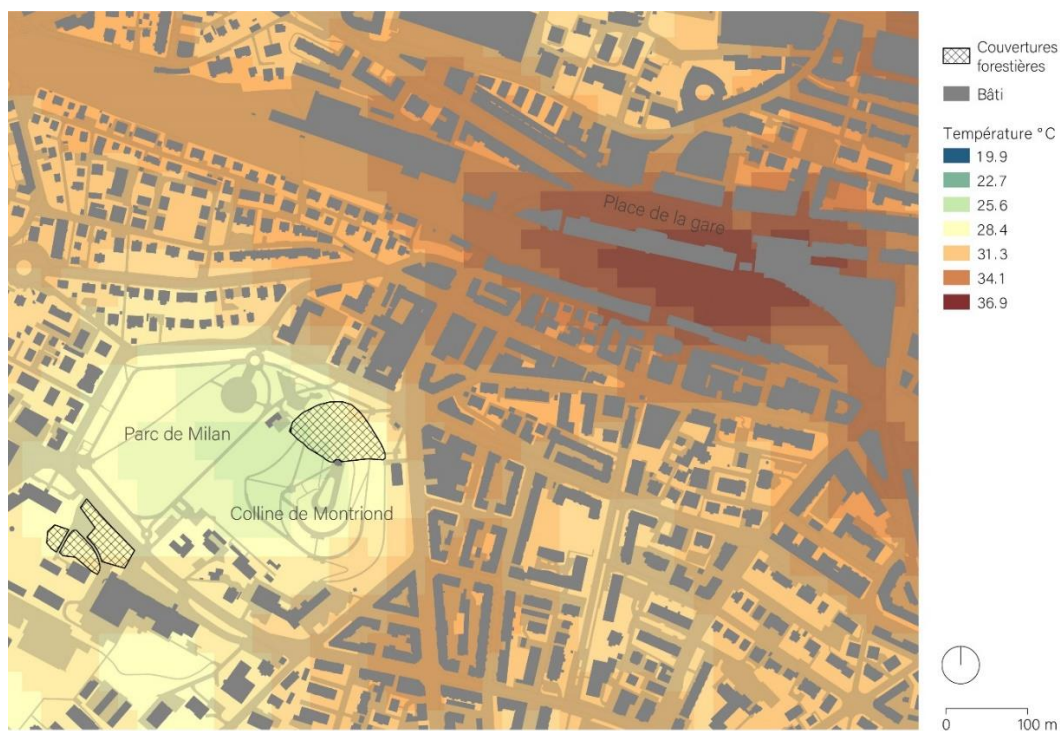


Figure 31 : ICU de la gare et îlot de fraîcheur du parc de Milan

Les corridors boisés et petites surfaces forestières sont probablement trop étroits pour que leur activité végétale puisse agir au mieux en termes de climatisation, les occupations du sol de part et d'autre impactant davantage la TS. Cependant, il est également possible que leur effet micro-climatiseur ne soit pas pleinement évalué avec une telle résolution.

La végétation a vraisemblablement un impact sur la présence d'ICU à Lausanne : si elle ne permet pas dans tous les cas d'avoir un effet climatiser à la hauteur que pourrait le prédire son NDVI, elle est créatrice d'îlots de fraîcheur et de gradients de température importants.

6.3 Analyse et propositions de secteurs réversibles^{20,21}

Ce chapitre propose de s'intéresser brièvement à des secteurs impactés par l'effet d'ICU et d'y apporter quelques éléments de réflexion concernant l'implantation de formes végétales. Trois secteurs de la ville de Lausanne ont été choisis (Tableau 7) comme possédant un potentiel de réversibilité afin de s'adapter à l'effet d'ICU auquel ils sont sujets. Ils sont abordés selon les trois types de formes environnementales urbaines citées par Forman (1995) :

Tableau 7 : Trois secteurs identifiés selon les formes environnementales urbaines (Forman, 1995)

| Secteurs réversibles selon leur forme environnementale | | |
|--|---|--|
| Tâche | Corridor | Matrice |
| Surface différente de son environnement | Surface linéaire différente de son environnement | Surface étendue dominante de fond (support) |
| Secteur de la gare | Voie de chemin de fer : Secteur de la déchèterie de Malley | Secteur de la place Grand-Saint-Jean Comme espace de la matrice qu'est le tissu bâti dense du centre-ville |

De plus, ces secteurs sont marquants dans l'effet de rupture du réseau vert (Figure 27) et peuvent ainsi être considérés comme vecteurs d'une (future) continuité végétale Nord-Sud.



Figure 32 : Situation des trois secteurs

²⁰ Toutes les orthophotos de ce chapitre sont issues de geo.vd.ch.

²¹ Toutes les données cadastrales représentées dans cette section sont issues des ShapeFile MO et NPCRS de l'Administration cantonale vaudoise) obtenus via le serveur de géodonnées UnilGis.

6.3.1 Secteur de la gare



Figure 33 : Secteur de la gare et périmètre d'intervention

Le secteur de la gare est soumis à la température de surface la plus élevée mesurée sur le territoire lausannois avec un ICU de degré 3 atteignant 36.95°C (Figure 34).

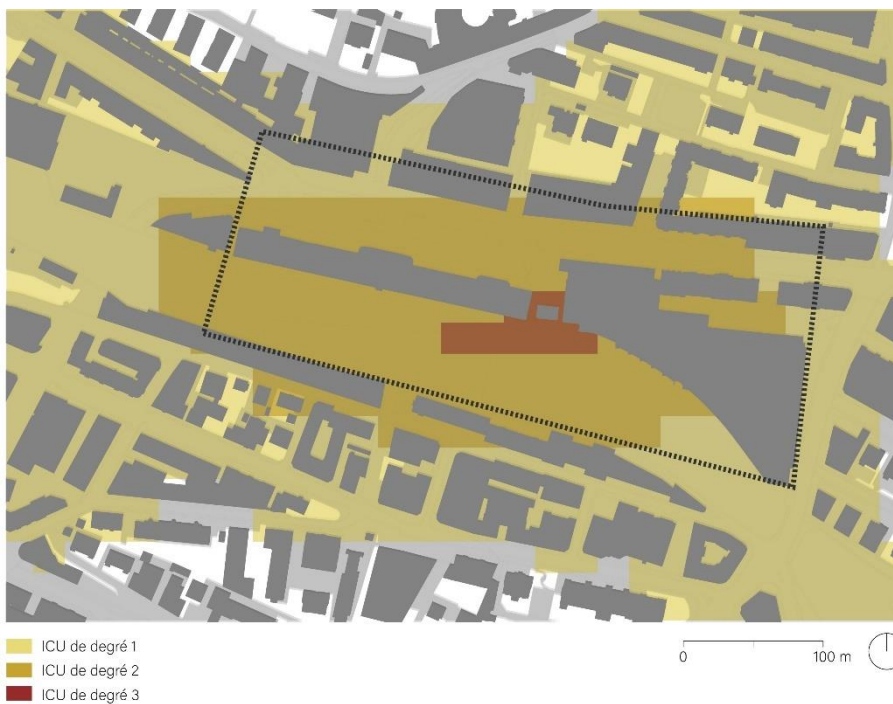


Figure 34 : Situation d'ICU sur le secteur de la gare



Figure 35 : Flux principaux sur le secteur de la gare

La place de la gare est un secteur fortement circulée (Figure 35). Cet espace comprend la voirie – qui accueille des flux piétons, cyclistes et motorisés –, des arrêts de bus TL, de légers parcs à vélos, des places de stationnement de TIM (voitures et cycles), des espaces dédiés aux taxis et des arbres d’alignement. Cette surface est d’environ 7800 m² et se situe sur domaine communal (Figure 36).



Figure 36 : Végétation et domanialité sur le secteur de la gare

Le bâti du secteur, de hauteur R+4 à R+6, se trouve sur domaine privé, dont en partie sur des parcelles appartenant aux CFF. Les voies de chemin de fer, recouvertes d'un vaste couvert sur le secteur de la gare, sont également sur domanialité privée (Figure 36).

En termes de végétalisation, beaucoup d'arbres – à la fois sur domaine privé et public – participent à la canopée, et plusieurs espaces verts ouverts privés se situent de part et d'autre du secteur. La place de la gare compte 10 arbres d'alignement en son milieu, mais la pleine terre est fortement limitée. En effet, les pieds d'arbres sont recouverts par des grilles, laissant peu d'espace au développement d'une strate herbacée (Figure 37). D'autres arbres d'alignement tiennent notamment la rue du Petit-Chêne, l'avenue de la Gare et l'avenue Louis-Ruchonnet. Somme toute, le périmètre d'intervention est majoritairement minéralisé.

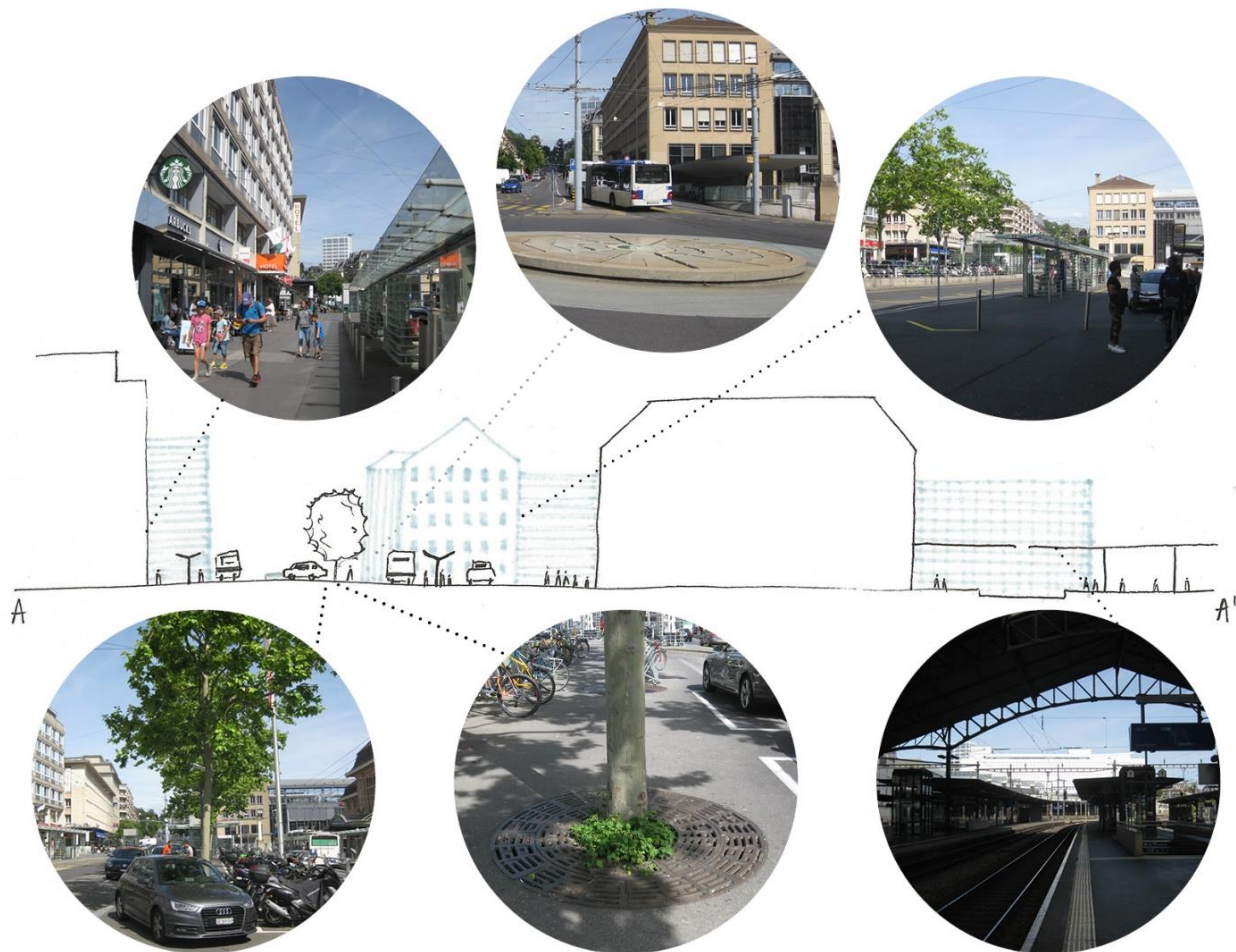
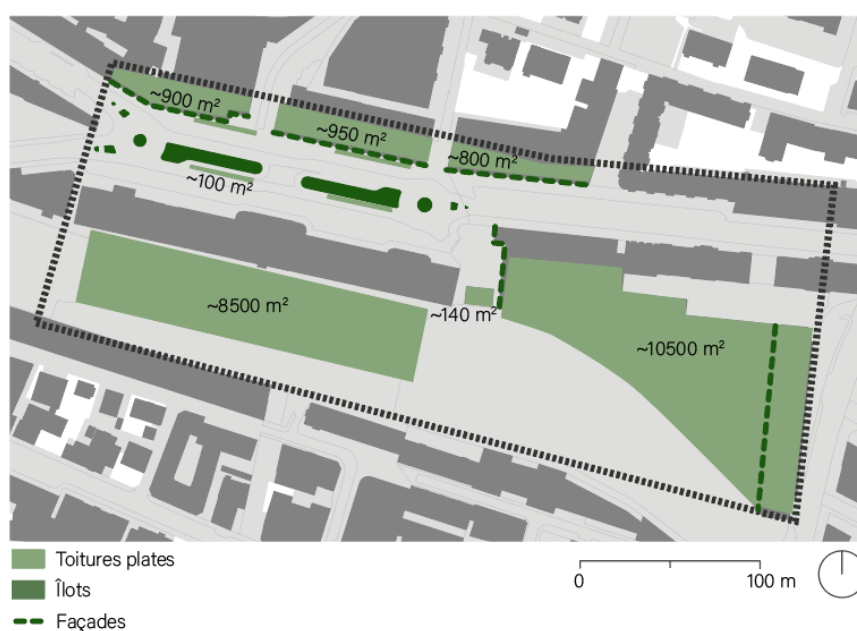


Figure 37 : Végétation, matériaux et ambiances du secteur de la gare (Photos : Bovay, 2020)

6.3.1.1 Projet de végétalisation du secteur de la gare

Avec le projet de la gare de Lausanne²², le sous-sol de la place de la gare va être largement utilisé comme interface de transports entre les trains CFF et les métros (m2 et m3), ce qui pose évidemment la question de la mutualisation de l'utilisation du sol et de la pleine terre à disposition. Cependant, il est possible d'imager l'implantation de diverses formes végétales sur le secteur. Les potentiels de végétalisation sur domaine public consistent en des **îlots routiers**, des **ronds-points**, les **toits des abris des arrêts de bus** (~100 m² chacun) et les deux **grands îlots** au centre de la place qui accueillent des flux piétons et des **places de stationnements** de voitures et de cycles. De plus, les **trottoirs** entourant la place sont des espaces à considérer en tant que surfaces pouvant accueillir des formes végétales. De manière générale, les **pieds d'arbres** dans l'espace public pourraient être davantage végétalisés, en enlever la grille qui empêchent les espèces rudérales de se développer. Les potentiels de végétalisation sur domaine privé sont les **façades** – toutefois pas aveugles –, certains **balcons**, et les **toitures plates**, ces dernières représentant une surface de plus de 21000 m².

