

Caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain et recherche d'une solution paysagère pour le site de la résidence Damrémont à Paris

Auteur : Hirsch, Yolène

Promoteur(s) : Bogaert, Jan; 3262

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master architecte paysagiste, à finalité spécialisée

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/2982>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain et recherche d'une solution paysagère pour le site de la résidence Damrémont à Paris

Yolène Hirsch

**Travail de Fin d'Etudes présenté en vue de l'obtention du
Diplôme de Master d'Architecte Paysagiste**

Année Académique 2016 - 2017

Promoteur : Professeur Jan Bogaert

Co-promoteur : Julien Bigorgne (Atelier Parisien d'Urbanisme)

Toute reproduction du présent document par quelque procédé que ce soit ne peut être autorisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et du président du Comité de Gestion du Master en Architecture du Paysage.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier vivement le professeur Jan Bogaert, pour son aide majeure dans l'orientation de ce travail de fin d'études, et pour la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de l'année.

Je remercie également M. Bigorgne, de l'Atelier Parisien d'Urbanisme, pour ses précieux conseils et explications en sa qualité de co-promoteur ; ainsi que Mme Blancot, qui a permis que cette collaboration voie le jour et qui m'a autorisée à accéder aux données cartographiques de la ville de Paris.

D'autre part, j'adresse mes remerciements à M. Babalone et Mme Gobran, de la société AERODATA, pour leur disponibilité et leur grande contribution à la mise à jour des données.

Pour terminer, je souhaite remercier tout particulièrement ma famille et mes proches pour leur soutien sans faille et leurs conseils avisés : Maëva Hirsch, Claudia Hirsch, Olivier Hirsch, Michaël Devesa, Claire Dauchy, Nestor Zamudio et Félicy Hirsch.

Résumé

Les villes présentent un microclimat où les températures sont significativement plus élevées que celles des zones rurales voisines: on parle d'îlot de chaleur urbain. Cette augmentation de température, liée à l'urbanisation, peut avoir des impacts sanitaires très graves. La problématique des îlots de chaleur urbains a été mise sur le devant de la scène lors de la vague de chaleur de l'été 2003, qui a causé 70 000 décès en Europe. Depuis, elle est de plus en plus prise en compte dans les politiques d'aménagement urbain, et de nombreuses études scientifiques tentent de préciser les causes et les conséquences du phénomène.

Ce travail de fin d'études cherche à proposer une analyse des îlots de chaleur urbains, dans une optique d'atténuation du phénomène, grâce à des aménagements paysagers locaux. Plus particulièrement, il s'est attaché à la ville de Paris, en décrivant l'îlot de chaleur urbain par l'étude d'une carte thermique. Ces observations ont permis d'identifier un site marqué par un îlot de chaleur intra-urbain, pour lequel un projet d'aménagement est élaboré. Les solutions proposées s'inspirent de l'analyse d'actions menées dans deux agglomérations, Lyon et Montréal.

Les facteurs qui influencent l'apparition et l'intensité d'un îlot de chaleur urbain sont principalement la perméabilité des sols, la présence d'eau, la présence de végétaux, les caractéristiques des matériaux et la forme urbaine.

D'après les exemples étudiés dans ce mémoire, les solutions qui semblent être les plus efficaces sont l'ajout de végétaux (en particulier d'arbres), la présence de surfaces d'eau et l'utilisation de matériaux de revêtement de couleur claire. Ces enseignements ont permis d'élaborer un projet d'aménagement sur une résidence parisienne et ses alentours, qui comporte deux variantes: une première où l'espace est aménagé de façon relativement uniforme, utilisant les solutions identifiées comme les plus efficaces; et une seconde où les cours intérieures se prêtent à des tests sur l'influence des types de solution. Ce projet s'intègre donc à la préoccupation globale de résolution de la problématique de l'ICU grâce à des aménagements paysagers, afin de diminuer les risques sanitaires et d'améliorer la qualité de vie des citoyens.

Mots-clés : îlot de chaleur urbain, îlot de chaleur intra-urbain, atténuation, ville de Paris, aménagement paysager

Note :

Compte tenu que certains éléments utilisés ici n'ont pas encore été publiés, ce travail de fin d'études doit rester CONFIDENTIEL jusqu'à la publication du Cahier n°4 sur l'îlot de chaleur urbain de Paris de l'Atelier Parisien d'Urbanisme.

Sommaire

Introduction	6
1. Présentation de la problématique des îlots de chaleur urbains	8
Introduction	8
1.1 Définitions et fonctionnement	8
1.2. Conséquences de l'îlot de chaleur urbain	20
2. Identification et cartographie des îlots de chaleur urbains de Paris	24
Introduction	24
2.1. Présentation de la carte thermique	24
2.2. Les manifestations de l'îlot de chaleur urbain	28
3. Présentation des solutions existantes	36
Introduction	36
3.1 Lyon, une intervention sur le quartier de la Part-Dieu	36
3.2 Montréal, une action à l'échelle de la ville	41
3.3 Conclusion partielle	46
4. Illustration par un projet sur le site de la résidence Damrémont	50
4.1 Diagnostic	50
4.2 Identification des solutions applicables au site	60
4.3 Proposition du projet	66
5. Discussion, conclusion	74
Glossaire	76
Abréviations	77
Bibliographie	78
Liste des figures	81
Liste des tableaux	85
Annexes	86

Selon les estimations, 66% de la population mondiale habitera en ville à l'horizon 2050 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2015).

