Université de Caen-Normandie
UFR des Sciences

- Mention AETPF : Agrosciences, Environnement, Territoires, Paysages, Forêt
- Master 2 ECOCAEN « Gestion et valorisation agri-environnementales »

PAUL SIMEON

« Caractérisation du phénomène d'Îlot de Chaleur Urbain (ICU), méthodologies d'identification et effets d'une renaturation urbaine»

https://up-magazine.info/urbanisme-architecture-paysages

2020-2021

Sommaire

Abréviations……3

I) Le milieu urbain dans le contexte du réchauffement climatique……...5

1) Introduction……..5

2) Le phénomène d'ICU……...7

II) Les variables explicatives du phénomène d'ICU……..….9

1) Caractéristiques et propriétés des matériaux de l'environnement urbain……..…..9

1.1) L'inertie thermique des matériaux……....9

1.2) L'albédo des matériaux…….9

2) Structure urbaine et transferts de chaleur……...11

2.1) Impacts sur les écoulements d'air……...11

2.2) Modification du phénomène d'évapotranspiration……11

3) Les apports de chaleur d'origine anthropique……13

III) Méthodologies d'identification des ICU……..13

1) Inventaire des outils et des méthodologies……15

2) Le système de classification LCZ : une méthode standardisée……..17

2.1) Les indicateurs urbains……17

2.2) Application du système LCZ……...19

IV) La renaturation urbaine……...……23

1) Le concept d'infrastructure naturelle (IN)…….....25

2) La biodiversité en ville……...25

3) Rôles de l'arbre en milieu urbain ……..27

3.1) La densité de plantation : un critère à respecter pour lutter contre les ICU……27

3.2) Choix et diversité des essences d'arbre en milieu urbain…….…...27

4) Les toitures végétalisées ou toitures vertes……29

4.1) Les différents types de toitures végétalisées……...31

4.2) Conception et mise en œuvre d'une toiture végétalisée……..……31

4.3) Les avantages des toitures végétalisées……..33

V) Conclusion…….……..35

Références bibliographiques……...……....37

Abréviations

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

ICU : Îlots de Chaleur Urbains

IGN : Institut Géographique National

IN : Infrastructures Naturelles

IR : Rayonnement Infrarouge

LCZ : Local Climat Zones

MNE : Modèle Numérique d'Elévation

Qgis :Quantum geographic information system

RA: Rapport d'Aspect

RNSA : Réseau National de Surveillance Aérobiologique

SE : Services Ecosystémiques

SIG : Systèmes d'Information Géographiques

SVF : Sky View Factor

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

° C : degrés Celsius

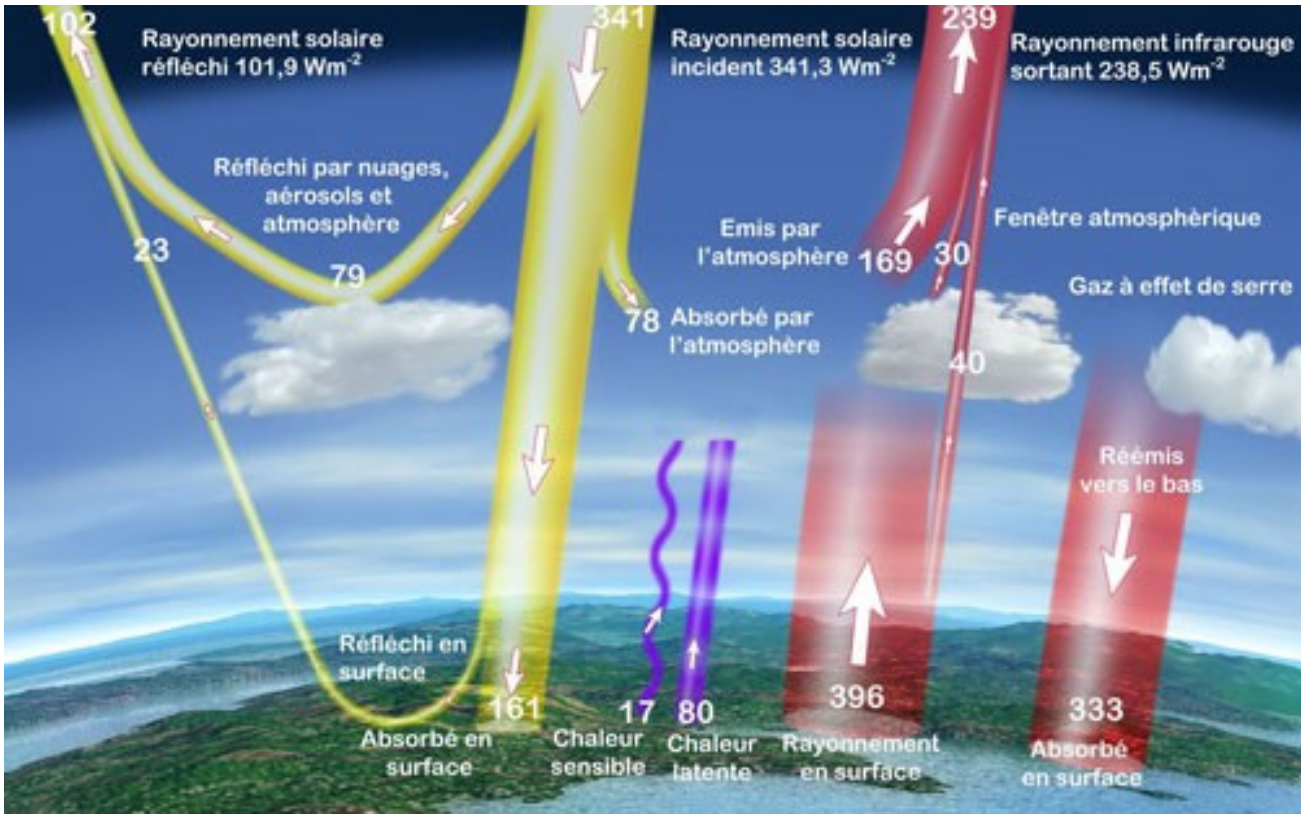


Figure. 1 : Représentation schématique des composantes de l'effet de serre. Les gaz à effet de serre (GES) sont transparents au rayonnement solaire et opaques au rayonnement infrarouge émis par la planète. La chaleur est ainsi piégée (http://www.meteofrance.fr/).

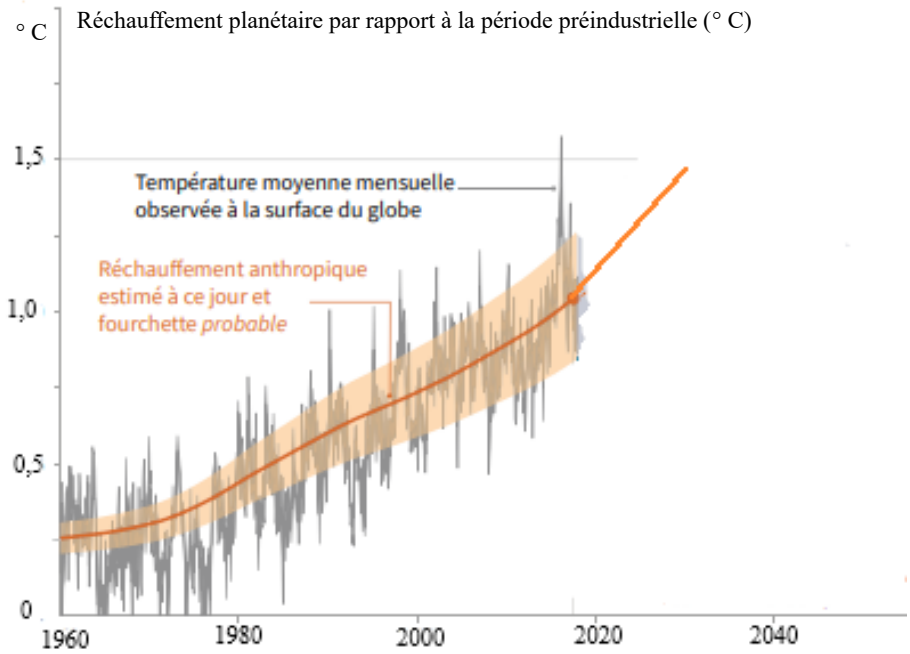


Figure. 2 : Courbe du réchauffement climatique d'origine anthropique estimé depuis la période préindustrielle et son évolution future selon les modèles prédictifs du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, 2019).

I) Le milieu urbain dans le contexte du réchauffement climatique

1) Introduction

L'expansion des activités anthropiques a conduit à une augmentation sans précédent de la consommation mondiale d'énergie, et a engendré de graves problèmes environnementaux à l'instar du réchauffement climatique (Qiao *et al*, 2019). Le réchauffement climatique est défini comme toute augmentation de la température moyenne à la surface du globe, s'ajoutant ainsi au réchauffement de 33 degrés Celsius (° C) provenant de l'effet de serre naturel (Thornes & Pope, 2014). L'effet de serre est un phénomène naturel engendrant une élévation des températures moyennes terrestres. Le principe est simple : les deux tiers de l'énergie solaire sont absorbés par l'atmosphère et la surface de la terre (sols et océans), le tiers restant est réfléchi vers l'espace. En retour de l'absorption énergétique, l'atmosphère et la surface terrestre émettent un rayonnement infrarouge (IR) absorbé par les nuages et les gaz à effet de serre (GES) tels que la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O), (Fig.1) (http://www.meteofrance.fr). Ainsi, la quantité de GES augmente la capacité de l'atmosphère à absorber les IR et donc la température (Valette & Cordeau, 2010). C'est depuis la révolution industrielle (XIXe siècle), que l'Homme a amplifié considérablement la quantité GES présents dans l'atmosphère, perturbant l'équilibre naturel des éléments (Anderson *et al*, 2016). Ces modifications engendrent un effet de serre d'origine anthropique s'additionnant à l'effet de serre naturel, qui est à l'origine du changement climatique (http://www.meteofrance.fr).

A l'heure actuelle, selon les estimations du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), les activités anthropiques ont provoqué un réchauffement planétaire estimé à environ 1 °C. De plus, d'après les modèles prédictifs établis, il est probable que la tendance de cette élévation de la température continue de progresser pour atteindre 1,5°C dans les décennies à venir (Fig.2) (GIEC, 2019).

Les systèmes urbains sont les principaux responsables des déséquilibres planétaires dans la mesure où ils sont responsables de 60 à 80% des émissions de GES et qu'ils représentent près de 75% de la consommation d'énergie mondiale (Terrin & Marie, 2015). Le réchauffement climatique devrait entraîner une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes tels que les vagues de chaleur, les fortes pluies, les inondations et les sécheresses (Guilyardi *et al*, 2019). Parallèlement, les milieux bâtis, urbains et périurbains sont particulièrement vulnérables aux conséquences du réchauffement climatique (Simard *et al*, 2019). Ainsi, l'impact du réchauffement climatique et particulièrement la hausse des températures dans les milieux urbains ont pris aujourd'hui des proportions qui inquiètent les scientifiques du monde entier et particulièrement les

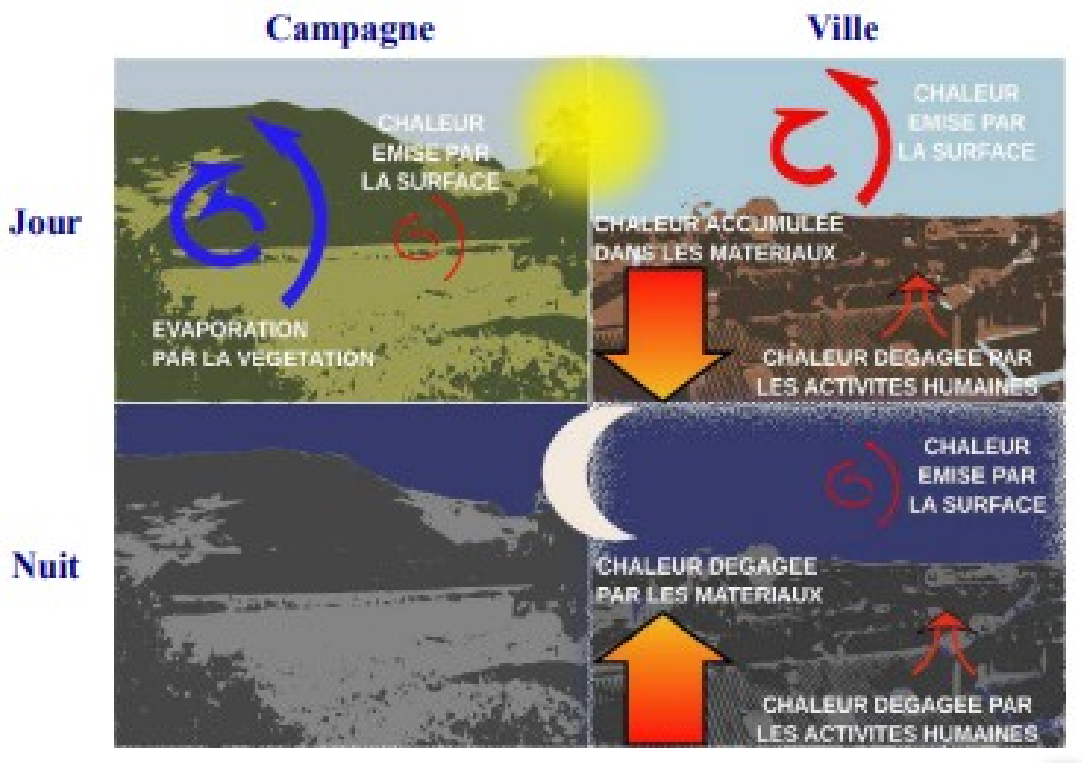


Figure. 3 : Schéma illustrant la différence de bilan d'énergétique entre la campagne et la ville le jour et la nuit (EPICEA, 2012).