La place de la gare étant largement circulée et ayant une surface de pleine terre limitée, des dispositifs aquatiques tels que des fontaines, des miroirs d'eau ou des systèmes d'aspersion d'eau pourraient être inclus à certains bâtiments, abris de bus ou trottoir pour rafraîchir l'air et la chaussée. De plus, il pourrait être envisager de peindre certaines surfaces bitumées en blanc pour augmenter l'albédo du secteur.



²² SBB CFF FFS : <https://company.sbb.ch/fr/entreprise/projets/suisse-romande-et-valais/leman-2030/nos-projets/projet-gare-de-lausanne.html>

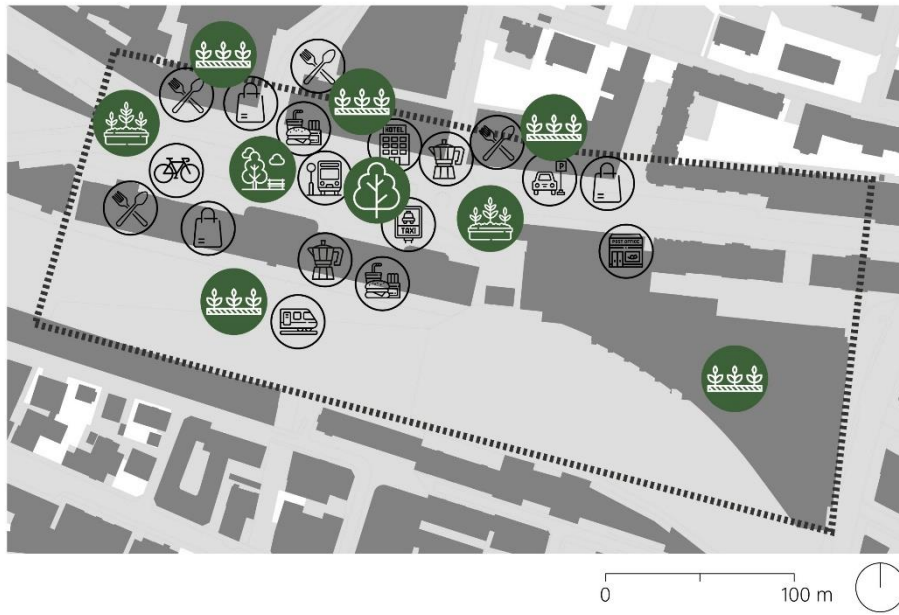


Figure 39 : Programmes sur le secteur de la gare

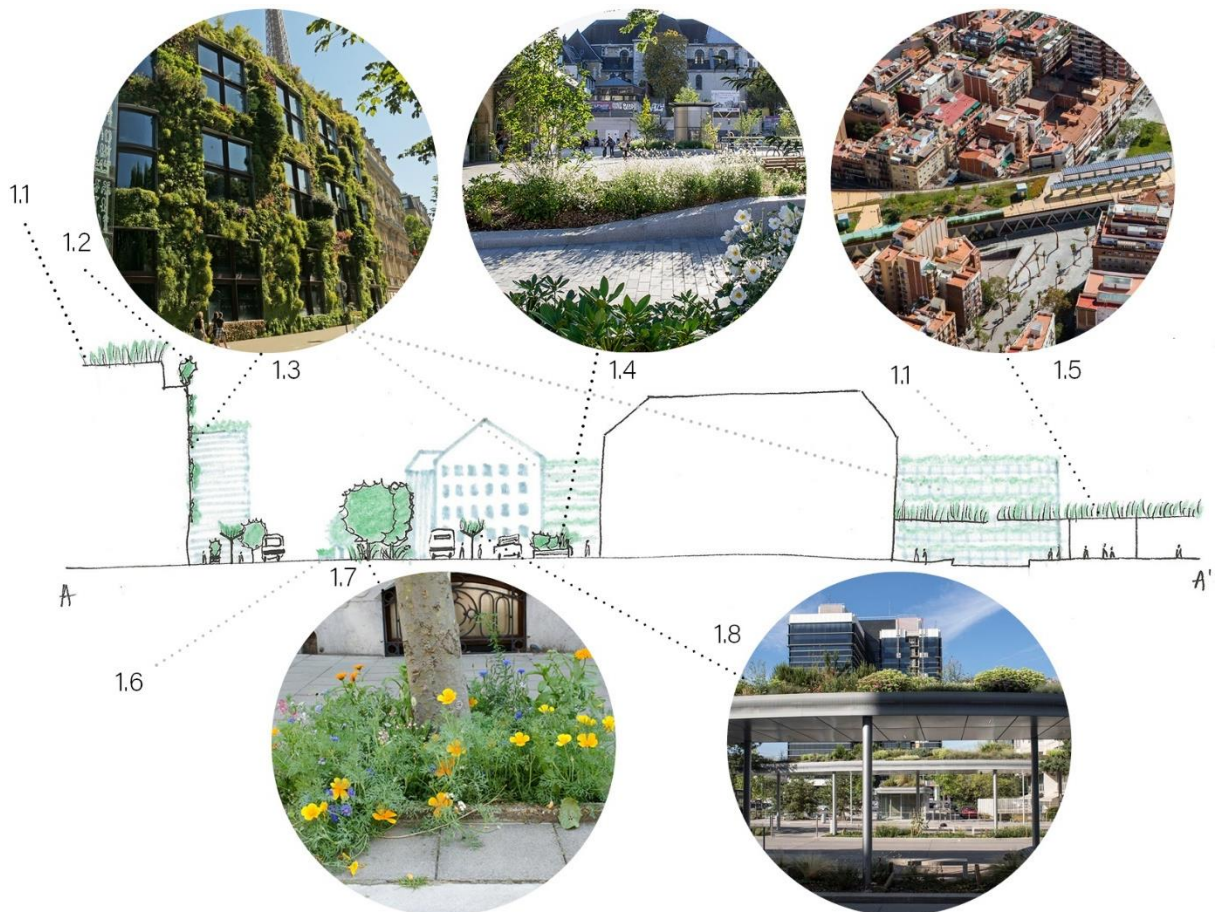


Figure 40 : Implantation de formes végétales sur le secteur de la gare

Tableau 8 : Formes végétales potentielles sur le secteur de la gare

| Forme végétale | Référence | Apports |
|--|---|--|
| 1.1 Toitures végétalisées | | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air Confort thermique pour le bâtiment |
| 1.2 Balcons végétalisés | | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air |
| 1.3 Façades végétalisées | Musée du Quai Branly Jacques Chirac à Paris <i>murvegetalpatrickblanc.com</i> | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air Confort thermique pour le bâtiment Confort acoustique Esthétisme & Identité |
| 1.4 Micro-jardins densément végétalisés et bancs végétalisés | Gare de Rouen <i>OKRA, landezine.com</i> | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air Esthétisme & Identité |
| 1.5 Couvert végétal sur les voies ferrées | Barcelone <i>©Adrià Goula Sardà, landezine.com</i> | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air |
| 1.6 Ilots routiers et ronds-points végétalisés | | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air |
| 1.7 Pieds d'arbres végétalisés | Schaerbeek <i>1030.be</i> | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air Qualité du sol |
| 1.8 Abris bus végétalisés | Barcelone <i>©Adrià Goula Sardà, landezine.com</i> | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air Esthétisme & Identité |

6.3.2 Voie de chemin de fer – Secteur de la déchèterie de Malley

La voie de chemin de fer entre la gare de Lausanne et la gare de Bussigny, soumise à des températures équivalentes à un ICU de degré 1, s'étend sur près de 7 km. Sur domanialité privée – les CFF étant propriétaires –, la voie de chemin de fer représente une forme environnementale dite de « corridor » continu (Forman, 2014). Les voies ferrées peuvent avoir une fonction importante de corridor écologique (Forman, 2014), et c'est le cas à Lausanne, qu'il s'agisse des tronçons à niveau ou en talus. En effet, les bords de la ligne CFF font partie des espaces composant le « sous-réseau écologique des lieux secs »²³. Ces prairies sèches sont importantes pour la biodiversité et méritent d'être maintenues, voire davantage végétalisées. Il est possible d'agir sur la voie de chemin de fer tant que corridor, c'est-à-dire sur toute sa longueur en proposant un programme linéaire, mais également sur certains nœuds ou intersections en proposant un programme « d'acupuncture ». Cette section de chemin de fer fait d'ailleurs partie du projet de voie verte d'agglomération²⁴ entre Lausanne et Morges, et le but est de profiter de l'aménagement de cet axe de mobilité douce pour valoriser et compléter la végétation. Ce projet apparaît ainsi comme étant un programme linéaire pouvant apporter de la végétation sur toute la longueur de la voie. Le projet de la gare de Lausanne quant à lui agit spécifiquement sur un nœud de la voie de chemin de fer. De plus, le projet du saut-de-mouton est actuellement en travaux et va modifier le profil du chemin de fer entre la halte de Prilly-Malley et Renens^{25,26}.

²³ « Réseau vert de Lausanne de l'Ouest lausannois » : Etude ciblée des composantes biologiques – Synthèse et fiches de mesures (https://ouest-lausannois.ch/wp-content/uploads/701_Rapport-Reseau-ecologique_Final.pdf), janvier 2014

²⁴ Concept directeur « Nature en ville » de la Commune de Lausanne : Rapport-préavis N° 2018/42, 13 septembre 2018

²⁵ Lausanne–Renens : saut-de-mouton (<https://company.sbb.ch/fr/entreprise/projets/suisse-romande-et-valais/leman-2030/nos-projets/saut-de-mouton.html>)

²⁶ Saut-de-mouton entre Prilly-Malley et Renens (<https://www.farralakis.ch/saut-de-mouton-entre-malley-et-renens-renens/>)



Figure 41 : Secteur de la déchèterie de Malley et périmètre d'intervention

Le secteur de la déchèterie de Malley (Figure 41) peut être intéressant comme section de la voie de chemin de fer à traiter sous forme « d'acupuncture » car il se trouve à l'endroit où l'ICU est le plus vaste le long de toute la section de chemin de fer entre Lausanne et Bussigny (Figure 42). De plus, comme le secteur fait également partie de deux projets cités précédemment, c'est un endroit qui peut être pensé transversalement. La problématique des ICU pourrait y être liée afin de penser l'aménagement pendant les travaux du saut-de-mouton et ceux dont va nécessiter la voie verte d'agglomération.

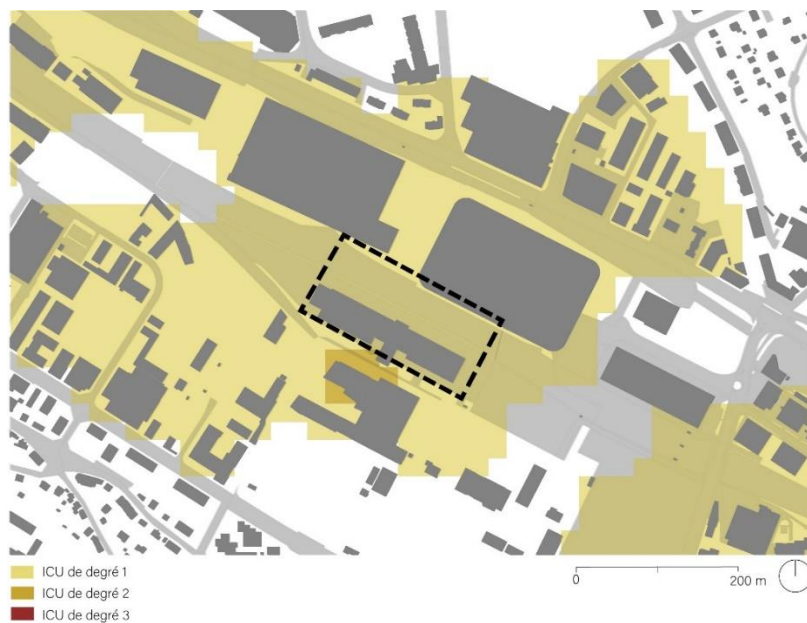


Figure 42 : Situation d'ICU sur le secteur de la déchèterie de Malley

La végétation sur le périmètre d'intervention est très pauvre (Figure 43). En effet, à part le corridor écologique de prairie sèche au Nord de la voie de chemin de fer, aucune autre forme végétale n'est présente. Au-delà du périmètre d'intervention, des espaces verts ouverts sont observables (Figure 41) – l'ICU de degré 1 apparaît justement à la limite de ces espaces végétalisés –, et des arbres sont également visibles dans les alentours (Figure 44).

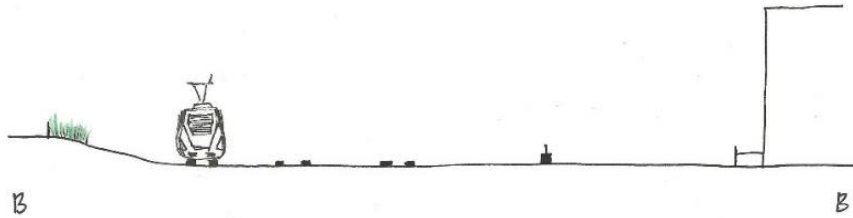


Figure 43 : Situation actuelle sur le secteur de la déchèterie de Malley

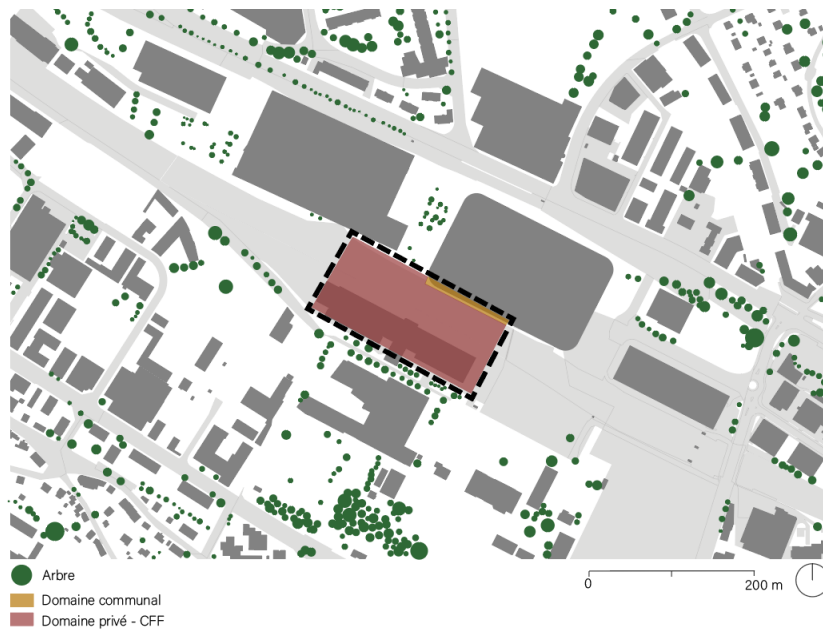


Figure 44 : Arborisation et domanialité sur le secteur de la déchèterie de Malley

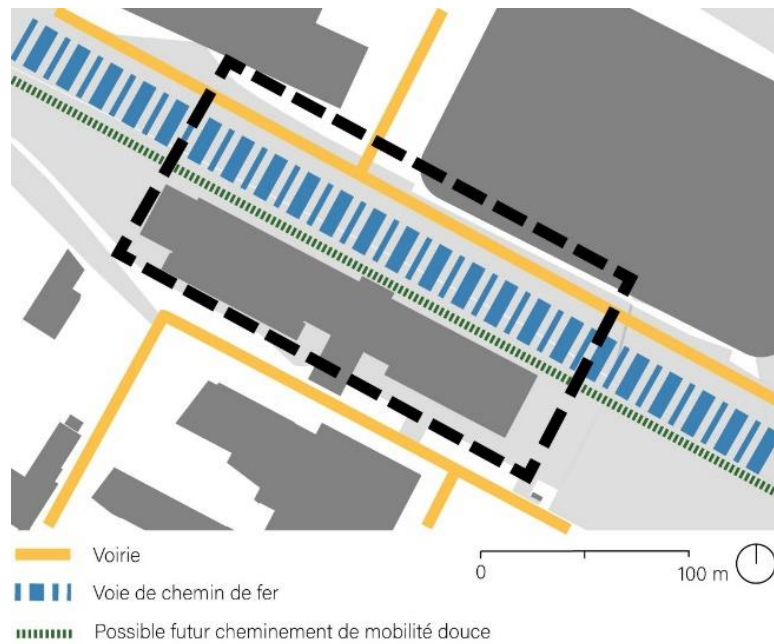


Figure 45 : Flux principaux sur le secteur de la déchèterie de Malley

6.3.2.1 Projet de végétalisation de la voie de chemin de fer sur le secteur de la déchèterie de Malley

Les potentiels de végétalisation du secteur sont sur le domaine des CFF, à la fois sur le toit du bâtiment de la déchèterie (bâtiment qui appartient toutefois à la commune de Lausanne) et le long des voies de chemin de fer. Le projet du saut-de-mouton va créer deux parois qui pourraient être pensées en façades végétalisées, comme c'est le cas à Barcelone (Figure 48) ; et le fait de faire passer la voie verte d'agglomération entre les rails et la déchèterie pourrait inciter l'installation d'un mur végétal au Nord de la voie verte et d'implanter des arbres au Sud. Cependant, les secteurs attenants à des infrastructures de transport exposent des contraintes techniques (Michaël Rosselet, entretien, 2020). L'implantation de végétation peut alors être délicate par endroits.