Or la ville présente un climat spécifique, caractérisé par un phénomène bien particulier : l'îlot de chaleur urbain (ICU).

Ce phénomène, découvert en 1820, est observé dans la plupart des villes, sur toute une gamme de latitudes et de régimes climatiques. En effet, ces villes présentent des températures plus élevées que la campagne alentour. Dans les grandes villes, la différence entre températures de l'air urbain et rural peut aller de 2 à 10 °C. Cela implique également que la moyenne et le minimum de température sont plus élevés en ville que dans le milieu rural à proximité et que les périodes journalières de températures froides, saisons froides et jours de gel sont toutes réduites en ville (Gaston 2010).

Depuis vingt ans, les chercheurs s'intéressent tout particulièrement à ce phénomène, ce qui a permis de mieux comprendre ses mécanismes et de se rendre compte de deux éléments capitaux : d'abord il est plus important la nuit et ensuite, il se développe premièrement en été et tend à augmenter en même temps que la taille de la ville et/ou sa population (Alberti 2008).

Avec l'îlot de chaleur urbain, la température de l'air augmente, ce qui accroît le stress hydrique et les concentrations de l'air en polluants, deux éléments qui influent sur la santé. Le phénomène a donc une influence très importante sur la santé humaine et la vague de chaleur de 2003 l'a illustré de façon frappante en causant un nombre inhabituel et inattendu de décès dans les villes de France, d'Italie et d'Allemagne. En effet, l'ICU étant plus prononcé la nuit, la température ne diminuait pas suffisamment en soirée pour permettre le repos physiologique nécessaire après le stress hydrique subi pendant la journée.

Par ailleurs, la température à l'échelle mondiale a augmenté au cours du vingtième siècle de 0,7°C (Conseil de Paris 2012) .

Le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) estime que la température de la Terre pourrait continuer d'augmenter pendant le 21ème siècle de 3 à 6°C si la tendance actuelle en termes d'évolutions démographiques, de modes de consommation et d'utilisation des sols ne change pas. Cela pourrait entraîner une raréfaction des ressources, des migrations importantes et d'autres phénomènes auxquels les sociétés devront

s'adapter (Actu-Environnement 2015). Il est donc nécessaire de travailler sur l'îlot de chaleur urbain afin de pouvoir prévenir et limiter ses effets dans le temps, d'autant plus que l'humain est très sensible aux stress thermiques et qu'il est fort probable que les vagues de chaleur deviennent de plus en plus fréquentes avec le réchauffement climatique (Parlow 2011).

L'augmentation de la population et l'élargissement des villes constituent donc un défi à l'urbanisation et à l'aménagement du territoire au regard du phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Ce travail de fin d'étude s'intéresse à la ville de Paris qui présente un îlot de chaleur avéré (Escourrou 1990)

L'hypothèse à confirmer est celle selon laquelle il est possible de proposer des aménagements dans Paris qui limitent l'effet d'îlot de chaleur urbain dans le contexte du réchauffement climatique. Cela signifie qu'il sera nécessaire de vérifier les hypothèses spécifiques suivantes :

- Comprendre les mécanismes régissant l'ICU permet d'identifier les leviers susceptibles de l'atténuer
- L'ICU de Paris est bien régi par les mécanismes théoriques de l'ICU et il se manifeste de façon non uniforme, en particulier et plus intensément dans les îlots de chaleur intra-urbains (ICIU)
- Des aménagements qui réduisent les effets des ICIU ont été mis en place dans d'autres métropoles
- Ces aménagements peuvent être adaptés à Paris pour limiter les effets des ICIU

L'objectif est donc de participer à l'atténuation de l'ICU de Paris en remplissant les objectifs spécifiques suivants :

- Comprendre la problématique de l'ICU
- Caractériser l'ICU parisien à différentes échelles et observer la répartition des ICIU
- Identifier des techniques de limitation des ICU
- Répondre au besoin de diminution de l'ICU dans Paris

Pour cela, il s'agira tout d'abord d'expliquer les mécanismes physiques et environnementaux de formation de l'ICU, puis d'en indiquer les conséquences. Ensuite, l'identification de l'expression de l'ICU sur la ville de Paris et la comparaison de différentes méthodes d'atténuation permettront de formuler une alternative d'aménagement à Paris.

Introduction

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) est le fait que la température de l'air en ville est plus élevée que celle des zones rurales avoisinantes. En général, la ville est plus chaude que la campagne toute la journée et l'effet s'intensifie la nuit. Ce phénomène a été découvert en 1820 par le météorologue Luke Howard. Il a observé que les températures de l'air sont plus importantes dans la ville de Londres que dans les sites ruraux à proximité pendant la nuit (+2,1°C en moyenne) (Landsberg dans Gaston 2010; Parlow 2011). Suite à cela, de nombreuses études ont confirmé ces observations au niveau mondial, comme celles de Bornstein en 1968, Oke et East en 1971, Oke en 1973 et en 1976, Nkemdirim en 1976, Horbert et al en 1982 ou encore Cayan et Douglass en 1984, Balling et Cerveny en 1987, Watkins et al en 2002, Gedzelman et al en 2003 et Souch et Grimmond en 2006 (Alberti 2008).