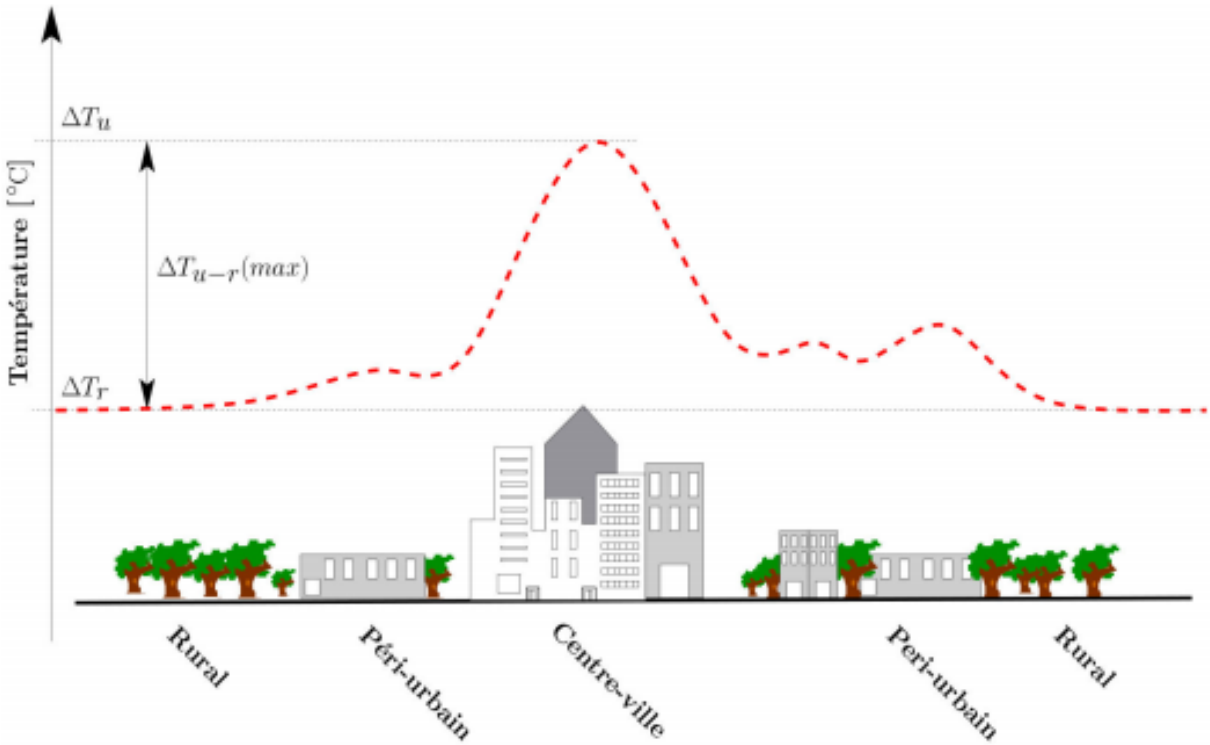


Figure. 4 : Représentation schématique du phénomène d'Îlot de Chaleur Urbain (ICU) illustrant les écarts de température entre une zone urbaine et les zones rurales environnantes, avec **Tu** : la **T**empérature **u**rbaine et **Tr** la **T**empérature en milieu **r**ural (Leconte, 2014).

climatologues. L'alerte est donc lancée à l'échelle mondiale auprès des décideurs politiques et des professionnels de l'urbanisme sur la nécessité de repenser les caractéristiques urbaines en fonction des enjeux actuels (Terrin & Marie, 2015). La vulnérabilité des villes aux vagues de chaleur est accentuée par la présence du phénomène d'Îlot de Chaleur Urbain (ICU). Ce terme fait référence aux variations de température existant entre le centre d'une agglomération et les zones non urbanisées alentours. Ce phénomène climatique entraîne de nombreuses conséquences sur l'environnement urbain (Leconte, 2014).

Cette analyse bibliographique vise à présenter le phénomène d'ICU, et à identifier les enjeux et les propriétés urbaines à l'origine de leur formation. Les différentes méthodologies permettant d'identifier les zones sujettes aux ICU ainsi que les moyens d'y remédier au travers d'une réflexion sur la renaturation urbaine seront également considérés.

2) Le phénomène d'ICU

L'impact des villes sur le climat est constaté à des échelles fines, traduisant une altération des modes d'occupation des sols et une modification des échanges thermodynamiques entre la surface et l'atmosphère (Daniel, 2017). En milieu urbain, l'imperméabilisation des surfaces et les différentes composantes de la ville engendrent une modification locale du climat (Fig. 3),(EPICEA, 2012). Ce phénomène climatique est appelé ICU et se traduit par une élévation des températures en centre-ville par rapport à la périphérie (Fig. 4), (Leconte, 2014). L'effet des ICU est particulièrement marqué lors des minima de température la nuit où l'écart entre le centre-ville et la périphérie peut atteindre 16° C (Cerema, 2019).

Ce phénomène engendre de nombreuses conséquences sur l'environnement urbain. En effet, la hausse des températures moyennes journalières affecte la consommation énergétique estivale des bâtiments ainsi que le confort thermique des riverains (Leconte, 2014). En conséquence, les ICU accentuent les répercutions d'un épisode caniculaire et peuvent être responsable d'une surmortalité (Foissard, 2015). En effet, lors de la canicule de 2003, la surmortalité a été de 40 % plus élevée dans les petites et moyennes villes, 80 % plus élevée à Lyon, et 141 % plus élevée à Paris que dans le reste de la France (Vandentorren *et al*, 2004). Le phénomène d'ICU doit être pris en compte dans les plans d'aménagement afin de protéger les personnes fragiles et d'améliorer la consommation énergétique des villes pour réduire les émissions de GES.

Afin de pouvoir lutter contre les ICU, il est nécessaire de comprendre le phénomène et notamment d'avoir connaissance des caractéristiques urbaines qui participent à sa formation.

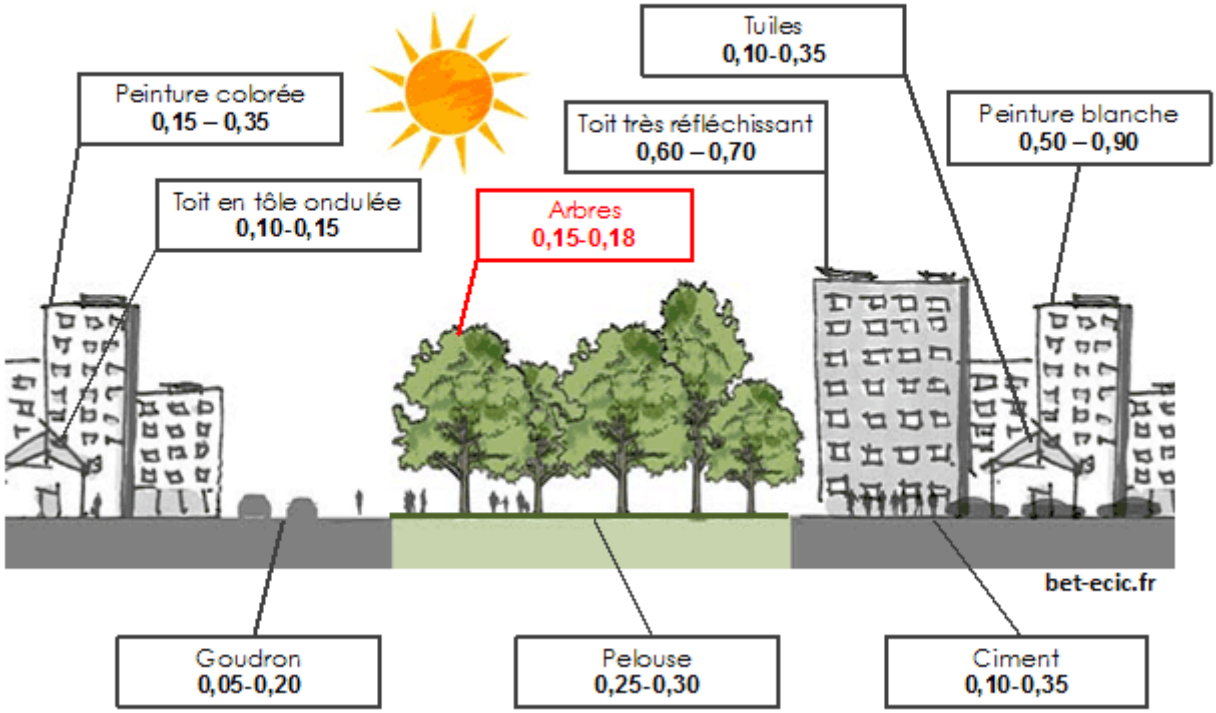


Figure. 5 : Représentation schématique illustrant l'albédo de plusieurs matériaux de l'environnement urbain (Colombert, 2008).

La compréhension du phénomène d'ICU permettra aux professionnels de l'aménagement urbain de le prendre en compte lors des futurs projets d'urbanisme.

II) Les variables explicative du phénomène d'ICU

L'existence d'un climat urbain découle de la façon dont l'environnement urbain répartit l'énergie disponible. La formation d'ICU est facilitée par différents paramètres inhérents au milieu urbain tels que la structure urbaine, les caractéristiques des revêtements et la concentration des activités humaines (Phillips *et al*, 2017).

1) Caractéristiques et propriétés des matériaux de l'environnement urbain

Le milieu urbain stocke plus de chaleur que la campagne. En cause, la propriété des matériaux qui composent les bâtiments, les infrastructures et les revêtements. En effet, les caractéristiques thermiques et radiatives des matériaux de construction sont souvent propices au stockage de la chaleur issue du rayonnement solaire en journée et à une restitution pendant la nuit (Bernard et al, 2020). La prise en compte de l'inertie thermique et de l'albédo est essentielle pour comprendre le comportement des matériaux urbains vis à vis de la chaleur (Leconte, 2014).

1.1) L'inertie thermique des matériaux

L'inertie thermique est définie comme la capacité d'un matériau à accumuler puis à restituer un flux thermique, c'est à dire de la chaleur. (Valette & Cordeau, 2010). La capacité des matériaux à restituer la chaleur est l'élément principal intervenant dans la formation des ICU. En effet, les matériaux utilisés pour la construction ont une inertie thermique bien plus grande qu'un sol naturel nu ou végétalisé (Greuillet & Galsomiès, 2013). Pour exemple, le béton à une capacité thermique comprise entre 2400 et 2640 KJ/m^3 .°C alors que celle de la terre nue et sèche est de 1350 KJ/m^3 .°C (Valette & Cordeau, 2010).

1.2) L'albédo des matériaux

L'albédo désigne l'indice de réfléchissement d'une surface, c'est à dire le rapport entre l'énergie reçue et l'énergie réfléchie. Il s'exprime selon un gradient de 0 à 1, où 1 correspond à une surface qui réfléchie 100% de l'énergie reçue et 0 une surface qui absorbe la totalité de l'énergie reçue. En transposant ce paramètre aux matériaux urbains, l'albédo détermine leur capacité d'absorption ou de réflexion de l'énergie reçue et ainsi leur température. Un matériau à faible albédo absorbe davantage d'énergie et sa température de surface sera alors plus élevée (Valette & Cordeau, 2010). L'albédo d'un matériau est fonction de sa couleur, de sa texture et de sa porosité. En ville l'albédo des matériaux utilisés semble très diversifié (Fig.5), (Colombert, 2008).

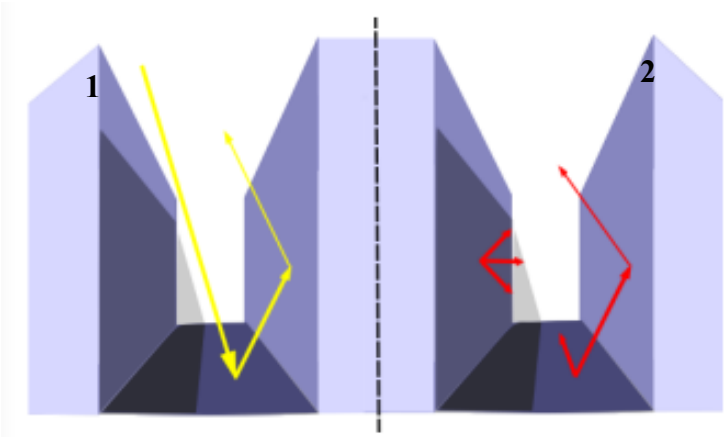


Figure. 6 : Représentation schématique de l'absorption et de la réflexion du rayonnement solaire (en **1**) et du rayonnement infrarouge (en **2**) en ville (Valette & Cordeau, 2010).