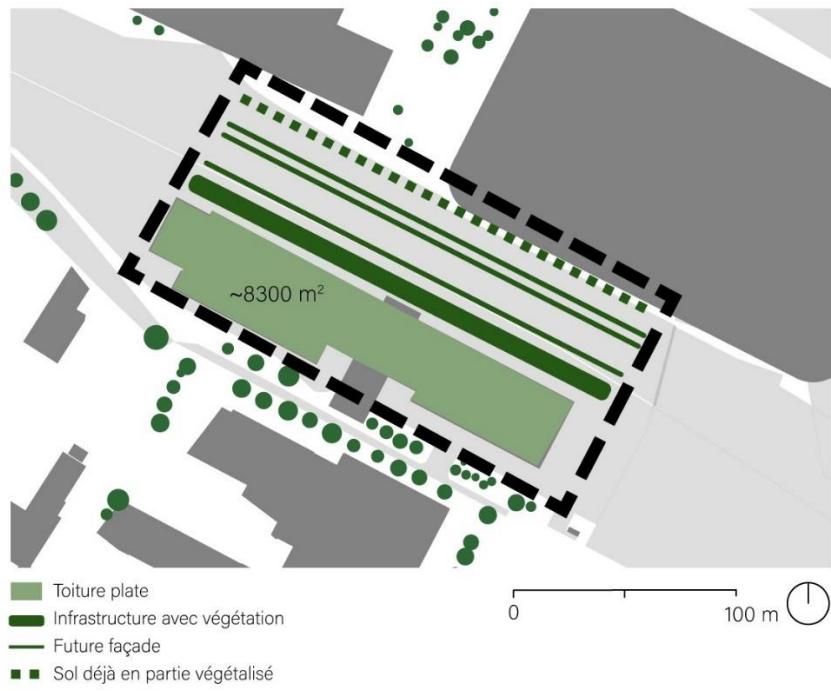


Figure 46 : Potentiels de végétalisation sur le secteur de la déchèterie de Malley

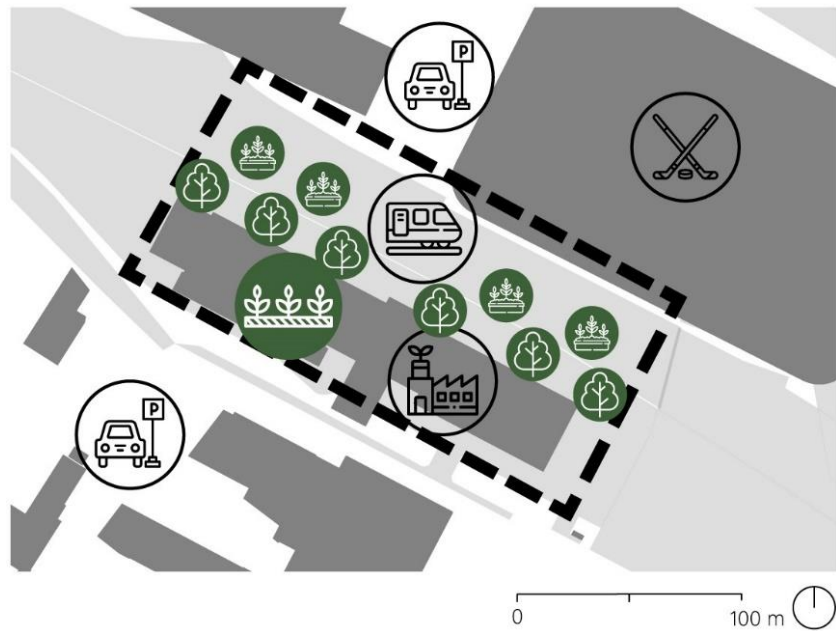


Figure 47 : Programmes sur le secteur de la déchèterie de Malley

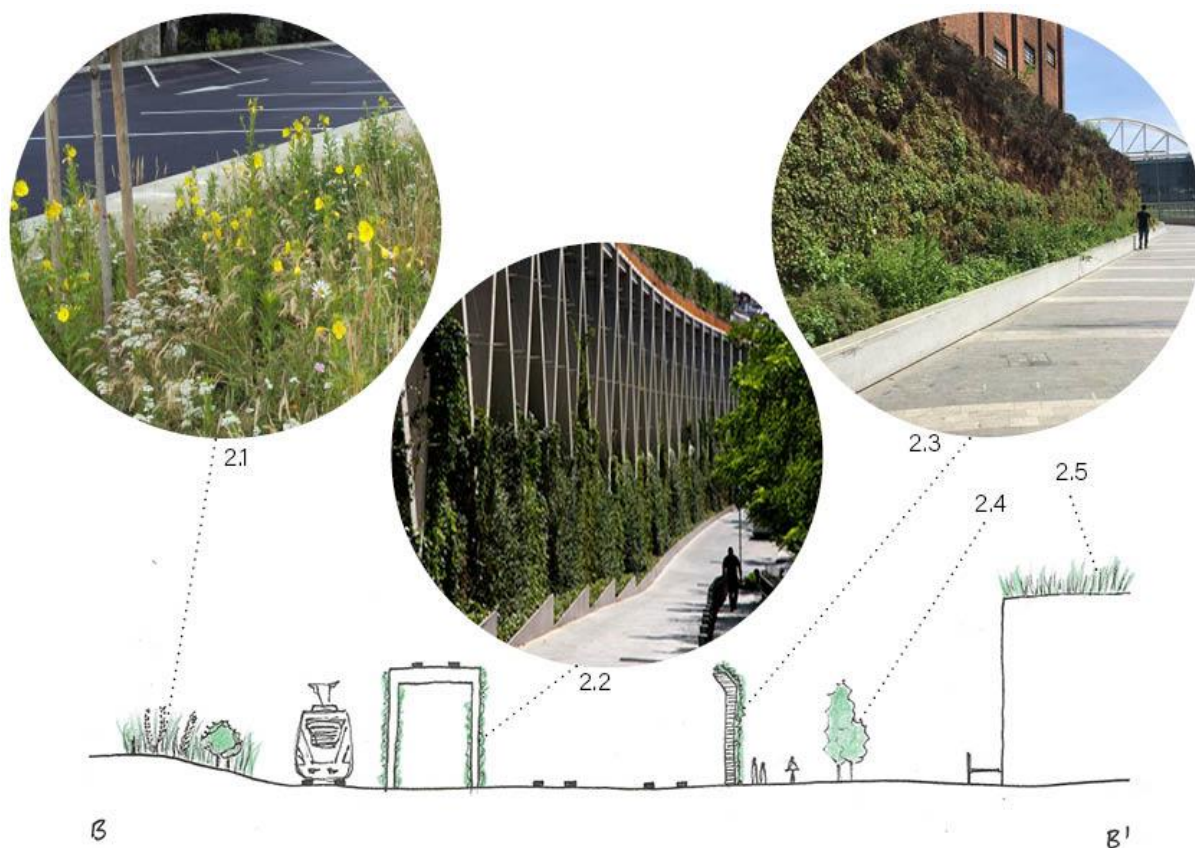


Figure 48 : Implantation de formes végétales sur le secteur de la déchèterie de Malley

Tableau 9 : Formes végétales potentielles sur le secteur de la déchèterie de Malley

| | Forme végétale | Référence | Apports |
|-----|---|--|---|
| 2.1 | Noüe paysagère sèche | Saint-Paul-lès-Dax <i>cahiersdufleurrissement.com</i> | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air Qualité du sol |
| 2.2 | Système de verdure vertical autour d'infrastructures ferroviaires | Barcelone ©Adrià Goula Sardà, <i>landezine.com</i> | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air |
| 2.3 | Mur végétal qui sépare les individus des voies ferrées | Birmingham New Street Station <i>biotecture.uk</i> | Confort acoustique Esthétisme & Identité |
| 2.4 | Arbres d'alignement | | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air Ombre Esthétisme & Identité |
| 2.5 | Toiture végétalisée | | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air Confort thermique pour le bâtiment |

6.3.3 Secteur de la place Grand-Saint-Jean



Figure 49 : Secteur de la place Grand-Saint-Jean et périmètre d'intervention

La place Grand-Saint-Jean, s'étendant sur une surface d'environ 550 m², est tenue par le tissu dense du centre-ville de Lausanne. L'ICU de degré 2 s'étend au Nord, jusqu'à l'Eglise et la Rue Saint-Laurent (Figure 50). Tout le secteur est piéton dont les rez actifs consistent principalement en des activités tertiaires.

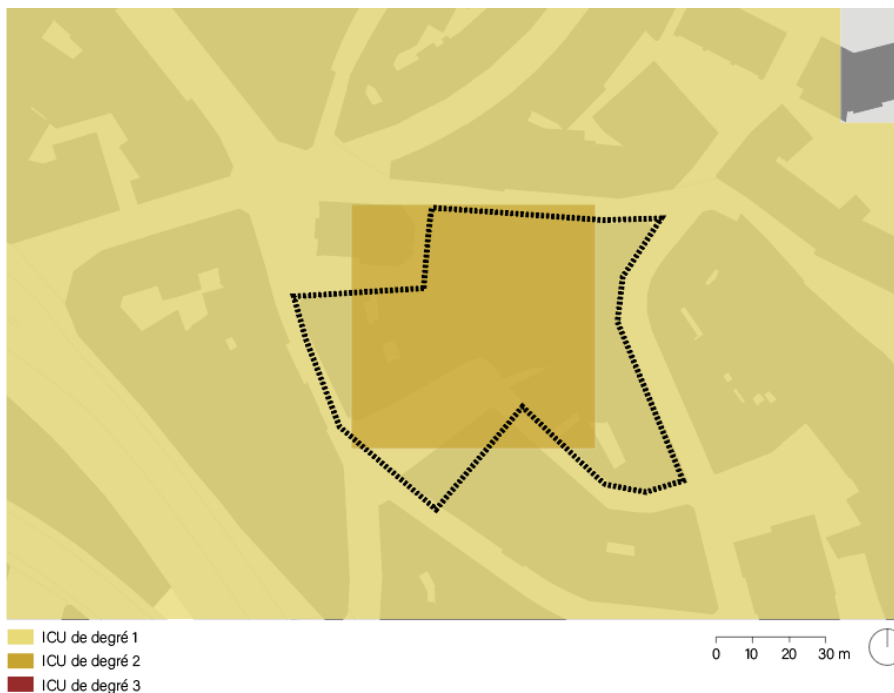


Figure 50 : Situation d'ICU sur le secteur de la place Grand-Saint-Jean



Figure 51 : Végétation et domanialité sur le secteur de la place Grand-Saint-Jean

La place Grand-Saint-Jean est une place de passage sur domanialité publique (Figure 51), pavée, accueillant un arbre et une fontaine en son centre. Quatre éléments de mobilier urbain sont situés à proximité de l'arbre. La terrasse d'un café-restaurant s'établit également sur la place. Le sol est pavé, et un des pavages laisse légèrement de la végétation apparaître, ne permettant toutefois pas une importante perméabilité au niveau du sol. La fontaine permet cependant d'ajouter un élément rafraichissant au milieu de la place grâce à sa participation à l'évapotranspiration.

Le bâti de R+5 du secteur est sur domaine privé (Figure 51). Les façades sont majoritairement pleines de fenêtres. En effet, une seule façade au fond de la place, dans un espace interstitiel, est aveugle. Le bâtiment tenant la place au Sud affiche une surface claire entre les fenêtres ; cependant, le matériau fait effet miroir.

La végétation présente sur ce secteur est très limitée (Figure 51). Un unique arbre se situe sur la place Grand-Saint-Jean, sur un carré de pleine terre d'environ 2 m² sur lequel aucune surface herbeuse n'est présente (Figure 52). Quelques végétaux sont présents sur une terrasse privée, sur un toit longeant la Rue Saint-Laurent.



Figure 52 : Végétation, matériaux et ambiances du secteur de la place Grand-Saint-Jean (Photos : Bovay, 2020)

6.3.3.1 Projet de végétalisation du secteur de la place Grand-Saint-Jean

Les potentiels de végétalisation sur domaine public sont le **sol** de la place et le **muret** au Sud-Est de la place. La place accueillant des flux piétons et une terrasse, elle doit être pavée, cependant sur les 550 m² de la place, il serait peut-être imaginable – selon la présence d’infrastructures souterraines – d’enlever une partie de surface de bitume pour ajouter de la surface de pleine terre au 2 m² actuels autour de l’arbre, ou d’espacer les pavés afin de donner plus de place au développement d’une surface herbeuse. De plus et afin de compléter les services de rafraîchissement de la fontaine, des dispositifs d’aspersion d’eau pourraient être inclus au secteur.

Les potentiels de végétalisation sur domaine privé consistent en les **façades** du bâti entourant la place (la plupart des façades ne sont pas aveugles, mais des options de végétalisation autour des fenêtres sont possibles), un large **balcon** qui surplombe la place, et les **toitures plates**. Ces espaces présentent les capacités d’accueillir des formes végétales et, ainsi, de créer des nouvelles tâches de nature dans la matrice bâtie.