1.1 Définitions et fonctionnement

Le phénomène d'ICU peut être expliqué physiquement par deux éléments: le bilan radiatif, qui indique la quantité de radiations solaires retenues par l'environnement, et le bilan de flux de chaleur, qui explique comment se répartissent les radiations dans l'environnement.

D'autre part, des facteurs environnementaux, comme la présence d'eau et de végétaux, la nature et les propriétés des matériaux présents, influencent la formation et l'intensité de l'ICU (Bigorgne 2015).

1.1.1 Bilan radiatif

Le bilan radiatif de la Terre est la différence entre la radiation solaire arrivant et celle sortant de la Terre. La planète (atmosphère, océans et surface des continents) reçoit de l'énergie du Soleil sous forme de radiations de courtes longueurs d'onde (0,2 à 4 micromètres). Une petite partie de cette radiation est réfléchie dans l'espace par l'atmosphère et une autre rentre dans l'atmosphère et est déviée vers la Terre (figure 1.1). Le reste est principalement absorbé par la surface terrestre (une faible part est cependant réfléchie directement vers l'espace par la surface du globe) (Climate Challenge 2013; Habert 2017).

La chaleur absorbée par la surface terrestre a pour effet d'augmenter la température de la Terre qui émet à son tour des radiations. En effet, toute matière dont la température est supérieure au zéro absolu* émet des ondes élec-

tromagnétiques qui forment le rayonnement thermique (Climate Challenge 2013; Habert 2017; Lehoucq 2016).

Or d'après la loi du déplacement de Wien (Benson 2009) :

$$(1) \lambda_{\max} = B/T$$

Avec

B: la constante de Wien ($B = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ K.m}$)

T : la température en K

$\lambda_{\max}$: la longueur d'onde en mètres

La longueur d'onde des radiations dépend donc de la température de la surface émettrice : plus la température de la surface est élevée, plus les longueurs d'onde émises sont petites (Benson 2009). C'est pourquoi le Soleil émet des rayonnements de plus petites longueurs d'ondes que la Terre. Il se produit ainsi un échange continu de rayons de grandes longueurs d'ondes (infrarouge entre 5 et 100 micromètres) entre la surface du globe et l'atmosphère, qui permet au bilan radiatif de la Terre d'être toujours en équilibre.

Si un seul des composants du système change, le bilan sera perturbé. La température de la surface terrestre sera donc modifiée et un nouvel équilibre se mettra en place (Climate Challenge 2013; Habert 2017). Ainsi, si la capacité d'absorption de chaleur de la Terre est augmentée en un endroit suffisamment étendu, comme une ville, la quantité d'énergie absorbée augmente et avec elle, la température, ce qui génère un changement de climat local. Cela implique également une hausse de la quantité de radiations émises par la terre en cet endroit, que l'on peut mesurer.

On utilise le bilan radiatif pour évaluer les effets du rayonnement solaire sur la surface terrestre.

En termes physiques, ce bilan rend compte de la météorologie, de la température, des vents et de la situation bioclimatique le jour et est exprimé par l'équation suivante (Parlow 2011) :

$$(2) Q^* = E_{sd} - E_{su} + E_{ld} - E_{lu}$$

Avec :

Q^* : radiation totale nette

E_{sd} : radiation solaire descendante de courtes longueurs d'ondes

E_{su} : radiation ascendante de courtes longueurs d'ondes (réflexion)

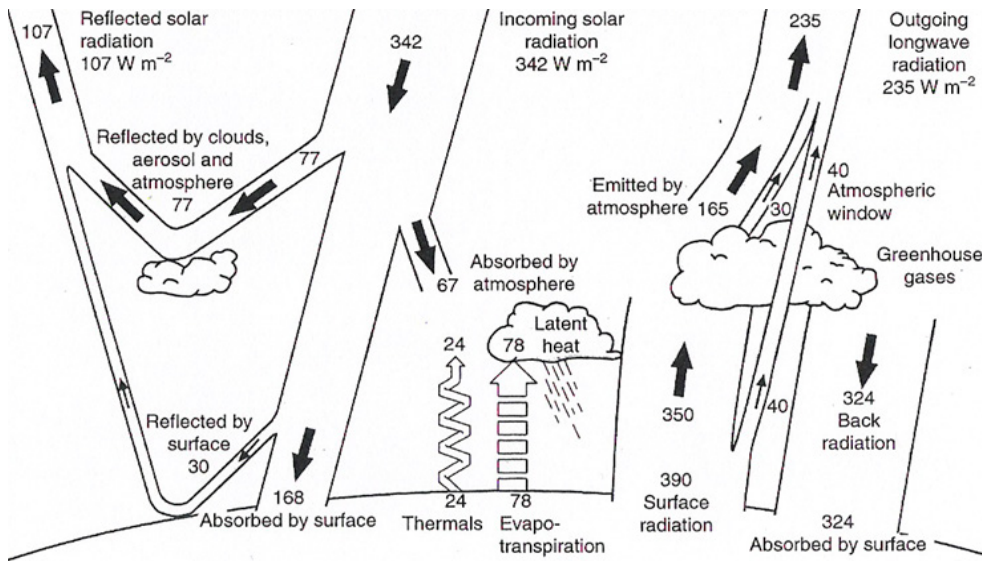


Figure 1.1 :Schéma de la dynamique des rayonnements du Soleil arrivant sur la Terre. Les unités sont en $W.m^{-2}$. Ce schéma montre le bilan radiatif global annuel moyen de la Terre (Kiehl et Trenberth 1997)

