



**HAL**  
open science

# Comment le climat urbain peut-il être pris en compte dans les projets d'aménagement paysager et urbain sous la pression de la surchauffe urbaine ?

Coline Raute

## ► To cite this version:

Coline Raute. Comment le climat urbain peut-il être pris en compte dans les projets d'aménagement paysager et urbain sous la pression de la surchauffe urbaine?. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02374767

**HAL Id: dumas-02374767**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02374767>**

Submitted on 21 Nov 2019

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

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

Année universitaire : 2018-2019

Spécialité/Mention :

Paysage

Spécialisation/Parcours :

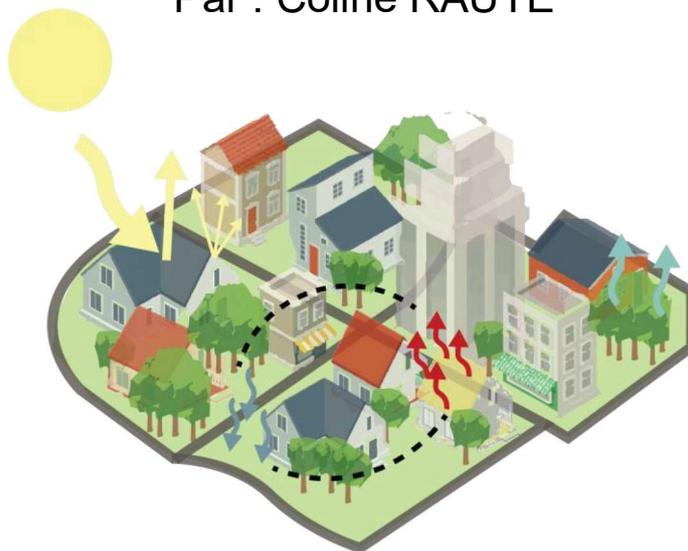
PPST

### Mémoire de fin d'études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

# Comment le climat urbain peut-il être pris en compte dans les projets d'aménagement paysagers et urbains sous la pression de la surchauffe urbaine ?

Par : Coline RAUTE



**Soutenu à AGROCAMPUS-OUEST Angers le 19/09/2019**

**Devant le jury composé de :**

Président : HERPIN Sophie

Maître de stage : DUBOURG Stéphane

Enseignant référent : GEISLER Elise

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

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



## REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le résultat de mon stage de fin d'étude réalisé aux ateliers UP+ de Montpellier mais surtout à l'aboutissement de mon cursus d'étude à Agrocampus-Ouest anciennement Institut National d'Horticulture et de Paysage (INHP).

Ce stage et ce mémoire n'auraient pas pu être possibles sans l'accompagnement de mon maître de stage et des ateliers UP+. En effet, ce stage s'est révélé très formateur et m'a permis d'acquérir des compétences à la fois sur le plan technique et entrepreneurial. Ayant un rôle d'assistante au chef de projet, j'ai pu mettre mes compétences à l'épreuve plus d'une fois. Je souhaitais donc remercier mon maître de stage Stéphane DUBOURG pour sa patience et sa capacité à supporter ma ponctualité parfois douteuse.

Au travers de ce dernier rapport marquant la fin de quelques années passées sur les bancs de l'école, j'ai souhaité lier deux thématiques qui me tiennent à cœur : le paysage et le changement climatique. En effet, cette école ne nous a pas seulement permis d'avoir une tête relativement bien faite, elle nous a également permis de développer et suivre nos passions. Je tenais d'ailleurs à remercier Marie-Claude ASSERAY qui fut quelque peu l'âme de l'école durant de nombreuses années.

Que ce soit grâce à l'ouverture à l'international, à la possibilité de « s'évader » pendant une année ou encore aux rencontres avec mes camarades de promotion, cette école m'aura enrichi tant sur le plan scolaire que sur le plan social et notamment en termes d'ouverture d'esprit. Merci également à Anaëlle HUET, Constance FRECHE, Claire BARADEZ qui furent mes camarades et colocataires durant cette dernière année et qui surent m'épauler.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION .....	1
PARTIE 1 : CLIMATOLOGIE URBAINE ET AMENAGEMENTS BIOCLIMATIQUES : REPENDRE AUX ENJEUX DES ILOTS DE CHALEUR EN VILLE .....	3
1.1 Le climat à l'origine des préoccupations de surchauffe urbaine.....	3
1.1.1 Prévisions du GIEC : une exposition croissante aux impacts du changement climatique .....	3
1.1.2 Nouvelles vagues de chaleur en ville : la vulnérabilité des sociétés mise en lumière .....	4
1.1.3 Histoire et développement des villes : l'affranchissement des conditions climatiques .....	5
1.2 Le phénomène d'îlot de chaleur et ses mécanismes .....	5
1.2.1 Les îlots de chaleur urbains : un microclimat intrinsèque à la ville .....	5
1.2.2 Notion de climatologie urbaine : des processus à l'origine des températures excessives ....	8
1.3 Les aménagements durables et le bioclimatisme au croisement des disciplines .....	12
1.3.1 Bioclimatisme et îlots de fraîcheur : la mise en place de stratégies d'adaptation .....	12
1.3.2 Stuttgart et Toulouse Montaudran Aerospace : des projets précurseurs en matière de climat urbain.....	13
PARTIE 2 : MORPHOLOGIE ET VENTILATION URBAINE, REGULATEURS DU CLIMAT URBAIN .....	17
2.1 L'agencement du tissu urbain à l'origine du phénomène d'ICU .....	17
2.1.1 Développement et requalification urbaine : des tentatives d'intégration du climat urbain aux projets d'aménagement .....	17
2.1.2 Organisation spatiale du quartier : la morphologie urbaine cause du climat .....	20
2.1.3 Le revêtement urbain : nouvelle source d'innovation technique .....	23
2.2 La circulation de l'air à la base d'un climat sain et frais .....	24
2.2.1 Planification et aménagement du territoire : gestion et utilisation du climat local .....	24
2.2.2 Agencement des éléments urbains à l'échelle du quartier : formation et conservation des courants d'air .....	26
PARTIE 3 : EAU ET VEGETAL, VERITABLES CLIMATISEURS URBAINS .....	29
3.1 Le végétal au cœur des stratégies de rafraîchissement .....	29
3.1.1 Mise en valeur du patrimoine végétal : le rôle thermorégulateur de la végétation.....	29
3.1.2 Agencement et choix du couvert végétal : la spécificité de l'environnement mis à l'honneur .....	30
3.2 Entre gestion intégrée et gestion innovante de la ressource en eau.....	33
3.2.1 Diversité des aménagements en eau : des potentiels de rafraîchissement variables .....	33
3.2.2 Innovations techniques et technologiques : une gestion de l'eau revisitée .....	33
1.3.2 Leviers d'action utilisables lors de la conception paysagère: la prise en compte de l'environnement immédiat.....	<b>Error! Marcador no definido.</b>
CONCLUSION .....	36
BIBLIOGRAPHIE.....	38

## LISTE DES SIGLES, ABREVIATIONS & GLOSSAIRE

### Glossaire

**Albédo** : Rapport entre la quantité de lumière que reçoit un corps et celle qu'il réfléchit ou diffuse. Ses valeurs vont de 0 à 1. 0 représente une surface qui n'émet aucune réflexion (un corps noir) à l'inverse, la valeur 1 correspond à une réflexion parfaite (semblable à un miroir).

**Corridor de ventilation**: Le corridor de ventilation correspond à la mise en place d'éléments structurels permettant l'écoulement de l'air de façon dirigée et favorisant son intensité.

**Couche de canopée urbaine** : couche d'air comprise entre le sol et la cime des arbres, ou des toitures des bâtiments, où l'essentiel de l'activité humaine se déroule.

**Evapotranspiration** : L'évapotranspiration est la somme de la transpiration du couvert végétal (à travers les stomates des plantes) et de l'évaporation des sols.

**Facteur vue du ciel** : Le facteur de vue du ciel correspond à la portion de ciel observable à partir de la surface. Ce facteur ne dépend ni de la latitude, ni de l'orientation, ni même du moment de l'année, mais seulement de la géométrie de l'espace. Ce facteur permet d'évaluer le niveau du confort visuel et d'éclairage naturel des espaces intérieurs et extérieures.

**Forme urbaine** : La forme urbaine (l'environnement bâti) est le produit de l'articulation des aménagements effectués à différentes échelles (agglomération, quartier, rue et bâtiment) en lien avec l'occupation humaine du territoire.

**Ilot de chaleur urbain** : Différence de température entre une zone urbaine et une zone rurale avec une température de l'air accrue en contexte urbain.

**Morphologie urbaine** : Etude de la forme et de la structure externe du bâti.

**Ratio H /L, Canyon urbain, prospect** : Le prospect dimensionne en premier lieu l'écart entre les bâtiments et les hauteurs de ceux-ci.

**Vagues de chaleur** : Phénomène météorologique de températures de l'air anormalement fortes, diurnes et nocturnes, se prolongeant de quelques jours à quelques semaines, dans une zone relativement étendue.

### Sigles

CLA : Couche Limite Atmosphérique

CLU : Couche limite urbaine

CLS : Couche Limite de Surface

CLU : Couche de canopée urbaine

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

ENAC : Ecole Nationale de l'Aviation Civile

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'Experts

Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

ICU : îlot de chaleur urbain

ISAE : Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace

PET : Potential Evapotranspiration

SVF : Sky View Factor

ZAC : Zone aménagement concertée

## LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Changement observé de la température mondiale et modélisation de son évolution .....	3
Figure 2: Ecart à la moyenne saisonnière de référence 1981-2010 de l'indicateur de température moyenne .....	4
Figure 3 : Caractérisation d'une vague de chaleur à partir de l'indicateur thermique .....	4
Figure 4 : Représentation de l'îlot de chaleur urbain .....	6
Figure 5 : Exemple de chaleur intra-urbaine dans l'arrondissement de St Laurent .....	6
Figure 6 : Répartition du gradient de températures en cercles concentriques formant le dôme de l'îlot de chaleur urbain.....	6
Figure 7 : Représentation schématique de la couche limite urbaine à méso-échelle (a), à l'échelle locale (b) et à micro-échelle .....	7
Figure 8 : Représentation schématique du phénomène de rayonnement en contexte urbain	8
Figure 9 : Représentation schématique du phénomène de conduction en contexte urbain....	8
Figure 10 : Représentation schématique du phénomène de convection en contexte urbain..	9
Figure 11 : Représentation schématique du phénomène de chaleur latente en contexte urbain .....	9
Figure 12 : Schéma récapitulatif des flux d'énergie intervenant dans le bilan radiatif en contexte urbain.....	10
Figure 13 : Schéma récapitulatif des processus à l'origine de l'îlot de chaleur urbain .....	11
Figure 14 : Facteurs naturels et humains contribuant à la formation d'ICU .....	11
Figure 15 : Représentation schématique du principe du bioclimatisme.....	12
Figure 16 : Cartographie des îlots de fraîcheur à Paris .....	13
Figure 17: Localisation de la région de Stuttgart.....	13
Figure 18 : Plan d'aménagement urbain avec les environnements proches de la ZAC de Montaudran .....	15
Figure 19 : Plan d'aménagement urbain avec usages et environnement proche de la ZAC de Montaudran .....	15
Figure 20 : Présentation des différentes couches et étapes aboutissant à la formation d'un UCMaP .....	18
Figure 21 : Situation générale de la région de Stuttgart.....	19
Figure 22 : Cartographie des recommandations en termes de planification pour la région de Stuttgart .....	19
Figure 23 : Plan de la variante "prospect" (gauche) et cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario "prospect" et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite).....	21
Figure 24 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario de base .....	21
Figure 25 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario « Prospect » .....	21
Figure 26 : Configuration urbaine de Santos, Brésil.....	22
Figure 27 : Configuration et modifications testées .....	22
Figure 28 : Plan de la variante "blanche" (gauche) et cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario "blanc" et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite) .....	23
Figure 29 ; Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario de base .....	23
Figure 30 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario « blanc » .....	23
Figure 31 : Evolution du gradient de l'écoulement d'air en fonction du type d'occupation du sol .....	24
Figure 32 : Création de courants d'air froid et écoulements .....	25
Figure 33 : Représentation schématique des écoulements d'air face à des obstacles .....	25
Figure 34 : Cartographie des écoulements d'air de la région de Stuttgart.....	25

Figure 35 : Représentations schématiques des écoulements d'air face à diverses contraintes urbaines .....	26
Figure 36 : Ecoulements autour d'un bâtiment.....	26
Figure 37 : Régimes d'écoulement aérauliques dans la rue.....	27
Figure 38 : Effets aérauliques en milieu urbain .....	27
Figure 39 : Ecart de vitesse de vent entre les quatre variantes et le projet initial en journée.	28
Figure 40 : Zones végétales isothermes à 27, 28, 29 °C .....	29
Figure 41 : Plan d'aménagement des espaces verts et spécification des essences.....	31
Figure 42 : Plan de la variante "verte" (gauche) et cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario "vert" et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite).....	31
Figure 43 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario de base .....	32
Figure 44 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario « Vert » .....	32
Figure 45 : Modélisation de différents scénarios d'agencement de couvert végétal du quartier de Portland en Oregon via le logiciel ENVI-met .....	32
Figure 46 : Plan de la variante "bleue" (gauche) et cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario "bleu" et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite).....	33
Figure 47 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario « Bleu ».....	34
Figure 48 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario de base .....	34
Figure 49 : Plan d'aménagement des espaces d'infiltration et récupération des eaux dans la ZAC.....	35
Figure 50 : Schématisation des pavés évaporatifs.....	35
Figure 51 : Récapitulatif des éléments jouant sur l'intensité des îlots de chaleur et pouvant être pris compte par les aménageurs .....	36

## AVANT- PROPOS

Ce mémoire a été réalisé durant mon stage de fin d'étude aux ateliers UP+ à Montpellier. Ayant un rôle d'assistante au chef de projet paysagiste, j'avais pour tâche de l'épauler sur des projets divers et variés. Travaillant sur des projets implantés dans le sud de la France, la problématique d'épisodes caniculaires et de confort de vie s'est naturellement imposée à moi.

Durant le mois de juillet 2019, j'ai d'ailleurs pu mesurer l'étendue des problèmes liés aux vagues de chaleur en ville et notamment durant la canicule à Montpellier. J'ai donc choisi d'effectuer mon mémoire de fin d'étude sur la thématique des îlots de chaleur urbains afin de comprendre leurs origines et pouvoir être à même de mettre en place des aménagements adaptés.

De façon globale, cette réflexion vise à comprendre les processus à l'origine de la formation des îlots de chaleur urbains afin d'être en mesure de mettre en place des stratégies d'adaptation ou d'atténuation face aux impacts du changement climatique.

En vous souhaitant une agréable lecture.

## INTRODUCTION

Vous êtes-vous déjà senti oppressé par la chaleur en ville quitte à raser les murs pour profiter d'un peu d'ombre ? Ou encore, avez-vous déjà préféré déjeuner sur la place de la fontaine (Tourtour) plutôt que sur le calvaire exposé plein sud et sans la moindre brise ? Nous l'avons tous fait en période de grosses chaleurs. Chacun élabore des stratégies, qui fonctionnent plus ou moins bien d'ailleurs, afin de rechercher un peu de fraîcheur et survivre à ces périodes de chaleur intenses. L'environnement urbain n'est cependant pas le meilleur endroit où il fait bon vivre durant ces périodes.

En effet, à l'ère des villes connectées et des smartcities, celles-ci drainent une population toujours plus importante. En l'espace d'un siècle, la population mondiale a augmenté de 1,75 milliards d'habitants en 1910 à plus de 7 milliards d'habitants en 2018 (Foissard, 2014). Au-delà d'une croissance à l'échelle planétaire, celle-ci se remarque principalement dans les villes. En effet, l'attraction qu'elles opèrent depuis le siècle dernier a provoqué un exode rural massif, multipliant la population citadine par deux en moins de soixante ans (*Ibid*).

Face à cette croissance démographique exponentielle, les villes se sont parfois développées de manière désordonnée afin de satisfaire les besoins en logements et en infrastructures [1]. Cela s'est traduit par la création de quartiers parfois en rupture totale avec l'environnement, mais aussi par l'élaboration de prouesses paysagères et architecturales se différenciant dans leurs morphologies en fonction de modes de pensée et époques de conception (Levy, 2005) tel que le quartier Antigone à Montpellier.

Ce développement irrégulier a cependant engendré des problématiques locales. En effet, l'étalement urbain a lentement provoqué le grignotage des terres agricoles accentuant entre autres le phénomène d'imperméabilisation des sols (Bédet, Le Bissonnais, Ruas, 2017) mais également une dépense énergétique plus importante (Liu et Sweeney, 2012) ou encore un besoin accentué en termes de transports.

Ces problématiques ont aujourd'hui un impact direct sur le confort et la qualité de vie des citadins en ville. En effet, dans un contexte de changement climatique, l'élévation des températures à l'échelle planétaire est largement amplifiée dans les endroits modifiés par l'homme (Foissard, 2014). Depuis quelques années, on assiste notamment à une recrudescence des vagues de chaleur en ville engendrant de l'inconfort pouvant provoquer une surmortalité chez les citadins [2].

Ce réchauffement urbain est aujourd'hui identifié à travers le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Au-delà du simple aspect d'augmentation des températures, les ICU correspondent à un type de microclimat plus ou moins défini que l'on retrouve uniquement en contexte urbain (Leconte, 2014).

Face à ce constat, une prise de conscience concernant l'intégration du climat urbain au cours du processus de conception émerge chez les aménageurs et les pouvoirs publics. En effet, le tissu urbain ayant un impact direct sur le climat, la seule prise en compte sectorielle du paysage, de l'urbanisme et de l'architecture n'est plus suffisante. Une approche transdisciplinaire devient alors nécessaire [3].

De nouveaux projets, et certains plus anciens mais novateurs comme le klimaatlas de Stuttgart, voient donc le jour. Jouant sur différents paramètres influençant l'intensité des îlots de chaleur, ces nouveaux aménagements sont les prémices d'une nouvelle manière de concevoir les villes (Bonhomme, 2015). Cependant, il existe toujours un fossé entre les sciences climatiques et l'aménagement. Bien que de nombreuses études aient été publiées concernant les îlots de chaleur par exemple, on retrouve peu d'applications concrètes en termes d'aménagement.

La compréhension du climat urbain apparaît alors nécessaire pour aménager ces projets et permettre aux citadins de vivre convenablement en période de grosse chaleur tout en préservant notre environnement. Une problématique se dessine alors :

## **De la théorie à la pratique : Comment le climat urbain est-il pris en compte dans les projets d'aménagement paysagers et urbains sous la pression de la surchauffe urbaine ?**

Quels sont les aspects les plus marqués du changement climatique en milieu urbain ? Comment caractériser et comprendre les mécanismes et impacts du phénomène d'îlots de chaleur ? Quelles sont les stratégies mises en place pour réguler la température des villes et assurer le confort de ses habitants ?

Afin de répondre à cette problématique, une étude bibliographique a été menée afin de comprendre le phénomène, mais également afin de pouvoir analyser des études et projets d'aménagements liés au bioclimatisme.

L'objectif est donc d'étudier à travers deux cas d'étude principaux la prise en compte des îlots de chaleur au sein des projets d'aménagement. La région de Stuttgart, ainsi que la ZAC Toulouse Montaudran Aerospace ont été choisies en raison de leur aspect précurseur mais également parce que ces projets ont bénéficié d'un diagnostic climatique sur lequel la conception pouvait s'appuyer. Pour la région de Stuttgart l'étude sera principalement focalisée sur une échelle marcoscopique (planification) alors que pour le cas de Toulouse, nous nous intéresserons à l'étude du quartier.

La première partie de ce mémoire aura pour objectif d'apporter des bases et notions de climatologie urbaine afin de comprendre les processus à l'origine de la formation des îlots de chaleur. Cela nous permettra par la suite d'analyser et d'étudier de façon critique les stratégies d'aménagement de certains projets jouant sur un ou plusieurs paramètres influençant les îlots de chaleur.

La deuxième partie sera plutôt consacrée à l'aspect urbanistique des projets et notamment au niveau de l'organisation du tissu urbain ayant une influence directe sur le phénomène. Cette approche pourrait paraître atypique pour un paysagiste, cependant, bien que celui-ci n'ait pas forcément vocation à agencer une ville, il est voué à travailler en collaboration avec des urbanistes et se doit de posséder des bases dans ce domaine.

La dernière partie quant à elle se focalisera sur les aspects paysagers de ces projets faisant référence dans le domaine de la prise en compte de la climatologie urbaine et notamment la végétalisation et la gestion de l'eau en ville.

# PARTIE 1 : CLIMATOLOGIE URBAINE ET AMENAGEMENTS

## BIOCLIMATIQUES : REpondre AUX ENJEUX DES ILOTS DE CHALEUR EN VILLE



Cette première partie est consacrée à la présentation des différents éléments permettant de définir et contextualiser la problématique. Dans un premier temps, les prévisions climatiques et ses conséquences à l'échelle urbaine seront exposées. Une définition globale du climat urbain ou ICU sera ensuite proposée, accompagnée d'une présentation non exhaustive des leviers d'action utilisables par le paysagiste permettant de pallier, ou tout du moins de réduire le phénomène.

### 1.1 Le climat à l'origine des préoccupations de surchauffe urbaine

#### 1.1.1 Prévisions du GIEC : une exposition croissante aux impacts du changement climatique

Le réchauffement climatique est désormais un fait avéré. Bien que ses répercussions ne soient pas dignes d'un scénario de l'apocalypse pour l'instant, de nombreuses études ont déjà été menées et prouvent l'augmentation tangible des températures liées aux activités humaines (Chavaillaz, 2016). En effet, les gaz à effet de serre (GES) ont tendance à laisser passer le rayonnement solaire mais piègent le rayonnement infra-rouge lointain émis par la terre. Une augmentation des GES, et notamment d'origine anthropique, entraîne un piégeage plus important et contribue au réchauffement climatique.