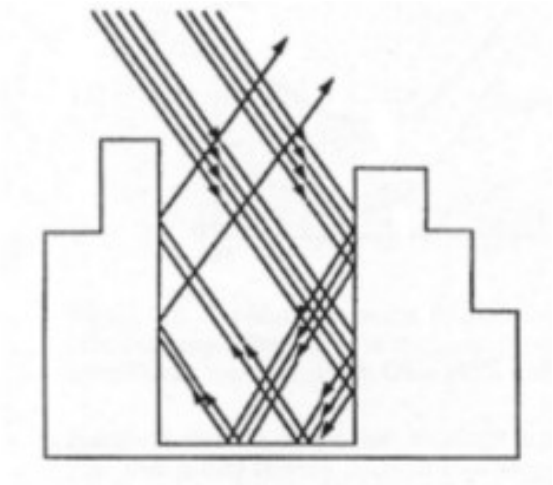


Figure. 7: Illustration du phénomène de piégeage radiatif dans le cas d'une rue canyon (Leconte, 2014).

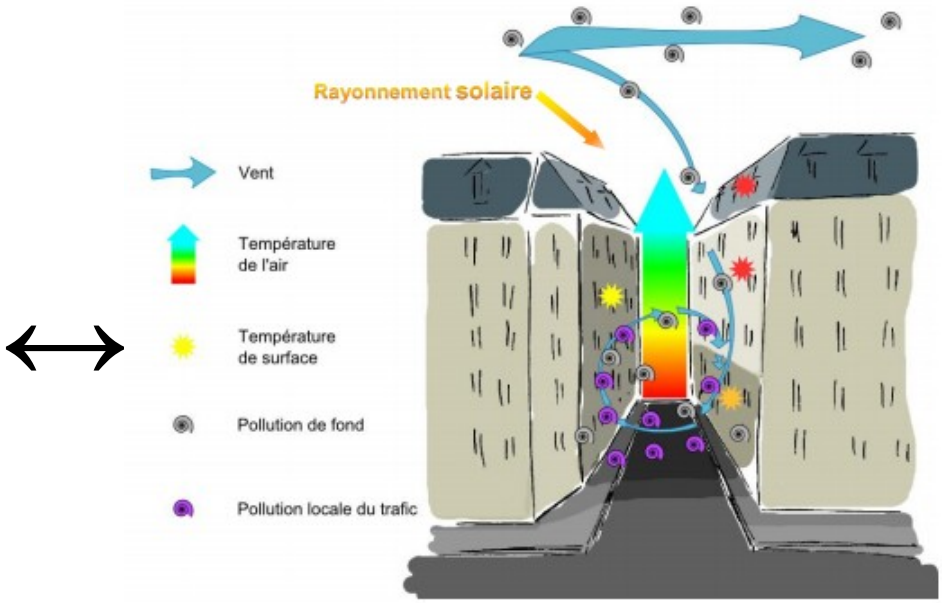


Figure. 7.1 : Schéma général illustrant les différents facteurs qui participent à l'effet dit de « rue canyon » (Valette & Cordeau 2010).

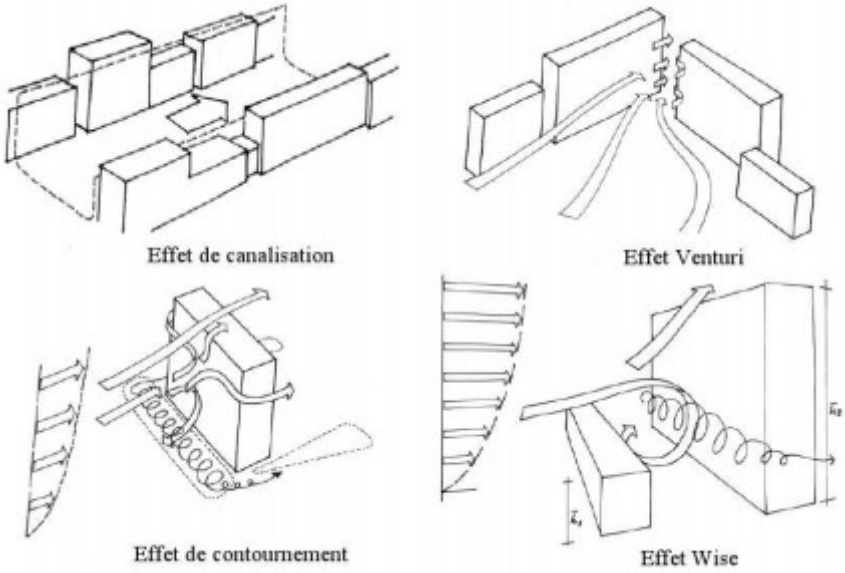


Figure. 8 : Représentation schématique des quatre effets de la morphologie urbaine qui impactent les écoulements d'air rencontrés en milieu urbain (Bouyer, 2009).

2) Structure urbaine et transferts de chaleur

A l'échelle de la ville, l'énergie solaire est absorbée et réfléchie en partie par les matériaux des éléments de celle-ci. La ville est constituée de bâtiments et d'éléments de plusieurs mètres de haut, lui conférant une structure tridimensionnelle. Cette morphologie tridimensionnelle de la ville offre une plus grande surface d'échange et d'absorption qu'une surface plane (Leconte, 2014). Lorsque l'énergie est absorbée, elle chauffe les composantes de l'environnement urbains (bâtiments, revêtements, mobiliers urbains…), la partie réfléchie est renvoyée. La multitude de surfaces sur lesquelles l'énergie peut être envoyée est une particularité des villes (Fig.5). Concrètement, le rayonnement renvoyé par un bâtiment peut l'être sur un autre qui absorbe à son tour de la chaleur. De plus, la ville émet un rayonnement infrarouge (IR) qui est également intercepté et réfléchi (Fig. 6), (Valette & Cordeau, 2010).

Le piégeage radiatif de la chaleur par les surfaces des bâtiments est une des caractéristiques de la structure des villes engendrant une augmentation locale de température (Greuillet & Galsomiès, 2013). En effet, les rues et les hautes parois verticales des bâtiments forment ce que l'on nomme « les canyons urbains ». Ces derniers sont les acteurs du piégeage radiatif en milieu urbain (Colombert, 2008). Ce concept théorique appelé rue « canyon » correspond à une rue de longueur infinie bordée de part et d'autre par des bâtiments. Cette morphologie accentue la rétention de l'énergie par absorption du fait des multi-réflexions qui s'effectuent sur les parois du canyon urbain (Fig.7), (Leconte, 2014). Ce piégeage influence également la valeur de l'albédo du couvert urbain . En effet, en considérant la définition évoquée précédemment (cf II.1.2), l'albédo est défini comme le rapport entre énergie reçue et énergie réfléchie. Or, dans le cas d'une rue canyon l'énergie réfléchie destinée initialement à rejoindre l'atmosphère va être à nouveau absorbée en partie par la surface sur laquelle elle est renvoyée (Colombert, 2008). De plus, l'effet de canyon urbain est alimenté par la pollution issue principalement du trafic routier (Fig.7.1), (Valette & Cordeau, 2010).

2.1) Impacts sur les écoulements d'air

L'environnement urbain modifie les écoulements d'air. Les bâtiments et les différents éléments du paysage urbain constituent un obstacle aux mouvements d'air, on parle de rugosité urbaine, (Leconte, 2014). Le vent est fortement impacté par la configuration des bâtiments et directions sont influencées par l'orientation des rues et la structure des bâtiments. La vitesse du vent en ville est 50 à 60 % plus faible que les zones dégagées aux alentours. Plusieurs effets attribués à la morphologie des bâtiments participent aux modifications des écoulements de l'air des milieux urbains dont les principaux sont : l'effet de canalisation, l'effet Venturi, l'effet Wise ainsi que l'effet de contournement (Fig.8), (Bouyer, 2009).

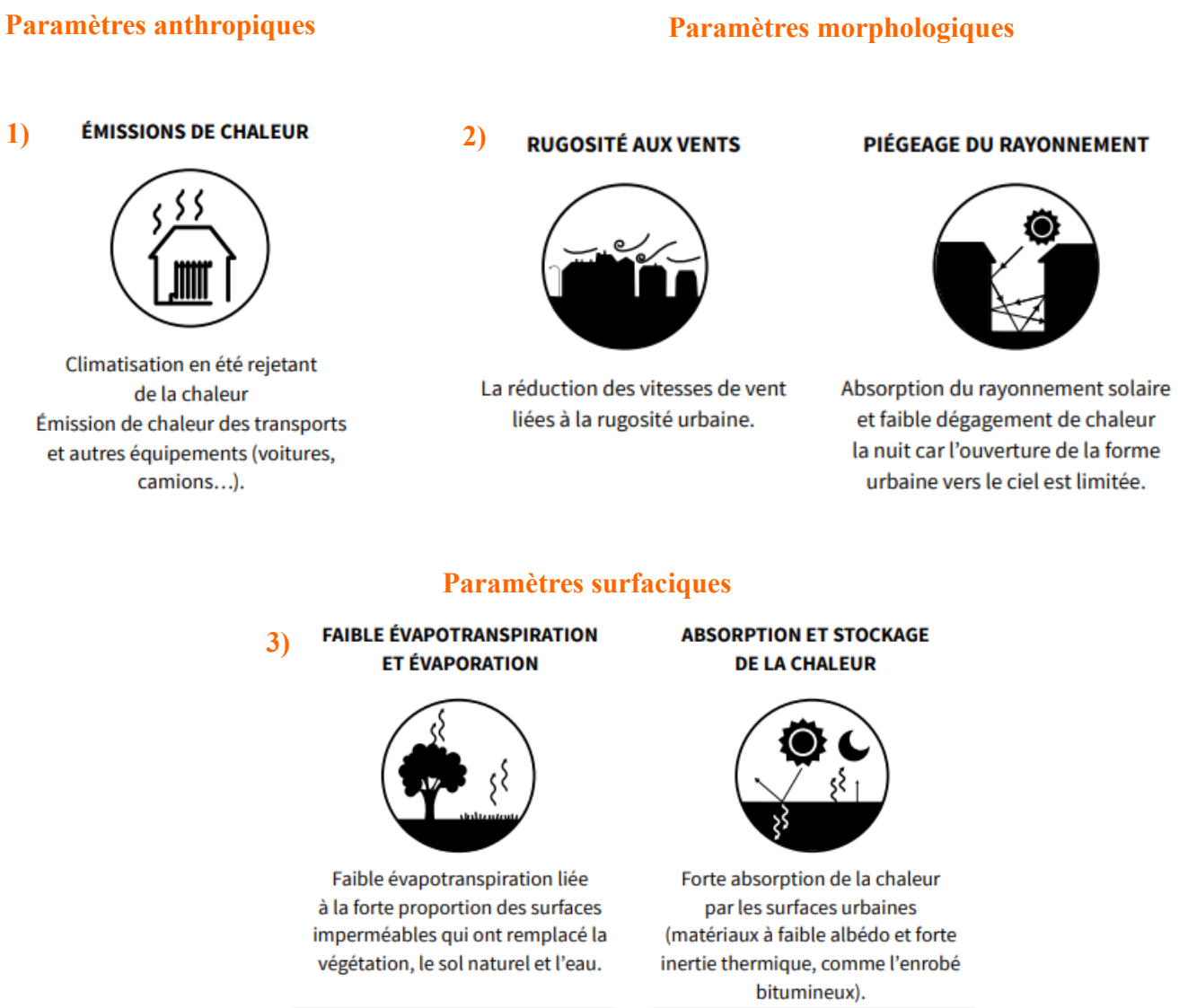


Figure. 9 : Pictogrammes illustrant les paramètres contribuant à la formation d'Ilot de Chaleur Urnain (ICU). En **1**, les paramètres anthropiques, en **2** les paramètres morphologiques et en **3** les paramètres surfaciques (Phillips *et al*, 2017).

2.2) Modification du phénomène d'évapotranspiration

En ville, la majorité des surfaces sont imperméables contrairement au milieu rural où la plupart sont perméables. Cette différence n'est pas sans conséquence sur le rafraîchissement procuré par le phénomène d'évapotranspiration. Lorsque les surfaces sont perméables, l'eau s'infiltre et se retrouve stockée dans le sol et dans les végétaux. Cette eau sera ensuite relargué progressivement dans le milieu via les phénomènes d'évaporation et d'évapotranspiration et entraîne un rafraîchissement de l'air. L'évaporation en milieu urbain est alors plus faible qu'en milieu rural, l'imperméabilisation des surfaces ne permettant pas l'infiltration de l'eau dans les sols. De plus, l'environnement urbain est très peu végétalisé comparativement au milieu rural réduisant également le phénomène d'évapotranspiration (Leconte, 2014). Correctement irrigué, un arbre peut dégager jusqu'à 0,378 m^3 d'eau par jour. Cette quantité d'eau représente un potentiel de refroidissement de 26,7 kWh par jour (Bouyer, 2009).

3) Les apports de chaleur d'origine anthropique

La ville concentre par nature de nombreuses activités humaines émettrice de chaleur. Les rejets de chaleur d'origine anthropique issus des activités de transport et de l'activité industrielle sont beaucoup plus importants en milieu urbain (Colombert, 2008). Par conséquent, l'émission de GES issu de ces activités contribuent à réchauffer l'environnement urbain et participent également au phénomène d'ICU.

Ainsi pour résumer, la formation d'ICU est attribuée à trois paramètres majeurs que l'on peut regrouper en fonction de leurs origines. Ainsi on distingue les paramètres anthropiques, morphologiques et surfaciques (Fig.9), (Phillips *et al*, 2017).