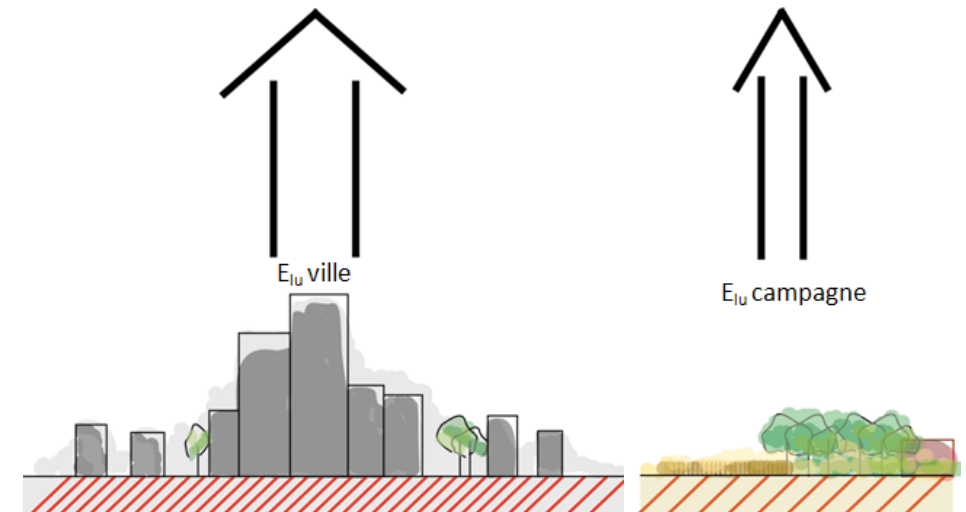


Figure 1.2 : Schéma représentant les différences d'émission ascendante de surface de grande longueur d'onde (Elu) entre la ville et la campagne(source personnelle).

Table 1.2.1 Albedo of different surface types

Surface type	Albedo
Soil, dark wet	0.06–0.08
Soil, light dry	0.16–0.18
Stones	0.2–0.3
Forest, coniferous	0.05–0.15
Forest, deciduous	0.10–0.25
Grass, green	0.26
Rock, granite	0.12–0.18
Road, asphalt	0.05–0.15
Buildings	0.09
Concrete	0.15–0.37
Urban, mean	0.15

Tableau 1.1 : Albédos selon les types de surfaces (Parlow 2011)

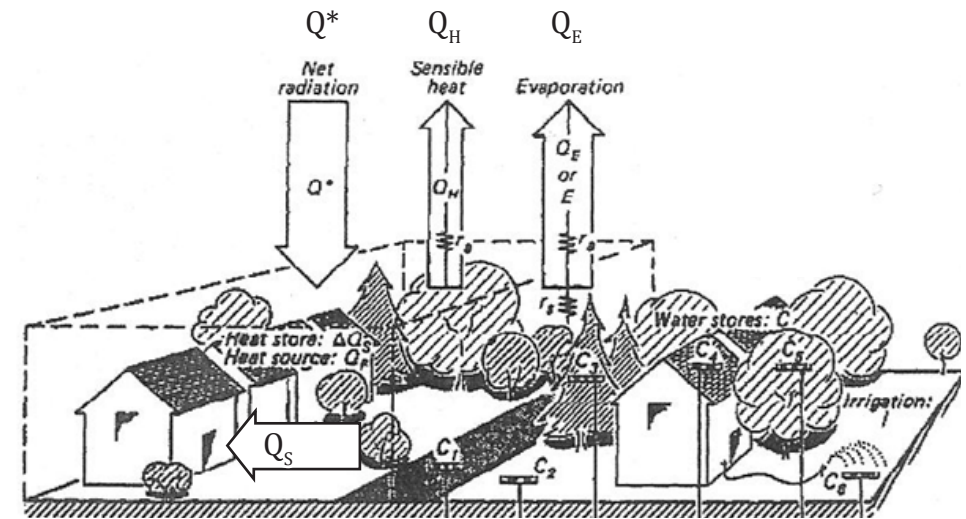


Figure 1.3 : Illustration des flux de chaleur en ville le jour et du lien entre l'énergie et les échanges en eau à la surface urbaine (d'après Grimmond et Oke dans Bogaert 2017)

E_{ld} : contre-radiation atmosphérique de grandes longueurs d'ondes

E_{lu} : émission ascendante de la surface de grandes longueurs d'ondes

Ce bilan permet de répartir l'ensemble du rayonnement solaire reçu par la Terre (Q^*) en quatre catégories.

Tout d'abord, la radiation solaire descendante de courtes longueurs d'ondes (E_{sd}) correspond à la quantité de rayonnement de courtes longueurs d'ondes arrivant à la surface de la Terre. Cette radiation dépend de la forme en trois dimensions de la ville, c'est-à-dire la largeur des rues, la taille et le type des bâtiments, ainsi que l'extension des espaces verts. Ces éléments produisent des effets d'ombre ou de réflexion de la lumière qui influent sur la quantité de rayons que la surface va recevoir directement.