Réchauffement global par rapport à 1850-1900

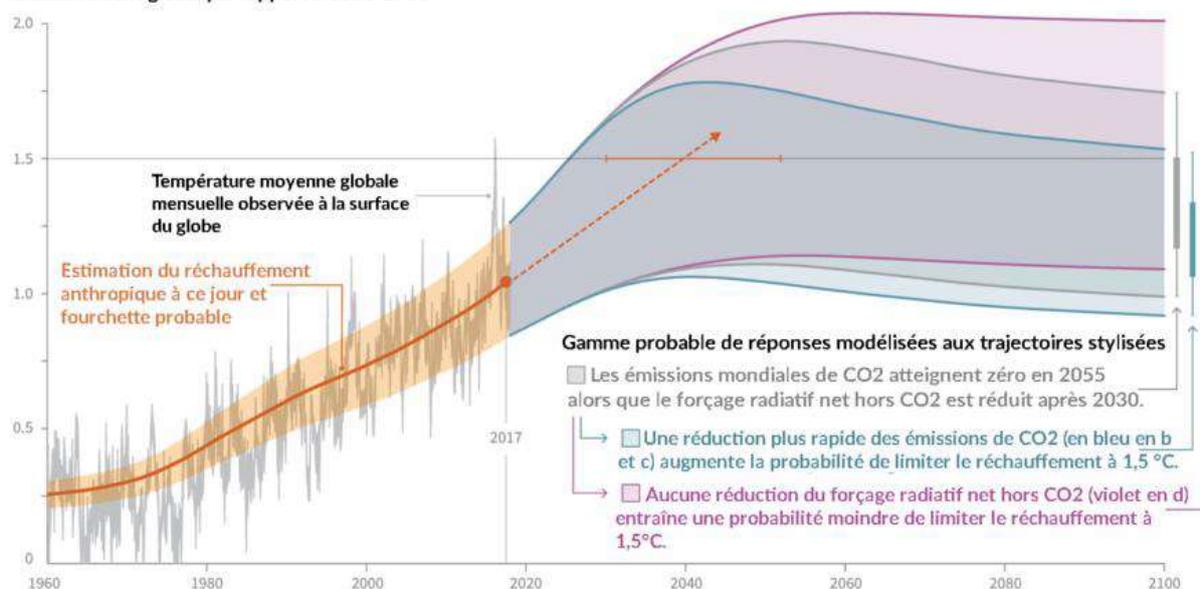


Figure 1: Changement observé de la température mondiale et modélisation de son évolution

Source : GIEC trad citoyenne 2019

Il y a quelques mois, le dernier rapport spécial du GIEC (Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) paraissait. Rapport prévisionnel des effets du changement climatique, celui-ci a pour vocation d'établir un diagnostic objectif de l'évolution du climat.

De manière plus concrète, ce dernier rapport spécial présente les effets d'un réchauffement de 1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels et des profils d'émission de gaz à effet de serre (GES) associés (Figure 1). Sachant que le réchauffement induit par les activités humaines a été estimé à 1°C en l'espace de 60 ans, une augmentation de 1,5°C en seulement 10 à 25 ans est préoccupante [4].

Conséquences directes de l'augmentation des températures, des phénomènes tels que la montée des eaux, l'accès à l'eau potable ou encore l'intensification de catastrophes naturelles sont à prévoir [2]. Parmi ces extrêmes climatiques relativement préoccupants, on retrouve les vagues de chaleur en ville. En effet, la majorité de la population vivant dans des centres urbains, l'inconfort provoqué a engendré une prise de conscience du phénomène (Besancenot, 2002).

### 1.1.2 Nouvelles vagues de chaleur en ville : la vulnérabilité des sociétés mise en lumière

Depuis quelques années, on remarque une recrudescence des épisodes de canicule en ville. Celles-ci se caractérisent par « un épisode de températures élevées, de jour comme de nuit, sur une période prolongée » [6].

Comme on peut le voir sur la figure 2, les vagues de chaleur sont déterminées par le dépassement d'une température moyenne très élevée en France dont la durée est ensuite calculée selon une valeur seuil.

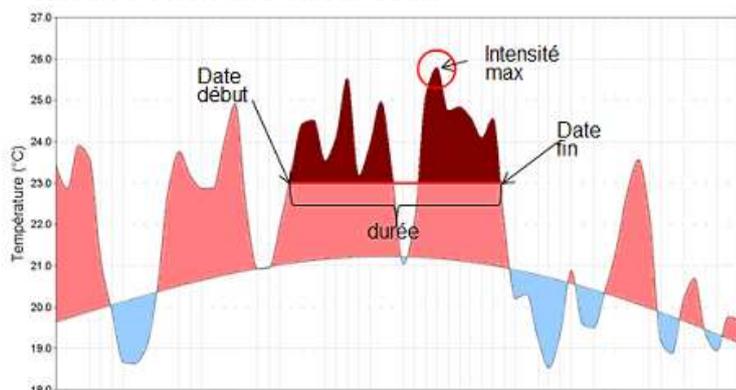


Figure 2: Ecart à la moyenne saisonnière de référence 1981-2010 de l'indicateur de température moyenne  
Source : Météo France

Les mesures enregistrées par Météo France nous indiquent d'ailleurs une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur en l'espace de trente ans (Figure 3). Probablement liée au réchauffement climatique, cela n'a cependant pu être clairement démontré.

Les conséquences de ces épisodes caniculaires peuvent être plus ou moins importantes et touchent notamment à la santé humaine. Déshydratation, coups de chaleur, amplification des maladies chroniques, tous ces maux font partie prenante du problème et ont engendré une prise de conscience par les sociétés (Besancenot, 2002). Au-delà de l'impact direct sur la santé humaine, ces épisodes engendrent également d'autres problématiques tel que la diminution de la ressource en eau, une surconsommation énergétique pouvant engendrer des pics de pollution, une détérioration des infrastructures ou encore une fragilisation de la biodiversité (Tsoka, 2011).

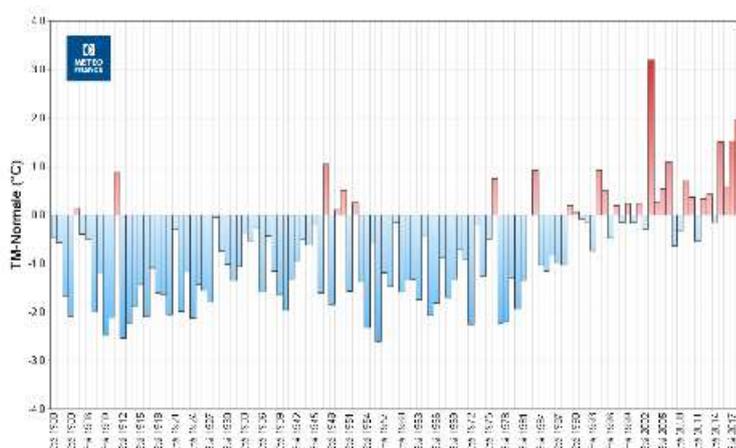


Figure 3 : Caractérisation d'une vague de chaleur à partir de l'indicateur thermique  
Source : Météo France

A l'échelle des villes, cela se traduit par une élévation considérable de la température par rapport aux campagnes environnantes (Le Bras, 2015). Les effets sont principalement ressentis la nuit lorsque le corps humain peine à récupérer et la ville à se refroidir. Ces effets

sont cependant variables au sein de la ville même. On remarque notamment que les anciens quartiers sont plus frais que ses alentours [3].

### 1.1.3 Histoire et développement des villes : l'affranchissement des conditions climatiques

Depuis toujours, les villes se sont implantées sur des endroits propices à leur développement et à la survie de la population. A proximité de points d'eau ou à l'abri sur un piton rocheux, ces zones anthropisées ont su profiter de l'environnement qui les entourait. En plus d'une implantation stratégique, l'organisation spatiale de la ville ainsi que les morphologies traditionnelles du bâti tenaient compte des conditions extérieures [3]. Concrètement, cela se traduit par la création de quartiers historiques en adéquation avec les contraintes climatiques. A titre d'exemple, on retrouve dans le sud de la France des habitats adaptés au climat méditerranéen. Les revêtements ayant des teintes claires sont privilégiés ainsi que des murs épais afin de limiter la pénétration de la chaleur et garder la fraîcheur. Dans les climats plus froids, des sas pour entrer sont parfois mis en place ainsi qu'une isolation thermique importante [3].

Cependant, avec l'évolution des technologies et des connaissances, le savoir-faire traditionnel élaboré dans un but particulier a été mis de côté. Il a laissé place à des aménagements plus confortables mais nécessitant une dépense énergétique plus importante tels que le chauffage ou la climatisation (Prévost et al, 2012). Un des exemples marquants concerne la construction de gratte-ciels ultra climatisés à Dubaï en totale opposition avec le climat chaud et désertique local. Cette évolution dans l'aménagement mène alors à une uniformisation du cadre bâti et un oubli de la prise en compte du climat dans les projets d'aménagement [3].

Les villes sont donc aujourd'hui un patchwork de quartiers plus ou moins adaptés à leur environnement qui, avec les effets du changement climatique, deviennent vulnérables lors de certains épisodes climatiques. Bien qu'étudiée depuis des siècles comme a pu le démontrer Yoshino (1990/91), la climatologie urbaine connaît un essor avec l'évolution des outils et des moyens, mais également en raison des enjeux liés à la vulnérabilité des centres urbains. En effet, les modifications climatiques ont provoqué un engouement de la discipline afin de pouvoir prévenir les impacts négatifs du climat.

## 1.2 Le phénomène d'îlot de chaleur et ses mécanismes

### 1.2.1 Les îlots de chaleur urbains : un microclimat intrinsèque à la ville

D'un point de vue global, le climat est créé par les transferts d'énergie entre les basses couches de l'atmosphère et la surface terrestre. Cette énergie peut se retrouver sous forme radiative, thermique, hydrique ou aérodynamique et varie en fonction de l'environnement (Oke, 1987). Le type d'environnement est donc déterminant. En effet, selon ses caractéristiques physiques et morphologiques, l'énergie sera répartie de façon distincte et modifiera les variables climatiques telles que la température de l'air, l'humidité ou le vent.

Si l'on s'intéresse à une échelle plus réduite, ces variations énergétiques peuvent générer un climat local particulier ou microclimat pouvant s'appliquer aux tissus urbains (Erell et al, 2011). En effet, la variation des morphologies urbaines, l'imperméabilisation des sols ou encore la répartition des espaces verts influent de façon significative sur le climat en ville et en périphérie (Leconte, 2014).

Ce phénomène local est plus connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain (Figure 4). Celui-ci correspond à un type de microclimat intrinsèque à la ville et se caractérise par des écarts de température de l'air significatif entre les villes et les campagnes.

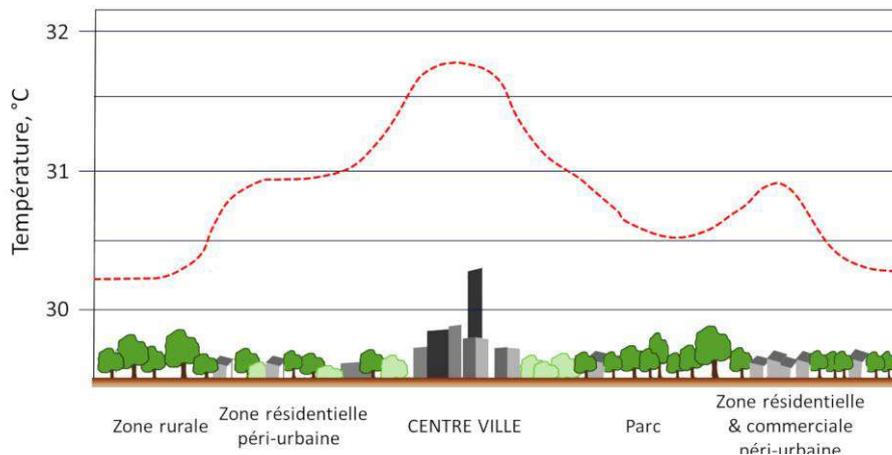


Figure 4 : Représentation de l'îlot de chaleur urbain  
Source : APUR, 2018

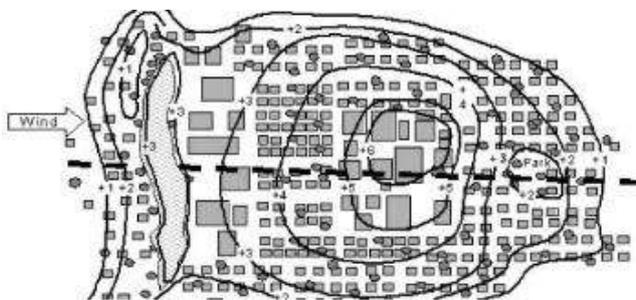


Figure 6 : Répartition du gradient de températures en cercles concentriques formant le dôme de l'îlot de chaleur urbain  
Source : Achour-Bouakkaz, 2006

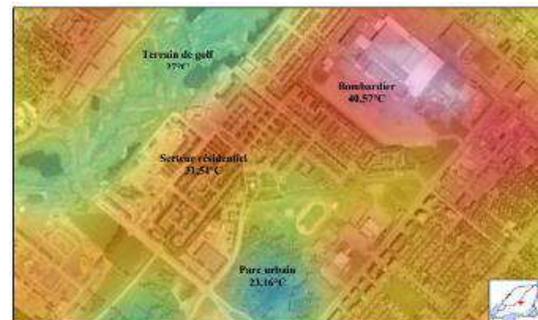


Figure 5 : Exemple de chaleur intra-urbaine dans l'arrondissement de St Laurent  
Source : Cavayas et Baudouin, 2008

Plus précisément, le nom d'îlot de chaleur lui a été attribué en raison de la forme concentrique que prennent les lignes de température autour de la ville comme on peut le voir sur la figure 5 (Tsoka, 2011).

Un exemple frappant correspond au cas du quartier de St-Laurent à Montréal en Juin 2005 que l'on peut observer sur la figure 6. Un écart de température de 17°C fut enregistré entre le quartier industriel (40,6°C) et un parc urbain (23,2°C) (Cavayas et Baudouin, 2008).

Au-delà de l'aspect spatial (ville/ campagne), le phénomène d'ICU se caractérise également par sa variabilité temporelle. Les surfaces imperméables ayant tendance à stocker la chaleur durant la journée, celle-ci est relâchée en période nocturne et amplifie le phénomène. L'intensité maximum est notamment observable peu après le coucher de soleil (Tsoka, 2011).

A l'échelle saisonnière, l'îlot de chaleur peut avoir un effet bénéfique en hiver grâce à la réduction de l'utilisation du chauffage. A l'inverse, en été, l'utilisation de la climatisation devient exponentielle et bien que ce processus permette le refroidissement interne, il engendre le réchauffement de l'espace extérieur (Ibid).

La formation des îlots de chaleur entraîne donc une modification du climat local mais cela peut également avoir un impact sur les conditions météorologiques en elles-mêmes. En effet, l'hétérogénéité générée au sein des différentes couches atmosphériques peut provoquer des brises thermiques particulières ou encore favoriser la nébulosité. Soumis aux conditions météorologiques, l'ICU peut également être à l'origine de celles-ci (Cantat, 2004).

Comme on a pu le voir précédemment, l'ICU est généré par les interactions entre les basses couches de l'atmosphère et les zones urbaines (figure 7). Afin de définir et caractériser précisément ce phénomène, différentes échelles seront présentées et une en particulier utilisée.

L'ICU est principalement observable dans la couche basse de l'atmosphère, à savoir la couche limite atmosphérique (CLA). Celle-ci est elle-même décomposée en différentes couches dont la couche limite de surface (CLS) qui nous intéresse particulièrement.

Cette couche est divisée en trois sous-couches :

- ◇ La sous-couche inertielle dont les échanges énergétiques verticaux sont relativement homogènes, mais peuvent-être modifiés par la nature de la zone inférieure.
- ◇ La sous-couche de rugosité localisée au niveau de la partie supérieure des éléments de rugosité (bâti, végétation...) pouvant engendrer une certaine turbulence.
- ◇ La couche limite de canopée urbaine située entre les éléments de rugosité. En raison des caractéristiques physiques relativement variées du milieu, cette couche est plutôt hétérogène et turbulente (Leconte, 2014) ; (Daniel, 2017).

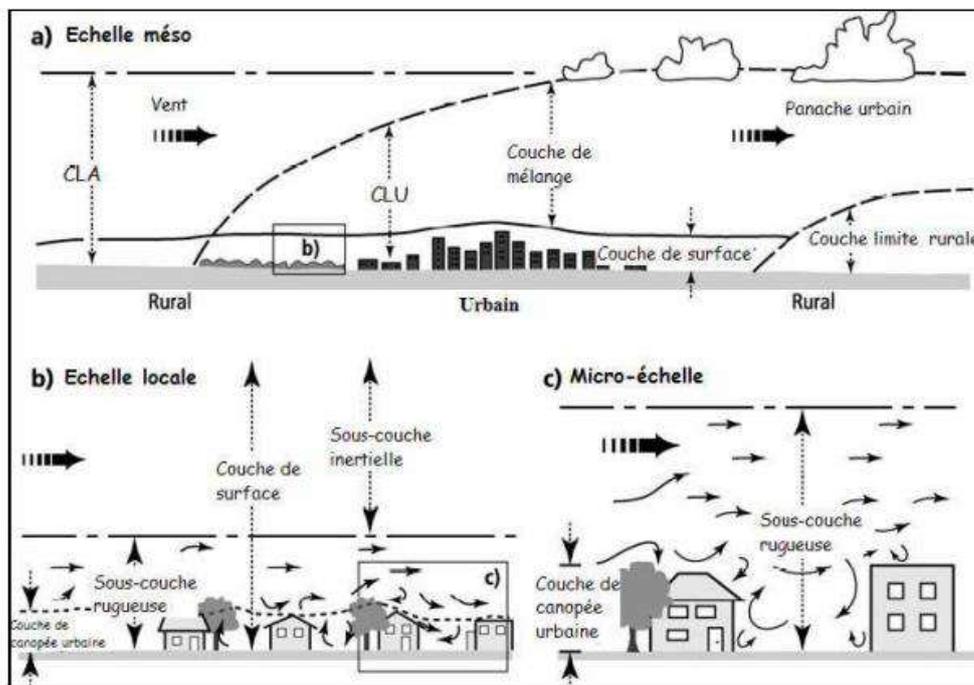


Figure 7 : Représentation schématique de la couche limite urbaine à méso-échelle (a), à l'échelle locale (b) et à micro-échelle  
Source : Leroyer, 2006

En plus de ce zonage vertical, les îlots de chaleur sont également analysés sur une échelle horizontale intervenant dans la couche limite atmosphérique (CLA), (Oke, 1988) :

- ◇ La méso-échelle faisant référence à des phénomènes climatiques à l'échelle de l'agglomération.
- ◇ L'échelle locale concernant principalement les quartiers, zones industrielles ou parcs urbains.
- ◇ La micro-échelle quant à elle englobant des portions de l'environnement urbain tel que la rue, le bâtiment ou le jardin (Colombert, 2008) ; (Daniel, 2017).

Enfin, l'îlot de chaleur urbain peut également se diviser en plusieurs types. L'îlot de chaleur souterrain, surfacique et atmosphérique (Daniel, 2017).

Par convention, nous nous intéresserons uniquement à l'îlot de chaleur atmosphérique et notamment celui localisé au niveau de la canopée urbaine. En effet, celui-ci concerne la température de l'air dans la zone où ont lieu les principales activités urbaines, thématique qui sera abordée tout au long de ce mémoire.

### 1.2.2 Notion de climatologie urbaine : des processus à l'origine des températures excessives

Afin de comprendre au mieux les processus à l'origine de la formation des îlots de chaleur, un rappel des mécanismes physiques et notamment des échanges énergétiques s'avère nécessaire.

Principale source d'énergie, le soleil interagit avec la terre sous forme de rayonnements qui sont soit réfléchis, soit absorbés ou diffusés lors de leur rencontre avec l'atmosphère. Ces rayonnements sont soumis à des mécanismes à l'origine des différents phénomènes climatiques qui assurent le maintien d'un équilibre au sein de l'atmosphère.

Ces mécanismes peuvent être décomposés en quatre types (Tsoka 2011) ; (Roussel 2016) :

#### Mécanismes de transfert

◇ Les rayonnements engendrent un transfert d'énergie d'un corps éloigné d'un autre par ondes électromagnétiques (rayonnements). Cela se traduit par l'existence d'un bilan radiatif défini par la quantité de rayonnement absorbé par une surface et la quantité émise vers l'atmosphère (Figure 8).

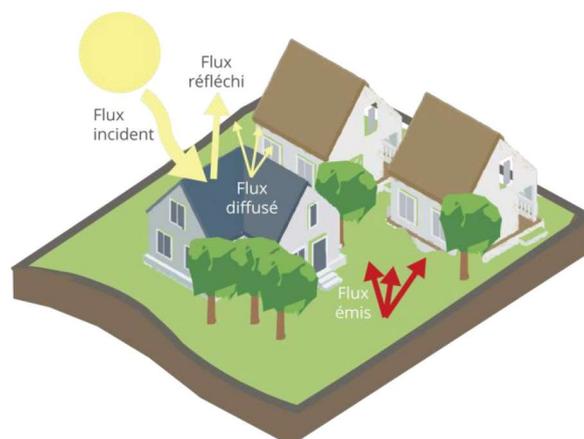


Figure 8 : Représentation schématique du phénomène de rayonnement en contexte urbain  
Source : Raute, 2019

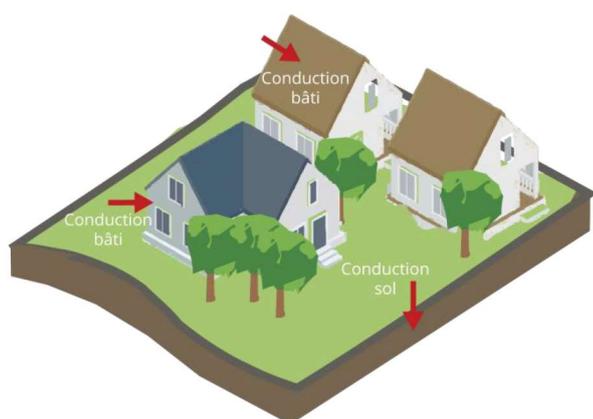


Figure 9 : Représentation schématique du phénomène de conduction en contexte urbain  
Source : Raute, 2019

◇ La conduction correspond à un transfert de chaleur générée par une différence de température entre deux régions d'une même matière ou entre deux matières en contact. La chaleur s'écoule alors de la zone la plus chaude vers la zone la plus froide (Figure 9). En ville, cela se modélise par un échange de chaleur entre le sol, qui, selon son degré d'imperméabilisation, peut être plus ou moins chaud, et l'atmosphère. Mais également par des transferts entre les différentes surfaces urbaines.