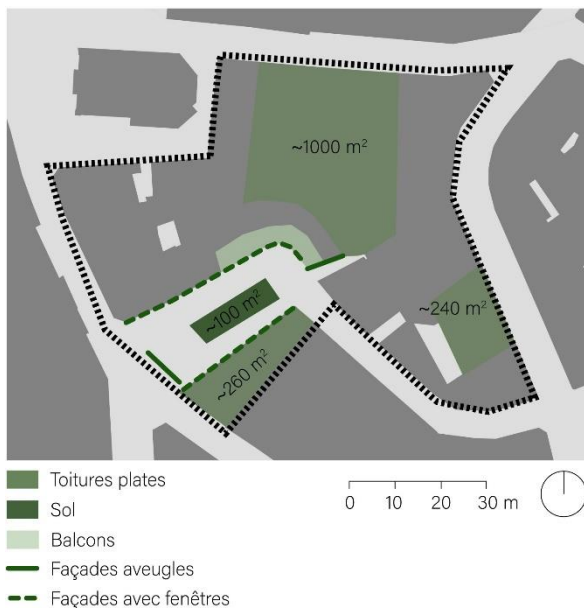


Figure 53 : Potentiels de végétalisation sur le secteur de la place Grand-Saint-Jean

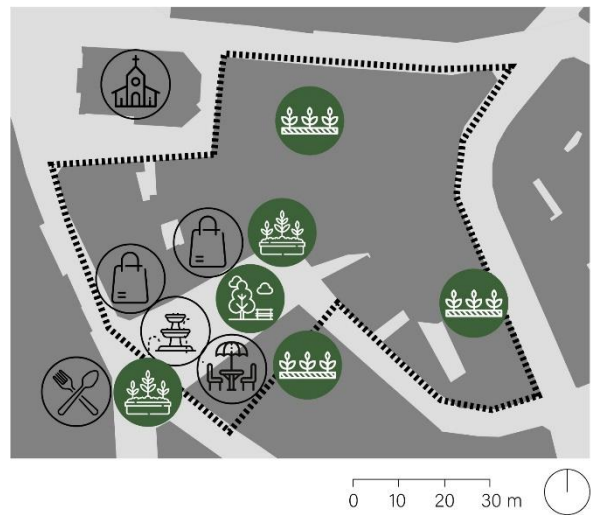


Figure 54 : Programmes sur le secteur de la place Grand-Saint-Jean

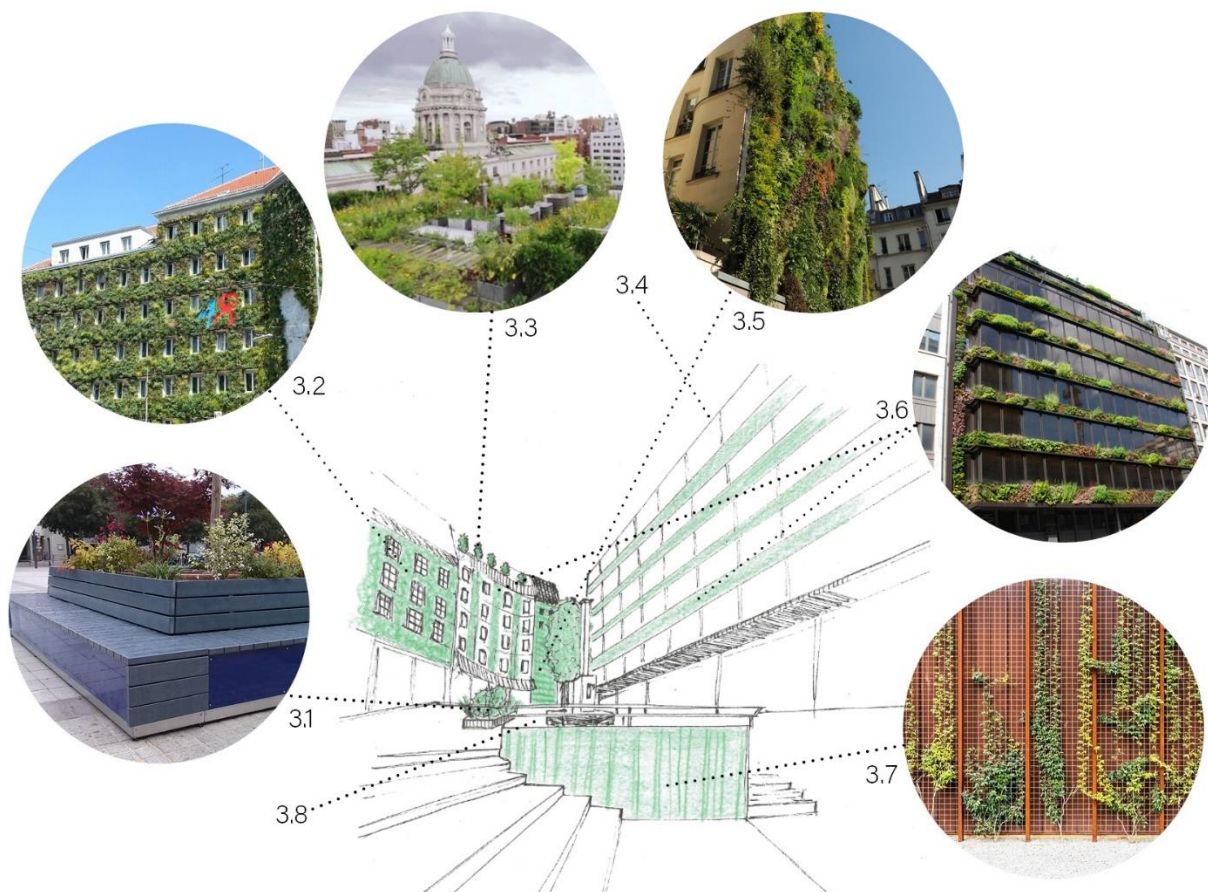


Figure 55 : Implantation de formes végétales sur le secteur de la place Grand-Saint-Jean

Tableau 10 : Formes végétales potentielles sur le secteur de la place Grand-Saint-Jean

| | Forme végétale | Référence | Apports |
|-----|------------------------------------|---|---|
| 3.1 | Banc végétalisé | <i>edppiveteau.fr</i> | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air Esthétisme & Identité |
| 3.3 | Balcon-terrasse végétalisé | New-York <i>urbanstrong.com</i> | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air |
| 3.4 | Toiture végétalisée | | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air Confort thermique pour le bâtiment |
| 3.5 | Façade végétalisée sur mur aveugle | L'Oasis d'Aboukir, Paris <i>murvegetalpatrickblanc.com</i> | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air |
| 3.2 | Façade végétalisée sur | Rue Belliard à Bruxelles <i>murvegetalpatrickblanc.com</i> | Confort thermique pour le bâtiment Confort acoustique Esthétisme & Identité |
| 3.6 | façade avec fenêtres | | |
| 3.7 | Mur avec végétaux rampants | <i>archdaily.com</i> | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air Esthétisme & Identité |
| 3.8 | Surface de pleine terre herbeuse | | Confort thermique (cf. p. 48) Biodiversité Qualité de l'air Qualité du sol |

7 Discussion

7.1 Politiques climatiques : des orientations stratégiques au projet urbain

S'il y a besoin d'études météorologiques pour construire les villes de demain en tenant compte des altérations dues au changement climatique, il est également nécessaire de pouvoir intégrer ces enjeux en amont des projets urbains (Rizwan et al., 2008). Afin que la prévention de la chaleur – et plus généralement la notion d'adaptation – soit pensée dans les réflexions de développement urbain, il s'agit d'opérer parallèlement à deux niveaux.

D'une part, il faut inclure la question climatique dans les outils stratégiques d'aménagement du territoire, tels que les planifications directrices (Neukom, 2019). Ce point est sur la bonne voie à Lausanne puisque l'actuelle révision du PDCOM inclut pour la première fois des mesures liées à l'adaptation au changement climatique (Claude Thomas, entretien, 2020). De plus, la mise en place d'un plan climat révèle une forte volonté de donner une vision claire concernant la problématique climatique au niveau de la ville intégrant tous ses services afin d'avoir une approche transversale. En outre, les postulats semblent être des moteurs importants au niveau communal pour créer de nouvelles stratégies prenant en compte les enjeux urbains.

D'autre part, il faut donner une base légale et coercitive à la question climatique au travers des instruments contraignants, comme les PGA ou même la LAT (Desthieux et Joerin, 2019 ; Gicquel, 2019 ; Neukom, 2019). Il n'existe en effet à ce jour pas de cadre juridique pour la problématique climatique – comme c'est le cas notamment pour les questions liées à l'aménagement du territoire ou à la nature et la biodiversité, qui trouvent un cadre légal au niveau fédéral. Cependant, ce point semble être considéré à Lausanne, car la ville réfléchit à l'introduction d'articles réglementaires en termes d'adaptation dans la révision du PGA, notamment via des quotas ou des indices relatifs à la pleine terre et à la verdure (Michaël Rosselet, entretien, 2020)

De manière générale, qu'il s'agisse des outils stratégiques ou des instruments réglementaires, il est indispensable d'aborder les problématiques climatiques sous l'angle de l'adaptation et non pas uniquement via l'atténuation. Ceci fait écho aux propos de Bertrand et Richard (2015) qui soulèvent le manque d'ancrage local des pratiques d'adaptation. En effet, dans son rapport-préavis concernant le futur plan climat et sa politique climatique, la municipalité de Lausanne cite certains objectifs stratégiques pour la réduction des émissions de CO₂ dans le cadre de développements immobilier sur les terrains publics. Ces objectifs prennent en compte la « *définition de morphologies urbaines favorisant la ventilation naturelle (notamment dans les fonds de vallée – bâtiments longitudinaux favorables à une aération naturelle des sites) ; [la] limitation*

des espaces extérieurs sur dalle et valorisation de la pleine terre (surfaces perméables permettant d'encourager la rétention et l'infiltration de l'eau) ; [l'] analyse d'ensoleillement/ombrage, afin de planifier des volumes bâtis définissant des espaces ouverts présentant un bon confort thermique » (Rapport-préavis N° 2019 / 30, page 10). Cela met en évidence trois choses : premièrement, bien que ces intentions répondent en partie à des stratégies d'adaptation, elles sont uniquement recensées dans les « éléments déterminants pour la réduction des émissions de CO₂ », ce qui prouve que la communication de la municipalité est majoritairement orientée sur la maîtrise des émissions et parle peu de résilience et d'adaptation ; deuxièmement, ces objectifs visent les « parcelles communales ou publiques », ce qui démontre un manque de mesures pour les parcelles privées ; et troisièmement, ce sont des objectifs dits « stratégiques » ne représentant pas des mesures contraignantes. En termes de perspectives visant à mieux gérer la problématique des ICU à Lausanne, les objectifs cités ci-dessus devraient :

- intégrer des stratégies d'adaptation ;
- s'appliquer également aux parcelles privées ;
- être envisagés en tant que mesures contraignantes, notamment dans le PGA.

Dans cette même idée, il serait souhaitable de faire en sorte que tous les projets urbains, privés comme publics, soient systématiquement accompagnés d'une étude climatique et répondent à des critères spécifiques concernant leurs effets thermiques. Les relevés climatiques pourraient renseigner notamment sur l'implantation de végétation, les flux d'air, l'orientation du bâti, etc. La question climatique étant globale, il s'agirait de mettre en œuvre une base réglementaire unique pour tout projet afin de servir les intérêts communs, et ce spécifiquement puisque la politique d'aménagement du territoire revendique la densification et le développement vers l'intérieur.

Si le principe de densification et la problématique des ICU peut paraître paradoxal – du fait que davantage de bâti implique davantage de facteurs influençant négativement l'effet d'ICU et laisse moins d'espaces végétalisés –, l'impératif du projet urbain apparaît alors comme une réponse à ces deux enjeux a priori difficilement compatibles. Il permet en effet de mettre en cohérence les objectifs d'adaptation au changement climatique et d'aménagement urbain (Da Cunha, 2015 ; Emelianoff, 2007). La densification mérite ainsi d'être « qualifiée » en prenant en compte les défis climatiques présents et futurs. Fanny Falconnet, cheffe de la Division Nature au SPADOM, le reconnaît et atteste de l'attention portée à la densification prenant en compte la végétation et les différents usages du sol. Le concept des « *Deep Cities* » qui avance un aménagement du territoire en trois dimensions en intégrant la dimension du sous-sol dans les projets de développement urbain en tant que « ressource à usages multiples » (Parriaux et al., 2010). Comme le révèle Claude Thomas, délégué à l'environnement à la Direction du logement, de l'environnement et de

l'architecture, ces éléments sont pris en compte dans les réflexions de la ville de Lausanne et ne consistent pas, selon lui, en un paradoxe mais devraient effectivement être considérés en synergie.

Le besoin de projet est utile pour répondre aux enjeux globaux et devrait être pleinement reconnu comme tel par les autorités politiques. En plus de tout ce qu'offre cette approche, elle permet d'inclure les politiques d'adaptation en couplant les « horizons d'attente » (visions à long terme) et les « espaces d'expérience » (actions ponctuelles à court terme) :

« Dans cette dialectique, le politique organise les aller-retour entre ces deux dimensions afin, d'une part, d'empêcher les horizons d'attente de « fuir » », c'est-à-dire, d'éviter que les prospectives ne soient trop lointaines pour ne pas être traduisibles en opérations concrètes et, d'autre part, de « résister au rétrécissement » des espaces d'expérience », autrement dit, de conjurer le risque que le projet se noie dans des considérations procéduriales et techniques ou se perde dans des considérations strictement opportunistes » (Haumont, 1993, cité dans Pinson, 2005, p. 223).

Ainsi, le fait de donner l'opportunité de tester des aménagements, à l'image de l'urbanisme tactique (Lydon et Garcia, 2015) ou de l'acupuncture urbaine (Lerner, 2014) – qui suggèrent des interventions urbaines ponctuelles, souvent éphémères et avec un budget limité –, permettrait d'envisager des solutions localisées aux impacts du changement climatique.

7.2 ICU et végétation : identification et caractérisation

Durant l'été 2019, le territoire urbain lausannois a atteint des températures de surface jusqu'à 10°C plus élevées que dans la zone rurale alentour, ce qui démontre la présence d'ICU. Il existe trois ICU de degré 3 (plus de 10°C qu'en zone rurale) qui se situent au niveau de la gare de Lausanne sur les voies ferrées et sur les toits de larges bâtiments en zone industrielle. Concernant les ICU de degré 2 (8°C de plus qu'en zone rurale), ils sont peu fréquents et apparaissent au niveau de zones commerciales ou industrielles, généralement sur les toits plats de bâtiments et sur les parkings. De vastes ICU de degrés 1 (6°C de plus qu'en zone rurale) se localisent en milieu urbain ; spécifiquement dans le centre-ville dense ainsi que le long de la voie de chemin de fer entre Lausanne et Bussigny, où aucune activité végétale n'est suffisante pour être identifiée à cette résolution d'analyse. Plusieurs effets d'ICU de degré 1 et 2 sont identifiés hors du tissu dense de la ville, mais toujours dans des zones où la végétation fait défaut (Figure 27). Un micro-effet

d'ICU est observable systématiquement sur les terrains de sport synthétiques du territoire lausannois.

Toutes ces observations démontrent une tendance générale : les endroits les plus chauds – identifiés par les différents degrés d'ICU – se situent là où il n'y a pas ou peu de végétation. En effet, il existe une corrélation négative et significative entre la TS et le NDVI. Cette corrélation de -0,81 rejoint de nombreuses études (Chen et al., 2006 ; Feyisa et al., 2014 ; Guha et al., 2018 ; Lo et al., 1997 ; Rizwan et al., 2008 ; Weng et al., 2004) qui l'ont établi auparavant et confirme que la distribution spatiale des ICU et celle de la végétation sont négativement corrélées.