La radiation ascendante de courtes longueurs d'ondes (E_{su}) correspond à la quantité de rayonnement qui sera réfléchi directement par la Terre. Elle dépend des matériaux de surface et de leurs capacités de réflexion. D'ailleurs, la notion d'albédo*, qui décrit la réflectivité* d'une surface, peut être définie par le rapport E_{su}/E_{sd} (la quantité de rayonnement réfléchi par rapport à la quantité de rayonnement reçue) qui varie entre 0 (pas de réflexion, surface noire) et 1 (réflexion totale, surface blanche). La ville a généralement des valeurs d'albédo plus faibles que la campagne (Parlow 2011), (tableau 1.1).

La contre-radiation atmosphérique de grandes longueurs d'ondes ou radiation descendante de grandes longueurs d'ondes (E_{ld}) correspond à la quantité de rayonnement renvoyée par l'atmosphère vers la Terre. C'est une grande source d'énergie qui dépend principalement, par beau temps, de la température de l'air et de la présence de vapeur d'eau dans la basse atmosphère. Sa valeur change peu au cours de la journée car l'air est brassé par les turbulences. L'émission ascendante de la surface de grandes longueurs d'ondes (E_{lu}) correspond à la quantité de rayonnement émise par la Terre. C'est le flux de radiation le plus important. Ce flux est responsable des grandes différences entre les sites urbains et les sites ruraux (figure 1.2). La radiation émise par la Terre à un endroit donné dépendant de la température de sa surface en ce point, plus la surface aura une température élevée, plus la quantité de rayonnement sera grande.

Cela s'explique par la loi de Stefan-Boltzman, qui dit que :

$$(3) E_{lu} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4$$

Avec : σ : constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

ε : l'émissivité (s.u.) ; T : la température de la surface en K (Parlow 2011)

Ainsi, le bilan de radiation nous permet de connaître la quantité d'énergie présente à la surface de la Terre. La répartition de cette énergie peut être analysée grâce au bilan des flux de chaleur.

1.1.2 Bilan des flux de chaleur

Le bilan des flux de chaleur permet de décrire spécifiquement les conditions urbaines. Il montre la répartition du gain d'énergie du rayonnement net (Q^*) en différentes densités de flux de chaleur. Il est défini physiquement par la formule suivante :

$$(4) Q^* + Q_H + Q_E + Q_S + Q_F = 0$$

Q^* : rayonnement net

Q_H : densité de flux de chaleur sensible: température de l'air

Q_E : densité de flux de chaleur latente: évapotranspiration

Q_S : densité de flux de chaleur de stockage : stockage dans le sol et les matériaux des constructions

Q_F : densité de flux de chaleur anthropique

Ces flux sont mesurés par rapport à une surface de référence considérée sans volume et donc qui ne participe pas au stockage de la chaleur. Les flux de chaleur sont positifs ou négatifs selon leur direction. Si un flux est dirigé vers la surface de référence, alors il est considéré comme positif. S'il se dirige hors de la surface, il est négatif (Parlow 2011).

D'après l'équation et sur la figure 1.3, on observe que pendant le jour, le rayonnement net est positif et est réparti dans les autres flux de chaleur (sensible, latente, stockage).

Le flux de chaleur sensible joue sur la température de l'air (Parlow 2011). Ce flux correspond à un échange de chaleur par convection* entre la surface et l'air. La chaleur sensible modifie la température d'un objet (OLF, 1990).

Le flux de chaleur latente correspond à l'évaporation d'une quantité d'eau pour un temps donné. On appelle ce flux évapotranspiration car il correspond à l'évaporation* de l'eau dans l'environnement (sol, feuilles, eau libre) et à la transpiration foliaire (Luquet dans Kotchi 2004). La chaleur latente* est la chaleur qui modifie l'état physique d'une matière. Un apport de chaleur latente fait passer l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur, par exemple.