◇ La convection est un transfert d'énergie sous forme de chaleur qui s'effectue entre deux corps, généralement des fluides, possédant une densité ou température différente (Figure 10). La circulation de la chaleur permet d'équilibrer les zones de pressions différentes et provoque ainsi des déplacements d'air dans le milieu. Adapté aux environnements urbains, ce phénomène se retrouve sous la forme du vent agissant notamment sur la distribution de la chaleur, l'humidité et les polluants. Dans un cas d'ICU, la circulation du vent est fortement modifiée par le bâti et sa vitesse a tendance à diminuer mais forme des écoulements plus turbulents.

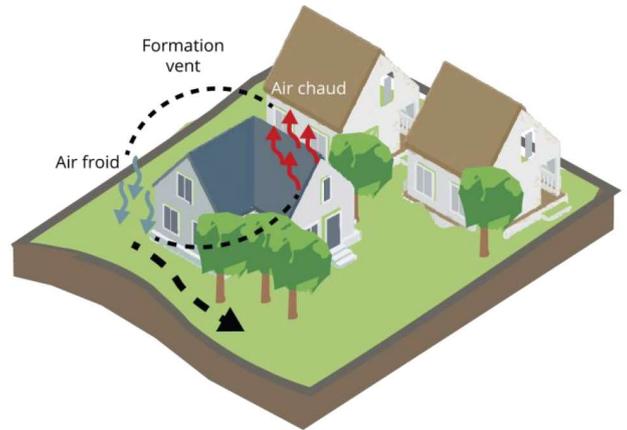


Figure 10 : Représentation schématique du phénomène de convection en contexte urbain  
Source : Raute, 2019

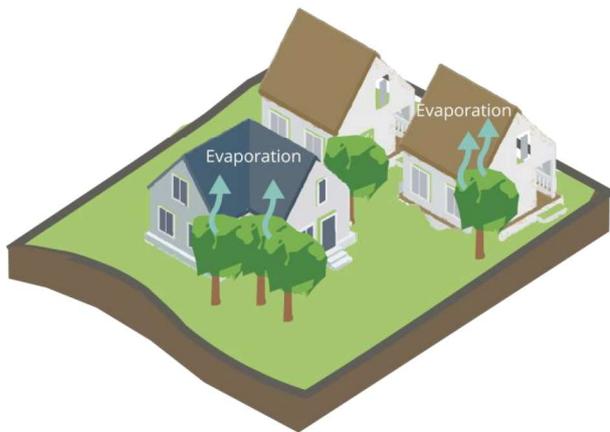


Figure 11 : Représentation schématique du phénomène de chaleur latente en contexte urbain  
Source : Raute, 2019

◇ La chaleur latente correspond à un transfert d'énergie lors du changement de phase d'un corps tel que le passage de l'eau à l'état de vapeur (Figure 11). A l'échelle urbaine, cela se retrouve lors du phénomène d'évapotranspiration.

◇ L'albédo n'est certes pas un processus permettant le transfert d'énergie mais est une mesure qui définit le rapport entre la quantité d'énergie qu'un objet reçoit et celle qu'il réfléchit. Cette mesure intimement liée au rayonnement est un indicateur majeur concernant les îlots de chaleur. Ses valeurs vont de 0 à 1. La valeur 0 représente une surface qui n'émet aucune réflexion (un corps noir). A l'inverse, la valeur 1 correspond à une réflexion parfaite (semblable à un miroir). Ces valeurs dépendent des caractéristiques du matériau et notamment de sa composition, rugosité et teneur en humidité. A l'échelle de la ville, cela peut avoir une influence importante au niveau du stockage de chaleur. En effet, un béton enrobé noir stockera beaucoup plus de chaleur qu'un sentier piétonnier en sable.

◇ Les rayonnements infrarouges sont également à prendre en compte. On distingue deux types de flux, le flux infrarouge atmosphérique et le flux infrarouge émis. Le premier est produit par le rayonnement des particules atmosphériques et notamment les aérosols et la vapeur d'eau de l'atmosphère. Le second est émis par la surface terrestre suite à l'absorption de l'énergie solaire et infrarouge atmosphérique. A l'échelle urbaine, cela se traduit par un stockage de l'énergie par les différents matériaux urbains puis une restitution sous forme de rayonnement infrarouge de nuit (Athamena, 2012).

### Modification du bilan énergétique

La température d'un milieu dépend donc de ces mécanismes mais également des apports et pertes en énergie. Comme on peut le voir sur la figure 12, cela se traduit par la formation d'un bilan énergétique propre à un environnement donné. A l'échelle de la ville, ce bilan se

trouve donc modifié en raison des caractéristiques inhérentes à cet environnement. Celui-ci peut s'écrire de la façon suivante :

$$Q^* + Q_f = Q_h + Q_e + \Delta Q_s$$

$Q^*$  : Flux de rayonnement net total

$Q_f$  : Flux de chaleur anthropique

$Q_h$  : Flux de chaleur sensible, correspond au transfert entre le sol et l'atmosphère

$Q_e$  : Flux de chaleur latent, provoqué par l'évapotranspiration

$\Delta Q_s$  : Flux de chaleur stockée, généré par l'accumulation de chaleur au sein des matériaux et du sol (Colombert 2008).

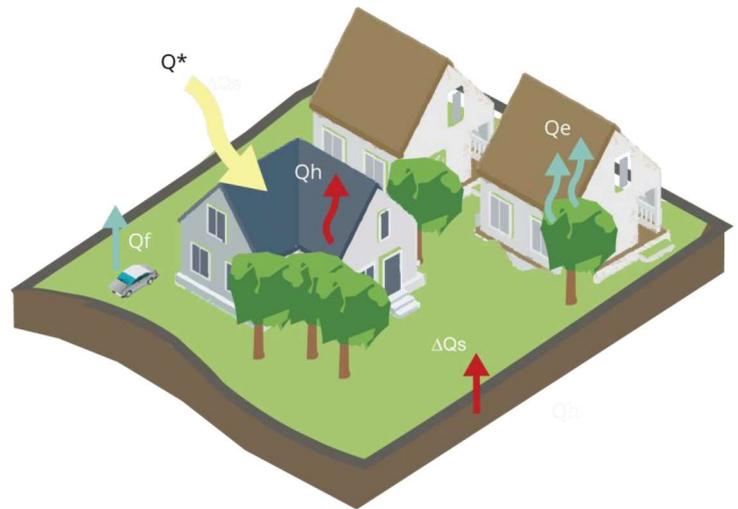


Figure 12 : Schéma récapitulatif des flux d'énergie intervenant dans le bilan radiatif en contexte urbain  
Source : Raute, 2019

### Causes de modification du bilan

Ces différents flux associés, aux mécanismes vus précédemment, sont donc à l'origine des événements climatiques que nous connaissons (pluie, vent, etc...). Cependant, à l'échelle de la ville, ces transferts se retrouvent modifiés et engendrent une modification du bilan énergétique avec pour conséquence une augmentation de la chaleur (Figure 13).

Période diurne (Leconte, 2014), (Colombert, 2008) :

◇ *Augmentation du flux de stockage  $\Delta Q_s$*  : En raison de sa structure 3D particulière qui offre des surfaces d'absorption plus importantes, la ville capte fortement les rayonnements solaires. Par ailleurs, la ville étant constituée de bâtiments de hauteurs et morphologies différentes, les rayonnements solaires sont absorbés de manière plus importante en raison des multiples réflexions sur les surfaces bâties. L'émission de rayonnements infrarouges par les surfaces a également tendance à augmenter les températures. On parle alors de piégeage radiatif.

Ce stockage est notamment amplifié par la présence de certains matériaux urbains ayant tendance à stocker plus de chaleur que des matériaux naturels. L'albédo notamment, est également à prendre en compte.

◇ *Augmentation du flux de chaleur sensible  $Q_h$*  : En raison de la différence de gradient de température entre les matériaux urbains et l'air, une partie de la chaleur stockée par les matériaux est transformée en chaleur sensible par convection. Le bâti ayant tendance à former une barrière contre l'écoulement du vent et à réduire sa vitesse, cette chaleur présente ne peut être évacuée.

◇ *Réduction du flux de chaleur latent  $Q_e$*  : L'évapotranspiration provoquée par les arbres se retrouve par ailleurs largement diminuée en ville. D'une part, les matériaux urbains sont pour la plupart imperméables et provoquent donc une évaporation rapide et peu de stockage. D'autre part, la présence de végétation est largement inférieure aux espaces ruraux. Le rayonnement solaire est plus facilement converti en chaleur sensible plutôt qu'en chaleur latente.

◇ *Augmentation du flux de chaleur anthropique  $Q_f$*  : Enfin, l'augmentation de la chaleur peut être directement imputée aux activités anthropiques. Les activités industrielles, les moyens de transports, la climatisation, le chauffage sont autant de mécanismes générant des transferts de chaleur positifs.

Période nocturne (Leconte, 2014), (Colombert, 2008):

De nuit, la chaleur stockée et accumulée au niveau des revêtements urbains est progressivement relâchée dans l'air par convection. Cependant cette chaleur ne peut s'évacuer complètement du fait de la présence du bâti. On remarque notamment que plus les hauteurs sont importantes, plus la chaleur reste bloquée. On parle alors de « facteur vue du ciel ». Plus celui-ci est élevé (moins le ciel est observable depuis le sol), plus la chaleur a tendance à rester bloquée.

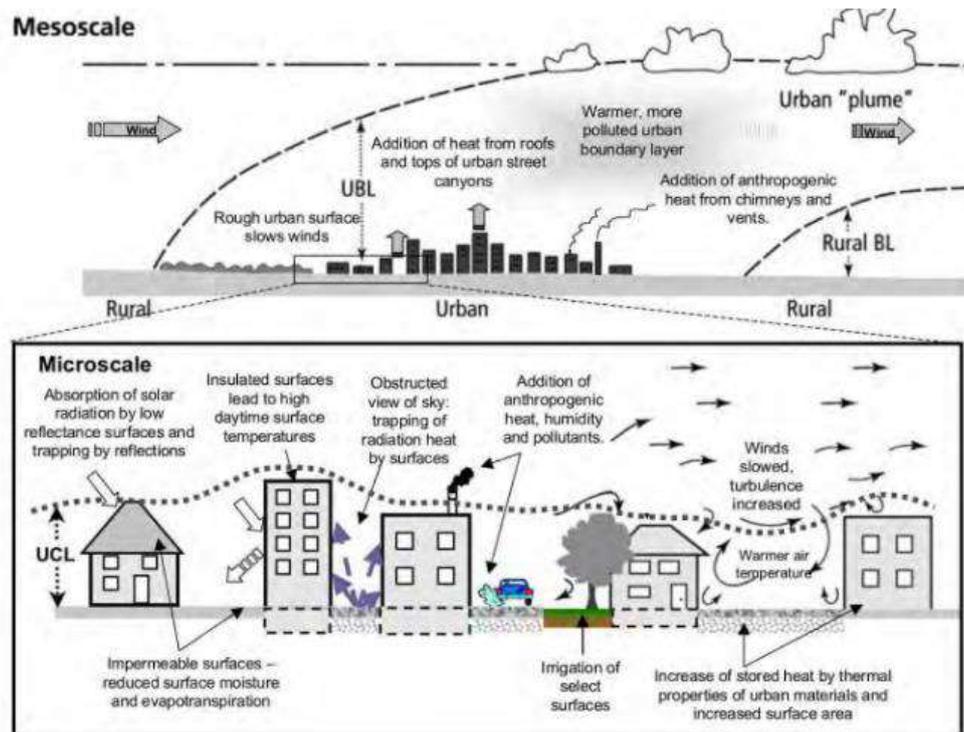


Figure 13 : Schéma récapitulatif des processus à l'origine de l'îlot de chaleur urbain  
Source : James Voogt, 2007

Bien que les activités anthropiques semblent être à la base de la formation des ICU, d'autres facteurs peuvent être mis en cause et peuvent influencer sur son intensité et amplitude (Leconte, 2014). La figure 14 suivante est d'ailleurs un bon récapitulatif des éléments mis en cause dans la formation d'ICU (Dubois, 2014).

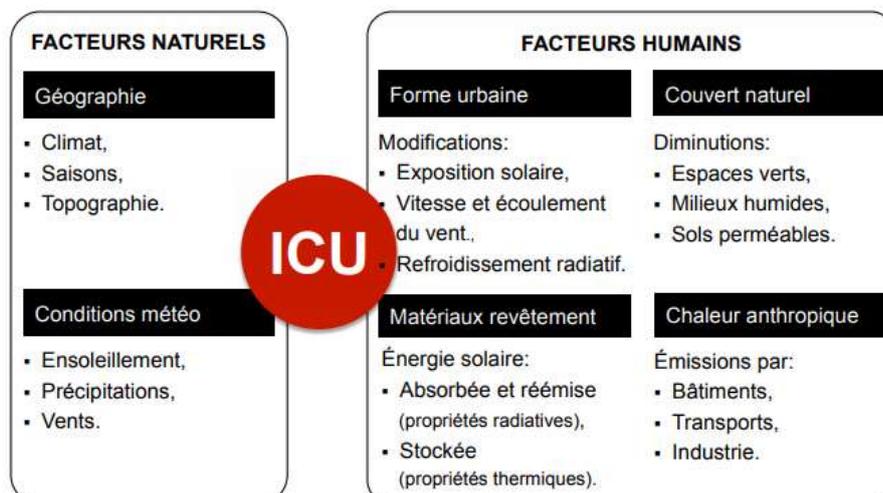


Figure 14 : Facteurs naturels et humains contribuant à la formation d'ICU  
Source : Dubois, 2014

## 1.3 Les aménagements durables et le bioclimatisme au croisement des disciplines

### 1.3.1 Bioclimatisme et îlots de fraîcheur : la mise en place de stratégies d'adaptation

Face à ce phénomène d'îlot de chaleur urbain, des solutions sont mises en place à la fois sur le plan paysager, architectural et urbanistique. Il s'agit d'aménager en tenant compte des conditions climatiques mais également de l'environnement, qu'il soit urbain ou rural. On remarque alors le retour à une architecture traditionnelle, agrémentée d'innovations techniques et technologiques pour certains projets.

On parle d'aménagement durable lorsque l'on aménage une maison, un quartier ou une ville avec l'objectif d'obtenir une qualité de vie confortable pour tout type de population tout en préservant les ressources et en limitant l'impact écologique [6] .

Le concept du bioclimatisme repose sur le même principe. Principalement utilisé en architecture, il peut cependant être transposé à diverses échelles d'aménagement. Il a pour fondement un aménagement plus respectueux de l'environnement et notamment grâce à l'utilisation des matériaux locaux et sains. Le projet doit être adapté au lieu d'implantation afin de pouvoir en tirer les avantages (ensoleillement, vent) et en éviter les contraintes comme on peut le voir sur la figure 15. Les énergies renouvelables disponibles sont mises à l'honneur afin d'utiliser le minimum d'énergie extérieure. L'objectif final étant toujours de procurer aux habitants un lieu de vie agréable et confortable [6], [7].

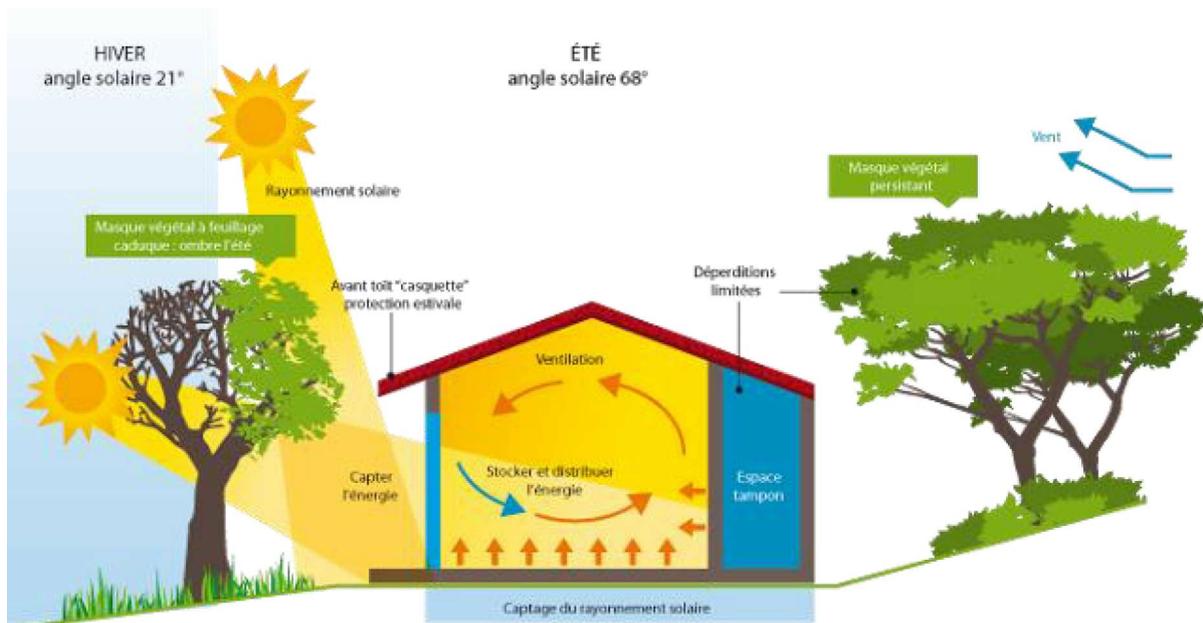


Figure 15 : Représentation schématique du principe du bioclimatisme  
Source : RRT12, 2018

Adapté à la problématique d'îlots de chaleur, ces concepts peuvent se muer en îlots de fraîcheur. Ceux-ci se caractérisent par la présence d'une zone plus froide, source de rafraîchissement en regard de l'environnement immédiat plus chaud. Ils se matérialisent principalement sous forme de parcs urbains et plus généralement par des endroits bénéficiant d'une végétalisation plus importante, d'une bonne ventilation ou encore d'un point d'eau à proximité (Bonhomme, 2015).

Une carte de Paris à destination des habitants a notamment été publiée afin que ces îlots de fraîcheur permettent à la population de venir se soustraire à la chaleur en période de canicule (Figure 16).

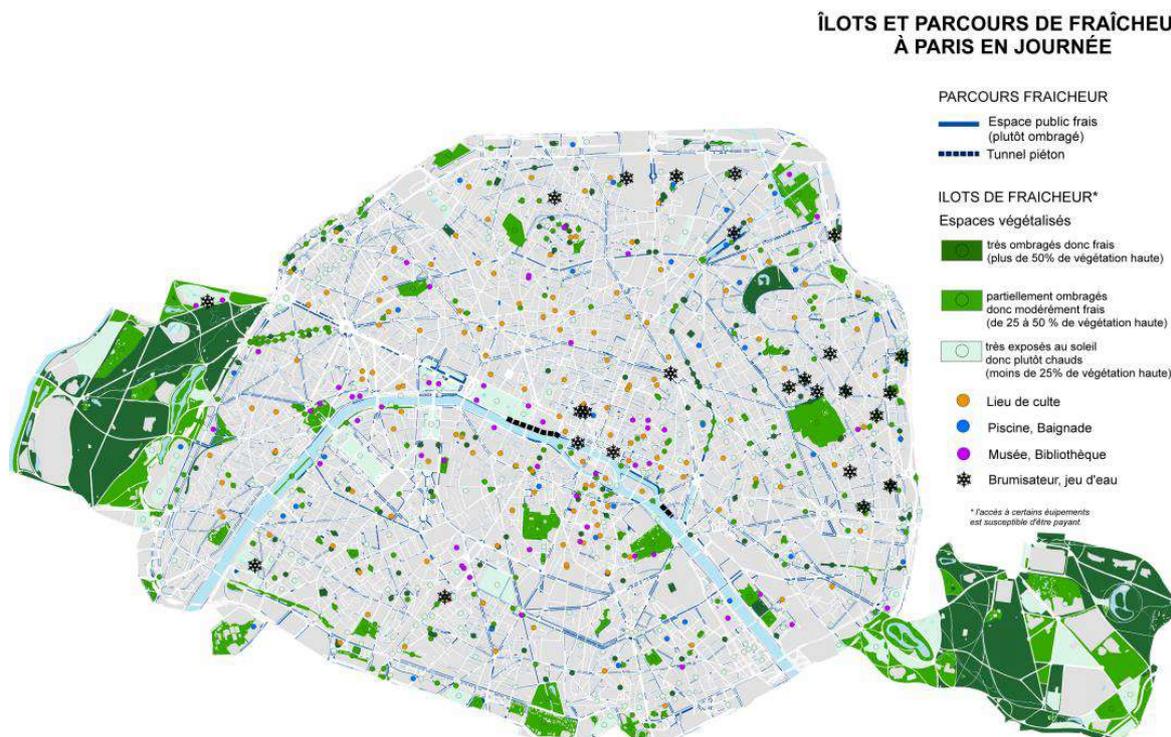


Figure 16 : Cartographie des îlots de fraîcheur à Paris  
Source : APUR, 2018

### 1.3.2 Stuttgart et Toulouse Montaudran Aerospace : des projets précurseurs en matière de climat urbain

Afin de répondre à la problématique, deux cas d'étude seront utilisés : la région de Stuttgart et le quartier Toulouse Montaudran Aerospace. Une présentation et contextualisation de ces projets d'aménagement est proposée afin de permettre une meilleure compréhension de leur analyse dans les parties suivantes.

#### Stuttgart

Localisée au sud-ouest de l'Allemagne, la ville de Stuttgart est la capitale de l'état fédéral Baden-Württemberg, quatrième plus grande région d'Allemagne (figure 17). Au vu de son étendue, la ville est définie en tant que ville-arrondissement. Cette ville-arrondissement est également connue sous le nom de « région Stuttgart », appellation que nous conserverons tout au long dans ce mémoire.