III) Méthodologies d'identification des ICU

1) Inventaire des outils et des méthodologies

Afin d'identifier les ICU d'une ville donnée plusieurs méthodologies ont été établies par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). D'une manière générale ces méthodes sont basées sur des mesures d'air, des mesures de températures de surfaces ou par des enquêtes publiques. En premier lieu, les mesures d'air effectuées au moyen de capteurs ou de stations météorologiques permettent de quantifier le profil thermique des zones prospectées. Ces mesures peuvent s'effectuer selon un protocole dit de points fixes ou mobiles. Un réseau de stations de mesures de températures d'air permet d'étudier la variabilité spatiale et temporelle du phénomène d'ICU. L'extrapolation des données recueillies permettra à terme d'établir des cartographies thermiques du territoire (Phillips *et al*, 2017).

1) Mesures d'air

MESURES FIXES (2 points)

- Échelle : Ville
- Résolution : Faible
- Coût estimé : < 10 000 €
- Durée : > 3 mois

- Matériel : Capteurs simples / Stations météorologiques (+ récupération possible des données existantes de Météo-France)

- Description :

Mesurer sur 2 points (un en ville et un en périphérie) les températures d'air mais aussi l'hygrométrie et les vitesses de vents durant un été ou sur plusieurs années. C'est une première approche dans la quantification de l'écart de température entre la ville et la campagne ainsi que la variabilité.

✓ Simplicité de mise en œuvre.

✗ La situation particulière des stations peut impacter les résultats de l'étude.

⚠ Le choix de l'implantation des stations est déterminant et nécessite un diagnostic préalable.

MESURES FIXES (réseau de points)

- Échelle : Ville
- Résolution : Moyenne
- Coût estimé : 50 000
- Durée : 3 mois

- Description :

Un réseau de stations de mesures fixes de température (+ hygrométrie / vitesses des vents) permet d'étudier la variabilité spatiale et temporelle du phénomène d'ICU.

L'extrapolation des résultats permet de construire des cartographies thermiques du territoire.

✓ Apporte des informations dans l'ensemble d'un territoire.

✗ La situation particulière des stations peut impacter les résultats de l'étude.

⚠ Le choix de l'implantation des stations est déterminant et nécessite un diagnostic préalable.

MESURES MOBILES

- Echelle : Ville / Espace publi
- Résolution : Moyenne à fine
- Coût : < 10 000
- Durée : < 1 mois

- Description :

Il s'agit d'effectuer un itinéraire muni d'un dispositif enregistreur (capteurs simples ou stations météorologiques) à l'intérieur et aux abords d'une agglomération. La taille de la zone prospectée dépend du moyen de locomotion (voiture, vélo ou à pied…).

✓ Simplicité de mise en œuvre.

✗ Les mesures effectuées ne sont pas simultanées. La mesure des variables climatiques n'est pas synchrone.

2) Mesures de températures de surfaces

TELEDETECTION

- Echelle : Ville / Espace public
- Résolution : Moyenne à fine
- Coût estimé : < 10 000 (image satellite) à 50 000 (Campagne aéroporté)
- Durée : 1 mois

Description :

La télédétection par imagerie satellite ou aérienne permet d'obtenir des cartographies de températures de surface.
Cette méthode nécessite une analyse du rayonnement infra-rouge pour passer des températures de brillance aux températures de surface. La connaissance de l'émissivité des matériaux est indispensable.

✓ Cette méthode est souvent utilisée. La sensibilisation au phénomène d'ICU est forte car les résultats sont sous formes de cartographie.

✗ La prise de photographies doit s'effectuer par temps clair. Il est indispensable de réaliser des simulations géoclimatiques pour avoir les T ° d'air.

CAMERA THERMIQUE

Echelle : Espace public
Résolution : Fine
Coût: < 10 000
Durée : < 1 mois

Description :

La caméra infra-rouge thermique utilisée depuis un point haut ou depuis une rue permet d'acquérir des données 3D des températures de surface.

✓ Cette technique à un fort impact de sensibilisation sur la question du confort urbain.

✗ Il est indispensable de combiner cette technique avec d'autres outils pour mesurer le ressenti thermique

3) Approches qualitatives

ENQUETES IN SITU

Echelle : Quartier, espace public
Résolution : Fine
Coût : < 10 000
Durée : < 1 mois

Description :

Il s'agit de réaliser des enquêtes sous forme de questionnaire afin de recueillir des données sur le terrain auprès des usagers concernant leur ressenti thermique et leur pratique des lieux.

✓ Permet de faire participer les usagers = Mobilisation et sensibilisation au phénomène d'ICU.

✗ Il est important d'avoir une diversité d'âges et de catégories socio-culturelles afin que les données recueillis soient les plus représentatives.

Figure.10 : Présentation des différentes méthodologies et leurs caractéristiques, utilisées pour l'identification des îlots de chaleur urbains (ICU) en France. En **1** les méthodes par mesure d'air, en **2** celles des mesures de surfaces et en **3** une approche qualitative (Phillips *et al*, 2017).

Les mesures de surfaces permettent de localiser les zones à forte inertie thermique qui intensifient l'effet d'ICU. La télédétection et l'imagerie thermique sont des méthodes qui permettent d'avoir des résultats explicites, directement sous forme de cartographie (Fig.10). La télédétection est une technique largement utilisée mais cette méthode nécessite de nombreux traitements, ainsi qu'une connaissance de la structure du territoire prospecté. Il est alors essentiel de connaître la nature et les propriétés des matériaux telles que l'émissivité pour ne pas interpréter de façon erronée les résultats cartographiques. L'imagerie thermique est la technique la plus représentative du comportement des matériaux urbains vis à vis de la chaleur (Phillips *et al*, 2017). Cependant, l'utilisation de l'imagerie thermique dans les études est cantonnée à l'échelle d'une rue ou d'un bâtiment (Marie A, 2020). Il est surprenant que cette technique ne soit pas employée à l'échelle d'une ville ou d'un quartier alors que les moyens technologiques et numériques le permettent. Il serait pertinent à mon sens de réaliser des cartes thermographiques avec une caméra thermique embarquée sur un drone. Ainsi, il serait possible d'élargir l'échelle d'application de l'imagerie thermique à un quartier entier ou à une ville (Simeon P, 2020).

Il est également possible d'aborder le phénomène d'ICU par des enquêtes de terrain sous forme de questionnaires. L'objectif est de recueillir des données concernant le ressenti thermique des usagers. Cette méthode permet de faire participer les riverains qui apprécient la prise en compte de leur avis dans les programmes d'aménagement.

Il est important de considérer que ces outils doivent être combinés en fonction des objectifs fixés et de l'échelle d'analyse pour obtenir des résultats fiables. De plus, le choix de la méthode d'étude est à définir selon le budget disponible. Les données récoltées via l'un de ces outils impliquent d'être analysées par le biais de simulations numériques ou par des modèles empiriques. Les systèmes de modélisation des résultats ne seront pas traités dans cet ouvrage mais sont consultables dans le recueil de l'ADEME qui figure dans les références bibliographiques.

Bien que le phénomène d'ICU soit décrit dans la littérature scientifique depuis la fin du 19ème siècle, les protocoles mis en œuvre pour son identification sont relativement récents. Les outils et méthodes utilisées doivent être affinés afin de pouvoir rédiger un guide d'application méthodologique des ICU à l'échelle du pays. Dans un soucis de communication et afin d'avoir une normalisation des résultats, une méthode générique d'identification des ICU a été établie par les géographes canadiens Timothy R Oke et Lan Stewart . Celle-ci repose sur un système de classification appelé « Zones Climatiques Locales » ou « Local Climate Zone » (LCZ) en anglais (Stewart & Oke, 2012).

LCZ Bâtiment	Définition
1 – Ensemble de tours compactes et hautes	- Mélange dense de **grands bâtiments de plusieurs dizaines d'étages**. Peu ou pas d'arbres. Couverture terrestre principalement **pavée**. Ex : construction en béton, en acier, en pierre, en verre…
2 – Ensemble d'immeubles compacts	- Mélange dense de **bâtiments de hauteur moyenne (3 - 9 étages)** Couverture terrestre principalement **pavée**. Ex : constructions en pierre, en brique et en béton...
3 – Ensemble de maisons compactes	- Mélange dense de bâtiments de **faible** hauteur. Couverture terrestre principalement pavée. Ex : constructions en pierre, en brique et en béton...
4 – Ensemble de tours espacées	- Arrangement **espacé** de **grands bâtiments** à plusieurs dizaines d'étages. Couverture terrestre pavée, avec une **abondance de surfaces perméables** (plantes basses, arbre épars). Ex : construction en béton, en acier, en pierre, en verre…
5 - Ensemble d'immeubles espacés	- Arrangement espacé de bâtiment de **hauteur moyenne** (3 – 9 étages). Couverture terrestre pavée, avec une abondance de **surfaces perméables**.
6 – Ensemble de maisons espacées	- Arrangement espacé de bâtiments de **faible** hauteur. Couverture terrestre pavée, avec une abondance de **surfaces perméables**
7 – Constructions légères de faibles hauteurs	- Mélange **dense** de bâtiments à un **seul étage**. Couverture terrestre principalement **compactée**, matériaux de construction légers (bois, chaume, métal ondulé)
8 - Grands bâtiments de faible hauteur	- Arrangement **espacé** de grands bâtiments de **faible hauteur** (1 – 3 étages). Peu ou pas de végétation.
9 – Constructions clairesemées	- Arrangement **clairsemé** de petites ou moyennes construction dans un **cadre naturel**. Abondance de surfaces perméables (plantes basses, arbres).
10 – Industries lourdes	- Ouvrages industriels de faible ou de moyenne hauteur (tours, réservoirs, cheminées). Couverture terrestre **pavée** et **compactée**.

LCZ recouvrement au sol	Définition
A – Arbres denses	- Paysage **densément boisé** d'arbres à feuilles caduques et/ou à feuilles persistantes. Couverture terrestre principalement **perméable** (plantes basses). Ex : Forêts, parcs urbains...
B - Arbres épars	- Paysage **légèrement boisé** d'arbres à feuilles caduques et/ou à feuilles persistantes. Couverture terrestre principalement **perméable** (plantes basses).
C - Buissons / Broussailles	- Réseau ouvert de **buissons**, **d'arbustes** et d'arbres ligneux bas. Couverture terrestre principalement **perméable** (plante basse). Ex : garrigues, zones agricoles...
D - Plantes basses, prairies, cultures	- Paysage **constitué d'herbe** ou de plantes/cultures herbacées. Peu ou pas d'arbres. Ex : prairies naturelles, zones agricoles, parcs urbains...
E – Roche nue, pavés	- Paysage **rocheux** ou zones **pavées**. Peu ou pas d'arbres et plantes. Ex : désert rocheux, rues pavées...
F – Terrains nus ou sable	- **Sols nus** ou couverture de **sable**. Ex : déserts, zones agricoles, vastes plages...
G – Eau	- **Surfaces d'eau**. Ex : Mers, lacs, rivières, lagons...

Propriétés variables de couverture terrestre.
= les propriétés variables ou éphémères de la couverture terrestre qui changent de façon significative en fonction des tendances météorologiques ou des saisons.
1- Arbres nus : Réduction de l'albédo
2 - Couverture neigeuse : Albédo élevé
3 - Sols secs : Augmentation de l'albédo
4 – Sols mouillés : Réduction de l'albédo

Figure.11 : Classification LCZ établie par les cartographes Oke et Stewart pour normaliser l'identification des Ilots de Chaleurs Urbains (ICU), (Stewart & Oke, 2012).

2) Le système de classification LCZ : une méthode standardisée

Le système de classification LCZ est une méthode générique pour appréhender de façon territorialisée la problématique des ICU à l'échelle d'un territoire communal ou intercommunal. La classification LCZ permet de qualifier les espaces naturels et construits selon leur différenciation thermique (Chadanson *et al*, 2019). Le concept de LCZ met en évidence la relation de causalité qui existe entre les caractéristiques urbaines d'une zone et le comportement thermique de celle-ci (Leconte, 2014). Les LCZ sont appliquées à l'échelle mésoclimatique et correspondent à des entités spatiale de 100 à 1000 m². Elles offrent la possibilité d'exprimer les écarts thermiques en terme de différence entre LCZ et permet de comparer ainsi les résultats entre villes et / ou entre pays (Chadanson *et al*, 2019).

Cette approche a nécessité un classement des territoires selon différents paramètres influençant leur comportement thermique. Les zones sont différenciées en fonction du type d'objets présents, de leur hauteur, de leur densité spatiale et du caractère perméable ou imperméable des surfaces situées entre les objets de la zone. Cette démarche a abouti à la création de 26 sous-classes qui ont été enrichies à l'aide de données descriptives et quantitatives concernant les propriétés relatives à la morphologie urbaine, à l'occupation au sol et aux matériaux urbains utilisés, pour isoler finalement 17 types de LCZ (Leconte, 2014).

Ainsi, ces critères ont permis de hiérarchiser un continuum urbain – rural en dix-sept types de zones climatiques selon leurs propriété respectives à l'échelle locale. Chacune d'elles présente un profil thermique unique laissant apparaître dix LCZ de type « Bâtiment » qui sont référencées de 1à 10 et sept LCZ de type « Recouvrement au sol » qui sont référencées de A à G (Fig.11). Chaque LCZ se définit comme une zone traduisant des traits spécifiques de la morphologie urbaine (Stewart & Oke, 2012). Les caractéristiques d'une LCZ donnée modifient le microclimat de celle-ci et favorisent la création d'un régime particulier de température d'air (Leconte, 2014). Les types de LCZ se caractérisent par une sélection de dix indicateurs urbains (Stewart & Oke, 2012).