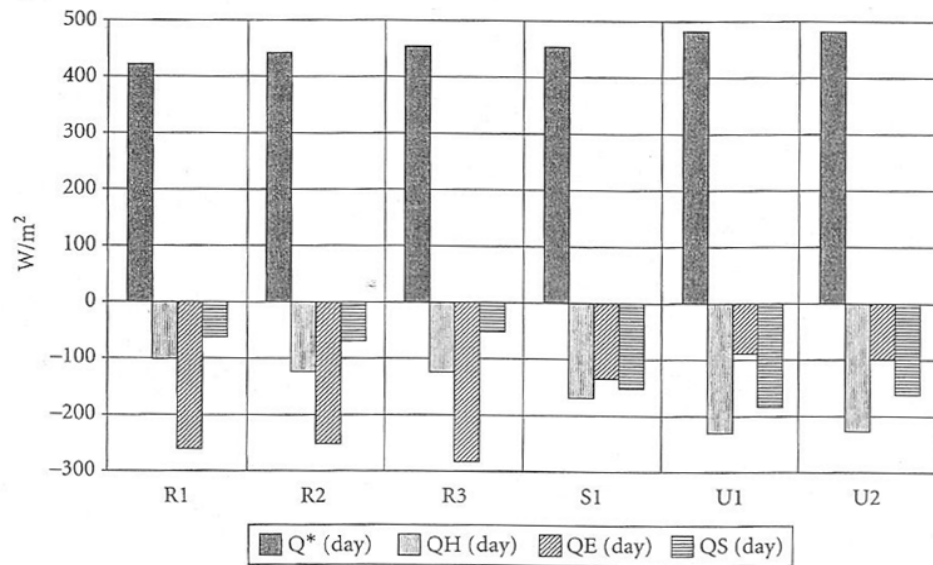


Figure 1.4.1: Moyenne des radiations et des flux de chaleur le jour pour deux sites ruraux (R1 et R2), un site périurbain (S1) et deux sites urbains (S1 et S2) pendant l'étude BUBBLE (Christen et Vogt dans Parlow 2011)

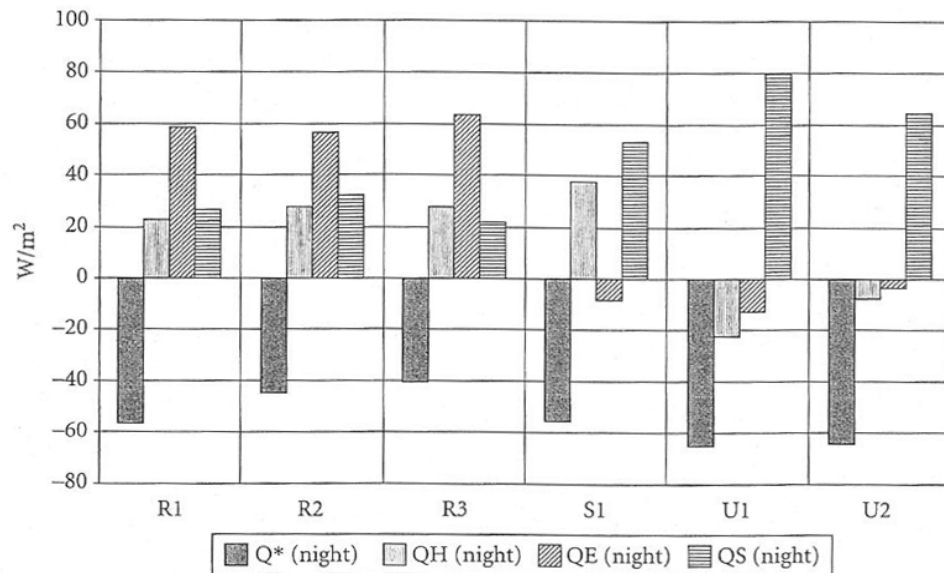


Figure 1.4.2 : Moyenne des radiations et des flux de chaleur la nuit pour deux sites ruraux (R1 et R2), un site périurbain (S1) et deux sites urbains (S1 et S2) pendant l'étude BUBBLE (Christen et Vogt dans Parlow 2011)

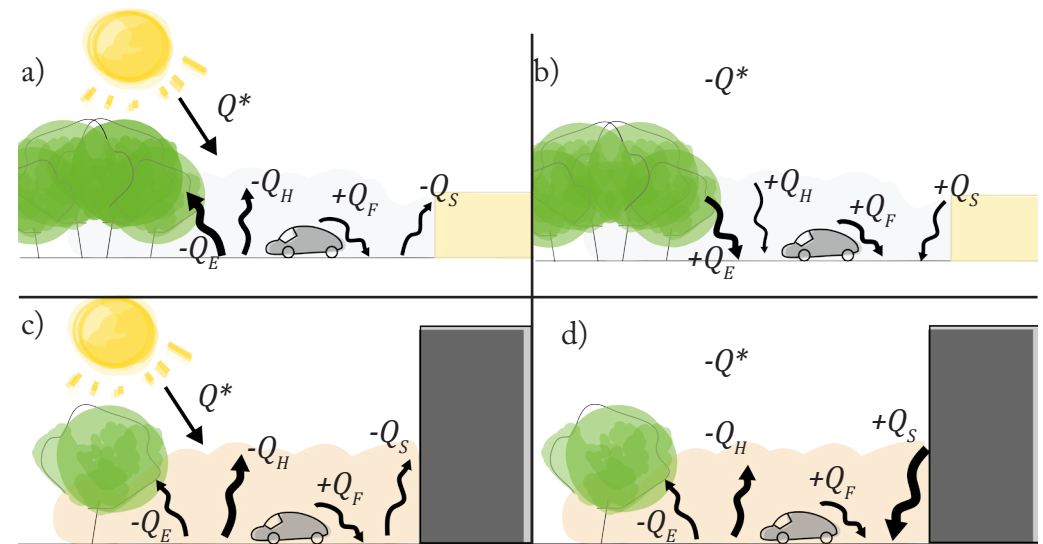


Figure 1.5 : Schéma de la répartition du rayonnement net en flux de chaleur. Le sol est considéré comme une surface sans épaisseur, comme surface de référence. a) environnement rural le jour, b) environnement rural la nuit, c) environnement urbain le jour, c) environnement urbain la nuit d) (source personnelle)