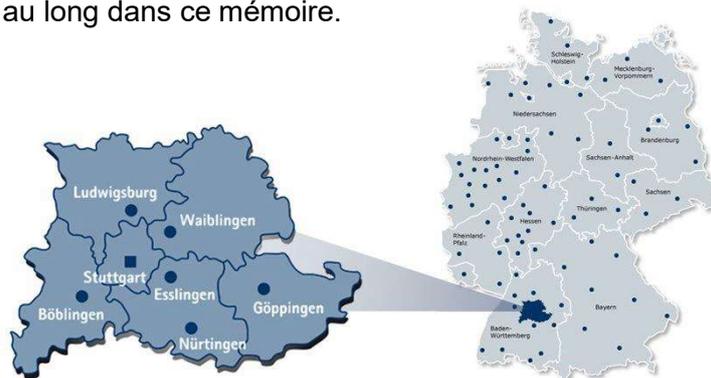


Figure 17: Localisation de la région de Stuttgart  
Source : IHK Stuttgart, 2018

Elle possède une population d'environ 613 300 habitants tandis que la région du Baden-Württemberg en comptabilise environ 5,3 million [8]. Soumise à un climat chaud et humide ainsi qu'à une force de vent faible (Ketterer et Matzarakis, 2012), Stuttgart est enclavée dans une cuvette et s'est développée jusqu'aux flancs des collines alentour. Le reste de la région repose quant à elle sur des collines, vallées et parcs [8]. Réputée pour son domaine industriel, la région de Stuttgart a développé des activités de production importantes, notamment avec les entreprises Daimler, Porsche and Bosch plants, Hewlett-Packard et IBM [9].

Suite à une épidémie de tuberculose ravageuse d'après-guerre et autres maladies liées à la pollution de l'air, la région a décidé de mettre en place le programme « Health System Standardization ». Ce projet consistait à mettre en place des conditions d'illumination et de ventilation favorisant la qualité de l'air et réduisant les problématiques liées à la propagation de maladies (Hebbert et Webb, 2012). Par ailleurs, afin de protéger la région et notamment les usines durant la seconde guerre mondiale, il fût décidé d'utiliser la topographie de Stuttgart afin de mettre en place un brouillard artificiel. Celui-ci permis de soustraire la région à la vue des avions ennemis mais également de découvrir la présence de courant d'air froid (Ibid).

Afin de permettre une bonne ventilation urbaine, la conservation de ces courants devint l'objectif principal de la région. En effet, en raison de la topographie mais également du rejet de polluants produit par les usines, la région était soumise à de fortes contraintes de salubrité [10]. Ces contraintes avaient par ailleurs de fortes chance de provoquer la formation d'îlots de chaleur forts et intenses. Grâce au « General Binding Site Plan » de 1948 la région adopta des régulations afin d'intégrer la climatologie au sein du service de planification. Une des actions phare de la région fût la création en 2008 d'un atlas climatique de la région. Ce klimaatlas comporte de nombreuses cartes indiquant la majorité des processus climatiques à l'œuvre dans la région. La nouveauté de cet atlas correspond à la mise en place d'un rapport de recommandation à l'usage des aménageurs prenant en compte les aspects climatiques et urbanistiques tel que les écoulements d'air à l'échelle de la région et du quartier (Hebbert et Webb 2012).

### *Quartier Toulouse Montaudran Aerospace*

Localisé à l'est de Toulouse, la ZAC de Montaudran Aerospace est située au sein du projet plaine campus, projet lauréat de l'appel d'offre écocité. Celui-ci englobe les projets de la ZAC Malpère-Marcassonne, le campus universitaire et la ZAC Montaudran Aerospace. La structure de la ZAC s'organise autour de la piste de décollage historique des avions de l'aéropostale, colonne vertébrale du projet. D'une longueur de 1,8km et 30m de largeur, cette piste fût rendue célèbre par des pionniers de l'aviation civile [11], (Bonhomme, 2015).

Ce projet a pour objectif d'être un élément structurant au sein du développement de l'agglomération et notamment en termes de rayonnement et dynamisme. En effet, il a pour idée principale la création d'un des plus grands campus scientifique d'Europe tout en associant, entreprises, recherche et universités.

Afin de réaliser ce projet, une stratégie basée sur l'aménagement durable et écologique a été énoncée : elle favorisera les déplacements doux, la préservation de corridors de biodiversité ou encore la gestion des eaux de pluie.

Séparée de la ZAC de Montaudran au nord par la voie ferrée et au sud des structures de recherche (CNRS, ENAC, ISAE) par le périphérique ouest toulousain, ce projet a pour vocation d'être une porte d'entrée de ville sur le sud-ouest toulousain [11].

La ZAC se composera donc de différents équipements culturels, avec notamment l'espace de mémoire Aéropostale et la halle du conservatoire des mécaniques, de recherche, ainsi que d'espaces verts et publics (Figure 18). La place centrale sera quant à elle le cœur du quartier et comportera des commerces, logements ainsi que des équipements publics.



Figure 18 : Plan d'aménagement urbain avec les environnements proches de la ZAC de Montaudran  
Source : Bonhomme, 2015

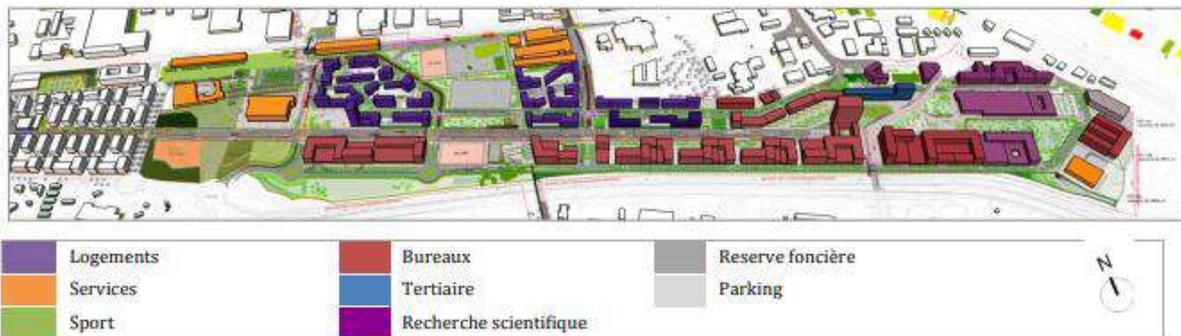


Figure 19 : Plan d'aménagement urbain avec usages et environnement proche de la ZAC de Montaudran  
Source : Bonhomme, 2015

Afin de proposer un aménagement novateur et en adéquation avec l'évolution du climat, la communauté urbaine Toulouse-Métropole a missionné un laboratoire de recherche afin de développer une analyse climatique du site.

Le logiciel Envi-Met sera utilisé afin de recréer les conditions climatiques locales mais surtout afin de les analyser face à différents scénarios d'aménagement.

Ces différents scénarios sont au nombre de 4 et correspondent à l'amélioration d'un scénario initial (Bonhomme, 2015) :

- Scénario Prospect : Le ratio hauteur/ largeur de la rue sera deux fois plus important que dans le projet initial
- Scénario Blanc : Les revêtements seront plus clairs que dans le projet initial (albédo plus fort).
- Scénario Vert : La densité végétale sera plus importante.
- Scénario Bleu : Les bassins d'eau avec fontaine seront installés dans les places ou parc de récréations et à proximité de la piste emblématique de la ZA.

Cet outil d'aide à la décision permettra ensuite au maître d'ouvrage de sélectionner la meilleure option d'aménagement possible, (Figure 19).

Dans cette première partie, nous avons pu découvrir les différents enjeux associés aux îlots de chaleur urbains. Phénomène connu depuis plusieurs années, celui-ci fait face à une augmentation considérable en raison de l'élévation des températures et notamment suite au changement climatique. Provoqué par le développement urbain, les îlots de chaleur se caractérisent par une différence de température mesurable en période diurne entre la campagne et la ville. En effet, les modifications engendrées par la présence de bâtiments et

la concentration d'activités anthropiques ont tendance à modifier l'équilibre climatique et génèrent un microclimat propre à la ville. Principal moteur du climat, l'énergie fournie par les rayonnements du soleil va subir et provoquer différents processus, engendrant notamment le stockage de l'énergie par les matériaux et le sol. Cette chaleur sera ensuite transmise de proche en proche via le phénomène de conduction, mais pourra également se transformer en chaleur sensible. En effet, la différence de température entre un matériau ayant reçu les rayons du soleil et l'air provoquera un mécanisme de convection engendrant la transformation d'une partie de la chaleur stockée en chaleur sensible. De plus, l'imperméabilisation des sols ainsi que la diminution du couvert végétal a tendance à réduire l'évapotranspiration et donc la transformation de la chaleur sensible en chaleur latente.

Face aux îlots de chaleur urbains cependant, les concepts de bioclimatisme et d'aménagement durable se sont développés. Ils prônent des économies d'énergie ainsi que la prise en compte de l'environnement qu'il soit climatique, social, économique ou écologique, au sein des aménagements. Ils reposent sur de nombreux éléments ou leviers d'action pouvant être mis en place afin de réduire ce phénomène. Cela se traduit par l'augmentation du couvert végétal, la mise en place de point d'eau, le revêtement du sol ou encore en jouant sur la forme urbaine et la ventilation.



Chaque agglomération, ville ou village possède une morphologie et des caractéristiques particulières. En modifiant l'environnement, ces irrégularités provoquent des anomalies dans le climat local et modifient l'équilibre de la machine thermique (Leconte, 2014). En effet, que ce soit au niveau du bilan radiatif ou des flux de chaleur, ces phénomènes sont largement modifiés selon la forme du tissu urbain.

Dans cette partie nous nous intéresserons donc à l'étude des formes urbaines grâce à la mise en place d'un outil de planification, ainsi que par l'analyse de différents facteurs morphologiques influençant le phénomène d'îlot de chaleur.

### 2.1 L'agencement du tissu urbain à l'origine du phénomène d'ICU

#### 2.1.1 Développement et requalification urbaine : des tentatives d'intégration du climat urbain aux projets d'aménagement

Comme on a pu le voir précédemment, les tissus urbains ont acquis leur forme actuelle suite à une succession d'évolutions historiques, mais également en raison de choix d'orientations d'aménagement [3].

Dans le contexte actuel, la politique d'aménagement urbaine consiste principalement à mettre en place des stratégies de densification afin de limiter le grignotage des terres environnantes (Geglo, 2014). En effet, d'un point de vue énergétique, cette densification semble être bénéfique à tout niveau. Diminution des dépenses énergétiques (Liu et Sweeney, 2012), diminution de l'usage de la voiture et donc des émissions, regroupement des usages et accès aux infrastructures facilité, diminution des surfaces minéralisées (Geglo, 2014) ; ce bilan paraît prometteur tant sur le plan social qu'économique. Cependant, ces informations sont à prendre avec précaution. En effet, si l'on observe cela d'un point de vue microclimatique, le concept de ville compacte ne paraît pas satisfaire toutes les exigences et notamment en terme de confort thermique (Emmanuel et Steemers, 2018) ; (Berardi et Wang, 2016). Face à ce constat, certaines villes ont décidé d'axer leur stratégie de développement non pas sur l'aspect urbain seul, mais sur un développement durable et tenant compte du climat urbain (Ren, Ng, et Katzschner, 2011). Un exemple concret et précurseur sur lequel la majorité de ces villes et régions se sont appuyées pour développer leurs stratégies de planification concerne la région de Stuttgart.

La région de Stuttgart possède un historique relativement impressionnant et précurseur quant à la prise en compte du climat urbain. En effet, dès 1978, la région publie une cartographie des îlots de chaleur (Hebbert et Webb, 2012).

La création en 2008 d'un atlas climatique de la région témoigne par ailleurs de l'importance de la prise en compte du climat urbain par la municipalité. Les données à l'origine du « Klimaatlas » sont multiples et proviennent principalement de ce qu'on appelle le système de carte climatique urbaine (UCMap system). Celui-ci peut être divisé en 3 phases (Ren, Ng, et Katzschner, 2011):

La première phase consiste à regrouper une série de données « basiques » tel que des données climatologiques, topographiques, sur la pollution de l'air, l'occupation du sol, etc... Ensuite, ces données sont triées pour certaines, puis regroupées afin de former 3 cartes climatiques ayant des caractéristiques déterminantes. Ces 3 cartes ont pour thématiques la

ventilation et les corridors venteux, la capacité thermique de l'environnement et enfin la localisation des zones où la pollution de l'air est rémanente (Ren, Ng, et Katschner, 2011).

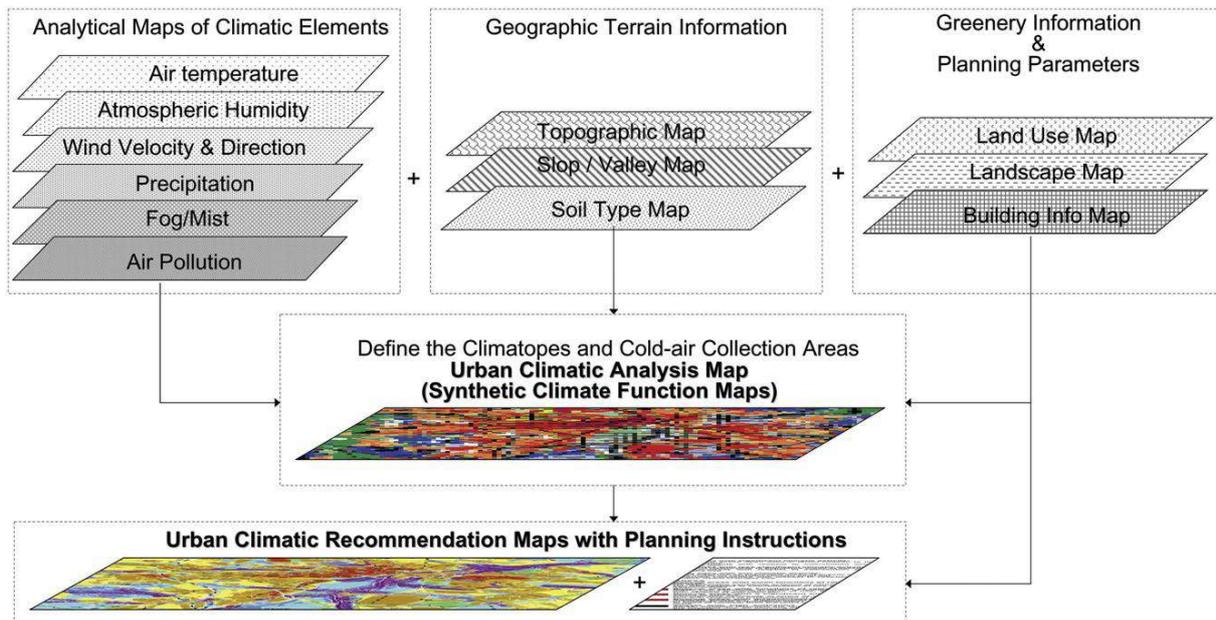


Figure 20 : Présentation des différentes couches et étapes aboutissant à la formation d'un UCMap  
Source : Ren, Ng, et Katschner, 2011

Enfin, le croisement de toutes ces données permet la création d'une carte d'analyse des données, l'UC AnMap (Urban Climatic Analysis Map). Celle-ci est matérialisée sous la forme d'une plateforme et résume les résultats de l'analyse climatique scientifique. Ces résultats sont représentés de façon plutôt évidente par les climatopes qui permettent de décrire des zones géographiques avec des caractéristiques microclimatiques similaires (figure 20). On en distingue 11 pour la région de Stuttgart : eau, espace ouvert, forêt, parc, zone rurale, zone urbaine, centre-ville, banlieue, voie ferrée, petite usine, usine. Ces climatopes peuvent par ailleurs être accompagnés d'indications sur les vents ou la pollution (Ren, Ng, et Katschner, 2011), [10].

Enfin, l'UC AnMap est accompagnée d'une carte de recommandations à l'attention des aménageurs, l'UC-ReMap (Urban Climatic Recommendation Map) (Ibid) ; (Ketterer et Matzarakis, 2012). Celle-ci a pour objectif d'informer et d'apporter des outils permettant une planification en adéquation avec l'environnement. Cette carte tire parti des climatopes et les regroupe en zones selon les degrés d'importance de prise en compte. Elle présente donc non seulement une évaluation climatique de la zone mais elle évalue également les zones à risque et ayant besoin d'une attention particulière.

Concrètement, en termes d'organisation urbaine, cela se traduit par la différenciation des zones bâties en fonction de leur importance climatique. Divisées en quatre catégories, celles-ci possèdent chacune des préconisations et réglementations quant à l'aménagement. On remarque notamment que la majorité des zones à risque en termes de pollution et impact climatique concerne des zones densément construites au centre de la vallée ainsi qu'au bord de la rivière Neckar [10]

Cela s'explique d'un part par la présence historique de la ville au centre de la vallée qui concentre une partie des émissions anthropiques, ainsi qu'une surface imperméable conséquente (figure 21). Les abords du Neckar regroupent quant à eux la majorité des usines provoquant un flux de chaleur anthropique très important accentué par la présence de voies de circulation très empruntées (Ren, Ng, et Katzschner, 2011).

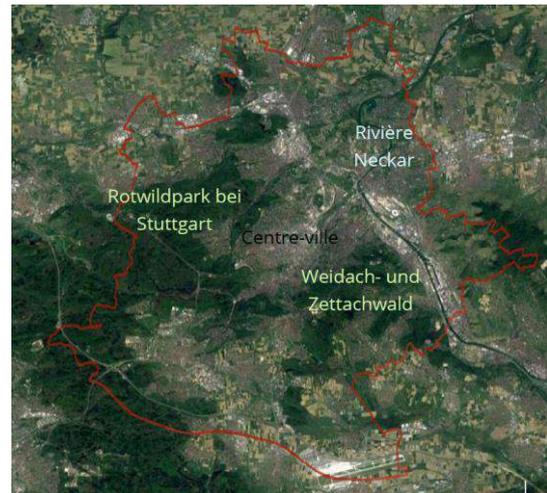
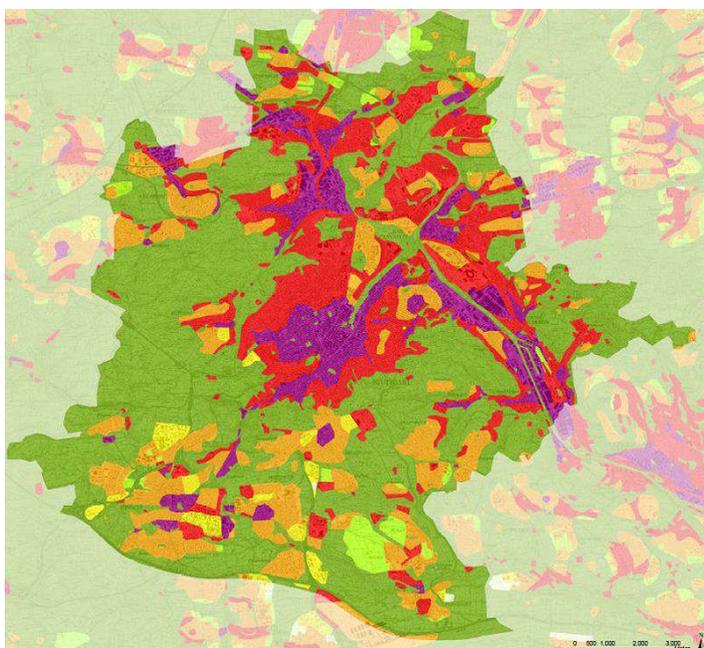


Figure 21 : Situation générale de la région de Stuttgart  
Source : Raute d'après Google map



### Recommendations for Planning

#### OPEN SITES

- Open sites with significant climatic activity:  
Climatically active open sites in direct relation to the housing area  
High sensitivity with respect to intervention which changes use
- Open sites with less significant climatic activity:  
No direct relationship to populated areas of activity  
Low sensitivity with respect to intervention which changes use
- Open sites with low climatic activity:  
Small influence on populated areas of activity or open sites inside an extended climatic potential  
Relatively insensitive with respect to restricted intervention which changes use

#### SETTLED AREAS

- Built-up areas with small functions of relevance to climate:  
No appreciable sensitivity in terms of climate/air pollution with respect to intensification of use and building agglomeration
- Built-up areas with functions of relevance to climate:  
Low sensitivity in terms of climate/air pollution with respect to intensification of use, e.g. consolidation, closure of gap sites etc.
- Built-up areas with a significant function of relevance to climate:  
Considerable sensitivity in terms of climate/air pollution with respect to intensification of use
- Built-up areas with disadvantages in terms of climate/air pollution:  
Agglomerated settlement areas or buildings with a disturbing effect in need of renewal from the point of view of urban climate
- Streets with extreme traffic load:  
extreme air and noise pollution
- Streets with very high traffic load:  
very high air and noise pollution
- Streets with high traffic load:  
high air and noise pollution

Figure 22 : Cartographie des recommandations en termes de planification pour la région de Stuttgart  
Source : Ren, Ng, et Katzschner, 2011

Le rapport de recommandations (figure 22) préconise d'ailleurs une augmentation des espaces verts, la création de corridors de ventilation ou encore la suppression de certains immeubles qui pourraient favoriser le stockage de chaleur [10]. Afin de veiller au respect de ces préconisations, la région se soumet à une série de réglementations encadrant le développement urbain. Le « German Building Code » révisé en 2004 prône notamment un développement durable intégrant des aspects sociaux, économiques et écologiques [9].

Bien que cet outil intègre un nombre de facteurs considérables, on peut noter que certaines données pourraient être également prises en compte. Tout d'abord, au niveau du tissu urbain, les climatopes s'intéressent uniquement à l'occupation du sol. Or, afin de modéliser parfaitement les écoulements et transferts thermiques, il serait intéressant de tenir compte de la hauteur du bâti, de l'étroitesse des rues et de leur orientation. En effet, la volumétrie de la ville impacte également les îlots de chaleur (Yau, Katzschner, Chao, Ng, 2009).