Par conséquent, la végétation a un impact sur la présence d'ICU à Lausanne. Cependant, le calcul de la différence de température entre la TS mesurée par télédétection et la TS prévue permet d'observer que les qualités de climatiseur de la végétation sont passablement limitées en milieu urbain. De plus, il existe des endroits montrant une activité végétale qui subissent des TS plus élevées de 4°C ou plus que ce qui est prévu selon leur NDVI. C'est le cas notamment pour certains espaces verts ouverts et des cordons boisés étroits. Cela met en évidence le fait que même si une activité végétale est présente, la forme du végétal en question (taille, densité, strate,...) et l'occupation du sol à proximité immédiate influencent fortement la TS.

Toutefois, cela est également le cas pour la situation inverse : certaines surfaces sont plus fraîches que prévues. Les secteurs plus frais de 4°C ou plus que ce que leur NDVI le prévoit se trouvent être les endroits adjacents à des points d'eau ainsi que les surfaces qui possèdent un albédo élevé et se situent à proximité immédiate d'une zone affichant une activité végétale. La présence d'eau, ainsi que la présence de végétation couplée avec un albédo élevé sont les deux combinaisons les plus efficaces pour palier à des TS trop élevées en l'absence de végétation.

Finalement, le phénomène d'ICU est complexe et ces derniers ne peuvent pas être réduits au seul facteur qu'est la végétation : l'effet climatiseur des points d'eau ainsi que l'albédo sont des éléments entrant largement en compte dans la distribution spatiale des ICU à Lausanne. Comme le montrent les cartographies réalisées, le centre-ville de Lausanne est touché par le phénomène d'ICU sur une grande surface. Même s'il est possible de déceler un réel manque d'activité chlorophyllienne aux endroits significativement plus chauds qu'en milieu rural, il est vraisemblable que la morphologie urbaine, les matériaux, l'albédo et les activités anthropiques jouent des rôles prépondérants sur la température. En effet, la température est généralement plus élevée de 1 à 4°C que ce que la valeur du NDVI le prévoit en zone urbaine.

7.3 Potentiels de réversibilité et stratégies d'adaptation : des dispositifs multiples

Les trois secteurs identifiés comme étant sujets à l'effet d'ICU, traités sous l'angle de l'urbanisme végétal et du projet urbain, peuvent accueillir des formes végétales. Les éléments qui le prouvent sont, premièrement, le fait que les secteurs sont en partie dénués de formes végétales et ont la capacité « physique » d'en voir s'y implanter. Deuxièmement, deux des trois secteurs (la gare et la voie de chemin de fer) sont actuellement soumis à des projets d'envergure. La réhabilitation de la gare peut intégrer la question des ICU dans sa conception et la création de la voie verte d'agglomération ainsi que celle du saut-de-mouton peuvent assimiler diverses formes végétales le long de la voie ferrée au niveau du secteur de la déchèterie de Malley.

Le chapitre *6.3 Analyse et propositions de secteurs réversibles* permet en effet de mettre en évidence qu'il existe des potentiels de réversibilité pour les trois secteurs. Beaucoup de potentiels se trouvent sur domaine privé et il s'agit principalement de zones bâties. Les potentiels de végétalisation sont donc les façades, les balcons, et les toitures plates, ces dernières étant nombreuses sur les trois secteurs analysés. De manière générale, le fait que beaucoup de surfaces ayant un potentiel de réversibilité soient sur des parcelles privées fait écho au manque de mesures pour le domaine privé établi précédemment. Cet élément complète l'argumentaire prouvant le besoin de créer des objectifs en termes d'adaptation qui s'appliquent également aux parcelles privées et qui soient envisagés en tant que mesures contraignantes. Les implications communales montrent toutefois une volonté d'exploiter les potentiels de réversibilité. En effet, le système de subventions de toitures végétalisées pour les privés géré par le SPADOM prouve une réflexion pour le cas des toitures plates, spécialement touchées par l'effet d'ICU.

En ce qui concerne les espaces réversibles identifiés sur domanialité publique, il s'agit notamment d'espaces non-bâti mais ayant un revêtement minéral, d'abris des arrêts de bus, de places de stationnement, de trottoirs, de pieds d'arbre et d'éléments routiers (îlots routiers et ronds-points). Dans ces cas-là, et selon la présence d'infrastructures souterraines, il serait envisageable d'enlever une partie de surface de bitume pour créer des espaces de pleine terre pouvant accueillir des végétaux.

De manière générale, le besoin de végétation en milieu urbain est indispensable pour garantir nombre de services écosystémiques et, intrinsèquement, pour adapter le milieu urbain aux effets du changement climatique. Selon Fanny Falconnet, l'enjeu principal concernant l'adaptation au changement climatique à Lausanne est la plantation d'arbres :

« Et pour planter des arbres, il faut toujours imaginer qu'on a besoin de surface au sol et dans le sous-sol. A mon avis, l'enjeu il va être là : [...] la mutualisation des services du sous-sol, car il est beaucoup utilisé, il est beaucoup mis à contribution pour tout ce qui est énergie, eau, ... pour tous les services qu'il rend... Et souvent, la place pour les plantations d'arbres, pour les fosses, elle est très réduite et ça va être facteur limitant. C'est quelque chose qu'il va falloir réussir à bien coordonner. Il faut mutualiser les bienfaits des différents usages du sous-sol. » (Fanny Falconnet).

La « Stratégie municipale pour le patrimoine arboré et forestier lausannois » expose une vision ayant des « *valeurs environnementale, paysagère, patrimoniale et sociale des arbres* ». Les souhaits de la ville de Lausanne concernant son réseau vert sont bien exposés et le SPADOM est vivement engagé dans les divers enjeux qui en découlent. Les questionnements relatifs à la pleine terre y sont par exemple cités. Il existe en effet un conflit d'intérêt entre les diverses infrastructures souterraines et les arbres. La volonté de la ville d'établir un inventaire de la pleine terre, extrêmement utile pour l'accueil des grands végétaux, la biodiversité, l'infiltration et l'évapotranspiration, est prévu dans le but de mieux la préserver et d'assurer un système hydrologique permettant d'assurer des stocks d'eau pour le développement des végétaux. Ces actions présagent une augmentation de l'indice de canopée à Lausanne, actuellement évalué à environ 19% (Michaël Rosselet, entretien, 2020).

De plus, Musy (2012) explique qu'il est important d'effectuer un recensement des diverses formes végétales de la ville dans le but de « *comparer les performances des différents types de présence végétale* ». Il pourrait alors être utile, en plus des inventaires de pleine terre et des arbres de la ville, de dresser un état des lieux de toutes les formes végétales. Afin d'établir un tel recensement du végétal, un travail approfondi issu d'« *une collaboration avec les spécialistes de la végétation* » est nécessaire : d'une part pour faire état de son influence sur son impact climatique, et d'autre part pour orienter les stratégies de végétalisation futures (Musy, 2012). Le SPADOM s'inspire d'ailleurs d'autres villes en ce qui concerne les techniques et approches en termes de plantation, gestion des eaux et choix d'essences végétales adaptées au changement climatique. Le besoin de composition urbaine végétale est important afin de combiner les essences et diversifier les strates végétales pour un effet thermique maximal mais surtout pour un développement des végétaux qui soit optimal.

Si la végétalisation peut répondre à divers enjeux urbains et climatiques, elle pose toutefois des questions en termes d'entretien. Il existe certaines impossibilités techniques, difficultés d'entretiens ou formes végétales qui ne peuvent pas être réellement durables (Vigano, 2019).

Michaël Rosselet aborde l'exemple de sites ou de types de végétaux qui impliqueraient des défis d'arrosage. La complexité d'une telle situation devrait peut-être induire la recherche d'une alternative. Si le but désiré est d'avoir un impact sur l'effet d'ICU, le fait de changer les matériaux ou les couleurs des infrastructures pourrait être considéré. De plus, si la ville accueille davantage de végétation, la possibilité de réintroduction de certains aléas – tels que les allergies, insectes, etc. – est envisagée. La sensibilisation et la communication doivent accompagner cette réintroduction de nature en ville.

Mollie (2009) remet toutefois en cause la volonté de végétaliser à tout prix :

« Dans un contexte croissant d'inquiétude environnementale, planter la ville devient une obligation, voire une urgence. Les décisions sont prises dans la précipitation, trop souvent au détriment des règles de l'art, [...] au mépris des fondements biologiques des végétaux [...] pour répondre aux exigences environnementales des citoyens [...]. » (Mollie, 2009, p. 21).

Mollie (2009) questionne ainsi la façon d'arborer en milieu urbain alors que l'urbanisation ne présente pas les meilleures conditions pour le développement de la végétation, qu'il s'agisse de la quantité de terre, d'espace, d'eau ou de soleil qui leur est allouée. Michaël Rosselet a conscience de ces enjeux et ajoute que le but n'est pas de « remplir tous les vides » ; l'équilibre entre végétation dense et espaces vides est fondamental. C'est pourquoi le fait de végétaliser n'est pas une solution pour tous les secteurs sujets aux ICU. Comme cela a été abordé dans le chapitre 4 *Stratégies urbaines de mitigation des ICU*, d'autres pistes d'actions peuvent être suivies afin de palier à l'effet d'ICU. Des réflexions sur la morphologie urbaine (orientation du bâti, densité, rugosité, *sky view factor*), les matériaux (albédo, propriétés thermiques), l'occupation du sol (perméabilité) et les activités anthropiques sont bien entendu également nécessaires afin de lutter contre l'effet d'ICU de manière intégrale. Ces éléments ne peuvent pas tous être modifiés, c'est pourquoi il est important de tirer parti des nouveaux projets de développement urbain ainsi que des projets de requalification.

De plus, les solutions que peuvent apporter l'ingénierie écologique en termes de dispositifs utilisant l'eau sont à intégrer dans les projets urbains. Les bassins, les fontaines, les pavés spécialement conçus pour faire de la rétention d'eau, ou les systèmes d'aspersion intégrés à des trottoirs ou des infrastructures peuvent être des dispositifs intéressants pour diminuer l'effet d'ICU (Nuruzzaman, 2015 ; Yamamoto, 2006). L'implantation de noue – forme végétale urbaine de type « espace vert ouvert humide » – peut être un dispositif répondant à la fois à la problématique

thermique des ICU et à la gestion des pluies torrentielles qui vont se faire de plus en plus fréquentes.

Cependant, comme pour la végétation, ces autres pistes d'action doivent également être pensées en amont. En effet, la création de couloirs de ventilation est par exemple une bonne stratégie pour apporter des courants d'air frais en été, mais il se pourrait qu'ils apportent des polluants ou de l'air très froid en hiver. De même pour les dispositifs utilisant de l'eau qui posent la question de la disponibilité en eau.

Une approche transversale est donc essentielle afin de donner concilier tous les facteurs nécessaires pour établir des stratégies de végétalisation qui soient efficaces. L'implantation de formes végétales doit prendre en compte les usages du site en question, l'héritage végétal, les continuités, le choix des essences, les besoins des végétaux, ainsi que l'intégration de tous ces éléments dans les projets de développement territorial.

Enfin, le besoin d'intégrer ces dispositifs d'adaptation aux projets existants est indispensable. L'approche transversale permet une réflexion large qui doit prendre également en compte les flux, les programmations, l'utilisation du sous-sol, etc. dans les phases du projet urbain.

7.4 Limites méthodologiques

Tout d'abord, malgré la gratuité et l'accessibilité des données Landsat 8, le cycle de 16 jours du satellite est une limite à l'étude des ICU car cela ne génère pas beaucoup d'images exploitables sur une saison. Ce travail se base ainsi sur une moyenne calculée sur les données récoltées sur cinq journées entre juin 2019 et août 2019, car il n'y a pas d'autres images ayant une couverture nuageuse inférieure à 20% permettant une bonne analyse.

Une autre problématique induite par l'utilisation des données Landsat est qu'elles génèrent des TS plus basses que celles observées sur le terrain à 5 cm du sol. En effet, en comparant les TS calculées via les données Landsat et les températures mesurées depuis la station météorologique de Pully²⁷, on observe une différence de température (Tableau 11).

²⁷ Située à 456 m d'altitude à l'Est de Lausanne, la station de Pully est la station météorologique du réseau de mesures automatiques de MétéoSuisse la plus représentative du climat lausannois.

Tableau 11 : Comparaison des températures mesurées à la station de Pully les jours d'acquisition des images Landsat (Agroscope – Agrometeo)²⁸ et de la température de surface calculée par télédétection au niveau de la station de Pully

| Date | Heure | Température de l'air (°C) | Température à 5 cm du sol (°C) | Température calculée par télédétection |
|----------------|-------|---------------------------|--------------------------------|--|
| 13.06.2019 | 10:00 | 18,8 | 31,1 | |
| | 11:00 | 19,9 | 34,4 | |
| 29.06.2019 | 10:00 | 25,7 | 34,1 | |
| | 11:00 | 26,6 | 38,8 | |
| 24.07.2019 | 10:00 | 29,5 | 43,9 | |
| | 11:00 | 30,7 | 46,2 | |
| 09.08.2019 | 10:00 | 26,2 | 31,6 | |
| | 11:00 | 27,7 | 35,5 | |
| 25.08.2019 | 10:00 | 22 | 30,8 | |
| | 11:00 | 23,5 | 30,4 | |
| Moyenne | | 25,06 | 35,68 | 29,07 |

La température moyenne entre 10:00 et 11:00 pour les journées dont les données Landsat sont utilisées pour ce travail est de 25,06°C pour l'air et de 35,68°C à 5 cm du sol à Pully, et la TS calculée par télédétection au niveau de la station météorologique de Pully indique 29,07°C, soit entre la température de l'air et la température à 5 cm du sol effectivement mesurées, alors qu'elle aurait dû hypothétiquement être davantage similaire aux 35,68°C mesurés à 5 cm du sol.

Cet écart démontre un décalage entre les mesures *in situ* et les mesures par télédétection. Ceci est probablement dû à la résolution spatiale des images satellites. En effet, via son *Thermal InfraRed Sensor* (TIRS) (bandes 10 et 11), la mission Landsat 8 récolte des données thermiques ayant une résolution de 100 m qui sont ensuite traitées afin d'obtenir une température de luminosité orthorectifiée, puis rééchantillonnées à 30 m^{29,30}. Les données de températures issues de Landsat 8 sont donc relatives et non réelles comme celles obtenues auprès des stations météorologiques. Cependant, malgré ce décalage, cela ne remet pas en cause l'identification des effets d'ICU puisque les TS calculées par télédétection sur l'ensemble du territoire ont été établies de la même manière.

Ensuite, la question de la résolution spatiale peut être discutée également en termes d'approche micro-urbanistique. En ce qui concerne l'identification du réseau vert par télédétection, elle permet de rendre compte de l'état de la végétation au même moment que la récolte des données relatives à la température. Cette méthode a été choisie pour être la plus représentative possible

²⁸ Agroscope – Agrometeo : <http://www.agrometeo.ch/fr/meteorology/datas>

²⁹ USGS (<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>)

³⁰ Google Earth Engine Data Catalog (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C01_T1_SR)

pour identifier le lien entre la présence d'ICU et celle de végétation. Toutefois, la résolution de 30 m n'est pas optimale pour détecter l'activité chlorophyllienne de toutes les formes végétales urbaines, ces dernières occupant souvent des surfaces inférieures à 30x30m. De plus, cette méthode ne donne pas d'information en terme de systèmes de verdure verticaux, de strates, d'espèces, etc.