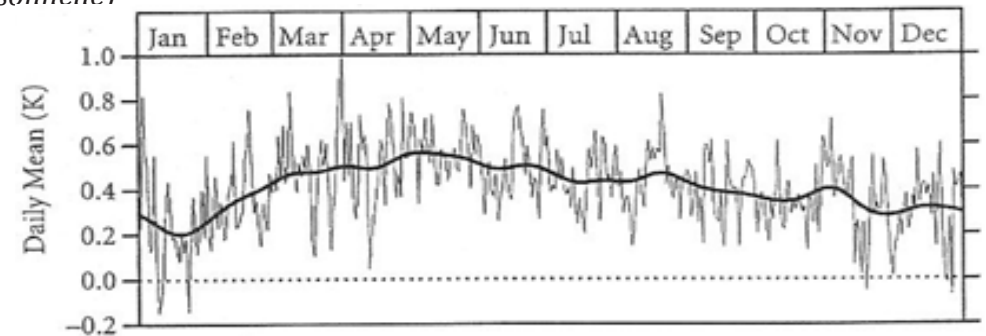


Figure 1.6.1: dynamique annuelle des différences de températures journalières (Christen et Voat dans Parlow 2011)

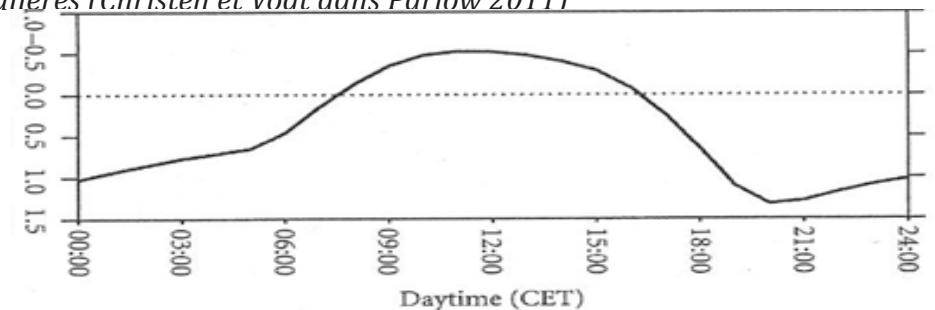


Figure 1.6.2 : dynamique des températures sur 24h avec des valeurs annuelles moyennes (Christen et Vogt dans Parlow 2011)

Le flux de chaleur de stockage correspond à la chaleur stockée dans le sol ou les matériaux des bâtiments.

Le flux anthropique indique les apports de chaleur issus des activités humaines : libération d'énergie par la combustion de ressources fossiles, chaleur dégagée par les activités industrielles, la circulation, le chauffage et l'air conditionné. Dans le contexte de cette étude, on considère ce flux comme négligeable par rapport aux autres (Parlow 2011).

Le bilan des flux de chaleur permet de comprendre l'importance des différences entre jour et nuit dans la répartition de l'énergie. En principe le jour, l'air, les plantes et les matériaux (dont le sol) absorbent le rayonnement (valeurs négatives par rapport à une surface de référence théorique sans épaisseur qui n'absorbe donc pas le rayonnement) alors que la nuit, le rayonnement net étant négatif, l'air, les plantes et les matériaux de l'environnement réémettent le rayonnement (valeurs positives par rapport à la surface de référence qui reçoit ces radiations).

Lors de l'étude BUBBLE (Basel Urban Boundary Layer Experiment) - qui avait pour but de comprendre les processus d'échange dans les espaces urbains en mesurant continuellement des données micro-météorologiques de surface sur différents sites de la ville de Bâle en Suisse (Christen et Vogt 2002) - les chercheurs ont analysé sur trois sites ruraux, un site périurbain et deux sites urbains la moyenne du rayonnement net et sa répartition en densités de flux de chaleur, en différenciant les valeurs du jour et de la nuit. Cette répartition est visible sur la figure 1.4.1 pour le jour et la figure 1.4.2 pour la nuit (Parlow 2011).

On voit que le jour, le rayonnement reçu dans les sites ruraux est réparti pour sa plus grande partie en flux de chaleur latent. Les flux de chaleur sensible et de stockage se répartissent le reste du rayonnement dans de plus faibles proportions. Pour le site périurbain, le rayonnement reçu est réparti plus équitablement parmi les différents flux de chaleur. On peut noter que les flux de chaleur de stockage sont plus grands que dans les sites ruraux.

Dans les sites urbains, le flux de chaleur sensible est très élevé et le flux de chaleur de stockage est presque quatre fois plus grand que dans les sites ruraux (il peut aller jusqu'à représenter la moitié du rayonnement net). Cela s'explique par le fait que les matériaux de la ville stockent très efficacement la chaleur.

La nuit, le rayonnement net moyen est négatif et compensé par les autres flux de chaleur qui sont positifs. Les températures des surfaces urbaines sont plus élevées que celles des surfaces rurales, elles dégagent donc plus de rayonnement.

Dans les sites ruraux, le rayonnement net est compensé par tous les autres flux de chaleur. Le flux de chaleur sensible entraîne une diminution de la température de l'air, le flux de chaleur latent est responsable de la condensation et le flux de chaleur de stockage diminue la température des sols.