De la même manière, l'ajout de données concernant les consommations énergétiques pourrait être pertinent. En effet, énergie et microclimat sont intimement liés. Dans un cas de dépenses énergétiques importantes, celles-ci agissent en tant que flux de chaleur anthropique et participent à l'augmentation des températures et par conséquent à la formation des îlots de chaleur (Liu et Sweeney, 2012) ; (Martilli 2014).

Bien que les cartes thermiques apportent un indice dérivé sur la chaleur émise, l'intégration des consommations énergétiques permettraient de prévoir de façon plus précise les pics de chaleur.

Ces cartes climatiques ne sont cependant pas les seuls outils permettant la prise en compte du climat au sein des stratégies de planification.

En France par exemple, l'utilisation du modèle SOLENE et ENVI-met permettent de modéliser les conditions climatiques à l'échelle du quartier pour le premier et à une échelle plus globale pour le second. Le logiciel SOLENE est développé au CRENAU, laboratoire de l'école d'architecture de Nantes alors que le logiciel Envi-met est mis au point par une entreprise spécialisée. Ils permettent d'étudier divers scénarios d'aménagement cependant, en raison des trop nombreuses données à prendre en compte à l'échelle d'une agglomération ils ne pourraient être utilisés pour la région de Stuttgart par exemple.

### 2.1.2 Organisation spatiale du quartier : la morphologie urbaine cause du climat

Actuellement, de nombreuses études scientifiques se sont intéressées à l'étude du tissu urbain d'une part, mais surtout à leurs interactions avec le climat urbain. Cela s'est traduit par la publication d'études définissant des facteurs et paramètres morphologiques permettant l'analyse de processus climatiques engendrés par le tissu urbain (Athamena, 2012). On peut notamment citer le ratio H/L, le facteur vu du ciel (sky view factor), la densité de surface ainsi que l'orientation du bâti.

Tout d'abord, le ratio H/L (ou prospect) lié au canyon urbain se caractérise par le ratio entre la hauteur de la construction (H) et la largeur de la rue (L). Ce ratio est à l'origine de deux phénomènes diamétralement opposés, il peut à la fois créer un îlot de fraîcheur grâce à l'ombrage procuré mais également former un piège radiatif suite à l'absorption et la réémission successives des flux d'énergie (Leconte, 2014).

Celui-ci peut être associé au facteur vu du ciel (SVF, sky view factor) correspondant à la proportion de ciel vue de la rue. Physiquement, cela permet d'évaluer la quantité de rayonnements échangés entre les zones de la rue éclairées et le ciel. Pour un SVF égal à 1, l'espace est complètement ouvert et la température dépendra principalement des conditions météorologiques. A l'inverse, pour un SVF inférieur à 1, la vue au ciel est obstruée et les températures seront principalement influencées par le contexte urbain (Leconte, 2014).

La densité de surface quant à elle tient compte du rapport entre la surface construite et la surface totale urbaine. Ses variations sont principalement dues aux modes d'occupation du sol et notamment avec la morphologie du centre-ville compact et dense progressant vers un habitat pavillonnaire plus ouvert, pour les zones urbaines européennes tout du moins. Au niveau du climat, les variations de densité peuvent avoir un impact sur la quantité d'énergie absorbée en raison de la quantité de surface imperméabilisée présente, ainsi que sur la ventilation urbaine (Achour-Bouakkaz, 2006).

L'orientation du bâti est aussi caractéristique du stockage de chaleur en raison de la durée d'exposition au soleil d'une face du bâtiment (Achour-Bouakkaz, 2006).

Si l'on s'intéresse au projet de la ZAC de Toulouse Montaudran Aerospace, le facteur étudié correspond au ratio H/L ou prospect.

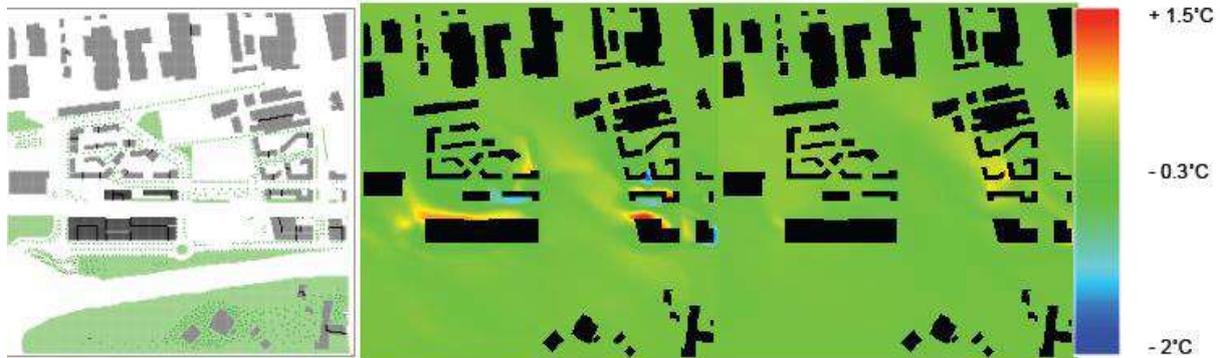


Figure 23 : Plan de la variante "prospect" (gauche) et cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario "prospect" et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite)  
Source : Bonhomme, 2015

Sur la figure 23, on remarque une faible différence de température entre le scénario prospect et le scénario initial avec quelques variations au niveau local.

Ces variations sont localisées autour des bâtiments et peuvent être positives comme négatives. Ces faibles variations peuvent s'expliquer par le fait que l'organisation spatiale du bâti ne permet pas l'utilisation du ratio H/L. En effet, l'espacement entre les bâtiments s'avère trop important pour que l'ombrage mutuel du bâti fonctionne (Bonhomme, 2015).

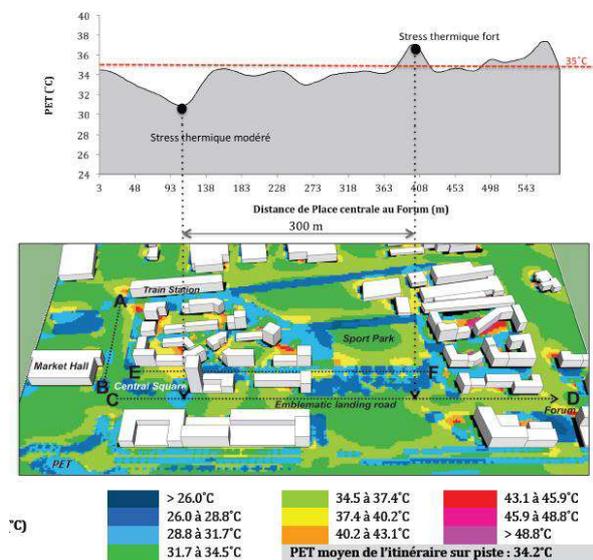


Figure 24 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario de base  
Source : Bonhomme, 2015

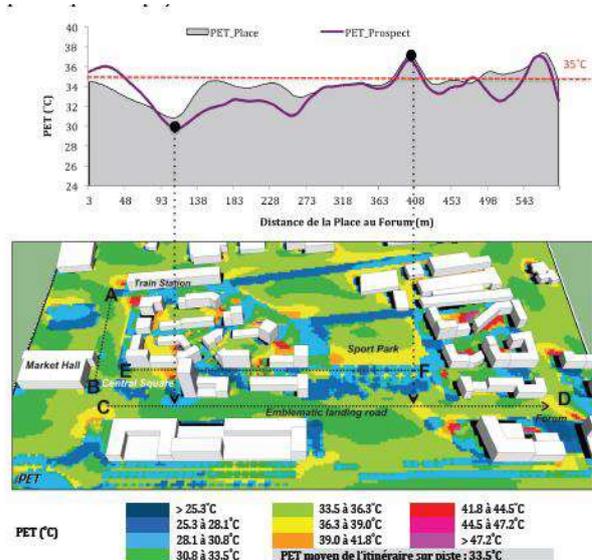


Figure 25 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario « Prospect »  
Source : Bonhomme, 2015

Ce ratio est notamment adapté à ce qu'on appelle les rues canyons. Ces rues relativement étroites empêchent un ensoleillement direct et favorisent le maintien de la fraîcheur. Dans le cas du scénario prospect, il s'avère que l'augmentation de la hauteur du bâti n'apporterait pas grand-chose en termes de réduction d'intensité de l'îlot de chaleur.

De même, si l'on observe le confort thermique d'un point de vue piétonnier sur les figures 24 et 25, le ratio H/L aura une influence seulement à une certaine heure de la journée. En effet,

en fonction de l'orientation du bâti, l'ombrage fourni sera plus ou moins important sur le trajet emprunté par les piétons (Bonhomme, 2015).

Dans un projet de requalification, celui-ci ne permet pas une redéfinition totale du tissu urbain, ce qui peut expliquer la faible prise en compte de la forme urbaine au sein du projet. Le surcoût que représenterait un réaménagement complet du quartier explique également cela.

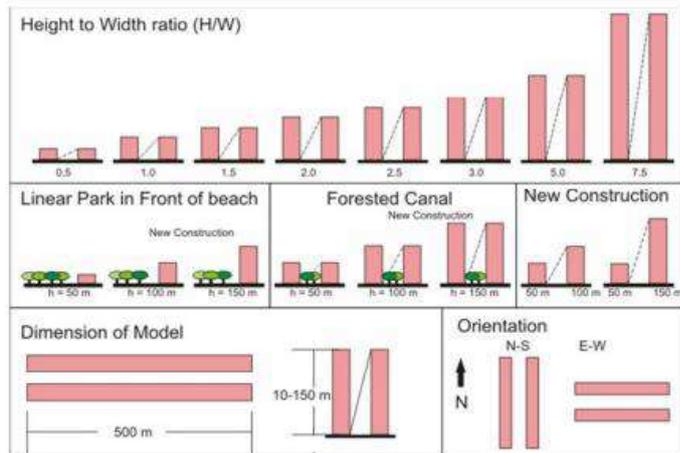


Figure 26 : Configuration urbaine de Santos, Brésil  
Source : (Matzarakis, 2017)

Afin de comprendre tout de même plus précisément l'impact de la forme urbaine nous pouvons citer l'étude de Matzarakis sur la prise en compte du facteur vue du ciel, du ratio H/L ainsi que de l'orientation du bâti à Santos au Brésil.

Cette étude se base donc sur l'étude d'indicateurs morphologiques et leurs impacts sur la température de l'air en ville ainsi que sur l'évapotranspiration.

Les conclusions de cette étude nous indiquent qu'une orientation est-ouest ainsi qu'un ratio H/L entre 2 et 3 améliore le confort thermique (figure 26, 27). Au-dessus d'un ratio de 3, le confort diminue et la mise en place d'autres stratégies d'atténuation devient nécessaire. Ces stratégies comportent notamment l'implantation de zones végétalisées au pied des immeubles (Bonhomme, 2015).

Les résultats ne sont cependant pas à prendre comme un fait universel. En effet, Sao Paulo étant localisé au bord de l'océan et possédant un climat local tropical, l'étude ne peut être reproduite. De même, l'utilisation d'un ratio H/L aussi élevé nous indique que nous sommes face à une ville densément construite.

H/W	FEATURES	STREET VIEW	SVF
0,5	Building Height: 1-2 floors Street: 20 m		SVF=0.6
1,0	Building Height: 6-12 floors Street/Canal: 50 m		SVF=0.5
1,5	Building Height: 3-6 floors Street: 20 m		SVF=0.34
2,0	Building Height: 12-22 floors Street/Canal: 50 m		SVF=0.08
2,5	Building Height: 6-12 floors Street: 20 m		SVF=0.26
3,0	Building Height: 22-35 floors Street/Canal: 50 m	Future Modifications due to new Urban Planning	SVF=0.26
5,0	Building Height: 12-22 floors Street: 20 m		SVF=0.21
7,5	Building Height: 22-35 floors Street: 20 m	Future Modifications due to new Urban Planning	FVC=0.07
5,0	Building Height: 12-22 floors Street: 20 m		SVF=0.16
	Building Height: 22-35 floors Street: 20 m		SVF=0.17
	Building Height: 12-22 floors Street: 20 m		SVF=0.85

Figure 27 : Configuration et modifications testées  
Source : (Matzarakis, 2017)

### 2.1.3 Le revêtement urbain : nouvelle source d'innovation technique

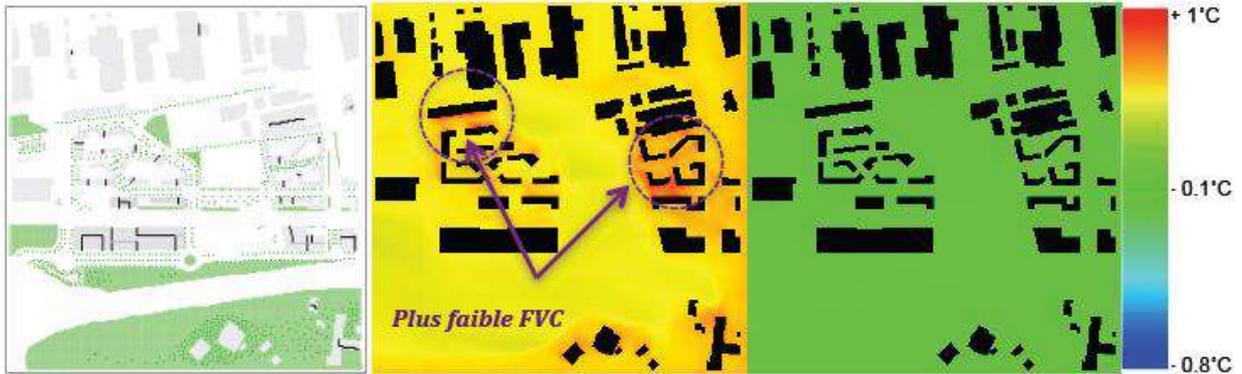


Figure 28 : Plan de la variante "blanche" (gauche) et cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario "blanc" et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite)  
Source : Bonhomme, 2015

La prise en compte du revêtement urbain fait également partie des scénarios d'atténuation envisagés pour la réduction de l'îlot de chaleur du projet de Toulouse. Sur la figure 28, cette stratégie se caractérise par la mise en place de revêtements possédant un fort albédo permettant une réflexion plus importante des rayons solaires (scénario blanc). Les différences entre la période diurne et nocturne sont flagrantes.

En journée, la température reste relativement élevée et notamment entre les immeubles ou la chaleur stagne. De nuit, la température diminue mais n'apporte pas non plus des îlots de fraîcheur notables. Dans ce scénario, l'emploi de revêtement avec un albédo élevé n'apporte finalement pas de réel rafraîchissement (Bonhomme, 2015).

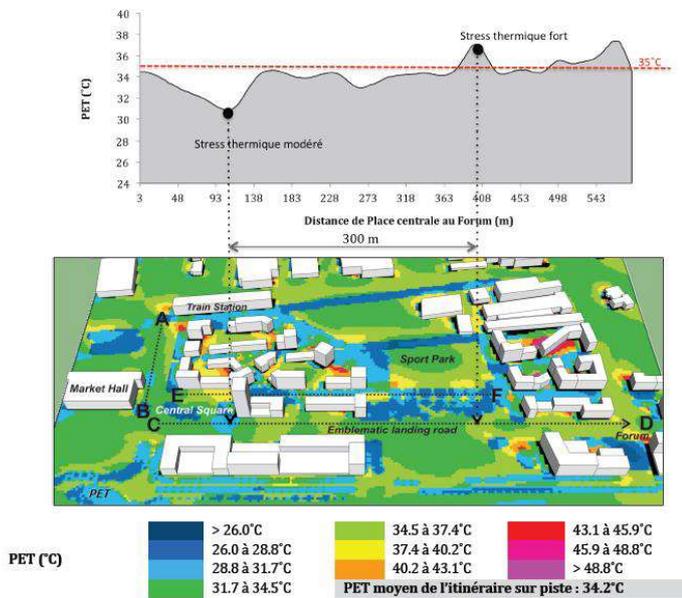


Figure 29 ; Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario de base  
Source : Bonhomme, 2015

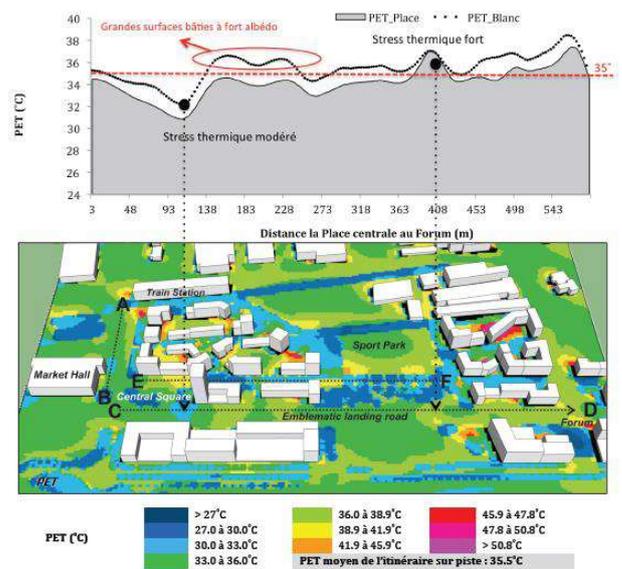


Figure 30 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario « blanc »  
Source : Bonhomme, 2015

Concernant le cheminement piéton (figures 29,30), on observe un profil similaire à l'état de base bien qu'une légère différence de température puisse être remarquée au niveau des passages à proximité des bâtiments. Cela peut notamment s'expliquer par le fait que les surfaces murales des bâtiments possèdent un albédo relativement élevé et renvoient directement les radiations solaires sur l'environnement urbain et les usagers (Bonhomme, 2015).

Des études ont cependant démontré l'influence positive de l'albédo des revêtements de chaussée (O'Malley et al, 2015). D'après une étude analysant les effets de différents revêtements et de leurs propriétés thermiques (Morini et al, 2016), une augmentation de l'albédo pourrait diminuer jusqu'à 2 degrés la température de l'air. Cette étude a été menée sur un site industriel et démontre également que la baisse de température profite à l'espace environnant. A l'inverse, l'étude (Salata et al, 2015) indique, tout comme le cas de Toulouse Montaudran Aerospace, qu'une augmentation de l'albédo engendre une augmentation de la température.

## 2.2 La circulation de l'air à la base d'un climat sain et frais

### 2.2.1 Planification et aménagement du territoire : gestion et utilisation du climat local

Bien que les conditions de ventilation de la région de Stuttgart puissent paraître inexploitable, celle-ci a su en tirer parti et développé cette thématique en tant qu'enjeu principal de planification.

Le KlimaAtlas de Stuttgart cité précédemment ne tient pas seulement compte de la forme urbaine. En effet, les corridors de ventilation apparaissent comme fondamentaux et leur prise en compte bénéficie d'une attention toute particulière.

Etant située dans une cuvette, la région de Stuttgart possède une faible ventilation. A cette circulation limitée s'ajoute une diminution de la vitesse du vent induite par les différences de rugosités entre la ville et la campagne. En effet, la hauteur relative du bâti (figure 31) a tendance à augmenter le pourcentage de frottements [12].

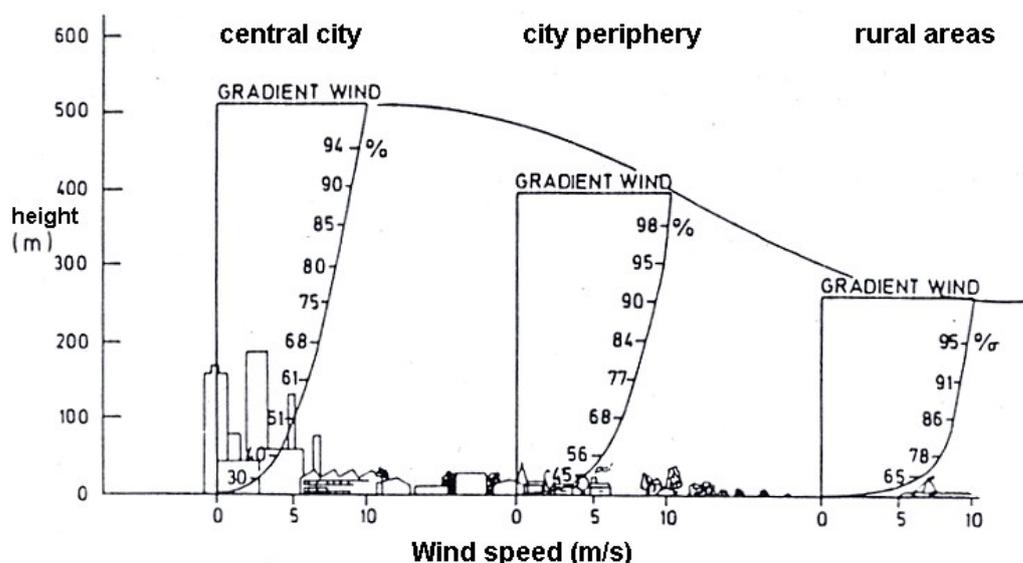


Figure 31 : Evolution du gradient de l'écoulement d'air en fonction du type d'occupation du sol  
Source : Klimafibel, 2012

Ces courants d'air froid sont majoritairement formés grâce à la présence de couvert végétal en zone rurale, comme on peut le voir sur la figure 32. En effet, grâce au processus

d'évapotranspiration, la quantité d'eau dans l'air augmente de façon significative au niveau de la couche atmosphérique localisée au-dessus de la zone rurale [12]. La différence de pression entre cette zone et la zone urbaine engendre ensuite un phénomène de convection qui propulse cette humidité vers les zones urbaines formant ainsi un courant d'air frais (Avisar, 1996).