7.4.1 Recommandations et perspectives

Cette étude établit un premier diagnostic des ICU à l'échelle de Lausanne. Afin d'examiner ce phénomène de manière plus précise, quelques pistes peuvent être suivies.

Tout d'abord, la définition d'ICU explique bien qu'il s'agit de calculer la différence entre la température d'une zone urbaine et la température d'une zone rurale. Toutefois, les notions d'« urbain » et de « rural » ne sont pas évidentes (Stewart et Oke, 2012). En effet, ces termes ne peuvent pas différencier les nombreux types de sites qui peuvent être rencontrés sur un territoire. Plusieurs zones définies en tant qu'« urbaines » peuvent être significativement différentes les unes des autres en termes de structure du bâti ou d'activités ; chaque site dit « urbain » constitue ainsi une situation climatique singulière. C'est pourquoi, d'après Stewart et Oke (2012), il est important de décrire les caractéristiques des zones urbaines de manière à pouvoir les assigner à une sous-classe de l'« urbain ». Malgré le fait que plusieurs classifications de sites aient été proposées (Aguilar et al., 2003 ; Oke, 2004 ; Stewart et Oke, 2012), il n'existe pas de classification de zones qui soit unanime. Toutefois, Stewart et Oke (2012) ont établi une classification qui recense 17 « local climate zones » (LCZ) définissant des sites en fonction de la structure urbaine (dimension du bâti, espacement entre les bâtiments, largeur de la voirie) ; de la couverture urbaine qui renseigne sur la perméabilité (bâti, pavé, végétalisé, sol nu, eau) ; des matériaux ; et des activités humaines. Cette démarche cherche à aider à repérer les zones ayant un climat homogène. Etant donné les conditions climatiques et les structures uniques des villes, il n'existe pas de méthode simple et généralisée pour identifier et appréhender les ICU (Rizwan et al., 2008), et le système de classification des LCZ n'y déroge pas. C'est pourquoi il faut pouvoir travailler avec une certaine flexibilité afin d'obtenir des résultats qui soient représentatifs de la complexité du système urbain étudié (Oke, 1982 ; Oke, 2004).

Ensuite, afin de palier au décalage de températures observé entre les TS issues de Landsat 8 et les températures mesurées à Pully et d'obtenir les températures de surfaces réelles sur le territoire lausannois, des mesures issues de capteurs fixes ou mobiles seraient nécessaires. L'utilisation de

capteurs *in situ* permettraient également d'appréhender la problématique ICU dans son intégralité et à une meilleure résolution que celle du capteur TIRS. L'installation de plusieurs stations de mesure météorologiques dans la ville – tel un réseau climatique – est utile pour rendre compte de l'influence de tous les facteurs spatialement et temporellement (Deilami et al., 2018). C'est d'ailleurs un projet qui pourrait être réalisé à Lausanne, comme le soulève Claude Thomas. Ceci permettrait éventuellement d'effectuer des mesures des facteurs influençant la température localement tels que le rayonnement solaire, la durée d'ensoleillement, la direction et la vitesse des vents, la présence de turbulences, l'humidité relative, les précipitations, le ruissellement et la pollution de l'air. Une étude approfondie de la méso- et de la microtopographie pourrait être particulièrement instructive pour comprendre l'effet d'ICU dans la ville de Lausanne, établie sur les collines de la Cité, le Bourg et Saint-Laurent.

En outre, une analyse de la morphologie de la ville, l'orientation du bâti, la densité, les canyons, etc., pourrait permettre d'établir si une certaine typologie d'espace urbain est plus ou moins propice à l'effet d'ICU. Une étude plus fine du réseau vert serait également imaginable. Cependant, comme le relève Musy (2012), la végétation varie spatialement et temporellement, ce qui rend l'analyse entre formes végétales et ICU davantage délicate. Une approche en trois dimensions – prenant en compte non seulement les surfaces mais également les strates végétales et les hauteurs du bâti – pourrait être envisagée. Il serait alors nécessaire d'utiliser une autre méthode de collecte de données comme l'utilisation d'un Lidar. Les données concernant la pleine terre et la présence d'infrastructures souterraines seraient aussi pertinentes pour informer des capacités du sol à accueillir des arbres. Cette démarche est abordée par Michaël Rosselet, responsable du patrimoine arboré SPADOM, et fait l'objet de discussions à Lausanne. Les outils de modélisation permettraient de croiser plusieurs des indicateurs cités ci-dessus.

En plus d'étudier les ICU via toutes leurs composantes, il serait intéressant de les aborder selon leur temporalité variable, en fonction des saisons ou de l'heure de la journée. Cette recherche fait état des ICU à Lausanne uniquement sur la période estivale 2019 entre 10:00 et 11:00, or, la situation pourrait être différente à une heure, saison ou année différente. En connaissant la façon dont le phénomène varie dans le temps, il serait plus aisé de procurer des stratégies de mitigation appropriées. L'étude des îlots de fraîcheur à Lausanne-même pourrait être une recherche à entreprendre afin d'estimer quels sont les facteurs assurant de la fraîcheur afin de reproduire ces conditions aux endroits touchés par l'effet d'ICU.

Dans le but de compléter l'identification quantitative des ICU, une approche qualitative pourrait également apporter des éléments intéressants. Des entretiens ou questionnaires conduits auprès de la population pourraient rendre compte des ressentis des individus.

Conclusion

Dans ce contexte de changement climatique global, les systèmes urbains peuvent être notamment touchés par le phénomène d'îlots de chaleur urbains (ICU), questionnant ainsi les stratégies pour y faire face. Cette recherche permet de mettre en évidence les enjeux relatifs à cette « anomalie thermique » (Oke, 1982) à l'échelle de la ville de Lausanne. La méthode utilisée, mobilisant la télédétection, l'approche du projet urbain et l'analyse des politiques climatiques locales permet d'établir un premier diagnostic de l'effet d'ICU sur le territoire lausannois ainsi que des potentiels de réversibilité que ce dernier possède.

La démarche développée répond à l'affirmative à la première hypothèse de ce travail qui considère qu'il existe des secteurs sujets aux effets d'ICU à Lausanne. Durant l'été 2019, le territoire urbain lausannois a atteint des températures de surface moyennes jusqu'à 10°C plus élevées que dans la zone rurale alentour. Trois degrés d'ICU ont été établis : il existe trois secteurs sujets aux ICU de degré 3 (10°C de plus qu'en zone rurale) ; les ICU de degré 2 (8°C de plus qu'en zone rurale) sont peu fréquents et apparaissent au niveau de zones commerciales ou industrielles, généralement sur les toits plats de bâtiments et sur les parkings ; et les ICU de degrés 1 (6°C de plus qu'en zone rurale) sont passablement généralisés dans le centre-ville dense ainsi que le long de la voie de chemin de fer entre Lausanne et Bussigny. Des effets d'ICU sont également identifiés hors du tissu dense de la ville – mais toujours dans des zones où la végétation fait défaut – et un micro-effet d'ICU est observable systématiquement sur les terrains de sport synthétiques du territoire lausannois.

La deuxième hypothèse qui stipule que la distribution spatiale des ICU et celle de la végétation sont négativement corrélées a pu être confirmée. La tendance générale est que les endroits les plus chauds – identifiés par les différents degrés d'ICU – se situent là où il n'y a pas ou peu de végétation. Il existe en effet une corrélation de -0,81 entre la température de surface (TS) et le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, qui représente l'activité chlorophyllienne). Par conséquent, la végétation a un impact sur la présence d'ICU à Lausanne. Cependant, le calcul de la différence de température entre la TS mesurée par télédétection et la TS prévue par la valeur du NDVI permet d'observer que les qualités de climatiseur de la végétation sont passablement limitées en milieu urbain. Si la présence de végétation ne permet pas dans tous les cas d'avoir un effet climatiseur à la hauteur que pourrait le prédire son NDVI, elle est toutefois créatrice d'îlots de fraîcheur et de zones tampons. Inversement, les surfaces adjacentes à des points d'eau ainsi que les surfaces qui possèdent un albédo élevé et se situent à proximité immédiate d'une zone affichant une activité végétale sont plus fraîches que prévues. La présence d'eau, ainsi que la

présence de végétation couplée avec un albédo élevé sont les deux combinaisons les plus efficaces pour palier à des TS trop élevées en l'absence de végétation. Par conséquent, le phénomène d'ICU est complexe et ce dernier ne peut pas être réduit au seul facteur qu'est la végétation. Comme le montrent les cartographies réalisées, le centre-ville de Lausanne est touché par le phénomène d'ICU de degré 1 sur une grande surface. Même s'il est possible de déceler un réel manque d'activité chlorophyllienne aux endroits significativement plus chauds qu'en milieu rural, il est vraisemblable que la morphologie urbaine, les matériaux, l'albédo et les activités anthropiques jouent des rôles prépondérants sur la température. En effet, la température est généralement plus élevée de 1 à 4°C que ce que la valeur du NDVI le prévoit en zone urbaine. Afin de rendre compte de l'effet de tous les facteurs influençant la présence d'ICU et ce, à une meilleure résolution, une approche multidisciplinaire effectuant des mesures *in situ* régulières et localisées concernant des éléments climatiques, et étudiant les aspects topographiques, physiques et urbanistiques pourrait être mise en place. De plus et de manière à compléter l'identification quantitative des ICU, une démarche qualitative pourrait rendre compte des ressentis des individus.

La troisième hypothèse qui énonce qu'il existe des potentiels de réversibilité de l'effet d'ICU à la parcelle grâce à l'implantation de formes végétales peut aussi être confirmée. Les trois secteurs identifiés comme étant sujets à l'effet d'ICU, traités sous l'angle de l'urbanisme végétal et du projet urbain, recensent tous des surfaces et infrastructures urbaines pouvant accueillir des formes végétales. De plus, deux des trois secteurs analysés sont actuellement soumis à des projets d'envergure. Ces projets de développement et de réhabilitation permettent de penser à l'implantation de diverses formes végétales. Toutefois, l'exploitation des potentiels de réversibilité dépend des mesures d'adaptation conduites localement, elles-mêmes fortement liées aux implications politiques. Malgré le fait que les politiques climatiques suisses et lausannoises mettent majoritairement d'importance sur les stratégies d'atténuation, il s'avère l'intégration des stratégies d'adaptation est de plus en plus mentionnée. L'analyse documentaire et les entretiens menés permettent de saisir les implications des autorités communales en termes de politiques climatiques et démontrent une volonté d'agir face aux enjeux du changement climatique. La politique climatique lausannoise est transversale et témoigne du souhait d'exploiter les potentiels de réversibilité urbains, notamment grâce à l'importance donnée à la végétation dans les stratégies de la ville.

Globalement, le projet urbain – intrinsèquement lié à la notion de réversibilité – et l'urbanisme végétal apparaissent comme vecteurs d'implantation de formes végétales, elles-mêmes établies comme ayant des rôles indispensables à l'échelle de la ville et aux stratégies

d'adaptation aux effets d'ICU. Le besoin de politiques climatiques locales adaptées est toutefois nécessaire pour exploiter les potentiels de réversibilité des espaces urbains au mieux. De manière générale, il serait suggéré que les objectifs climatiques communaux intègrent davantage les stratégies d'adaptation aux politiques climatiques ; soient également appliqués aux parcelles privées et envisagés en tant que mesures contraignantes, notamment dans le PGA. En outre, il est nécessaire que les politiques climatiques lient la présence de formes végétales urbaines – et plus largement de formes environnementales – aux problématiques climatiques via des mesures contextualisées.

La ville de Lausanne est ainsi sujette au phénomène d'îlots de chaleur urbains et la végétation – au travers des multiples formes qu'elle peut prendre – offre des potentiels de réversibilité à l'espace urbain.

Pour conclure, et dans le but d'appréhender la problématique des ICU dans son intégralité, une approche multidisciplinaire est fondamentale afin de mettre en évidence la complexité du phénomène. Ce besoin de transversalité est en effet indispensable pour l'identification et la caractérisation des ICU, mais également pour l'élaboration de politiques d'adaptation au changement climatique ainsi que de stratégies de mitigation aux effets d'ICU permettant de tirer parti de l'existant, d'implanter de nouvelles formes végétales urbaines et d'exploiter au mieux les potentiels de réversibilité.

Bibliographie

- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T. C. et Wieringa, J. (2003). Guidance on metadata and homogenization. *WMO/TD, 1186*, 1-53.
- Allegrini, J. et Carmeliet, J. (2018). Simulations of local heat islands in Zürich with coupled CFD and building energy models. *Urban climate, 24*, 340-359.
- Anquetil, V., Adeline, K., Bensalma, A., Briottet, X., Gutleben, C., Launeau, P., Long, N., Musy, M, Oltra-Carrió, R. et Provendier, D. (2014). Présence végétale en ville : quelle connaissance ? Dans M. Musy (dir.), *Une ville verte : Les rôles du végétal en ville*. Paris : Editions Quae.
- Anquez, P. et Herlem, A. (2011). *Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions*. Chaire de responsabilité sociale et de développement durable, UQAM.
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society, 23*(1), 1-26.
- Arrif, T., Blanc, N. et Clergeau, P. (2011). Trame verte urbaine, un rapport Nature–Urbain entre géographie et écologie. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Aslan, N. et Koc-San, D. (2016). Analysis of relationship between urban heat island effect and land use/cover type using Landsat 7 ETM+ and Landsat 8 OLI images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 41*. DOI : 10.5194/isprsarchives-XLI-B8-821-2016
- Barles, S. (2002). Le métabolisme urbain et la question écologique. *Les Annales de la recherche urbaine, 92*(1), 143-150. <https://doi.org/10.3406/aru.2002.2469>
- Barles, S. (2010). Écologies urbaine, industrielle et territoriale. Dans O. Coutard et J.-P. Lévy (dir.), *Écologies Urbaines* (p. 61-83). Paris : Economica.
- Barrow, C. (2006). *Environmental management for sustainable development*. Routledge.
- Berdoulay, V. et Soubeyran, O. (2002). Un « vaste programme ». Dans V. Berdoulay et O. Soubeyran (dir.), *L'écologie urbaine et l'urbanisme* (p. 21-50). Paris : La Découverte.
- Bertrand, F. et Richard, E. (2015). La délicate existence locale de l'adaptation aux changements climatiques: avec, sans, ou à côté de l'atténuation. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie, 6*(3). <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.11048>
- Blanc, N. (2009). Vers un urbanisme écologique ?. *Urbanisme végétal et agriurbanisme, Urbia*(8), 39-59.