2.1) Les indicateurs urbains

Pour identifier aisément les limites physiques entre les LCZ, il faut collecter les informations nécessaires pour décrire la zone étudiée. Les informations à recueillir correspondent à dix indicateurs établis par Stewart et Oke. Ces indicateurs urbains peuvent être estimés à partir d'un travail de terrain, d'images satellites ou calculés. La typologie des LCZ construites propose une combinaison unique de ces dix indicateurs. Ils apportent des informations concernant les spécificités de la zone et permettent de caractériser cette entité (Leconte, 2014).

Domaine d'intervention des indicateurs urbains	Indicateurs urbains
Morphologie urbaine	- Facteur de Vue du Ciel - Rapport d'Aspect - Hauteur moyenne des bâtiments - Longueur de rugosité effective
Occupation des sols	- Pourcentage de surface bâtie - Pourcentage de surface imperméable - Pourcentage de surface perméable
Matériaux urbains	- Effusivité thermique - Albédo
Métabolisme urbain	- Flux de chaleur anthropique

Figure. 12 : Liste des dix indicateurs urbains utilisés pour établir la classification Local Climat Zones (LCZ) classé par domaine d'intervention (Leconte, 2014).

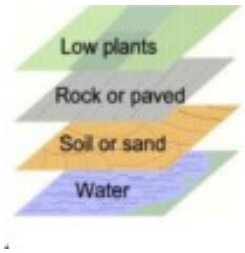
LCZ **Nom de la zone**

Description de la zone

Forme : description de la morphologie des bâtiments, de la couverture végétale, des matériaux de construction et de l'activité humaine. **Fonction** : Utilisation des terres la plus probablement associées à cette zone. **Emplacement** : emplacement prévue de la zone (périphérie, ville, campagne). **Correspondance** : zones comparable dans le système de classification de Stewart & Oke.

Illustration de la zone

Recouvrement au sol



Objets

Propriétés de la zone

1) facteur de vue du ciel (0 – 1)	Fraction du ciel visible du niveau du sol. Varie avec la hauteur et l'espacement des bâtiments / des arbres. Affecte le chauffage / refroidissement radiatif de surface.
2) Rapport d'aspect Hauteur / Largeur (0 - 3)	Le rapport d'aspect se définit comme le rapport moyen hauteur-largeur des rues. L'espacement des bâtiments / arbres ont une incidence sur les débits d'air.
3) Hauteur moyenne Bâtiments / arbres (0 - 50m)	Moyenne géométrique de la hauteur des bâtiments et de la végétation. Affecte le régime d'écoulement de la réflectivité de surface et la dispersion de la chaleur au-dessus du sol.
4) Classe de rugosité du terrain (1 - 8)	Classification de la rugosité effective pour les paysages urbains et ruraux (Davenport et al, 2000).
5) Fraction de surface occupé par le bâtiment (0 – 100%)	La proportion de la surface du sol recouverte de revêtement artificiels influe sur la réflectivité de la surface, le régime d'écoulement et la dispersion de la chaleur au-dessus du sol.
6) Fraction de surface imperméables (0 – 100%)	Proportion de la surface du sol avec une couverture imperméable (roche, pavée...).
7) Fraction de surface perméables (0 – 100%)	Proportion de la surface du sol avec une couverture perméable (sol nu, végétation, eau).
8) Effusivité thermique	Capacité de la surface d'accepter ou de libérer la chaleur. Les valeurs donnent une plage typique pour la surface dans chaque LCZ.
9) Albédo (0 - 1)	La réflectivité de surface à l'échelle locale, sous un ciel clair en milieu de journée. Affecte le potentiel du chauffage radiatif de surface. varie selon l'humidité des surfaces
10) Flux de chaleur anthropique (0 – 400 $W.m^{-2}$)	Densité moyenne annuelle du flux de chaleur anthropique à l'échelle locale. Les sources de chaleur comprennent les émissions de polluant liées au transport, à l'industrie...

Figure. 13 : Illustration d'une structure de fiche type pour caractériser un LCZ détaillant chacun des dix indicateurs urbains (Leconte, 2014)

Les indicateurs correspondent à des informations relatives à la morphologie urbaine, à l'occupation des sols, aux matériaux urbains ainsi qu'aux flux de chaleur anthropiques (Fig. 12).

Ainsi, chacun des 17 types de LCZ est défini par une fiche caractéristique comprenant : un nom et un code / une définition sous forme de texte / une fonction / une localisation / des illustrations sous formes de photographies prises au niveau de la rue et en partie supérieure de la canopée urbaine / une combinaison de dix indicateurs urbains (Fig.13), (Leconte, 2014).

2.2) Application du système LCZ

L'application de la classification LCZ nécessite en premier lieu, de recueillir les informations dédiées à la description de la zone d'étude, c'est a dire déterminer les dix indicateurs urbains permettant de définir les types de LCZ. Lorsque les dix indicateurs ont été trouvés, il faut alors comparer les résultats obtenus aux 17 fiches caractéristiques. Il s'agit ensuite de trouver la meilleure concordance entre la valeur des résultats des indicateurs trouvés pour une étude donnée et celle des fiches types établies par Stewart et Oke (Leconte, 2014).

Ces indicateurs seront présentés par la suite, toutefois certains seront simplifiés car ils impliquent des méthodes de calcul mobilisant quelques rappels de thermodynamique.

Le premier indicateur à définir est le rapport d'aspect (RA). Il s'applique à l'échelle d'une rue et apporte des informations sur sa morphologie. Il se définit par la formule :

$$RA = h / w$$

- Avec **h** la hauteur des bâtiments de part et d'autre de la rue
- Avec **w** la largeur de la rue

Cependant dans le cas d'une rue où la largeur et la hauteur des bâtiments sont variables, il est indispensable de procéder à des calculs de valeurs moyenne de h et w. Ainsi, à plus grande échelle on calcul le RA par la relation suivante :

$$RA = 0,5 * (Sv / (Sa - Sb))$$

- Avec **Sv** la **S**omme **v**ertical de toute les surfaces verticales de la zone de calcul
- Avec **Sa** l'aire de la zone de calcul
- Avec Sb la somme de toutes les zones occupées par des bâtiments

Le second indicateur est le facteur de vue du ciel ou « Sky View Factor » (SVF) en anglais. Il se définit comme la proportion de ciel visible en un point donné de la rue d'étude et est caractérisé par la relation suivante :

$$SVF = \cos\beta$$ Où $$\beta = \tan^{-1} * (h/0.5\ w)$$

- Avec **h** la hauteur des bâtiments de part et d'autre de la rue
- Avec **w** la largeur de la rue

Classe de rugosité	Longueur de rugosité	Description
1	0.0002	Mer ou lac dégagé (indépendamment de la taille des vagues), estran, plaine couverte de neige, désert sans relief, goudron et béton.
2	0.005	Surface terrestre sans relief, sans obstacles notables et pratiquement sans végétation, par exemple une plage ou un marais.
3	0.03	Paysage présentant une végétation basse (par exemple de l'herbe) et des obstacles isolés, séparés entre eux d'environ 50 fois la hauteur des obstacles (par exemple des pâturages sans brise-vent, un paysage de landes ou de tundra).
4	0.10	Zone naturelle ou cultivée comprenant des plantes ou des cultures de faible hauteur. Zone relativement dégagée présentant des obstacles occasionnels (par exemple des haies de faible hauteur, des bâtiments bas ou des arbres) séparés d'environ 20 fois la hauteur des obstacles.
5	0.25	Zone naturelle ou cultivée comprenant des cultures hautes ou de hauteurs variées, et des obstacles épars, séparés de 12 à 15 fois la hauteur des obstacles pour les objets poreux (par exemple des brise-vent végétaux) ou de 8 à 12 fois la hauteur des obstacles pour les objets solides (par exemple des bâtiments de faible hauteur).
6	0.5	Paysage cultivé de façon intensive présentant de nombreux groupes d'obstacles de taille importante (par exemple de grandes fermes, ou des bosquets) séparés par des espaces dégagés d'environ 8 fois la hauteur des obstacles. Grands végétaux présentant une faible densité spatiale (par exemple un verger ou une jeune forêt). Zone partiellement couverte par des bâtiments bas espacés d'environ 3 à 7 fois la hauteur des bâtiments, et sans grands arbres.
7	1.0	Paysage couvert de façon régulière par de grands obstacles de taille similaire, avec des espaces dégagés du même ordre de grandeur que la hauteur des obstacles (par exemple une forêt régulière à maturité). Zone densément bâtie sans variation importante du point de vue de la hauteur de bâtiments.
8	> 2	Centre ville alternant bâtiments hauts et bâtiments bas. Grandes forêts comprenant des arbres de tailles variées et des clairières.

Figure.14 : Classification de la rugosité de terrain (z_0). Les valeurs faibles de z_0 correspondent à des zones dégagées et les fortes valeurs à des structures urbaines denses (Davenport et al, 2000).

Figure.15 : Estimation des surfaces imperméables et perméables d'un quartier de Nancy, via le logiciel de SIG Qgis (Leconte, 2014).

Le calcul de SVF en milieu urbain à une échelle supérieure s'effectue selon deux approches différentes. La première mobilise l'utilisation d'un logiciel de Systèmes d'Information Géographique (SIG) permettant de calculer les valeurs de SVF à partir d'un Modèle Numérique d'Élévation (MNE). Cette approche est la plus couramment employée. L'extension SAGA disponible à partir du logiciel de SIG « Quantum geographic information system » (Qgis) permet de calculer automatiquement le SVF d'une agglomération. L'algorithme de l'extension utilise un MNE et calcul un SVF pour chaque pixel de l'image, (Unger, 2009). Il est également possible de procéder à une seconde approche du SVF à l'aide d'objectifs photographiques spéciaux appelés « Fish – Eyes ». Cette méthode implique de réaliser une photographie de la zone avec un appareil muni de ce type d'objectif et de les traiter à postériori (Grimmond et al, 2011).

Le troisième indicateur est la hauteur moyenne des bâtiments (H) de la zone d'étude. Il permet d'avoir accès au quatrième indicateur qui correspond à l'effet de rugosité (z_0). De façon empirique, il se définit par la relation : $z_0 = 0{,}7\ H$

- Avec z_0 l'effet de rugosité
- Avec H la hauteur moyenne des bâtiments

De plus, une classification de la rugosité effective du terrain ou « effective terrain roughness » a été établie entre la valeur de z_0, les écoulements d'air et la structure des caractéristiques du milieu d'étude. Les valeurs faibles de z_0 correspondent à des zones dégagées et les fortes valeurs à des structures urbaines denses (Fig.14), (Davenport et al, 2000).

Le cinquième, sixième et septième facteurs correspondent respectivement à la fraction de surface occupée par les bâtiments, les sols imperméables et les sols perméables. La fraction de surface bâtie peut être déterminée automatiquement via les bases de données disponibles de l'Institut Géographique National (IGN). Pour déterminer la fraction des surfaces perméables et imperméables il est nécessaire de connaître la surface totale de la LCZ d'étude.

Surface totale de la LCZ = Surface du bâtie + Surface imperméable + Surface perméable

Les surfaces imperméables et perméables peuvent être mesurées directement sur le terrain ou estimées à l'aide d'un logiciel SIG (Fig.15).

Le huitième facteur est l'effusivité thermique (μ), c'est à dire la capacité d'un matériau à absorber et restituer de la chaleur. La conductivité thermique notée λ et la capacité thermique C_v permettent de comprendre l'augmentation du stockage de la chaleur en milieu urbain. L'effusivité thermique (μ), est définit par la relation : $\mu = \sqrt{\lambda C_v}$

Matériau	Effusivité thermique ($J.m^{-2}.s^{-0.5}.K^{-1}$)
Tourbière sèche	186
Sol argileux sec	596
Sol sableux sec	620
Tourbière humide	1418
Eau	1543
Sol argileux humide	2213
Sol sableux humide	2552
Brique	1066
Verre	1108
Asphalte	1206
Tuile d'argile	1219
Béton dense	1785
Pierre	2220
Acier	14473

Figure.16 : Liste non exhaustive des valeurs de l'effusivité thermique de plusieurs éléments naturels et urbains (Stewart, 2011).

Les matériaux urbains ont une effusivité thermique supérieurs aux éléments naturels secs (l'humidité influe sur l'effusivité thermique), (Fig.16). Ils sont donc susceptibles de stocker davantage de chaleur en l'absence de précipitation. Les variations d'effusivité thermique en milieu rural illustrent que les propriétés des matériaux sont un facteur de contrôle de l'amplitude des ICU (Stewart, 2011).

Le neuvième facteur est l'albédo des matériaux, les valeurs des différents matériaux sont consultables sur internet. Concernant la quantification du flux total de chaleur anthropique qui est le dixième et dernier indicateur, il est difficile de le déterminer du fait de l'impossibilité de mesurer directement l'ensemble des flux qui le compose. Ainsi, la plupart du temps cet indicateur est estimé en fonction des données disponibles (Leconte, 2014). En complément de ces indicateurs il est également indispensable de procéder à des mesures de températures d'air dans les zones d'études. Ces mesures peuvent être effectuées selon le protocole « points fixes » ou « points mobiles » présentés précédemment (cf III.1).