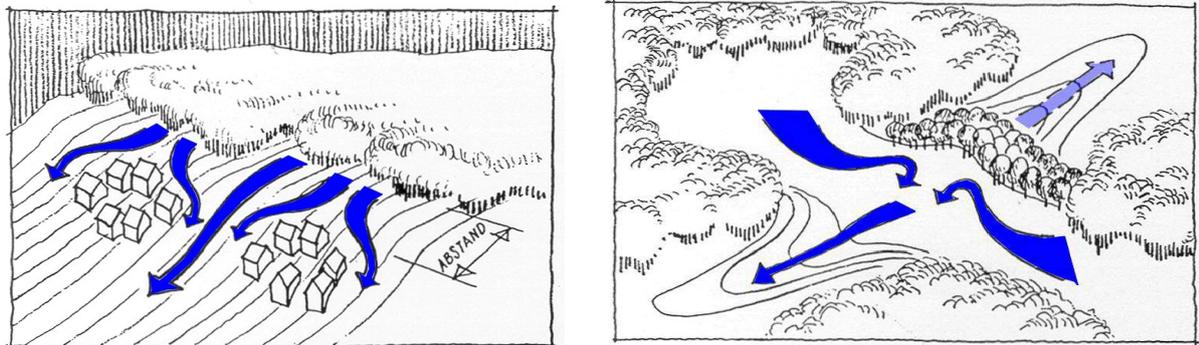


Figure 32 : Création de courants d'air froid et écoulements  
Source : Klimafibel, 2012

Ces écoulements peuvent cependant être réduits ou disparaître en fonction des obstacles qui leur font face. Ces obstacles peuvent se retrouver sous forme de barrage, murs antibruit, alignements d'arbres perpendiculaires à l'écoulement ou encore des bâtiments et centres urbains. De même, une route perpendiculaire à cet écoulement aura tendance à le perturber [12].

La figure 33 suivante est d'ailleurs une bonne représentation des mécanismes à l'œuvre.

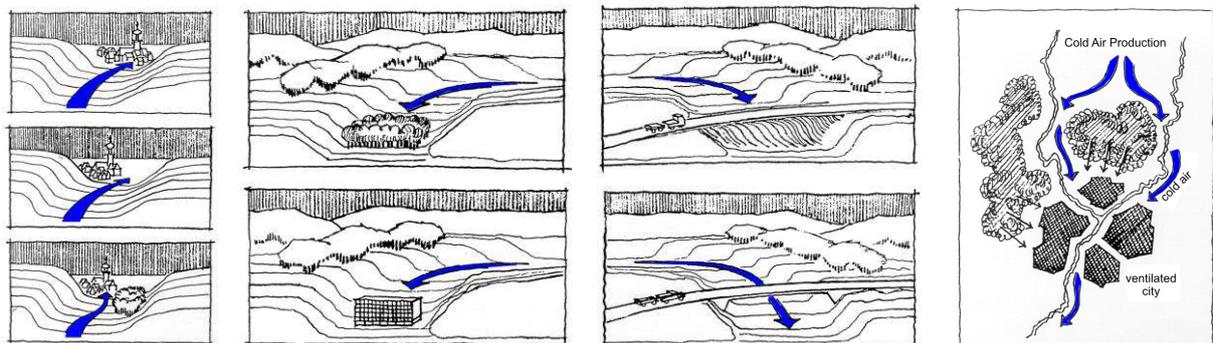


Figure 33 : Représentation schématique des écoulements d'air face à des obstacles  
Source : Klimafibel, 2012

Si l'on s'intéresse aux cartes du Klimaatlas (figure 34), on remarque que les principaux courants proviennent du sud de la région et sont caractérisés par un transfert d'air frais. Ils suivent par ailleurs les grands axes routiers et se chargent au passage de particules polluées. Au-delà de ces écoulements majeurs, on observe de nombreux écoulements secondaires. Ceux-ci qui peuvent être générés par la présence d'espaces végétalisés ou par des interférences liées aux obstacles présents. De façon globale, les recommandations en termes d'aménagement urbain préconisent une ville aérée avec une densité bâtie relative [12]. De la même manière, le développement périphérique ne doit pas agir comme un obstacle mais être aménagé de façon diffuse.

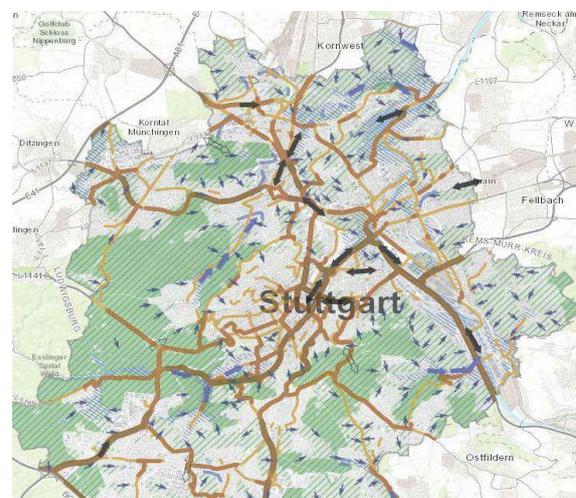


Figure 34 : Cartographie des écoulements d'air de la région de Stuttgart  
Source : Klimaatlas, 2008

Au niveau du développement urbain des collines, celui-ci est limité dans la mesure du possible. En effet, la majorité des zones de production d'air froid étant sur les hauteurs, la préservation de corridors de ventilation apparait primordiale. Dans le cas d'un développement obligatoire, des zones non constructibles devront être mises en place afin de préserver des espaces vides et les bâtiments devront être espacés d'une distance minimum. Par ailleurs, le développement de constructions sur un axe linéaire sera préférable dans le sens de la pente afin d'éviter de former un obstacle à l'écoulement, (Figure 35) [12].

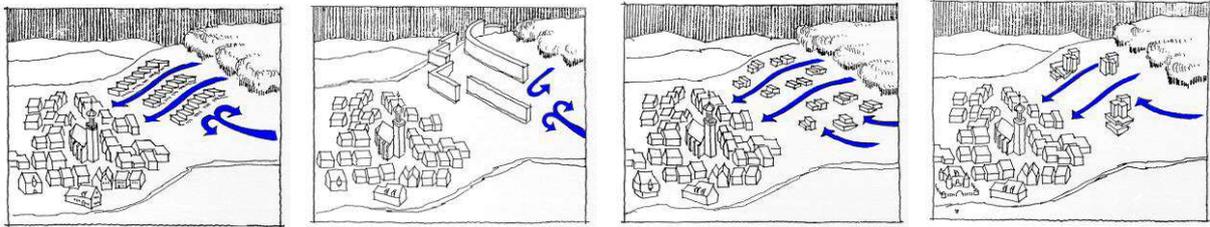


Figure 35 : Représentations schématiques des écoulements d'air face à diverses contraintes urbaines  
Source : Klimafibel, 2012

Cette représentation des écoulements participe donc à l'intégration des enjeux climatiques au sein de la politique de planification de la région de Stuttgart. En termes d'améliorations on pourrait cependant souligner l'échelle d'étude. La représentation étudiée s'applique uniquement à l'échelle mésoclimatique, c'est-à-dire à l'échelle d'une région naturelle d'étendue limitée, et ne permet pas d'étudier en détail les écoulements à l'œuvre au sein des différents quartiers. De plus, cette modélisation reste tout de même théorique et dépend certes, de données physiques mais également de l'appréciation des experts scientifiques. Enfin, bien que le rapport de recommandations incite fortement à la préservation des corridors de ventilation, certaines zones non protégées d'un point de vue réglementaire peuvent se retrouver urbanisées.

## 2.2.2 Agencement des éléments urbains à l'échelle du quartier : formation et conservation des courants d'air

L'empreinte urbaine se lit également sur la modification des régimes de vent. Dans le cas où le flux est sensible, une rugosité accrue d'un substrat exerce un effet freinage et une convergence. La fragmentation et la décomposition du bâti produit des effets d'accélération et de canalisation des flux, inégaux selon les orientations des rues. Dans le cas où les flux sont faibles, le contraste température entre agglomération et milieu rural provoque une brise de campagne.

### Écoulement d'air autour d'un bâtiment

A l'échelle du bâtiment (Figure 36), l'écoulement des masses d'air est principalement modifié par la hauteur et forme du bâti. Lorsqu'un vent vient heurter un bâtiment, trois zones principales de perturbation apparaissent :

- à l'avant un vortex turbulent dû à l'écoulement descendant sur la face au vent,
- à l'arrière une zone de turbulence qui s'étire dans la cavité de basse pression due à la séparation des écoulements au niveau des bords du bâtiment,
- et plus loin le sillage du bâtiment caractérisé par une turbulence élevée et des vitesses horizontales inférieures à celles de l'écoulement non perturbé comme on peut le voir sur la figure 37 (Oke, 1988).

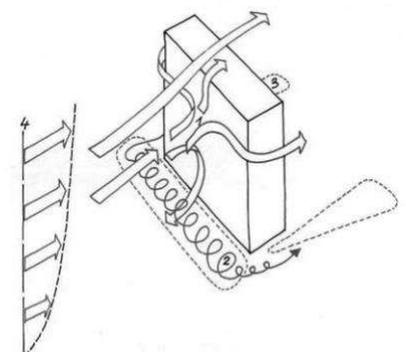


Figure 36 : Écoulements autour d'un bâtiment  
Source : Gandemer et Guyot, 1976

### Écoulement dans une rue

Mettant en jeu divers éléments et plusieurs variables, l'écoulement de l'air à l'échelle de la rue est plus difficile à modéliser (Figure 37). Dans le cas où la hauteur du bâtiment est inférieure à la largeur de la rue les écoulements n'interagissent pas. Dans le cas où la hauteur, l'espacement et la densité du bâti sont combinés, le régime de l'écoulement de rugosité évolue en un écoulement à interférence des sillages. Ce processus se caractérise par l'apparition d'écoulements secondaires.

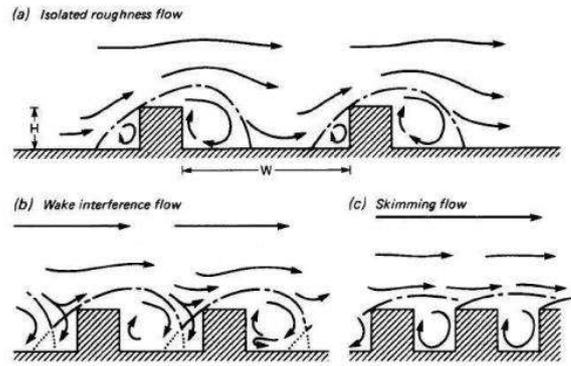


Figure 37 : Régimes d'écoulement aérauliques dans la rue

Source : Oke, 1988

Enfin, lorsque ces variables sont plus élevées, un vortex stable se met en place ainsi qu'un régime d'écoulement rasant (Oke, 1988). La figure 38 nous montre d'ailleurs ces phénomènes.

### Effets aérauliques en milieu urbain

A l'échelle de la ville, de nombreux facteurs tels que les formes du bâti, la densité, la hauteur perturbent les écoulements de l'air et génèrent ainsi un système aéraulique propre. Bien que les mécanismes d'écoulements urbains soit relativement connus et détaillés dans la littérature scientifique, ceux-ci ne s'appliquent que pour certaines configurations que nous allons détailler brièvement (Figure 38) (Tsoka, 2011) :

- L'effet de Canalisation fait référence à la formation du couloir par un ensemble construit.
- L'effet Venturi correspond au rétrécissement d'un passage engendrant une augmentation de la vitesse du vent.
- L'effet de Coin concerne une augmentation de la vitesse du vent à l'angle d'un bâtiment. Celle-ci est créée par la différence de pression entre une façade exposée et une autre non exposée.
- L'effet Wise correspond à l'apparition d'un rouleau tourbillonnaire devant un bâtiment de hauteur élevée face à un bâtiment de hauteur plus faible.

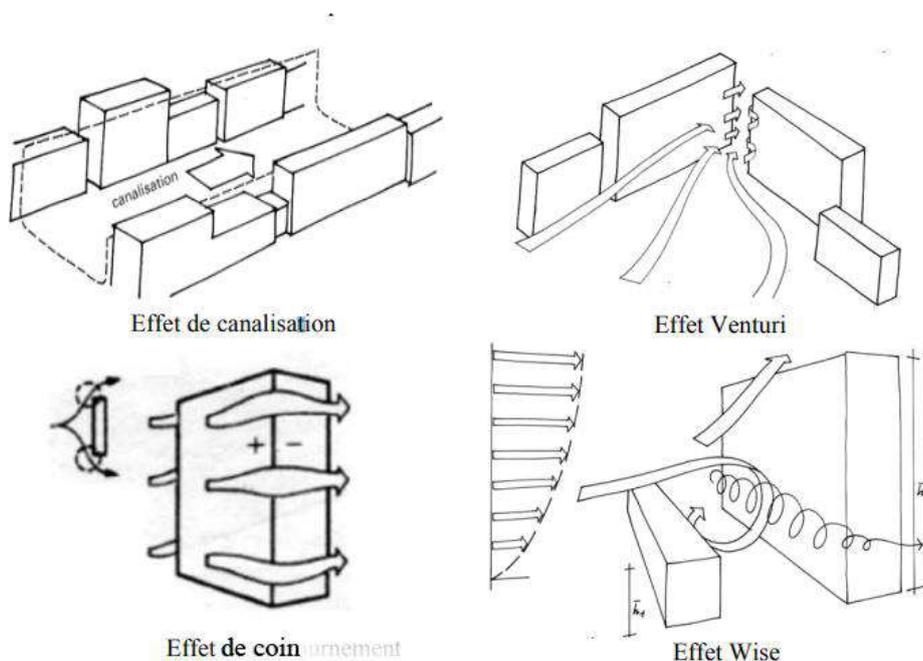


Figure 38 : Effets aérauliques en milieu urbain

Source : Gandemer et Guyot, 1976

A l'échelle du quartier de Toulouse Montaudran Aerospace (Figure 39), l'analyse des écoulements sur le projet initial vient malheureusement à manquer. Une étude des écoulements en fonction des différents scénarios est cependant exploitable.

Sur les cartes aérauliques, on remarque que le scénario ayant le plus d'impact concerne le scénario avec le ratio H/L plus élevé. En effet, celui-ci provoque une accélération d'environ 0,5 m/s au niveau de la piste qui peut être produite par un effet Venturi (Bonhomme, 2015).

A l'inverse, on peut remarquer un ralentissement notable sur le scénario vert. La mise en place d'espaces arborés agit comme un obstacle face au vent et diminue les écoulements pourtant importants au niveau de la piste (Ibid).

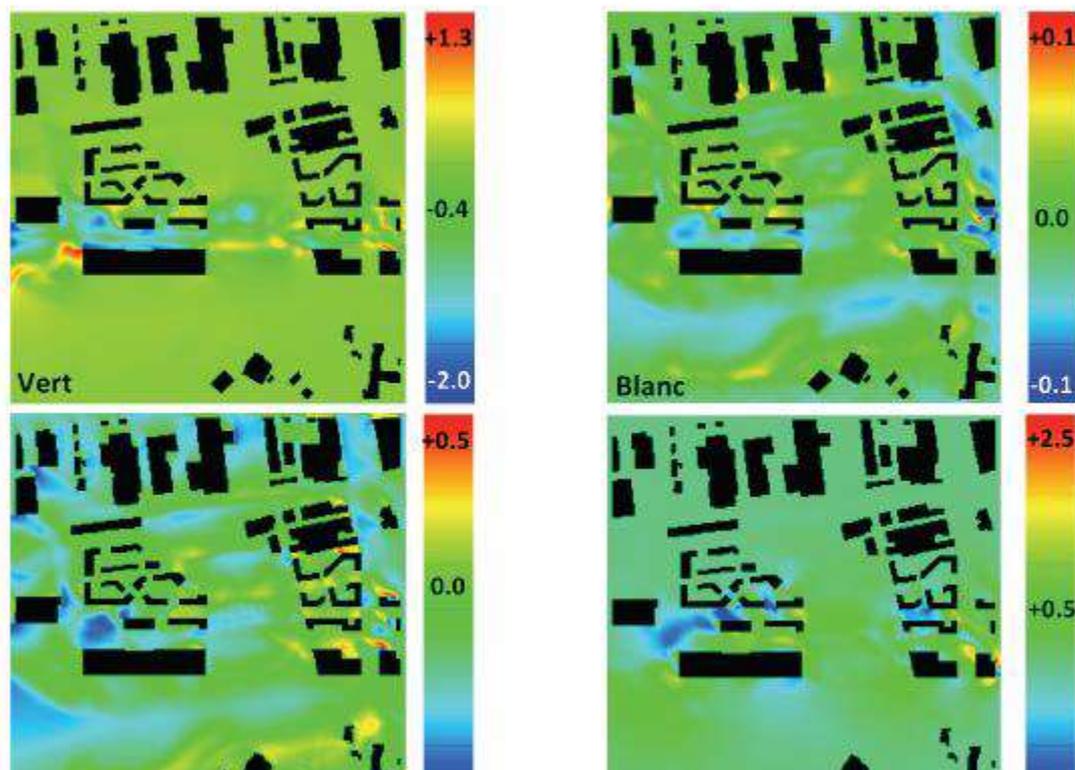


Figure 39 : Ecart de vitesse de vent entre les quatre variantes et le projet initial en journée  
Source : Bonhomme, 2015

Cette deuxième partie nous a permis à la fois d'analyser différentes stratégies de prise en compte du climat dans les projets d'aménagements, mais également de mettre en lumière les éléments pouvant avoir une influence sur les îlots de chaleur.

Pour la ville de Stuttgart, l'accent est mis sur l'aménagement raisonné de la ville. En effet, la mise en place du klimaatlas a engendré une prise de conscience de la population et des aménageurs grâce à une sensibilisation sur les phénomènes climatiques. De plus, l'accompagnement de ces cartes par un rapport de présentation a permis la mise en valeur et la protection des courants d'air frais créés au niveau des espaces verts en amont de la ville. Cette stratégie s'est pour l'instant avérée payante au vu de l'implantation de la ville et est reprise par des nombreuses autres agglomérations.

Le quartier de Toulouse Montaudran Aerospace a quant à lui réalisé des études sur l'impact de la forme du bâti sur la formation des îlots de chaleur. Bien que ce scénario se soit montré peu efficace au vu de l'implantation du bâti, l'organisation spatiale et la morphologie du bâti reste un critère déterminant et notamment dans les villes de forte densité bâtie. Les écoulements du vent à l'échelle du quartier ont quant à eux servi de base pour la modélisation du climat mais peuvent également être utilisés en tant que levier d'action utilisable par les aménageurs.



Aménagements en vogue en ce moment, la végétalisation et l'utilisation de l'eau en tant qu'éléments rafraîchissants deviennent des réponses apparemment évidentes aux îlots de chaleur. En effet, ces solutions apparaissent comme les plus simples à mettre en place en termes de faisabilité et d'installation. Cette partie évoquera donc des projets de végétalisation se basant sur le potentiel rafraîchissant des végétaux, mais également sur la sélection de ceux-ci en fonction du climat local. Elle s'attachera également à détailler des projets où la gestion de l'eau est mise en avant.

### 3.1 Le végétal au cœur des stratégies de rafraîchissement

#### 3.1.1 Mise en valeur du patrimoine végétal : le rôle thermorégulateur de la végétation

La végétation tient également une place de choix au sein de la politique de développement de la région. En effet, représentant plus de 60% de la surface totale de Stuttgart, le végétal fait partie intégrante de la région.

De nombreuses études l'ont démontrée, la contribution de la végétation au refroidissement urbain est notable. Que ce soit grâce au processus de transpiration ou encore grâce à l'ombrage fournit, la végétation apporte un sentiment de fraîcheur que nous allons expliquer plus précisément.

Tout comme les revêtements de surface, les végétaux absorbent ou réfléchissent les rayonnements solaires. Certaines longueurs d'ondes de ces rayonnements sont notamment utilisées lors du processus de photosynthèse permettant ainsi la transformation d'une petite partie de l'énergie radiative en énergie chimique (Avisar, 1996). Cependant, cet aspect en tant qu'élément réducteur du flux radiatif est mineur comparé à d'autres processus. D'ailleurs, l'efficacité des plantes à convertir le rayonnement solaire en énergie serait seulement de 1 à 2% (Ibid).

L'évapotranspiration par ailleurs, est le processus associé à la combinaison du phénomène de transpiration végétale et à celui de l'absorption de l'eau présente dans le sol. La transpiration végétale se caractérise par le rejet d'eau par les stomates des feuilles exposées au soleil (Vinet, 2000). Ce mécanisme consomme d'ailleurs une partie de l'énergie générée par photosynthèse. Cette transpiration permet le rafraîchissement de la surface des feuilles et provoque donc une augmentation de l'humidité dans l'air en contact avec celles-ci. (Givoni, 1991). L'utilisation de l'eau du sol participe quant à elle à la circulation de la sève au sein de la plante et notamment dans le xylème.

La végétation apporte de l'ombre ; c'est un fait établi. En été d'ailleurs, elle peut arrêter 70 à 90% du rayonnement solaire (Vinet, 2000). Cet ombrage engendre naturellement une diminution de l'échauffement des surfaces. Cependant, la sensation de fraîcheur ressentie lors du passage sous un arbre n'est pas seulement induite par cet ombrage. En effet, des études menées sur la température de surface du feuillage indiquent que celle-ci est égale à une température sous abri et peu dépendante des conditions de rayonnement, (Figure 40).

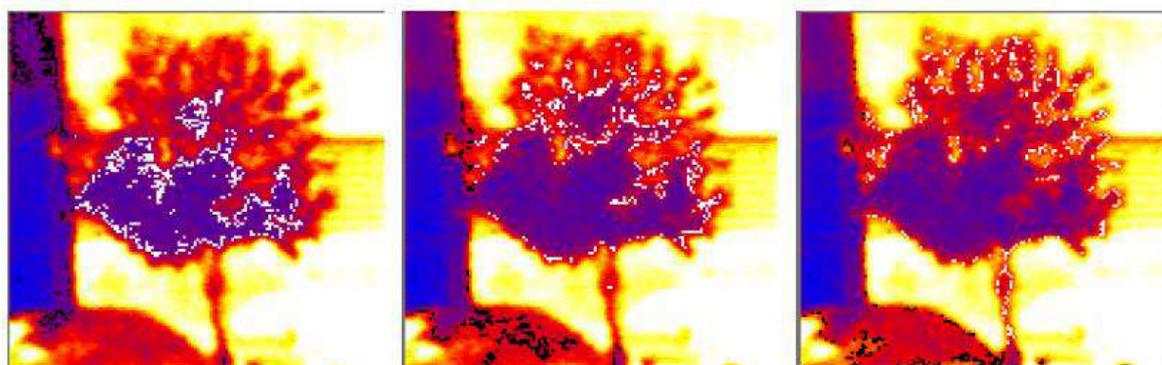


Figure 40 : Zones végétales isothermes à 27, 28, 29 °C  
Source : Alvarez et al, 2000

Consciente de ce potentiel, la région de Stuttgart a développé une politique de végétalisation et de protection du patrimoine végétal qui, associée à la ventilation urbaine, permet de réduire de façon conséquente l'îlot de chaleur urbain.