- Blanc, N. (2010). L'habitabilité urbaine. Dans O. Coutard et J.-P. Lévy (dir.), *Écologies Urbaines* (p. 169-183). Paris : Economica.
- Bougé, F. (2009). *Caractérisation des espaces verts publics en fonction de leur place dans le gradient urbain rural. Cas d'étude : la trame verte de l'Agglomération Tourangelle* [thèse de doctorat]. École polytechnique de l'université de Tours.
- Bouzou, N. et Marques, C. (2016). Les espaces verts urbains : Lieux de santé publique, vecteurs d'activité économique. Rapport ASTERES pour le compte de l'Union Nationale des Entreprises du Paysage.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R. et Stone, C. (1984). Classification and regression trees. *Wadsworth International*, 37(15), 237-251.
- Carson, R. (1962). *Silent spring*. Houghton Mifflin Harcourt.
- Champiat, C. (2009). Identifier les îlots de chaleur urbains pour réduire l'impact sanitaire des vagues de chaleur. *Environnement, Risques et Santé*, 8(5), 399-411.
- Chen, X. L., Zhao, H. M., Li, P. X. et Yin, Z. Y. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote sensing of environment*, 104(2), 133-146.
- Da Cunha, A. et Guinand, S. (2014). *Qualité urbaine, justice spatiale et projet : Ménager la ville*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Da Cunha, A. (2015). Nouvelle écologie urbaine et urbanisme durable. De l'impératif écologique à la qualité urbaine. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, (65), 5-25. <http://popups.ulg.ac.be/0770-7576/index.php?id=4116>
- Da Cunha, A. et Delabarre, M. (2018). Nouvelles écologies urbaines, formes environnementales et habitabilité : vers un urbanisme au contact du vivant. *Nouvelles écologies urbaines, Urbia*(21), 10-24.
- Dahech, S., Beltrando, G. et Bigot, S. (2005). Utilisation des données NOAA-AVHRR dans l'étude de la brise thermique et de l'îlot de chaleur. Exemple de Sfax (SE tunisien). *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Darwin, C. (1859). *On the origin of species*. John Murray.
- Deilami, K., Kamruzzaman, M. et Liu, Y. (2018). Urban heat island effect : A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 67, 30-42.
- Delabarre, M. (2013). *Natures plurielles : pour une contribution à l'habitabilité de l'espace public contemporain* [thèse de doctorat]. Université de Grenoble.

- Delabarre, M. (2017). Vers une techno-nature? L'ingénierie écologique comme déterminant dans les pratiques de projet urbain. Dans L. Bourdeau-Lepage (dir.), *Nature en ville : désirs & controverses* (p. 114-124). Bruguères : Editions La Librairie des territoires.
- Delabarre, M. et Dugua, B. (2017). *Faire la ville par le projet*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Desthieux, G. et Joerin, F. (2019, 22 novembre). *Projet Goclima.ch : « Gouvernance climatique des villes suisses : vers une amélioration des pratiques institutionnelles et organisationnelles » Panorama des expériences réalisées en Suisse à l'échelle communale (et infracommunale) et pistes d'actions* [communication orale]. Conférence centrale 2019 de la FSU. Lucerne.
- Dugua, B., Delabarre, M. et Novarina, G. (2017). Planification et adaptation aux changements climatiques en Europe. Dans I. Thomas et A. Da Cunha (dir.), *La ville résiliente : Comment la construire ?* (p. 267-289). Gatineau, Canada : Les Presses de l'Université de Montréal.
- Dureau, F. et Lévy, J.-P. (2010). Morphologie urbaine et consommations énergétiques : un éclairage à partir de la recherche française. Dans O. Coutard et J.-P. Lévy (dir.), *Écologies Urbaines* (p. 84-101). Paris : Economica.
- Duvigneaud, P. (1974). *La synthèse écologique. Populations, communautés, écosystèmes, biosphère, noosphère*. Doin.
- Emelianoff, C. (2000). L'écologie urbaine entre science et urbanisme. *Quaderni*, 43(1), 85-99. DOI : 10.3406/quad.2000.1474
- Emelianoff, C. (2007). La ville durable : l'hypothèse d'un tournant urbanistique en Europe. *L'Information géographique*, 71(3), 48-65. DOI : 10.3917/lig.713.0048.
- Erkman, S. (1997). Industrial ecology : an historical view. *Journal of cleaner production*, 5(1-2), 1-10.
- Erkman, S. (2004). *Vers une écologie industrielle* (2^e éd.). Charles Léopold Mayer.
- Fallot J.-M. et Rebetez, M. (2008). Villes et climat. *Vues sur la ville*, 21, 1-7.
- Feyisa, G. L., Dons, K. et Meilby, H. (2014). Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning*, 123, 87-95.
- Forman, R. T. (1995). Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape ecology*, 10(3), 133-142.
- Forman, R. T. (2014). *Urban ecology: science of cities*. Cambridge University Press.
- Gandy, M. (2015). From urban ecology to ecological urbanism : An ambiguous trajectory. *Area*, 47(2), 150-154.
- Garnier C. et Mirénowicz P. (1984). Manifeste pour l'écologie urbaine, *Métropolis*, 64-65, 9-19.

- Gaston, K. J., Davies, Z. G. et Edmondson, J. L. (2010). Urban environments and ecosystem functions. Dans K. J. Gaston (dir.), *Urban ecology* (p. 35-52). Cambridge : Cambridge University Press.
- Gehrig R., König N. et Scherrer S. (2018). Städtische Wärmeinseln in der Schweiz - Klimatologische Studie mit Messdaten in fünf Städten. *Fachbericht MeteoSchweiz*, 273.
- Georgescu-Roegen, N. (1979). *Demain la décroissance. Entropie, écologie, économie*. Lausanne : Favre.
- Gicquel, M. (2019, 22 novembre). *Des opportunités d'aménagement du territoire pour s'adapter au changement climatique* [communication orale]. Conférence centrale 2019 de la FSU. Lucerne.
- Guha, S., Govil, H., Dey, A. et Gill, N. (2018). Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 667-678.
- Gwiazdzinski, L. (2013). De l'hypothèse de réversibilité à la ville malléable et augmentée. Vers un néo-situationnisme. Dans F. Scherrer et M. Vanier (dir.), *Villes, territoires, réversibilités* (p. 205-219). Hermann.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 4(1), 1-23.
- Howard, L. (1833). *The climate of London : deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it*. Harvey and Darton.
- Hunt, A. et Watkiss, P. (2011). Climate change impacts and adaptation in cities : a review of the literature. *Climatic change*, 104(1), 13-49.
- Ingallina, P. (2001). *Le projet urbain*. Presses universitaires de France.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- IPCC. (2018). *Summary for Policymakers*. Dans Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf
- Koc, C. B., Osmond, P. et Peters, A. (2017). Towards a comprehensive green infrastructure typology: a systematic review of approaches, methods and typologies. *Urban ecosystems*, 20(1), 15-35.
- Lerner, J. (2014). *Urban acupuncture*. Island Press.

- Lévy, J.-P. (2010). Ville et environnement : pour un changement de paradigme. Dans O. Coutard et J.-P. Lévy (dir.), *Écologies Urbaines* (p. 3-14), Paris : Economica.
- Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y. et Laganier, R. (2010). Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 487-502.
- Lizarralde, G., Bornstein, L., Labbé, D., Thomas, I., Davidson, C., Gould, K. et Bryant, C. (2017). Une analyse critique des cadres théoriques. Dans I. Thomas et A. Da Cunha (dir.), *La ville résiliente : Comment la construire ?* (p. 53-67). Gatineau, Canada : Les Presses de l'Université de Montréal.
- Lo, C. P., Quattrochi, D. A. et Luvall, J. C. (1997). Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *International journal of Remote sensing*, 18(2), 287-304.
- Lydon, M. et Garcia, A. (2015). *Tactical Urbanism : short-term action for long-term change*. Island Press.
- Masson, V. (2010). Le climat urbain. Dans O. Coutard et J.-P. Lévy (dir.), *Écologies Urbaines* (p. 142-153). Paris : Economica.
- Matson, M., McClain, E. P., McGinnis Jr, D. F. et Pritchard, J. A. (1978). Satellite detection of urban heat islands. *Monthly Weather Review*, 106(12), 1725-1734.
- McPherson, E. G. (1994). Cooling urban heat islands with sustainable landscapes. Dans : R. H. Platt, R. A. Rowntree et P. C. Muick (dir.), *The ecological city : preserving and restoring urban biodiversity* (p. 151-171), Amherst, MA : University of Massachusetts Press.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. et Behrens, W. W. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books.
- MétéoSuisse. (2020). Bulletin climatologique année 2019. Genève. https://www.meteosuisse.admin.ch/content/dam/meteoswiss/fr/service-und-publikationen/publikationen/doc/2019_ANN_f.pdf
- Mirzaei, P. A. (2015). Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 19, 200-206.
- Mollie, C. (2009). *Des arbres dans la ville : l'urbanisme végétal*. Actes sud.
- Musy, M. (2012). L'étude des microclimats urbains: champ de recherche à l'interface entre climatologie, urbanisme et génie-civil. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Hors-série 12).
- Nations Unies. (1992). *Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques*. Repéré à <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf>

- National Centre for Climate Services (NCCS). (2018). *CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse*. Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse. https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/fr/dokumente/website/klima/CH2018_broschure.pdf.download.pdf/CH2018_broschure.pdf
- Neukom, M. (2019, 22 novembre). *L'aménagement du territoire dans les conditions du changement climatique – Exemple de Zurich* [communication orale]. Conférence centrale 2019 de la FSU. Lucerne.
- Nuruzzaman, M. (2015). Urban heat island: causes, effects and mitigation measures-a review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(2), 67-73.
- Odum, E. P. (1953). *Fundamentals of ecology*. Saunders Company.
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment (1967)*, 7(8), 769-779.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Oke, T. R. (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. IOM report N 81, WMO/TD N 1250. *World Meteorological Organization, Geneva*.
- Paquot, T. (2004). Ville et nature, un rendez-vous manqué ?. *Diogenes*, (3), 83-94.
- Parastatidis, D., Mitraka, Z., Chrysoulakis, N. et Abrams, M. (2017). Online global land surface temperature estimation from Landsat. *Remote sensing*, 9(12), 1208.
- Parriaux, A., Blunier, P., Maire, P., Dekkil, G. et Tacher, L. (2010). *Projet Deep City : ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains*. Rapport de recherche PNR 54. vdf Hochschulverlag AG. Lausanne. DOI : 10.3218/3332-8
- Pinson, G. (2005). Le projet urbain comme instrument d'action publique. Dans P. Lascoumes et al. (dir.), *Gouverner par les instruments* (p. 199 à 233). Paris : Presses de Sciences Po.
- Pommier, G., Provendier, D., Gutleben, C. et Musy, M. (2014). *Impacts du végétal en ville*. Projet VegDUD, Plante & Cité, Nantes.
- Pradel, B. (2013). Processus de réversibilité et rythmes des transformations urbaines : penser la ville à pile ou face ?. Dans F. Scherrer et M. Vanier (dir.), *Villes, territoires, réversibilités* (p. 237-247). Hermann.
- Quenault, B. (2013). Retour critique sur la mobilisation du concept de résilience en lien avec l'adaptation des systèmes urbains au changement climatique. *EchoGéo*, (24). DOI : 10.4000/echogeo.13403
- Ranagalage, M., Dissanayake, D. M. S. L. B., Murayama, Y., Zhang, X., Estoque, R. C., Perera, E. N. C. et Morimoto, T. (2018). Quantifying surface urban heat island formation in the world heritage tropical mountain city of Sri Lanka. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(9), 341. DOI : 10.3390/ijgi709034

- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. et Chunho, L. I. U. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120-128.
- Robert, P., Rey-Debove, J. et Rey, A. (2012). Résilience. *Le Petit Robert 2013 : Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française* (p. 2214). Paris : Dictionnaires Le Robert.
- Sadler, J., Bates, A., Hale, J. et James, P. (2010). Bringing cities alive: the importance of urban green spaces for people and biodiversity. Dans K. J. Gaston (dir.), *Urban ecology* (p. 230-260). Cambridge : Cambridge University Press.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C. et Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*, 90(4), 434-440. DOI : 10.1016/j.rse.2004.02.003
- Stefulesco, C. (1997). L'urbanisme végétal. Dans Institut National de la Recherche Agronomique, *La plante dans la ville, Les Colloques*, 84 (p. 101-106). Paris, INRA.
- Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31(2), 200-217.
- Stewart, I. D. et Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Terrin, J.-J. (2015). Penser la ville avec le climat. Dans J.-J. Terrin (dir.), *Villes et changement climatique, Cities & Climate Change* (p. 10-23). Éditions Parenthèses.
- Thomas, I. et Bleau, N. (2017). L'analyse de la vulnérabilité sociale et territoriale. Dans I. Thomas et A. Da Cunha (dir.), *La ville résiliente : Comment la construire ?* (p. 137-153). Gatineau, Canada : Les Presses de l'Université de Montréal.
- Thomas, I. et Da Cunha, A. (2017). *La ville résiliente : Comment la construire ?* Gatineau, Canada : Les Presses de l'Université de Montréal.
- Toubin, M., Lhomme, S., Diab, Y., Serre, D. et Laganier, R. (2012). La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ? *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, 3(1). DOI : 10.4000/developpementdurable.9208
- Vigano, P. (2019, 22 novembre). *Adaptation au changement climatique dans la Ville territoire* [communication orale]. Conférence centrale 2019 de la FSU. Lucerne.
- Ville de Lausanne. (2019, juin). *Portrait statistique 2019*. Direction de la sécurité et de l'économie. Service de l'économie. Office d'appui économique et statistique. Lausanne. <https://www.lausanne.ch/officiel/statistique/portrait-statistique/aperçu-statistique.html>
- Weng, Q., Lu, D. et Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote sensing of Environment*, 89(4), 467-483.

Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Scientific American*, 213(3), 178-193.

World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press

Wu, J. (2006). Landscape ecology, cross-disciplinarity, and sustainability science. *Landscape ecology*, 21(1), 1-4.

Wu, J. (2014). Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions. *Landscape and Urban Planning*, 125, 209-221.

Yamamoto, Y. (2006). *Measures to mitigate urban heat islands*. *Quarterly Review*, 18, 65-83.

Zhioua, I. Z. (2017). *Formes et structures de la ville contemporaine. La ville et le rôle du végétal : atténuation du changement climatique et qualité urbaine* [présentation PowerPoint]. Repéré dans l'environnement Moodle2 : <http://moodle.unil.ch/>

Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Froking, S., Yao, R., Qiao, Z. et Sobrino, J. (2019). Satellite remote sensing of surface urban heat islands: progress, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, 11(1), 48.