Après avoir exposé les différentes méthodologies existantes pour permettre d'identifier le phénomène d'ICU, il sera présenté la mesure dans laquelle la renaturation urbaine peut permettre son atténuation, ainsi que les avantages annexes associés.

IV) La renaturation urbaine

En ville, l'adaptation aux changements climatiques nécessite d'allouer des superficies végétalisées dans les plans d'aménagement urbain. La réintroduction d'espaces naturels et plus largement du végétal en ville est une des solutions les plus efficaces pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain. La végétation joue un rôle essentiel de protection contre la chaleur grâce au phénomène d'évapotranspiration et d'ombrage des sols et des bâtiment. Cela engendre à la fois une baisse de la température et une augmentation du taux d'humidité de l'air. L'ensemble de ces paramètres participe activement au rafraîchissement de l'espace urbain (ADEME, 2012). Dans un quartier résidentiel de Munich en Allemagne, une étude a démontré qu'une augmentation de 10 % des surfaces végétalisées permet de réduire d'un degré la température dans un rayon de 100 mètres (IUCN France, 2018). La végétalisation permet également la création de surfaces perméables qui permettent la gestion des eaux de ruissellement et un assainissement de l'air (Valette & Cordeau, 2010).

En effet, la végétation en ville permet une amélioration de la qualité de l'air via le processus de photosynthèse qui permet la production d'oxygène et la captation de CO_2, ainsi que par la filtration des particules polluantes en suspension (ADEME, 2012).

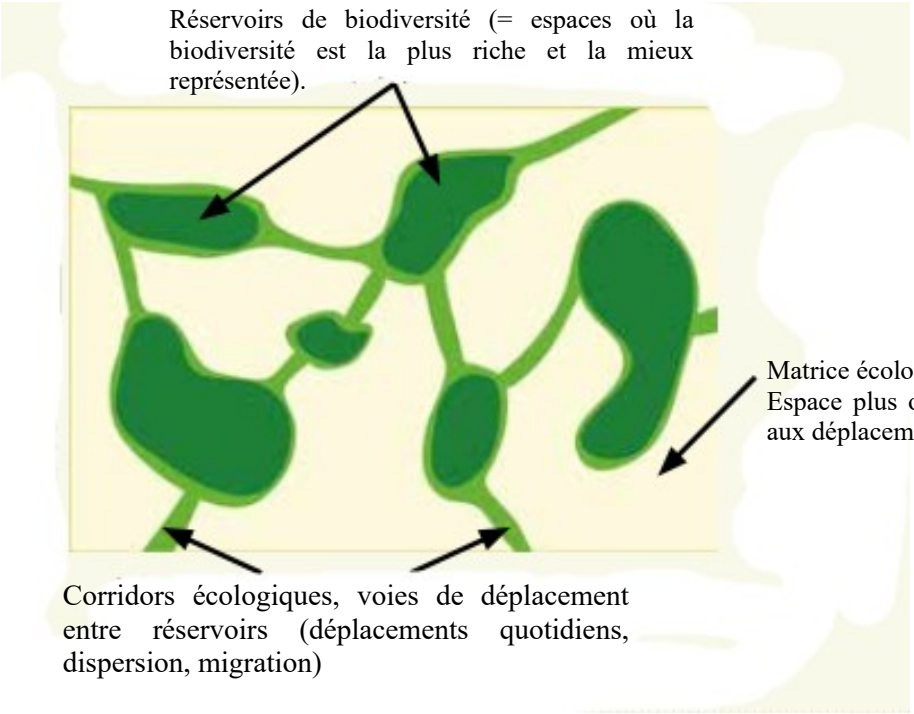


Figure.17 : Illustration schématique du concept de corridors écologiques (U2B LPO, 2019).

Jusqu'à 85% des particules en suspension dans l'air peuvent être captés par un espace boisé (ADEME, 2012). Dans ce contexte, un concept est de plus en plus utilisé dans les programmes d'aménagement urbains partout à travers le monde : le concept d'Infrastructure Naturelle (IN).

1) Le concept d'infrastructure naturelle (IN)

Le concept d'infrastructure naturelle (IN) est de plus en plus populaire parmi les décideurs et urbanistes du monde entier confrontés aux multiples défis posés par l'expansion urbaine et les changements climatiques (Bissonnette et al, 2018). En effet, les acteurs qui interviennent en aménagement du territoire incorporent désormais le concept d'IN dans leurs projets afin de favoriser une meilleure intégration des fonctions écologiques des milieux naturels au sein des territoires urbains et périurbains (Dupras *et al*, 2015). Le concept d'IN introduit l'idée selon laquelle les villes constituent des écosystèmes qui s'intègrent à une trame verte et bleue devant être protégée et mise en valeur pour assurer la protection de la biodiversité et la production des services écosystémiques (SE) essentiels aux sociétés humaines (Liao, 2012).

2) La biodiversité en ville

Actuellement, la biodiversité urbaine est rarement une priorité dans les programmes d'aménagement. En effet la biodiversité urbaine est souvent qualifiée d'ordinaire. Pourtant, les écosystèmes urbains présentent une grande richesse spécifique. Elle résulte de la diversité des habitats et des microclimats de l'environnement urbain qui favorisent le développement d'une large gamme d'espèces (Henry & Frascaria-Lacoste, 2012). Il faut considérer que la biodiversité profitera du dynamisme des villes pour s'installer là où c'est possible, dès la moindre opportunité. Aristote disait : « la nature à horreur du vide ». Ainsi, il est important d'inclure la biodiversité dans toutes les actions d'aménagement. De plus, en considérant la nécessité de repenser les caractéristiques de l'environnement urbain, il apparaît opportun d'accorder une place prépondérante à la biodiversité dans les projets (U2B LPO, 2019). Le développement de la nature en ville est d'ailleurs l'un des objectifs du Plan Biodiversité (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2018). De nombreux espaces urbains ne disposent pas suffisamment de zones de nature dites «fonctionnelles» pour assurer la pérennité des populations faunistiques et floristiques. En conséquence, les espèces sont obligées de se déplacer pour rechercher les ressources nécessaires à leur cycle de vie. Alors, pour permettre et / ou faciliter ces déplacements, il est primordial d'assurer une connectivité entre habitat dans les projets d'aménagements. Ainsi, cette connectivité peut s'opérer via la création ou le maintien au sein des paysages urbains, de petits corridors écologiques. Les corridors écologiques sont des voies de déplacement pour la biodiversité (Fig.17). Ces derniers peuvent être des haies, des arbres d'alignement, des bandes enherbées, des mares, des bosquets… (U2B LPO, 2019).

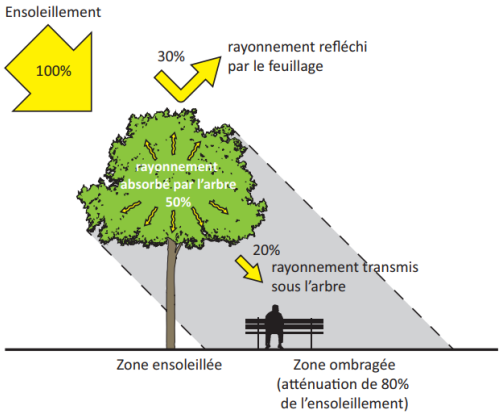


Figure.14 : Schéma illustrant le rôle de protecteur de l'arbre en ville au regard du pourcentage d'ensoleillement parvenant au sol (Bigorgne & Mangold, 2014).

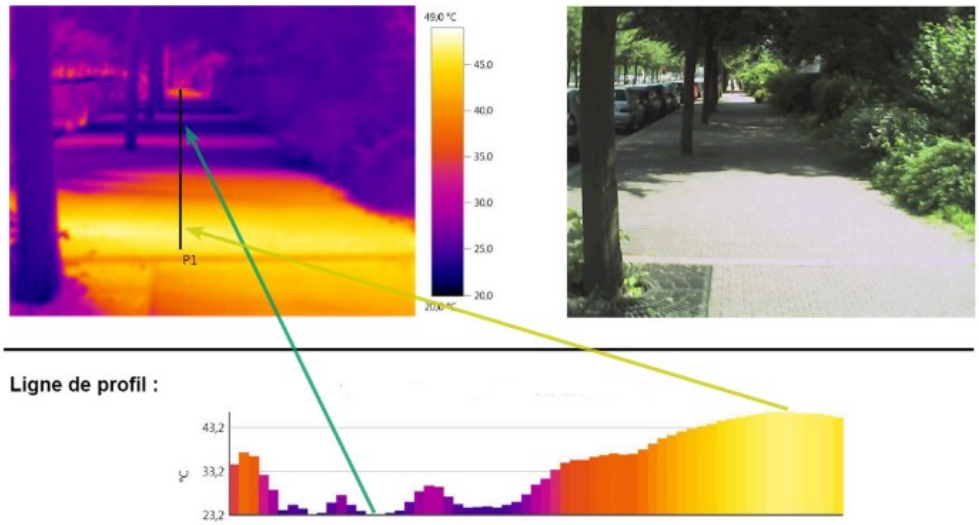


Figure.15 : Photographie thermique infrarouge permettant de mesurer l'impact de l'ombrage induit par les arbres sur la température au sol en milieu urbain à Lille. Une différence de 20 ° C est enregistrée entre une portion de sol exposée au soleil (maximum de 46.8 ° C) ou à l'ombre (minimum de 23.2 ° C). La température extérieure était de 28 ° C (E6, 2018).

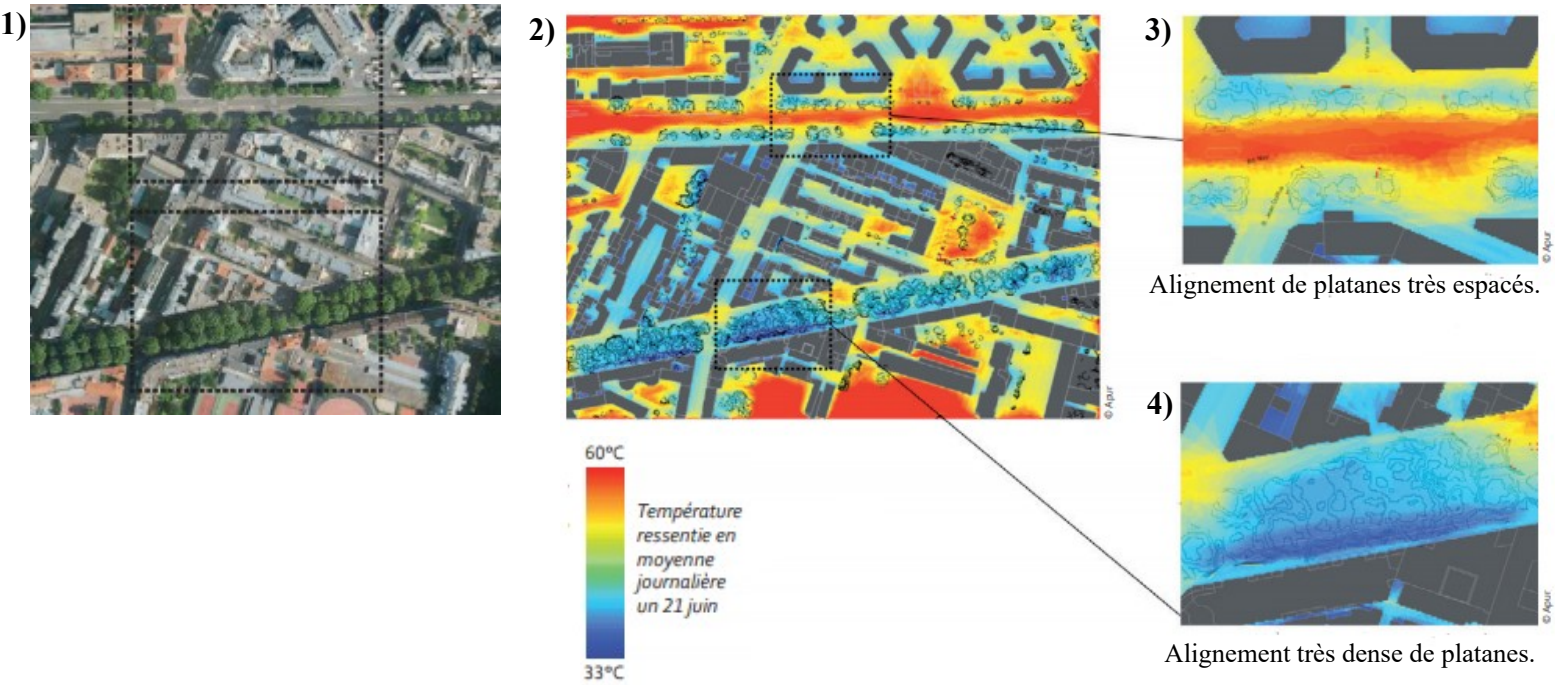


Figure.16 : Photographie aérienne de deux rues arborées par des platanes en proportion différente à Paris (en **1**) et carte thermographique correspondante (en **2**) obtenue par télédétection laser (Lidar). En **3**, la rue arborée avec une faible densité de platanes est plus sujette à l'inconfort thermique des usagers que celle plus densément arborée en **4**. (Bigorgne & Mangold, 2014).

La végétalisation des milieux urbains en ville peut s'opérer de plusieurs façons possibles notamment au travers de la création d'espaces verts, de la plantation d'arbres d'alignement ainsi que par la mise en place de toitures et de murs végétalisés. L'ensemble de ces alternatives présentent des intérêts différents et complémentaires (ADEME, 2012).