On a pu le voir précédemment, les zones agricoles et les forêts permettent la formation de courant d'air frais. Cependant, à l'échelle de la région, l'utilité principale du couvert végétal est de favoriser le rafraîchissement local via les processus évoqués précédemment, mais également de limiter l'imperméabilisation des sols et d'agir en tant qu'élément structurel urbain. Ces stratégies de végétalisation peuvent être divisées en plusieurs catégories : la végétalisation des rues, la création de toitures végétales et plus largement la conservation de trames végétales ou corridors à l'échelle de la région.

Tout d'abord, la mise en place de trames vertes a permis de former des corridors permettant de canaliser les écoulements d'air et de les faire circuler dans la ville. Ceux-ci sont reliés entre eux par des « artères vertes » comme les berges de la rivière Neckar (Rehan, 2016). Celles-ci ont été aménagées de manière à favoriser les modes doux entre les zones commerciales et résidentielles. De même, la présence de parcs au sein de la ville est relativement élevée. Le U vert notamment est un immense parc en forme de U et se caractérise par la possibilité de se déplacer des jardins royaux du centre aux forêts alentour uniquement à travers des environnements végétalisés (Ibid).

De la même manière, la région a mis en place le projet 21 qui se définit notamment par la végétalisation des rails de tramway, créant ainsi des couloirs verts à travers toute la ville [10].

Le développement de toitures végétales est également en plein essor au sein de la région. Depuis 1986, la région a élaboré un programme de support pour les projets de toitures végétalisées mais a également émis une réglementation concernant la végétalisation des toitures du bâti de moins de 12° en termes de pente. De même, depuis 1993 la majorité des nouveaux bâtiments possèdent une toiture végétale [12].

Afin de préserver ce patrimoine, la région a mis en place plusieurs réglementations. Tout d'abord, la préservation des espaces naturels est régit par l'article de conservation fédéral de la nature (BNatSchG) et l'article de conservation de la nature pour le Land of Baden-Württemberg (NatSchG). Ces espaces comprenant les espaces verts en zones résidentielles, les cimetières, les alignements d'arbres, les arbres isolés, certains jardins etc... ne peuvent être modifiés (Rehan, 2016).

Ensuite, le German Building Code établi en 1960 et révisé en 2004 vise également à protéger les espaces verts en gérant le développement urbain [10].

### **3.1.2 Agencement et choix du couvert végétal : la spécificité de l'environnement mis à l'honneur**

Le quartier de Toulouse Montaudran Aerospace a fait le choix de proposer une surface végétalisée d'environ 30ha, soit 40% de la surface du projet (Bonhomme, 2015). Une des thématiques phares est de s'appuyer sur la végétation « sauvage » déjà présente sur le site. En effet, la palette végétale a été sélectionnée avec attention en association avec les paysagistes, aménageurs et maîtres d'ouvrage.

Cette palette a été étudiée et choisie selon deux échelles, celle du site ainsi que celle du projet.

Au niveau du site, des relevés floristiques ont été mis en place afin de déterminer la flore spontanée qui pourrait se développer de façon naturelle au sein du site. Un inventaire des essences locales adaptées au climat et au type de sol de la région de Toulouse a également été organisé.

A l'échelle du projet, une approche historique a été menée afin de sélectionner des espèces « exotiques » caractéristiques du site (Bonhomme, 2015).

Concernant l'atténuation du phénomène d'îlot de chaleur, nous avons pu le voir précédemment, la végétation joue un rôle important au niveau du rafraîchissement des espaces. La ZAC possédant une surface végétalisée importante de par l'aménagement de ces espaces verts mais également en raison de son inscription au sein d'un trame verte (Figure 41) cela permet un rafraîchissement notable [11].

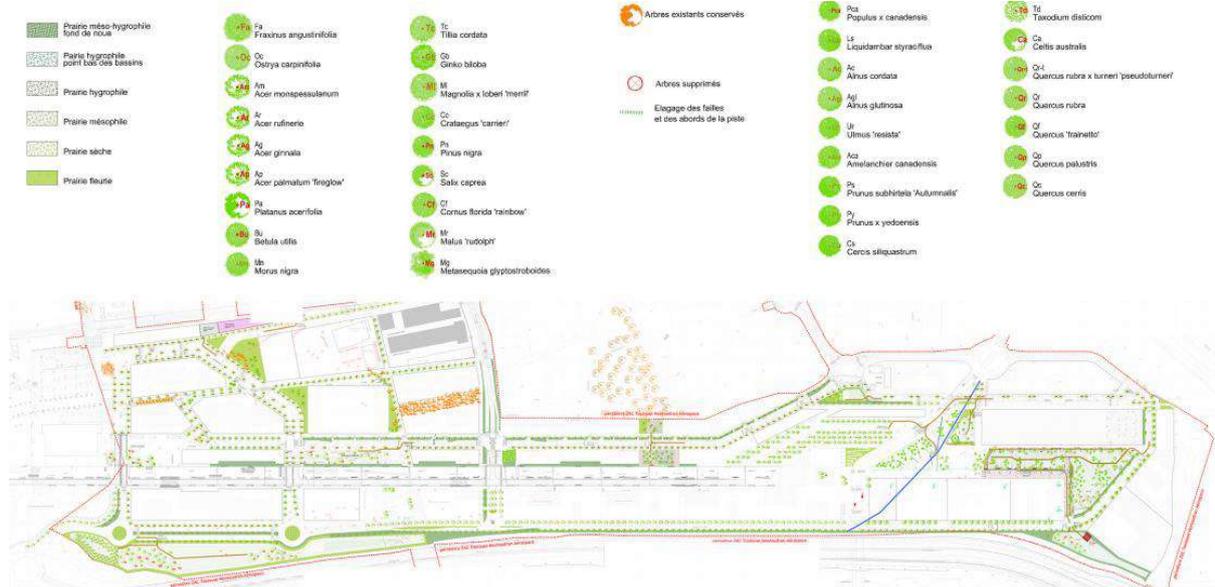


Figure 41 : Plan d'aménagement des espaces verts et spécification des essences  
Source : Bonhomme, 2015

L'analyse du scénario vert (augmentation de la densité végétale) (Figure 42) de la place centrale est basé sur une végétalisation deux fois plus importante. Elle nous indique que la température de l'air peut être réduite en période diurne avec un rafraîchissement pouvant aller jusqu'à 1,5°C comparé au projet initial (Bonhomme, 2015). On remarque que les zones végétalisées ont un impact sur l'intégralité de la place et de façon plus localisée au niveau des zones où les densités végétales sont plus importantes.

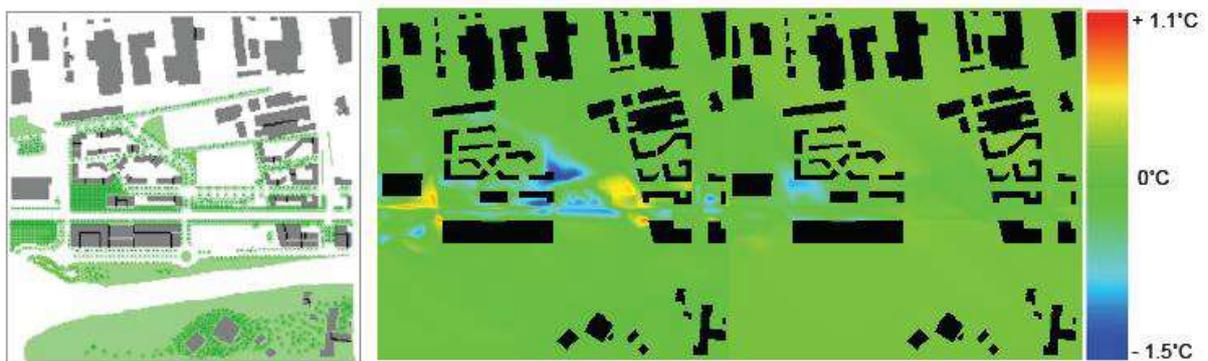


Figure 42 : Plan de la variante "verte" (gauche) et cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario "vert" et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite)  
Source : Bonhomme, 2015

Si l'on s'intéresse au confort thermique du piéton (Figure 43, 44) à l'échelle du projet, le scénario vert permet également agir sur la température. En effet, la mise en place d'alignement d'arbres le long de la piste ainsi que la densification des espaces verts et la plantation d'arbres sur la place centrale permet au piéton de profiter de l'ombre de ceux-ci tout au long de son trajet. Cela se traduit par une diminution considérable de la température, à savoir 7°C comparé au projet initial (Bonhomme, 2015).

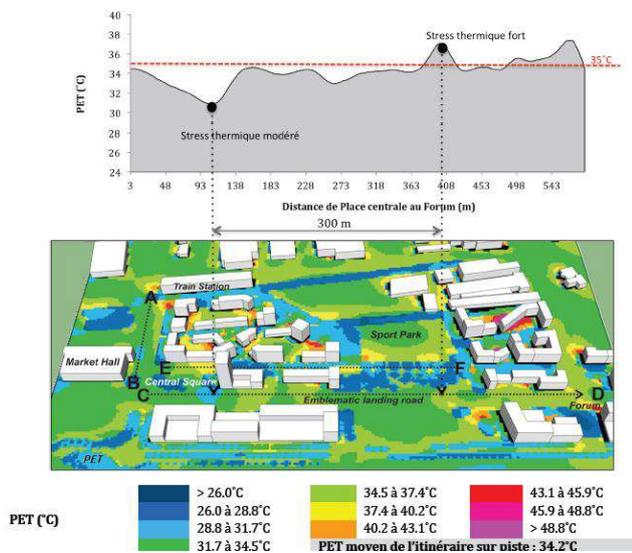


Figure 43 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario de base

Source : Bonhomme, 2015

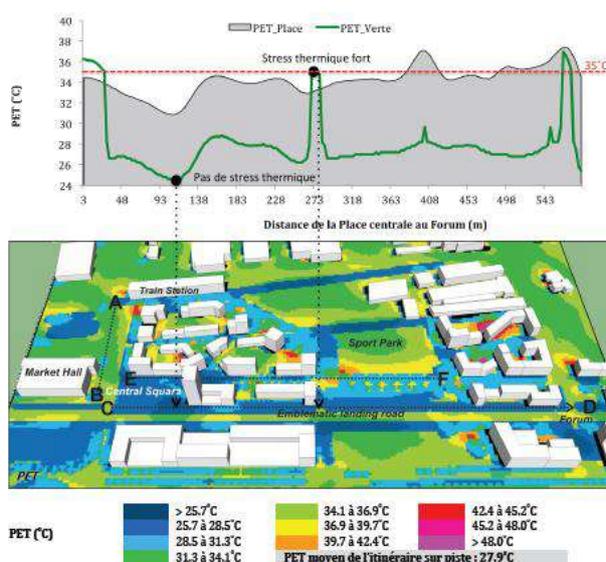


Figure 44 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario « Vert »

Source : Bonhomme, 2015

Ce scénario vert nous apporte de nombreuses informations quant à l'utilisation du végétal en tant qu'élément d'atténuation du phénomène d'îlot de chaleur. Un seul regret suite à cette analyse concerne l'implantation même du végétal au sein du quartier.

En effet, si l'on s'intéresse à l'étude réalisée sur un quartier de portland en Oregon, différents scénarios uniquement axés sur les stratégies de végétalisation apportent un complément quant à la nécessité de réfléchir sur l'agencement et l'implantation des essences végétales (Makido, Hellman, et Shandas, 2019).

Une des conclusions la plus évidente indique que le scénario le plus végétalisé aurait tendance à diminuer drastiquement la température. Cependant, ce scénario ne sera pas forcément celui retenu. En effet, afin de pouvoir transpirer de façon optimale, les végétaux ont besoin d'une source en eau. Or, en période de vague de chaleur cette ressource vient à manquer et une faible ou mauvaise évapotranspiration pourrait même avoir tendance à provoquer une légère augmentation des températures (Figure 45), (Makido, Hellman, et Shandas 2019).

De même, la sélection d'essences est essentielle. En effet, bien que certaines essences soient adaptées au climat local comme par exemple en Méditerranée, celle-ci ont développé certaines stratégies d'adaptation qui incluent notamment la diminution des pertes en eau et donc de l'évapotranspiration en période de sécheresse (Givoni, 1991).

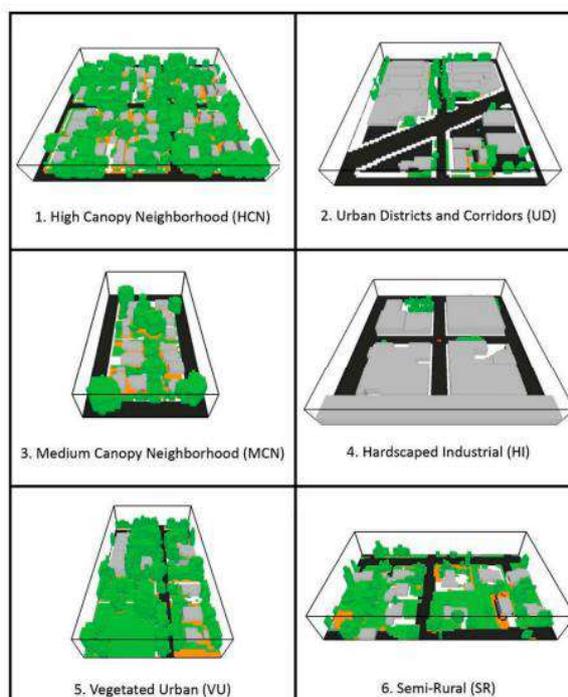


Figure 45 : Modélisation de différents scénarios d'agencement de couvert végétal du quartier de Portland en Oregon via le logiciel ENVI-met  
Source : Makido, Hellman, et Shandas, 2019

## 3.2 Entre gestion intégrée et gestion innovante de la ressource en eau

### 3.2.1 Diversité des aménagements en eau : des potentiels de rafraîchissement variables

L'eau peut se retrouver sous une multitude de formes, que ce soit à l'état solide, liquide, gazeux ou encore sous forme de bassins, fontaines, rivières. D'un point de vue technique, le rafraîchissement apporté par ce point d'eau se matérialise tout simplement par l'évaporation (Dubois, 2014).

Plus précisément les rayonnements solaires sont tout d'abord absorbés par l'eau (Vinet, 2000). Ceux-ci engendrent un changement de phase de l'eau, elle passe d'une phase liquide à une phase gazeuse. Ce mécanisme de changement d'état nécessite une consommation d'énergie importante retrouvée sous forme de chaleur et fournie notamment par le rayonnement solaire. Cela provoque alors des déperditions sous forme de chaleur latente (Ibid).

L'eau entre également en jeu dans les processus d'infiltration qui se retrouvent relativement réduits en zone urbaine. En effet, l'imperméabilisation des sols provoque le ruissellement de la pluie sur les toitures et voiries et est directement dirigé vers le réseau d'eaux pluviales. Le stockage d'eau dans le sol est donc relativement réduit et engendre une diminution du phénomène d'évapotranspiration (Vinet, 2000).

En contexte urbain, ce phénomène se retrouve par ailleurs largement diminué du fait de la faible présence d'eau dans le sol comparé aux zones rurales. On se retrouve alors avec une chaleur sensible plus élevée que la chaleur latente. (Bonhomme, 2015)

Si l'on s'intéresse maintenant à la typologie du point d'eau, on remarque une forte variation en termes de rafraîchissement. De façon évidente, les larges étendues d'eau permettent un refroidissement plus important du fait de la quantité d'eau évaporée. Cela peut s'étendre jusqu'à 100m au-delà des berges.(Vinet, 2000). A l'inverse, les sources ponctuelles en eau ne produisent pas assez de vapeur d'eau pour refroidir l'espace. Ce propos est cependant à nuancer avec le développement de technique de brumisation et jet d'eau que nous détaillerons par la suite (Ibid).

En reprenant l'exemple de Stuttgart, on observe également la prise en compte de l'eau en tant qu'élément de rafraîchissement (Rehan, 2016). En effet, la région s'est dotée de plusieurs fontaines à jets qui, placées dans des endroits stratégiques, bénéficient de courants d'air qui peuvent ainsi transporter l'humidité formée. La région possède également des lacs visibles au sein du parc de Rosenstein.

### 3.2.2 Innovations techniques et technologiques : une gestion de l'eau revisitée

Le scénario bleu de la ZAC de Toulouse Aerospace quant à lui repose sur l'implantation de deux grandes fontaines d'eau au niveau d'un couloir de ventilation permettant l'extension de l'îlot de fraîcheur.

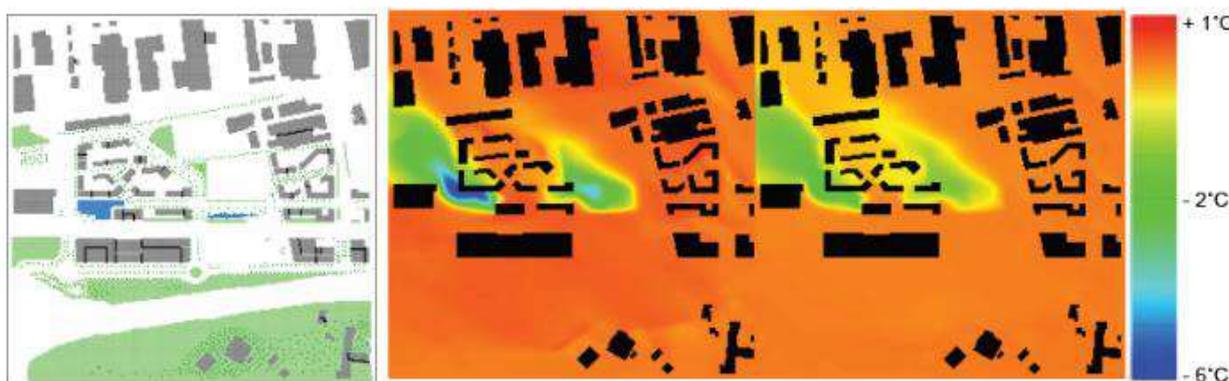


Figure 46 : Plan de la variante "bleue" (gauche) et cartes de distribution spatiale de l'écart de température de l'air entre le scénario "bleu" et le projet initial, jour (milieu) et nuit (droite)

Source : Bonhomme, 2015

On remarque sur les cartes thermiques (Figure 46) une baisse de la température. Cependant, celle-ci n'est pas aussi étendue que pour le scénario vert. En effet, on observe la présence d'un îlot de fraîcheur uniquement à proximité des fontaines et cela engendre un rafraîchissement limité à l'échelle de la place. On notera cependant que la diminution de la température est beaucoup plus conséquente à cet endroit-là. On observe jusqu'à 6°C de différence (Bonhomme, 2015).

Si l'on s'intéresse maintenant au trajet et au confort thermique du piéton (Figure 47, 48), on remarque une très légère diminution de la température. En effet, nous avons pu le voir précédemment, ces aménagements possèdent principalement un impact local (Vinet, 2000). Il est cependant intéressant de noter que la mise en place d'un bassin au sein d'un couloir venteux permet de propager la fraîcheur de la place centrale jusqu'à la gare et peut aller jusqu'à 3°C (Bonhomme, 2015).

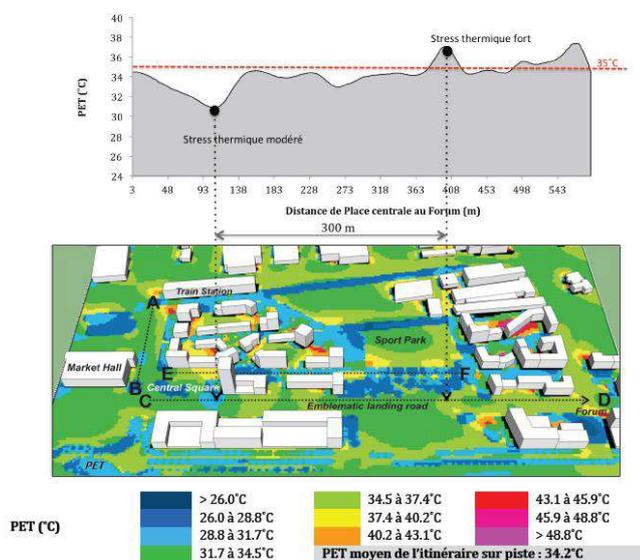


Figure 48 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario de base

Source : Bonhomme 2015

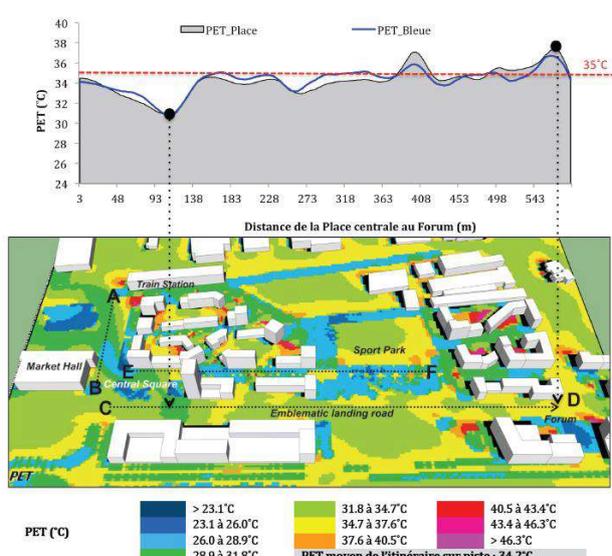


Figure 47 : Graphique et carte de température physiologique équivalente (PET) pour le scénario « Bleu »

Source : Bonhomme 2015

Au-delà de ces scénarios, la ZAC de Toulouse Aerospace a développé d'autres types d'aménagements permettant d'atténuer les îlots de chaleur.