Table des illustrations

Tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1 : Trois types de formes environnementales urbaines (adapté à partir de Forman (1995 & 2014)) | 24 |
| Tableau 2 : Paramètres définissant les formes végétales urbaines (liste non-exhaustive d'après Koc et al., (2017) ; Pommier et al. (2014))..... | 26 |
| Tableau 3 : Formes et infrastructures végétales urbaines (d'après AIVF (Association des Ingénieurs des Villes de France), 1995, cité dans Bougé, 2009 ; Koc et al., 2017) | 28 |
| Tableau 4 : Altérations des paramètres physiques et climatiques en milieu urbain (d'après Fallot et Rebetez, 2008 ; Forman, 2014, p. 126 et p. 216 ; Musy, 2012)..... | 31 |
| Tableau 5 : Types de structures urbaines (bâties et naturelles) influençant le climat urbain (Erell et al., 2011 dans Forman, 2014) | 32 |
| Tableau 6 : Température de surface moyenne (°C) par type d'occupation du sol | 75 |
| Tableau 7 : Trois secteurs identifiés selon les formes environnementales urbaines (Forman, 1995) | 84 |
| Tableau 8 : Formes végétales potentielles sur le secteur de la gare | 90 |
| Tableau 9 : Formes végétales potentielles sur le secteur de la déchèterie de Malley | 96 |
| Tableau 10 : Formes végétales potentielles sur le secteur de la place Grand-Saint-Jean | 101 |
| Tableau 11 : Comparaison des températures mesurées à la station de Pully les jours d'acquisition des images Landsat (Agroscope – Agrometeo) et de la température de surface calculée par télédétection au niveau de la station de Pully | 110 |

Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Illustration des écarts de températures à la moyenne 1961-1990 en Suisse pour chaque année depuis 1864 (MétéoSuisse, 2020, meteosuisse.admin.ch)..... | 5 |
| Figure 2 : Modifications climatiques observées en Suisse (NCCS, 2018) | 6 |
| Figure 3 : Projet de Vincent Callebaut pour la densification des quartiers Praille-Vernets-Acacias à Genève (vincent.callebaut.org) | 29 |
| Figure 4 : « Vegetal City », dessin de Luc Schuiten (vegetalcity.net)..... | 29 |
| Figure 5 : Résumé des concepts mobilisés (Bovay, 2020) | 30 |
| Figure 6 : Différents types d'ICU (Bovay, 2020)..... | 33 |
| Figure 7 : Résumé des facteurs influençant les ICU (Bovay, 2020)..... | 37 |
| Figure 8 : Le quartier de Parc-Extension (en-haut) et la cité-jardin de Mont-Royal (en-bas), séparés par le boulevard de l'Acadie à Montréal (Terrin, 2015) | 39 |

| | |
|--|----|
| Figure 9 : Coulée verte René-Dumont, Paris (monparisjoli.com/2014/08/29/la-coulee-verte-une-promenade-bucolique-de-bastille-a-vincennes/)..... | 50 |
| Figure 10 : Forêt urbaine à Tokyo (lemonde.fr/economie/article/2019/07/25/les-forets-urbaines-font-sens-dans-les-villes-denses_5493101_3234.html) | 50 |
| Figure 11 : Plantation d'érables le long du cours Roger Bonvin, Sion (sion.ch/acclimatisation) | 51 |
| Figure 12 : Végétalisation de toiture à Lausanne (lausanne.ch)..... | 51 |
| Figure 13 : Végétalisation de toiture à Bâle (climate-adapt.eea.europa.eu) | 52 |
| Figure 14 : Mur végétalisé à Avignon (murvegetalpatrickblanc.com) | 52 |
| Figure 15 : Bâtiment des TL et de l'interface de transports publics à la Place de l'Europe à Lausanne (dra4.ch/dra2/projets/1152/interface-des-transport-publics-centre-clientele-tl_-transport-lausannois/) | 53 |
| Figure 16 : Immeuble résidentiel à Renens (dvhkarchitectes.ch/fr/realisations/les-fleurs-dehden) | 53 |
| Figure 17 : Création d'un jardin sur le toit d'une école primaire, Sion (sion.ch/acclimatisation) | 54 |
| Figure 18 : Végétalisation de places de parking (ecovegetal.com/realisations)..... | 54 |
| Figure 19 : Végétalisation des zones de rails de trams à Stuttgart (climate-adapt.eea.europa.eu)..... | 55 |
| Figure 20 : Bus avec toits végétalisés à Madrid (urbanews.fr) | 55 |
| Figure 21 : TS en fonction du NDVI | 64 |
| Figure 22 : TS en fonction du NDVI, avec une moyenne établie avec une fenêtre de 300x300m | 64 |
| Figure 23 : Localisation des points ayant un NDVI et une TS bas | 65 |
| Figure 24 : Températures de surfaces..... | 74 |
| Figure 25 : Localisation des différents degrés d'ICU (Fond de carte : www.geo.vd.ch)..... | 75 |
| Figure 26 : ICU de la place Grand-Saint-Jean | 77 |
| Figure 27 : ICU et NDVI | 78 |
| Figure 28 : ICU et végétation (selon NDVI) au centre-ville..... | 79 |
| Figure 29 : Différences de température entre les TS mesurées et les TS prévues selon le NDVI..... | 80 |
| Figure 30 : Différences de température entre les TS et les TS prévues et couvertures forestières | 82 |
| Figure 31 : ICU de la gare et îlot de fraîcheur du parc de Milan | 83 |
| Figure 32 : Situation des trois secteurs | 84 |
| Figure 33 : Secteur de la gare et périmètre d'intervention | 85 |
| Figure 34 : Situation d'ICU sur le secteur de la gare..... | 85 |
| Figure 35 : Flux principaux sur le secteur de la gare..... | 86 |
| Figure 36 : Végétation et domanialité sur le secteur de la gare..... | 86 |
| Figure 37 : Végétation, matériaux et ambiances du secteur de la gare (Photos : Bovay, 2020) | 87 |
| Figure 38 : Potentiels de végétalisation sur le secteur de la gare..... | 88 |
| Figure 39 : Programmes sur le secteur de la gare | 89 |
| Figure 40 : Implantation de formes végétales sur le secteur de la gare..... | 89 |
| Figure 41 : Secteur de la déchèterie de Malley et périmètre d'intervention | 92 |
| Figure 42 : Situation d'ICU sur le secteur de la déchèterie de Malley..... | 92 |
| Figure 43 : Situation actuelle sur le secteur de la déchèterie de Malley | 93 |

| | |
|--|-----|
| Figure 44 : Arborisation et domanialité sur le secteur de la déchèterie de Malley | 93 |
| Figure 45 : Flux principaux sur le secteur de la déchèterie de Malley | 94 |
| Figure 46 : Potentiels de végétalisation sur le secteur de la déchèterie de Malley | 95 |
| Figure 47 : Programmes sur le secteur de la déchèterie de Malley | 95 |
| Figure 48 : Implantation de formes végétales sur le secteur de la déchèterie de Malley | 96 |
| Figure 49 : Secteur de la place Grand-Saint-Jean et périmètre d'intervention | 97 |
| Figure 50 : Situation d'ICU sur le secteur de la place Grand-Saint-Jean | 97 |
| Figure 51 : Végétation et domanialité sur le secteur de la place Grand-Saint-Jean..... | 98 |
| Figure 52 : Végétation, matériaux et ambiances du secteur de la place Grand-Saint-Jean (Photos : Bovay, 2020)..... | 99 |
| Figure 53 : Potentiels de végétalisation sur le secteur de la place Grand-Saint-Jean..... | 100 |
| Figure 54 : Programmes sur le secteur de la place Grand-Saint-Jean | 100 |
| Figure 55 : Implantation de formes végétales sur le secteur de la place Grand-Saint-Jean..... | 100 |

Annexes

Analyse documentaire – Politiques climatiques suisses et lausannoises

ARE (Office fédéral du développement territorial). (2013, novembre). *Changement climatique et développement territorial. Un outil de travail pour aménagistes*.
<https://www.are.admin.ch/are/fr/home/media-et-publications/publications/espaces-ruraux-et-regions-de-montagne/klimawandel-und-raumentwicklung---eine-arbeitshilfe-fuer-planeri.html>

NCCS (National Centre for Climate Services). (2018, novembre). *CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse*. Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse.
https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/fr/dokumente/website/klima/CH2018_broschure.pdf.download.pdf/CH2018_broschure.pdf

OFEV (Office fédéral de l'environnement). (2012, mars). *Adaptation aux changements climatiques en Suisse. Objectifs, défis et champs d'action : Premier volet de la stratégie du Conseil fédéral du 2 mars 2012*.
www.bafu.admin.ch/ud-1055-f

OFEV (Office fédéral de l'environnement). (2014, avril). *Adaptation aux changements climatiques en Suisse. Plan d'action 2014-2019 : Deuxième volet de la stratégie du Conseil fédéral du 9 avril 2014*.
www.bafu.admin.ch/ud-1081-f

OFEV (Office fédéral de l'environnement). (2015). *Adaptation aux changements climatiques. Stratégie du Conseil fédéral : enjeux pour les cantons*. www.bafu.admin.ch/uw-1509-f

OFEV (Office fédéral de l'environnement). (2017, septembre). *Impulsions pour une adaptation de la Suisse aux changements climatiques. Conclusions de 31 projets pilotes sur l'adaptation aux changements climatiques*. www.bafu.admin.ch/ui-1703-f

OFEV (Office fédéral de l'environnement). (2018, novembre). *Quand la ville surchauffe. Bases pour un développement urbain adapté aux changements climatiques*. www.bafu.admin.ch/uw-1812-f

Ville de Lausanne. (1996, janvier). *Plan directeur communal*. Lausanne.

Ville de Lausanne. (2018, septembre). *Rapport-préavis N° 2018 / 42. Concept directeur « Nature en ville » de la Commune de Lausanne*. Direction du logement, de l'environnement et de l'architecture. Lausanne.

Ville de Lausanne. (2019, janvier). *Stratégie municipale pour le patrimoine arboré et forestier lausannois*. Lausanne.

Ville de Lausanne. (2019, février). *Plan directeur communal. Version pour consultation publique*. Lausanne.

Ville de Lausanne. (2019, août). *Rapport-préavis N° 2019 / 30. Stratégie municipale en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'adaptation aux changements climatiques*. Direction de la culture et du développement urbain. Lausanne.

Guide d'entretien

1. Présentation du contexte de ma recherche

2. Présentation de l'interlocuteur

- Pouvez-vous me décrire votre poste et votre rôle dans votre institution ?
- Quelles sont vos implications dans les politiques climatiques et les politiques de végétalisation de la ville ?
- Faites-vous partie du groupe de travail interservices d'accompagnement « Changements climatiques » ?
- Pouvez-vous me donner une définition de l'adaptation au changement climatique ?

3. Situation générale à Lausanne

- De manière générale à Lausanne, quels sont les enjeux que vous percevez en termes d'adaptation au changement climatique ?
- Qu'est-ce que vous préconisez face aux défis d'adaptation au changement climatique ?

4. ICU et outils

- Est-ce que des espaces ont déjà été identifiés comme étant problématiques en termes de chaleur ?
 - Si oui, lesquels et de quelle façon ? Est-ce que des mesures ont été mises en place localement ?
- Quel type d'instruments préconiseriez-vous pour l'adaptation au changement climatique et la réduction des effets d'ICU à l'échelle d'une ville comme Lausanne ?

5. Plan climat (2021)

- Selon vous, quelles sont les thématiques et leviers d'action prioritaires ?
- Que pensez-vous de l'élaboration d'un tel plan ?

6. Végétation et formes environnementales

- Selon vous, est-ce que la végétation est bien intégrée aux politiques et aux projets d'aménagement à Lausanne ?
 - Si oui, via quel d'instruments ?
 - Si non, pensez-vous qu'une base réglementaire serait nécessaire ?
- Est-ce qu'il existe des cartographies de la pleine terre et de la canopée ?
- Que pouvez-vous me dire à propos des subventions pour les toitures végétalisées ?

7. Perspectives

- Avez-vous quelque chose à ajouter ?

Code GEE

```
var collection = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR')
    .filterDate('2019-06-01', '2019-08-31')
    .filterBounds(geometry2)
    .filterMetadata('CLOUD_COVER','less_than',20);
print(collection, 'collection');
var image = collection.mean();
print('Image Mean=',image);

var SR = image.select('B1', 'B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B7')
    .multiply(0.0001);
Map.addLayer(SR);

// True colors
var visParams = {
  bands: ['B4', 'B3', 'B2'],
  min: 0,
  max: 3000,
  gamma: 1.4,
};
// False colors
var visParams2 = {
  bands: ['B5', 'B6', 'B4'],
  min: 0,
  max: 4000,
  gamma: [1, 0.9, 1.1]
};
Map.addLayer(image, visParams, 'True Colors');
Map.addLayer(image, visParams2, 'False Colors');

var bands = ['B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B7', 'B10', 'B11'];
image = image.select(bands);

// Feature collection pour chaque classe d'utilisation du sol
var featureCollection = ee.FeatureCollection([
  ee.Feature(forest, {name: 'forêt', class: 1}),
  ee.Feature(urban, {name: 'urbain', class: 2}),
  ee.Feature(rural, {name: 'rural', class: 3}),
  ee.Feature(water, {name: 'eau', class: 4})
])
.filterBounds(geometry2);
```

```

var training = image.select(bands).sampleRegions({
  collection: featureCollection,
  properties: ['class'],
  scale: 10,
});
print(training);

// Classification
var classifier = ee.Classifier.cart().train({
  features: training,
  classProperty: 'class',
  inputProperties: bands
});
var classified = image.select(bands).classify(classifier);
print('classified=',classified)

// forêt=1=green, urbain=2=red, rural=3=yellow, eau=4=blue
Map.addLayer(classified,
{min:1, max:4, palette:['green','red','yellow','blue']},
'classification');

// Brightness temperature (°Kelvin 0.1) to (°K) = BTK
var BTK = image.select("B10")
  .multiply(0.1);

// NDVI
var ndvi = image.normalizedDifference(['B5','B4']);
var ndviParams = {min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white', 'green']};
print('NDVI=',ndvi);
Map.addLayer(ndvi, ndviParams, 'NDVI');

// Proportion of vegetation (Pv)
// Pv = ((NDVI - NDVImin) / (NDVImax - NDVImin))^2
// Avec NDVImin=0,2 et NDVImax=0,5
var ndvimin = 0.2;
var ndvimax = 0.5;
var pv = [(ndvi.subtract(ndvimin)).divide(ndvimax-ndvimin)]^2;
print('pv= ',pv);

// Emissivity (E)
// E = 0.004 * Pv + 0.986
var E = pv*(0.004)+(0.986);
print('E=',E);

```

```

// LST = BTK / (1 + (λσBT / (hc)) ln(E))
// λ = a = longueur d'onde effective pour la bande 10 de Landsat 8 = 10.9 μm
// σ = b = Boltzmann constant = 1.38*10^-23 J/K
// h = Planck constant = 6.626*10^-34 Js
// c = velocity of light in a vacuum = 2.998*10^8 m/s
var a = 10.9e-6;
var b = 1.38e-23;
var h = 6.626e-34;
var c = 2.998e8;
var lnE = Math.log(E);
var coef1 = a * b;
var coef2 = h * c;
// Final LST & °C Conversion
var LST =
(BTK.divide(BTK.multiply(coef1).divide(coef2).multiply(lnE).add(1))).subtract(273.5);
print('LST=',LST);

var min = ee.Number(LST.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.min(),
  geometry: geometry2,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e9
}).values().get(0));
print('min LST=', min);
var max = ee.Number(LST.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.max(),
  geometry: geometry2,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e9
}).values().get(0));
print('max LST=', max)
Map.addLayer(LST,{palette:['blue','limegreen','yellow','darkorange','red'],min:19,max:37},
'LST');

// ICU en fonction de la moyenne de la classe « rural » = 26.71
var ICU1 = LST.gte(26.71+6);
var ICU11 = ICU1.updateMask(ICU1);
Map.addLayer(ICU11,{palette:'yellow'},'ICU degré 2',true);
var ICU2 = LST.gte(26.71+8);
var ICU22 = ICU2.updateMask(ICU2);
Map.addLayer(ICU22,{palette:'orange'},'ICU degré 2',true)
var ICU3 = LST.gte(26.71+10);
var ICU33 = ICU3.updateMask(ICU3);
Map.addLayer(ICU33,{palette:'red'},'ICU degré 3',true)

```