3) Rôles de l'arbre en milieu urbain

L'arbre est un élément important des tissus urbains. La présence d'arbres en ville, peut être associés à divers bénéfices. L'arbre en ville participe à maintenir des continuités écologiques, il est un support essentiel pour l'épanouissement de la biodiversité en milieu urbain. Dans un contexte de réchauffement climatique, les arbres ont un rôle important pour lutter contre le phénomène d'ICU, et permet d'améliorer la qualité de l'air. En effet, les arbres d'alignement en ville sont des outils pour améliorer le confort thermique dans les espaces publics, notamment lors d'un épisode caniculaire. Un arbre correctement irrigué, peut dégager jusqu'à 0.378 m^3 d'eau par jour, soit un potentiel de refroidissement de 26,7 kWh par jour (Bouyer, 2009). De plus, de façon simplifiée, l'arbre en milieu urbain permet de créer des zones d'ombre qui améliorent le confort des usagers par sa protection direct contre le soleil (Fig.14), (Bigorngne & Mangold, 2014). La végétation influe sur le rafraîchissement en journée et particulièrement sur la chaleur au sol. En effet, la différence de température entre une zone exposée ou soleil et une zone ombragée peut atteindre 20° C (Fig.15), (E6, 2018). L'arbre joue également une fonction de climatiseur naturel au cours de la nuit par le phénomène d'évapotranspiration permettant de rafraîchir l'air ambiant (Bigorgne & Mangold, 2014). De plus, l'ombrage a un effet positif a posteriori car il réduit le stockage de la chaleur par les revêtement et les bâtiments, et donc atténue leur restitution d'énergie thermique durant la nuit.

3.1) La densité de plantation : un critère à respecter pour lutter contre les ICU

La densité de plantation est un critère à prendre en considération afin que les arbres puissent apporter le confort climatique escompté lors de fortes chaleurs sur l'espace public. En effet, les résultats d'une campagne de mesure effectuée par télédétection laser à Paris, a permis d'illustrer qu'une densité d'arbre insuffisante ne protège pas l'espace public de la chaleur (Fig. 16), (Bigorgne & Mangold, 2014).

3.2) Choix et diversité des essences d'arbre en milieu urbain

Concrètement, il n'existe pas de liste d'essences d'arbres « sures » pour les plantations urbaines. L'arbre en ville ne doit pas être considéré comme un élément du mobilier urbain à vocation décorative mais comme un être vivant ayant des exigences et des besoins. Le choix des espèces doit s'opérer avec une volonté de diversification et en considérant l'adaptation de celles-ci

Tableau I : Potentiel allergisant des principales essences d'arbres présentes en France métropolitaine

Arbres		
Espèces (nom vernaculaire)	**Famille**	**Potentiel allergisant**
Erables*	**Sapindacée**	**Modéré**
Aulnes*	**Bétulacée**	**Fort**
Bouleaux*		**Fort**
Charmes*		**Fort**
Charme Houblon		**Faible / Négligeable**
Noisetiers*		**Fort**
Baccharis	**Astéracée**	**Modéré**
Cades	**Cupressacée**	**Fort**
Cyprès commun		**Fort**
Cyprès d'Arizona		**Fort**
Genévriers		**Faible / Négligeable**
Thuyas*		**Faible / Négligeable**
Robiniers*	**Fabacée**	**Faible / Négligeable**
Châtaigniers*	**Fagacée**	**Faible / Négligeable**
Hêtres*		**Modéré**
Chênes*		**Modéré**
Noyers*	**Juglandacée**	**Faible / Négligeable**
Mûriers à papier*	**Moracée**	**Fort**
Mûriers blanc*		**Faible / Négligeable**
Frênes*	**Oléacée**	**Fort**
Oliviers		**Fort**
Troènes*		**Modéré**
Pins*	**Pinacée**	**Faible / Négligeable**
Platanes	**Platanacée**	**Modéré**
Peupliers*	**Salicacée**	**Faible / Négligeable**
Saules*		**Modéré**
Ifs*	**Taxacée**	**Faible / Négligeable**
Cryptoméria du Japon	**Cupressacée**	**Fort**
Tilleuls*	**Malvacée**	**Modéré**
Ormes*	**Ulmacée**	**Faible / Négligeable**
* plusieurs espèces		

Liste des principales espèces d'arbres rencontrées en France métropolitaine et potentiel allergisant associé d'après le Réseau National de Surveillance Aérobiologique (RNSA).

Le potentiel allergisant est :

- Faible / Négligeable = Espèces pouvant être plantées en zones urbaines

- Modéré = Espèces dont le nombre de plantation doit être restreint

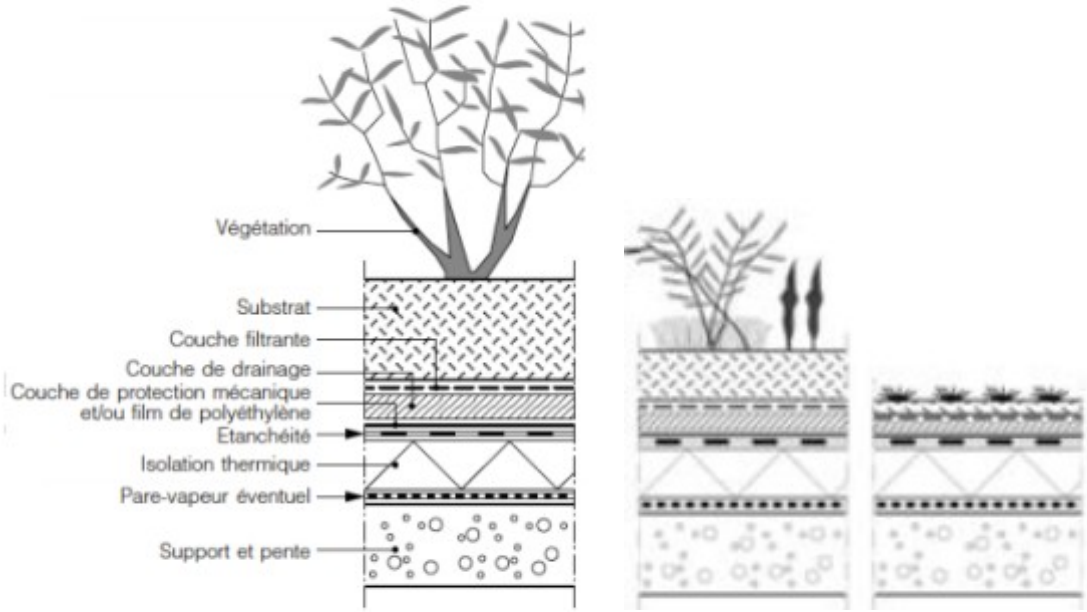
- Fort = Espèces ne devant pas être plantées en zones urbaines

aux changements climatiques pour que l'arbre puisse remplir sa fonction écologique (Kelly, 2016) . Il faut privilégier les espèces indigènes régionales. Elles sont parfaitement adaptées à leur environnement ainsi qu'aux exigences de la faune locale (Boisleux *et al*, 2017). La diversité des essences végétales dans les programmes de plantation en milieu urbain est également un critère à prendre en considération. En effet, les monocultures sont des écosystèmes fragiles, vulnérables aux maladies et aux parasites (Kelly, 2016). Pour exemple, 42.000 platanes (*Platanus acerifolia*) ont été plantés aux abords du canal du Midi, ils ont été attaqués par un champignon et 30.000 d'entre eux ont déjà été abattus (https://www.franceinter.fr/).

Le choix des essences d'arbres doit prendre en considérations les avancées des recherches scientifiques. Il semblerait que sous l'effet du rayonnement solaire, certaines essences utilisées couramment pour arborer les villes à l'instar du platane *Platanus acerifolia* peuvent émettre des composés volatils chimiques aggravant la pollution à l'ozone d'origine anthropique lors d'une période de forte chaleur. Il se trouve que cette espèce d'arbre représente plus de 40 % des arbres d'alignement à Paris (Churkina *et al*, 2017). Il faut également éviter les essences qui présentent un risque allergénique élevé. En effet, les arbres et d'une manière générale les plantes des milieux urbains sont plus stressés car l'environnement est contraignant. En conséquence, il s'opère une production plus importante de pollen, pouvant se fixer à certaines substances polluantes et augmentant ainsi le potentiel allergisant (ADEME, 2012). Le Réseau National de Surveillance Aérobiologique (RNSA) renseigne sur le potentiel allergisant des principales espèces de France métropolitaine (Tableau I).

4) Les toitures végétalisées ou toitures vertes

Les toitures végétalisées présentent de nombreux avantages, tant sur le plan esthétique et durable, que dans une perspective de protection de la biodiversité et de l'environnement en milieu urbain (Med & Fuchs, 2009). Pendant longtemps, les toitures végétalisées sont restées très peu répandues en France par rapport à certains de nos homologues Européens comme l'Allemagne où 15 % des toitures étaient déjà végétalisées en 1990 contre seulement 1 % en France en 2005 (Valette & Cordeau, 2010). Cependant, avec une progression en 2008 supérieure à 50 % la France prend enfin conscience des avantages environnementaux des toitures végétales et rattrape son retard. La mise en place de ce type de végétalisation peut s'opérer sur des surfaces dont la pente est inférieure ou égale à 35° (Med & Fuchs, 2009). Ainsi, le potentiel des toitures végétalisables a été estimé à 314 hectares uniquement à Paris (Valette & Cordeau, 2010) soit l'équivalent surfacique de 448 terrains de football. D'une manière générale, les toitures végétalisées se déclinent en système intensif, semi-intensif et extensif (Lebeuf, 2018).



Intensif Semi-intensif Extensif

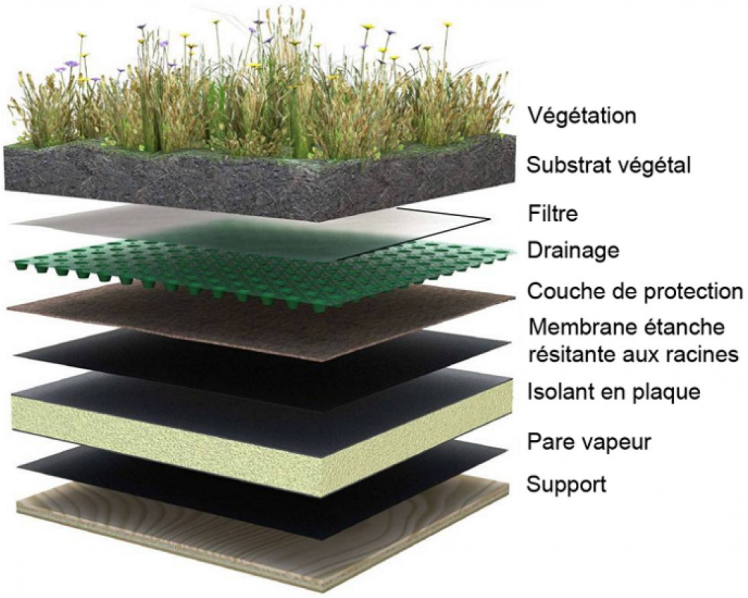


Figure.17 : Schéma de composition d'une toiture végétalisée d'après le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC).

4.1) Les différents types de toitures végétalisées

Il existe des différences fortes entre les fonctions remplies par les toitures dites extensives par rapport à celles dites intensives. D'une façon générale, les systèmes intensifs ou « terrasse-jardin » sont caractérisés par un sol profond, un poids élevé, un entretien fréquent, un coût relativement élevé ainsi qu'une grande diversité dans le choix des plantes comparativement aux systèmes extensifs. Les systèmes extensifs sont définis par un substrat mince, une plus grande légèreté, un faible coût, un entretien minime et un choix de plantes plus restreint (Lebeuf, 2008).

La technique la plus utilisée est celle de la toiture extensive. Ce type de toiture est facile à mettre en œuvre, c'est principalement des bryophytes (mousses), des plantes succulentes (sédum) et des plantes de rocaille qui y sont plantées (Valette & Cordeau, 2010). Les toitures extensives peuvent être mises en place sur n'importe quel type de toit dont la pente n'est pas trop importante. Les systèmes intensifs nécessitent une charpente ou une dalle surdimensionnée, selon le type de végétation que l'on souhaite mettre en place (Med & Fuchs, 2009). En conséquence, les systèmes extensifs sont moins chers, il faut compter 50 à 100 €/m² contre plus de 300 €/m² en système intensif d'après le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

4.2) Conception et mise en œuvre d'une toiture végétalisée

De manière à protéger l'enveloppe du bâtiment, une toiture végétalisée est constituée de plusieurs composantes. Traditionnellement, les systèmes disposent d'une structure portante, d'un isolant thermique, d'un pare-vapeur, d'une couche d'étanchéité anti-racines, d'une couche de drainage, d'une membrane filtrante, d'une couche de substrat et de végétation (Fig.17), (Lebeuf, 2008).

- La structure portante

La structure portante doit être pensée en fonction de l'installation souhaitée. Le poids du système peut tripler lorsqu'il est gorgé d'eau en cas de fortes précipitations. Ainsi, il convient d'intégrer la surcharge inhérente au poids de terre végétale humide dans le calcul des surfaces portantes.