Tout d'abord, le quartier disposera d'un système de gestion des eaux pluviales (Figure 49) relativement performant. En effet, en raison d'une pente presque nulle et d'un sol compact, l'aménagement de bassins de rétention associés à des noues favorisera la récupération des eaux de ruissellement et notamment celles des toitures (Bonhomme, 2015). Cela permettra le drainage et l'infiltration de l'eau dans les nappes phréatiques provoquant une meilleure évapotranspiration à l'échelle du quartier. Le site sera constitué de 11 bassins de stockage reliés à des bassins de captation par des noues. L'objectif est de pouvoir réguler une pluie trentennale pendant 24 heures. En cas d'épisode pluvieux plus intense, les eaux seront dirigées vers des bassins en mesure de contenir une pluie centennale (Bonhomme, 2015).

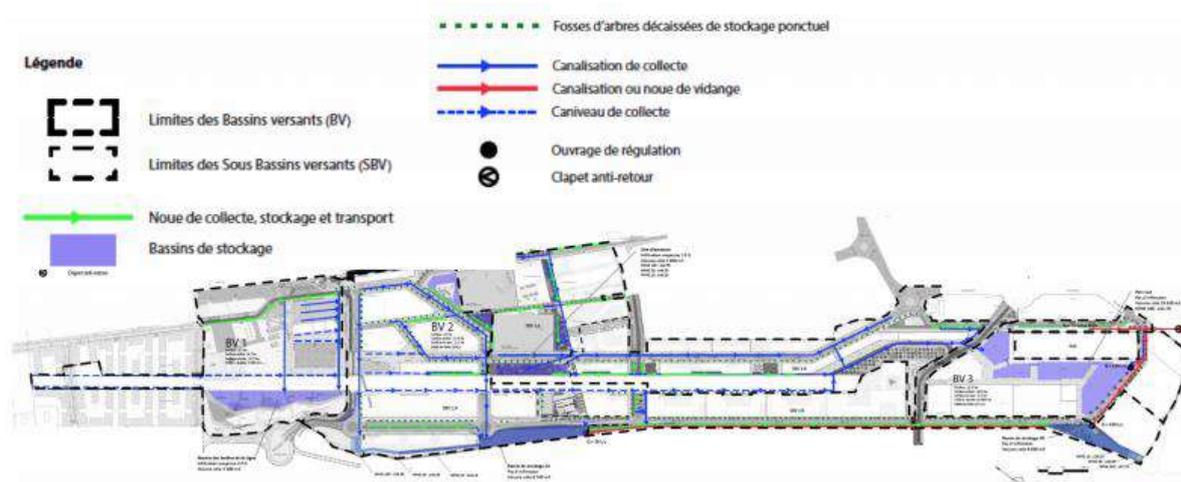


Figure 49 : Plan d'aménagement des espaces d'infiltration et récupération des eaux dans la ZAC  
Source : Bonhomme, 2015

Ensuite, l'élaboration de pavés rafraichissants (Figure 50) peut être définie comme un processus technique innovant en termes de gestion de l'eau. Ceux-ci sont actuellement en phase de test au sein du quartier. Ces pavés combinent deux systèmes. Dans un premier temps, ils permettent de filtrer l'eau polluée à travers des grilles et filtres. Dans un second temps, l'eau filtrée est stockée dans un bassin souterrain, puis réacheminée jusqu'aux pavés desquelles elle s'évapore ensuite (cités 2018).

Encore en expérimentation, les pavés sont testés aux abords d'un immeuble. Les chercheurs testent maintenant le degré d'évaporation en fonction de la vitesse du vent, de la température de l'air, de l'ensoleillement, etc...

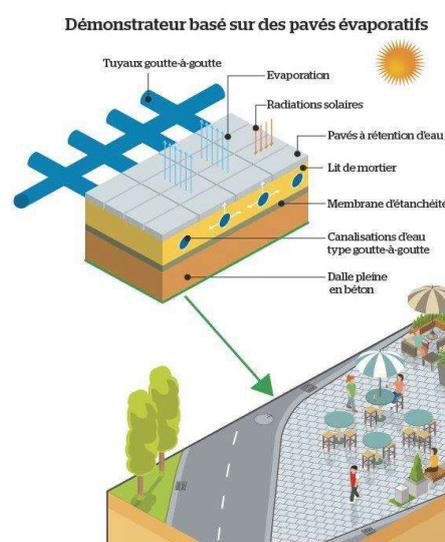


Figure 50 : Schématisation des pavés évaporatifs  
Source : cités 2018

Cette dernière partie nous a permis d'observer dans quelle mesure l'utilisation de l'eau et de la végétalisation peuvent être effectives en tant qu'élément d'atténuation de l'îlot de chaleur.

La ville de Stuttgart a mis en place un important programme de préservation des espaces végétalisés. En effet, couplé au mécanisme de ventilation urbaine, ces deux leviers d'action semblent à la fois jouer sur la réduction de l'îlot de chaleur ainsi que sur la qualité de l'air. A l'échelle de Stuttgart, cela se traduit par un maillage végétal fort qui peut se retrouver sous forme de parcs, alignements d'arbres ou encore toitures végétales. La gestion de l'eau est également à l'œuvre, avec une importance limitée cependant. Bien que l'on retrouve la présence de fontaines et de rivières, celles-ci sont peu mises en avant concernant les îlots de chaleur.

Le quartier de Toulouse Montaudran Aerospace quant à lui a également choisi de mettre en avant la biodiversité végétale. Le scénario vert nous indique notamment un effet d'îlot de chaleur réduit comparé au scénario de base. Il est possible d'aller plus loin grâce à la végétalisation. En effet, l'agencement des essences peut également avoir un impact significatif. La gestion de l'eau est également importante au sein du projet. Bien que le scénario bleu paraisse peu efficace la gestion des eaux de ruissellement et la mise en place de pavés refroidissants est déterminante. En effet, l'objectif de ces installations en zone urbaine est de pallier à l'imperméabilisation des sols via la formation du phénomène d'évapotranspiration.

## CONCLUSION

A travers ce mémoire, nous avons souhaité mettre en évidence la manière dont la climatologie urbaine est prise en compte au sein de projets d'aménagement. En effet, de nombreuses études sont déjà existantes quant aux variabilités climatiques d'un lieu ainsi que lors de la mise en place d'une étude d'impact. Ces phénomènes sont cependant mal interprétés par les aménageurs.

Face à l'intensification du phénomène d'îlot de chaleur, l'intégration de ce type de microclimat urbain devient nécessaire lors de la conception paysagère et urbaine. La mise en place de projets d'aménagement tel que Stuttgart et Toulouse Montaudran Aerospace correspond cependant aux prémices d'une prise de conscience de ce contexte de surchauffe urbaine.

Ainsi, la stratégie de développement de la ville de Stuttgart autour de la notion de ventilation urbaine et de trames vertes a permis l'émergence de « the coolest city » grâce à l'aération de la ville. Cette planification a pu être mise en place suite à la collaboration de climatologue, architectes, paysagistes, etc... et la création d'un atlas climatique compréhensible et utilisable par tous.

La stratégie du quartier de Toulouse Montaudran Aerospace quant à elle repose sur une modélisation préalable de différents scénarios d'aménagement. Axé sur quatre thématiques principales, ces scénarios nous permettent d'analyser et de proposer le meilleur aménagement possible. Aussi intéressante que soit cette initiative, une modélisation de diverses propositions pour chaque scénario aurait été intéressante.

Le rafraîchissement des espaces peut donc être provoqué par différents paramètres ayant une influence négative sur la formation d'îlots de chaleur. On retrouve notamment la morphologie du tissu urbain, le vent, les revêtements, la végétation ainsi que l'eau. Le tableau suivant résume les différents éléments sur lesquels les aménageurs, et plus précisément, les paysagistes peuvent agir :

	VILLE / PLANIFICATION	QUARTIER
FORME URBAINE ET ECOULEMENTS D'AIR	Réduire les émissions de chaleur anthropique.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Accroître la diversité et desserte des transports collectifs</li> <li>- Privilégier les modes doux</li> <li>- Réduire l'utilisation de la climatisation grâce à une climatisation passive</li> </ul>
	Favoriser la dissipation de la chaleur par le vent et le refroidissement radiatif. Limiter l'absorption, l'émission et le stockage d'énergie solaire dans les matériaux.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Orienter les rues par rapport aux vents dominants d'été</li> <li>- Contrôler le ratio H/L pour éviter le phénomène de rue canyon et contrôler la densité bâtie</li> <li>- Matériaux clairs et réfléchissants</li> </ul>
	Protéger les rues et les espaces publics du soleil en été.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inclure des dispositifs d'ombrage urbains et architecturaux : arcades, auvents, parasols, pergolas, etc</li> <li>- Orienter les rues afin que les bâtiments voient le sud</li> </ul>
VEGETALISATION ET GESTION DE L'EAU	Favoriser l'infiltration des eaux pluviales et le maintien d'humidité dans le sol.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Matériaux perméables, poreux, chaussées végétalisées</li> </ul>
	Préserver et ajouter des arbres et plantes grimpantes pour protéger les surfaces du soleil.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bois, parcs, arbres d'alignement, forêt urbaine</li> <li>- Murs et toitures végétales</li> </ul>
	Créer des îlots de fraîcheur à l'aide d'espaces en eau et d'espaces végétalisés afin d'abaisser la température de l'air. Augmenter le ratio d'espaces verts.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Murs et toitures végétales</li> <li>- Bois, parcs, arbres d'alignement, forêt urbaine</li> <li>- Jardins, cours d'eau, jeux d'eau, bassins et fossés de rétention</li> </ul>

**Figure 51 : Récapitulatif des éléments jouant sur l'intensité des îlots de chaleur et pouvant être pris compte par les aménageurs**  
*Source : Raute, 2019 d'après Dubois, 2014*

La littérature scientifique est extrêmement riche lorsque l'on traite d'îlot de chaleur. Cependant, on remarque actuellement peu de projets réellement axés sur un développement climatique résilient. En effet, de nombreuses expérimentations sont en cours, mais celles-ci peinent à sortir de terre. Une prise de conscience mais surtout une sensibilisation des professionnels et citoyens serait donc une nouvelle étape. Face à ces nouvelles vagues de chaleur et plus largement au changement climatique, il sera nécessaire de repenser quelque peu nos modes de vie et nos façons d'habiter un territoire.

## BIBLIOGRAPHIE

### Articles de revue

- Avisar R. (1996). Potential Effects of Vegetation on the Urban Thermal Environment. *Atmospheric Environment*, 30, p437-48.
- Berardi U. et Yupeng W. (2016). The Effect of a Denser City over the Urban Microclimate: The Case of Toronto. *Sustainability*, 8, p822.
- Besancenot J. (2002) Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. *Environnement, risques et santé*, 1, p229-240.
- Cantat O. (2004). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois: Environnement, aménagement, société*, 191, p75-102.
- Rohinton E. et Steemers K. (2018). Connecting the realms of urban form, density and microclimate. *Building Research & Information*, 8, p804-808.
- Givoni B. (1991). Impact of Planted Areas on Urban Environmental Quality: A Review. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25, p289-99.
- Levy A. (2005). Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et sociétés*, 122, p25-48.
- Xiaochen L. et Sweeney J. (2012). Modelling the Impact of Urban Form on Household Energy Demand and Related CO2 Emissions in the Greater Dublin Region. *Energy Policy*, 46, p359-69.
- Makido Y. Hellman D. Shandas V. (2019). Nature-Based Designs to Mitigate Urban Heat: The Efficacy of Green Infrastructure Treatments in Portland, Oregon. *Atmosphere*, 10, p282.
- Martilli A. (2014). An Idealized Study of City Structure, Urban Climate, Energy Consumption, and Air Quality. *Urban Climate*, 10, p430-46.
- Morini E. Touchaei A. Beatrice C. Rossi F. Cotana F. (2016). The Impact of Albedo Increase to Mitigate the Urban Heat Island in Terni (Italy) Using the WRF Model. *Sustainability*, 8, p999.
- Oke, T.R. (1987). *Boundary Layer Climates*. London: Routledge, 435, p333.
- Oke, T.R. (1998) Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 1, p103-113.
- O'Malley C. Piroozfar P. Farr E. et Pomponi E. (2015). Urban Heat Island (UHI) Mitigating Strategies: A Case-Based Comparative Analysis. *Sustainable Cities and Society*, 19, p222-35.
- Rehan R-M. (2016). Cool city as a sustainable example of heat island management case study of the coolest city in the world. *HBRC Journal*, 12, p191-204.
- Ren C. Ng E. et Katzschner L. (2011). Urban Climatic Map Studies: A Review. *International Journal of Climatology*, 31, p2213-2233.
- Salata F. Golasi I. De Lieto Vollaro A. et De Lieto Vollaro R. (2015). How high albedo and traditional buildings' materials and vegetation affect the quality of urban microclimate. A case study. *Energy and Buildings* 99, p32-49.

### Thèses

- Achour-Bouakkaz N. (2006). La Relation entre l'îlot de chaleur urbain, phénomène du changement climatique et la densité du plan bâti : cas de la ville d'Alger. DU Magister Aménagement du territoire, Université d'Alger, Alger, 149p.
- Athamena K. (2012). Modélisation et simulation des microclimats urbains: Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers. Doctorat ambiances architecturales et urbaines, Université de Nantes, Nantes, 318p.

- Chavaillaz Y. (2016). La vitesse du changement climatique et ses implications sur la perception des générations futures. Doctorat Océan, atmosphère, climat et observations spatiales, Université Paris-Saclay, Paris-Saclay, 274p.
- Colombert M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Doctorat Génie urbain, Université Paris-Est, Paris, 541p.
- Daniel M. (2017). Villes, climat urbain et climat régional sur la France: étude par une approche de modélisation climatique couplée. Doctorat Océan, atmosphère et surfaces continentales, Université de Toulouse 3, Toulouse, 2019p.
- Dubois C. (2014). Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique; Une feuille de route pour accompagner les architectes et les designers urbains québécois. Doctorat Génie civil, INSA Toulouse, Toulouse, 278p.
- Foissard X. (2014). L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique: application à l'agglomération rennaise. Doctorat Sciences humaines et sociales mention géographie, Université Rennes 2, Rennes, 248p.
- Geglo P. (2014). La densification du tissu urbain à l'initiative des collectivités territoriales: des communes du sud de la France mises à l'épreuve. Spécialité Urbanisme et Projet Urbain, Université Pierre Mendès France, Grenoble, 114p.
- Le Bras J. (2015). Le microclimat urbain à haute résolution: mesures et modélisation. Doctorat Océan, atmosphère et surfaces continentales, Université de Toulouse 3, Toulouse, 230p.
- Leconte F. (2014). Caractérisation des îlots de chaleur urbains par zonage climatique et mesures mobiles: Cas de Nancy. Doctorat science du bois et des fibres, Université de Lorraine, Nancy, 274p.
- Tsoka S. (2011). Relations entre morphologie urbaine, microclimat et confort des piétons: application au cas des écoquartiers. Doctorat ambiances et formes urbaines, Centrale Nantes, Nantes, 146p.
- Vinet J. (2000). Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain: Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Doctorat science pour l'ingénieur option architecture, Polytechnique Nantes, Nantes, 251p.

## Rapport

- Bonhomme, M. et al. Ilots de fraîcheur urbains. Toulouse: LRA, 2015. p105. Rapport n°1
- Cavayas F. et Y Baudouin. Évolution des occupations du sol, du couvert végétal et des îlots de chaleur sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal (1984-2005). Montréal (Ca): CRE, 2008. p120. Rapport n°1
- Hebbert, H. et Webb, B. Towards a Liveable Urban Climate - Lessons from Stuttgart. Stuttgart (AI) : ISOCARP, 2012. p19. Rapport n°8
- Béchet B. (coord.), Le Bissonnais Y. (coord.), Ruas A. (coord.), Aguilera A., André M., Andrieu H., Ay J.-S., Baumont C., Barbe E., Beaudet-Vidal L., Belton-Chevallier L., Berthier E., Billet Ph., Bonin O., Cavailhès J., Chancibault K., Cohen M., Coisson T., Colas R., Cornu S., Cortet J., Dablanç L., Darly S., Delolme C., Fack G., Fromin N., Gadal S., Gauvreau B., Géniaux G., Gilli F., Guelton S., Guérois M., Hedde M., Houet T., Humbertclaude S. (expert technique), Jolivet L., Keller C., Le Berre I., Madec P. (expert technique), Mallet C., Marty P., Mering C., Musy M., Oueslati W., Paty S., Polèse M., Pumain D., Puissant A., Riou S., Rodriguez F., Ruban V., Salanié J., Schwartz C., Sotura A., Thébert M., Thévenin T., Thisse J., Vergnès A., Weber C., Werey C., Desrousseaux M. Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols, Déterminants, impacts et leviers d'action. (Fr) : INRA, 2017. p609. Rapport n°1.

## Communication lors d'un colloque

- Ketterer C. et Matzarakis A. (2012). Development and application of assessment methods for thermal bioclimate conditions in Stuttgart. In ICUC8 – 8th International Conference on Urban Climates, Dublin (Ir), 6th-10th August 2012, p5.
- Ng E. (2009). *Urban Climatic Studies for hot and humid tropical coastal city of Hong Kong*. In The seventh International Conference on Urban Climate, Yokohama (Jp), June 29 - July 3 2009, 4p.

## Sitographie

- [1] Weber et Hirsch (2000). Processus de croissance et limites urbaines. *Cybergeo : European Journal of Geography*. [En ligne], Dossiers, document 158, <http://journals.openedition.org/cybergeo/716> (consulté le 24/09/19)
- [2] Météo France (2018). Réchauffement climatique et vagues de chaleur, canicules - Météo-France. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/impacts-du-changement-climatique-sur-les-phenomenes-hydrometeorologiques/changement-climatique-et-canicules>. (consulté le 23/08/2019)
- [3] Colombert Salagnac Morand et Diab (2012). Le climat et la ville : la nécessité d'une recherche croisant les disciplines. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne]. Hors-série 12 | mai 2012. <http://journals.openedition.org/vertigo/11811>. (consulté le 24 septembre 2019).
- [4] Wikisource (2019). Rapport du GIEC : Réchauffement climatique de 1,5°C. [https://fr.wikisource.org/wiki/Rapport\\_du\\_GIEC:\\_R%C3%A9chauffement\\_climatique\\_de\\_1,5%C2%B0C](https://fr.wikisource.org/wiki/Rapport_du_GIEC:_R%C3%A9chauffement_climatique_de_1,5%C2%B0C). (consulté le 23/08/2019)
- [5] Météo France (2018). Rapport spécial 2018 du GIEC. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-giec-groupe-dexperts-intergouvernemental-sur-levolution-du-climat/rapport-special-2018-du-giec>. (consulté le 23/08/2019)
- [6] Météo France (2018). Canicule, forte chaleur : définition, historique, dangers. MétéoFrance. 2018. <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/meteo-et-sante/canicules>. (consulté le 23/08/2019)
- [7] DDT (2016). Qu'est ce que l'aménagement durable ? [http://www.maine-et-loire.gouv.fr/IMG/pdf/AD\\_-\\_VF.pdf](http://www.maine-et-loire.gouv.fr/IMG/pdf/AD_-_VF.pdf). (consulté le 23/08/2019)
- [8] *Wikipédia* (2019). Stuttgart. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Stuttgart&oldid=160598218>. (consulté le 18/08/2019)
- [9] Climate-adapt (2010). Combating heat island and poor air quality with green aeration corridors. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/case-studies/stuttgart-combating-the-heat-island-effect-and-poor-air-quality-with-green-ventilation-corridors>. (consulté le 25/08/2019)
- [10] Staedtebauliche-klimafibel (2012). Klimafibel. <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/?p=61&p2=5.8>. (consulté le 24/08/2019)
- [11] Toulouseaerospace (2019). Home | Aerospace. <http://www.toulouseaerospace.com/fr>. (consulté le 25/08/2019)
- [12] Staedtebauliche-klimafibel I (2012a). Klimafibel. <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/?p=61&p2=5.8>. (consulté le 24/08/2019)

	Diplôme : Ingénieur paysagiste Spécialité : Paysage Spécialisation / option : Projet de paysage sites et territoire (PPST) Enseignant référent : Elise Geisler
Auteur(s) : Coline RAUTE Date de naissance* : 15/11/1994	Organisme d'accueil : Atelier UP+ Adresse : 128 Avenue de Fes 34000 MONTPELLIER
Nb pages : 41                      Annexe(s) : 0	Maître de stage : Stéphane Dubourg
Année de soutenance : 2019	
Titre français : De la théorie à la pratique : Comment le climat urbain est-il pris en compte dans les projets d'aménagement paysagers et urbains dans un contexte de changement climatique Titre anglais : From theory to practice : How urban climate is consider in landscape and urban design ?	
Résumé (1600 caractères maximum) : Face à l'intensification du phénomène d'îlot de chaleur, la prise en compte du climat urbain au sein des projets d'aménagement devient nécessaire. En effet, le dialogue entre scientifiques en charge de l'étude du climat et les aménageurs s'avère difficile. Face à ce constat, nous pouvons nous demander quels sont les aspects les plus marqués du changement climatique en milieu urbain ? Comment caractériser et comprendre les mécanismes et impacts du phénomène d'îlots de chaleur ? Quelles sont les stratégies mises en place afin de réguler la température des villes ? L'objectif de ce mémoire est de proposer une présentation accessible des phénomènes à l'origine des îlots de chaleur mais également d'analyser des projets s'étant appuyés sur l'étude du climat. L'étude préalable des îlots de chaleur permettra alors d'avoir les outils nécessaires à la compréhension de stratégies mise en place au sein de la ville de Stuttgart et du quartier de Toulouse Montaudran Aerospace.	
Abstract (1600 caractères maximum) : Faced with the intensification of the urban heat island phenomenon, it is necessary consider the urban climate within development projects. Indeed, the dialogue between scientists in charge of climate study and planners is quite difficult. In this context, we can ask ourselves what are the most significant aspects of climate change in urban areas? How to characterize and understand the mechanisms and impacts of the urban heat island phenomenon? What strategies are in place to regulate city temperatures? The objective of this report is to propose an accessible presentation of urban heat islands but also to analyses projects that have been based on climate studies. The preliminary study of the heat islands will then provide the necessary tools to understand the strategies implemented in the city of Stuttgart and the Toulouse Montaudran Aerospace district.	
Mots-clés : îlot de chaleur urbain, conception, études climatiques, végétalisation Key Words: urban heat island, design, climate studies, revegetation	