- Isolation thermique et système d'étanchéité

Préalablement à l'installation d'une toiture végétale, il est recommandé de revoir l'isolation thermique du bâtiment afin de conserver la chaleur et ainsi réaliser des économies énergétiques. La couche d'étanchéité utilisée pour ce type d'ouvrage doit être résistante à la compression et aux racines (Med & Fuchs, 2009).

Les membranes bitumeuses de type Styrène Butadiène Styrène (SBS) qui est un caoutchouc synthétique conférant une plus grande élasticité à ces membranes, sont les systèmes d'étanchéité les plus recommandées mais uniquement dans leur version «anti-racines».

- Le système de drainage

Le système de drainage est fonction de l'inclinaison du toit, de la résistance de la structure portante, de l'épaisseur et de la nature du substrat. Le plus souvent, c'est l'utilisation du polyéthylène gaufré qui est retenue et permet de créer un espace de drainage d'environ 10 mm de hauteur dirigeant l'eau de pluie vers les gouttières extérieures.

- Le système de filtration

Le système de filtration est mis en place pour éviter le colmatage du système de drainage par le substrat. Ainsi, ce système est un filtre géotextile permettant la rétention du substrat, laissant l'eau s'égoutter et offrant un milieu humide pour les racines des plantes (Med & Fuchs, 2009).

- Le substrat et les espèces végétales

Le substrat utilisé doit être léger et résistant à la compaction tout en retenant l'eau. Sa composition est généralement un mélange de terre et/ou de compost végétal de feuilles ou d'écorces mélangé à des agrégats de pierres légères et absorbantes. Techniquement, toutes les espèces sont susceptibles d'être plantées mais certaines peuvent nécessiter des soins et un entretien contraignant. La végétation doit être choisie de façon cohérente en fonction de la localité, de l'orientation du bâtiment, de la pente du toit et de la nature du substrat. Les essences végétales à privilégier sont les plantes vivaces et indigènes tolérantes à la chaleur et au stress hydrique (Valette & Cordeau, 2010).

4.3) Les avantages des toitures végétalisées

De nombreux avantages environnementaux et économiques sont associés aux toitures végétales (Lebeuf, 2008).

Premièrement, les coûts d'entretien et les surcoûts de construction des toitures végétalisées ne doivent pas être un frein pour l'installation de ce type de structure. En effet, ils sont négligeables en comparaison des avantages que procurent les toitures végétalisées. Selon le CSTB, en France, le complexe étanchéité et végétalisation extensive est estimé entre 50 à 100 € le m^2 en fonction de la surface, de la pente, des végétaux choisis et des éventuels travaux de renforcement. Ainsi, ce type de toiture engendre en apparence un surcoût par rapport à un toit classique en tuile ou en ardoise. Cependant, l'allongement de la durée de vie de l'étanchéité rend à long terme cette solution moins coûteuse qu'un toit classique (Med & Fuchs, 2009).

De plus, les toitures végétales participent à la réduction du phénomène d'ICU et à la gestion des eaux de pluies. Selon une étude du Ministère Canadien, la végétalisation de seulement 6 % des toits des villes, pourrait engendrer une diminution de la température de l'air d'environ 1,5°C. Ainsi, les toitures végétales participent à l'économie des coûts de climatisation de l'ordre de 5 % dans les bâtiments concernés. Parallèlement, un toit végétal est en mesure d'absorber plus de 50 % de la quantité d'eau qui lui parvient, permettant une réduction des coûts de gestion de l'eau.

Les toitures végétalisées apparaissent également comme une solution élégante pour la protection de la biodiversité. Elles permettent la création d'habitats favorables à la flore et à la faune. En effet, les toitures extensives sont idéales pour l'accueil des plantes adaptées aux milieux secs et oligotrophes qui sont justement menacées de disparition à cause de l'eutrophisation générale des milieux. Il est également possible d'installer des ruches qui permettent la réintroduction des abeilles en ville.

V) Conclusion

Le phénomène d'ICU doit continuer d'être étudié pour permettre son identification dans l'ensemble du territoire français et ainsi prévenir des multiples effets néfastes que les ICU occasionnent tant sur l'environnement que sur la santé humaine. La méthodologie LCZ établie par Stewart et Oke semble être relativement accessible et applicable pour un grand nombre de décideurs qui souhaiteraient appréhender de façon plus précise leur territoire.

Dans ce contexte, la renaturation urbaine octroie de nombreux avantages à l'environnement urbain. Ainsi, les solutions de végétalisation existantes doivent être encouragées dans les projets d'aménagement.

Références bibliographiques

Anderson TR, Hawkins ED, Jones PD (2016). CO2, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. Endeavour **40** : 178-187.

ADEME (2012). Guide de recommandation pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain à destination des collectivités territoriales.

Bernard J, Musy M, Marie H (2020). Rafraîchissement des villes : solutions existantes et pistes de recherches. Adaptation au changement climatique et projet urbain, 16 pp.

Bigorgne J, Mangold A (2014). Les îlots de chaleur urbains à Paris – Cahier 2 : simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements. Atelier Parisien d'Urbanisme (Apur).

Boisleux F, Boussada S, Coomans V, Tison Y, Behr P, Carlier E, Delfanne F, Duraquet C, Freytet F, Gagnaire E, Halgrain S, Henique J, Koch S, Nourisson M, Miodowski V, Sauvage E, Regnier I, Wauthy D, Decoupigny D (2017). L'arbre en ville, vers une politique métropolitaine du patrimoine arboré. L'atelier des espaces publics de la métropole Lilloise. L'agence de développement et d'urbanisme de Lille métropole / métropole européenne de Lille. Cahier numéro 6.

Bouyer J (2009). Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Energie électrique. Université de Nantes.

Chadanson JC, Clément B, Correa N, Cuesta-Gicquel B, Laguille B, Primet C, Tourtel M (2019). Adapter les tissus urbains de la métropole bordelaise au réchauffement climatique.

Chauvigné J, Berens S, Caudron E (2019). Biodiversité & chantiers, comment concilier nature et chantiers urbains. LPO France, 80 pp (https://urbanisme-bati-biodiversite.fr/IMG/pdf/guide-biodiversite-et-chantiers.pdf).

Churkina G, Kuik F, Bonn B, Lauer A, Grote R, Tomiak K, Butler TM (2017). Effect of VOC Emissions from Vegetation on Air Quality in Berlin during a Heatwave. Environmental Science & Technology **51** : 6120 – 6130.

Colombert M (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Autre. Université Paris-Est, 541 pp.

Cordeau E, (2015). Vulnérabilité des villes à la hausse des températures, évaluée à l'aide des «zones climatiques locales, numéro 661.

Daniel M (2017). Villes, climat urbain et climat régional sur la France : étude par une approche de modélisation climatique couplée. École doctorale Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace (Toulouse), 209 pp.

Davenport AG, Grimmond CSB, Oke TR, Wieringa J (2000) Estimation de la rugosité des villes et des pays abrités, Preprints Conference on Applied Climatology, Asheville, Amer Meteorol Soc, Boston, 96–99

Dupras J, Drouin C, Andre P, Gonzalez A (2015) Towards the Establishment of a Green Infrastructure in the Region of Montreal (Quebec, Canada), Planning Practice & Research, **30** : 355 – 375.

Foissard X (2015). L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise. Géographie – Université Rennes 2, 248 pp.

Greuillet C, Galsomiès L (2013). L'îlot de chaleur urbain et le lien avec la qualité de l'air. Pollution atmosphérique – numéro spécial.

Grimmond C, Potter S, Zutter H, Souch C (2011). Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. International Journal of Climatology, **21** : 903– 913.

Henry A., Frascaria-Lacoste N., 2012. Comparing green structures using life cycle assessment: a potential risk for urban biodiversity homogenization? Int J Life Cycle Assess,**17** : 49.

Lebeuf PA (2018). Cerner l'impact de la végétation du bâtiment comme une solution durable pour les organisations. Maîtrise en environnement – université de Sherbrooke, 169 pp.

Leconte F, (2014). Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy.. Climatologie. Université de Lorraine, 274 pp.

Letcher M (2019). Managing Global Warming. An Interface of Technology and Human Issues. Academic Press **1** :3-15.

Liao KH (2012). A Theory on Urban Resilience to Floods—A Basis for Alternative Planning Practices. Ecology and Society, **17** : 48.

Med B, Fuchs A (2009). La végétalisation des bâtiments. Direction régionale de l'équipement d'île de France 46 pp.

Paramati SR, Mo D, Gupta R (2017). The effects of stock market growth and renewable energy use on CO2 emissions: Evidence from G20 countries. Energy Economics **66** : 360 – 371.

Phillips C, Debergue S, Barais C, Vignaud P, Marie H, Lapray K, Musy M, Lidbury E (2017). Diagnostic de la surchauffe urbaine, méthodes et applications territoriales. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

Projet EPICEA (2012) – Etude Pluridiscipliaire des Impacts du Changement Climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne. Synthèse des résultats du projet.

Qiao H, Zheng F, Jiang H, Dong K (2019). The greenhouse effect of the agriculture-economic growth-renewable energy nexus: Evidence from G20 countries. Sciences of The Total Environnement **671** : 722 - 731.

Roussel I (2017). Pour une ville durable qui conjugue les enjeux climatiques avec ceux de la qualité de l'air. Bulletin de la Société Géographique de Liège – Climatologie, 68.

Simard C, L'Ecuyer-Sauvageau C, Bissonnette JF, Dupras J (2019). Le rôle des infrastructures naturelles pour la gestion des eaux de ruissellement et des crues dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques. Le Naturaliste canadien **143** : 25 - 31.

Stewart I. (2011). Redefining the urban heat island. Thèse de doctorat, The University of British Columbia, Vancouver, 368 pp.

Stewart I, Oke T (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. Bulletin of the American Meteorological Society **93** : 12.

Terrin JJ, Marie JB (2015). Villes et changement climatique, îlots de chaleur urbains.

Thornes JE, Pope FD (2014). Why do we need Solutions to Global Warming in Geoegineering of the Climate System **1** : 1-21.

Unger, J. (2009). Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. International Journal of Environment and Pollution, **36** :59 – 80.

UICN France (2018). Les Solutions fondées sur la Nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France.

Vandentorren S, Suzan F, Medina S, Pascal M, Maulpoix A, Cohen JC, Ledrans M (2004). Mortality in 13 French Cities During the August 2003 Heat Wave. American Journal of Public Health **94** : 1518 – 1520.

Valette E, Cordeau E (2010). Les îlots de chaleur urbains – Répertoire de fiches connaissance. Institut d'aménagement et d'urbanisme d'île-de-France, Département Environnement urbain et rural.

Sites Internets

Réseau National de Surveillance Aérobiologique – consulté en janvier 2021 (https://www.pollens.fr/le-reseau/les-pollens).

Météo France – consulté en novembre 2020 (http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/comprendre-le-climat-mondial/leffet-de-serre-et-autres-mecanismes).

Eurostat 2014 - consulté en janvier 2021 (https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/products-pocketbooks/-/KS-EI-14-001).

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment – consulté en janvier 2021 (http://www.cstb.fr/fr).

Contact :

Mr Marie, Chargé de mission transition énergétique chez Communauté Urbaine Caen la mer, rendez-vous téléphonique 2020.

Résumé

Cet ouvrage de recherches bibliographiques s'adresse aux professionnels de l'aménagement urbain et aux décideurs politiques. Il apporte des informations sur l'environnement urbain du 21ème siècle et sur la nécessité de repenser les caractéristiques des villes en fonction des enjeux actuels liés au réchauffement climatique. Dans ce contexte, il sera notamment abordé le phénomène d'Îlot de Chaleur Urbain (ICU) et les risques environnementaux et sanitaires associés. Ainsi, il sera présenté les différentes méthodologies développées pour identifier les zones sujettes aux ICU. Parmi celles-ci, la classification LCZ établie par les géographes Canadiens Stewart et Oke semble être une méthode générique, standardisée, et accessible pour un grand nombre d'élus souhaitant améliorer leur compréhension du territoire. De plus, une réflexion sera effectuée sur les effets de la renaturation pour lutter contre le phénomène d'ICU et plus largement sur l'environnement urbain. En effet, la réintroduction d'espaces naturels est une des solutions les plus efficaces pour lutter contre l'effet d'ICU. Il sera présenté une liste non-exhaustive des solutions de végétalisation du tissus urbains ainsi que les services écosystémiques affiliés.

Mots clefs : Réchauffement climatique, Aménagement urbain, Îlot de Chaleur Urbain (ICU), Renaturation, Végétalisation, Services écosystémiques.

Summary

This bibliographical research book is aimed at urban planning professionals and policy makers. It provides information on the urban environment of the 21st century and the need to rethink the characteristics of cities according to current challenges related to global warming. In this context, the UCI phenomenon will be discussed and associated environmental and health risks. Thus, it will be presented the different methodologies developed to identify the areas subject to ICU. Among these, the LCZ classification established by Canadian geographers Stewart and Oke seems to be a generic, standardized, and accessible method for a large number of elected officials wishing to improve their understanding of the territory. In addition, a reflection will be made on the effects of renaturation to combat the phenomenon of ICU and more broadly on the urban environment. Indeed, the reintroduction of natural spaces and more widely of plants in the city is one of the most effective solutions to fight against the effect of ICU. A non-exhaustive list of urban tissue revegetation solutions and associated ecosystem services will be presented.

Keywords: Global warming, Urban planning, Urban Heat Island (ICU), Renaturation, Vegetation, Ecosystem services.