La nuit, sur les sites urbains et périurbains, le rayonnement net est compensé principalement par le flux de chaleur de stockage. Sur les sites urbains, le flux de chaleur de stockage est plus important que le rayonnement net : il y a surcompensation. Cela donne lieu à la conservation d'une petite partie des flux de chaleur sensibles et latents (l'air continue de se réchauffer et les plantes continuent d'évapotranspirer).

L'importance du flux de stockage s'explique par la capacité des matériaux de la ville à se comporter comme des batteries qui emmagasinent l'énergie le jour et la relâchent la nuit. La diminution de la température de l'air en ville la nuit est donc beaucoup plus faible qu'à la campagne (figure 1.5).

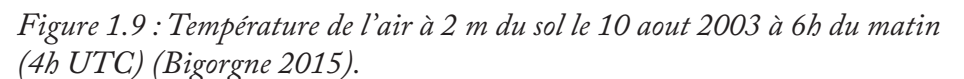
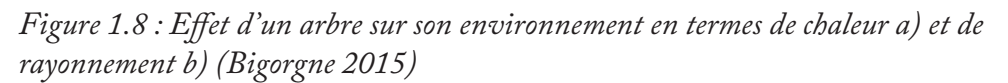
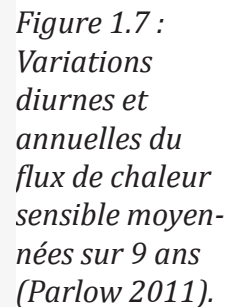
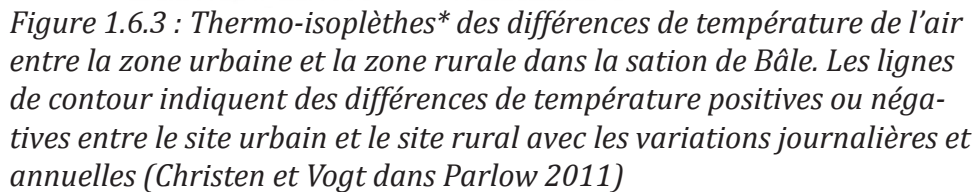
Les températures de l'air urbain sont donc en général de quelques degrés plus élevées que celles des lieux ruraux, que ce soit à l'échelle quotidienne ou annuelle. Cet aspect du climat urbain est présent dans la majorité des grandes villes dans le monde et n'est pas lié aux effets de saisons.

La pérennité de l'îlot de chaleur a d'ailleurs été montrée dans l'étude BUBBLE par la mise en évidence de l'évolution de la différence de température entre la ville et la campagne (Parlow 2011).

Les figures 1.6.1, 1.6.2, 1.6.3 montrent une vue globale des dynamiques diurnes et annuelles de l'effet d'îlot de chaleur urbain, mesurées à une station urbaine à Bâle et dans la station rurale de Fischingen (à 5km) et moyennées sur 9 ans (entre 1994 et 2002).

On remarque sur la figure 1.6.1 que la moyenne journalière des températures des sites urbains est entre 0,2°C et 0,5°C plus élevée que celle des sites ruraux, et ce tout au long de l'année. Cela indique bien que la présence de l'îlot de chaleur urbain ne dépend pas des effets de saison.

Sur la figure 1.6.2, on voit que la température de l'air urbain est plus élevée que celle de l'air rural de 1,4°C la nuit, alors que le jour, les températures urbaines sont jusqu'à 0,5K (0,5°C) plus faibles que les températures rurales.



L'îlot de chaleur s'exprime donc particulièrement la nuit alors qu'il est pratiquement absent le jour.

L'imagerie satellite présentant souvent de hautes températures de surface le jour, on pourrait conclure que la température de l'air est plus importante en ville. Or cela doit être mis en relation avec le bilan de flux de chaleurs.

En effet, les températures de surface sont plutôt dépendantes des flux de chaleur de stockage, alors que la température de l'air provient de la chaleur sensible* et des mouvements d'air dans la couche inférieure de l'atmosphère. Les matériaux de la ville captent donc le rayonnement et le stockent pendant que la chaleur sensible, et donc la température ambiante, restent faibles et moins importantes que celles de la campagne.

L'effet d'îlot de chaleur urbain est plus fort lors des premières heures du soir et dépasse $+2^{\circ}\text{C}$ à 21h, comme le montre la figure 1.6.3. La ligne d'équilibre qui relie les points où la différence de température est nulle suit les variations de la longueur du jour (le soir et le matin). La période d'ICU est plus courte (nuit plus courte) mais plus intense en été qu'en hiver. Si on prenait des mesures journalières non moyennées, on pourrait observer des différences de température pouvant excéder les 8°C , même dans la période la plus chaude de la vague de chaleur européenne de 2003 (Parlow dans Parlow 2011), alors qu'on pourrait s'attendre à ce que l'intensité de la chaleur lors de ces événements soit telle que la campagne soit autant impactée que la ville.

En ville, le flux de chaleur sensible est négatif aussi bien le jour que la nuit, ce qui indique que le flux est dirigé de la surface vers l'atmosphère (figure 1.7). Le flux de chaleur sensible atteint -180 W.m^{-2} en été pendant la journée.

Tout au long de l'année, ce flux reste négatif (entre -10 et -20 W.m^{-2}), il se dirige de la surface vers l'atmosphère (Christen et Vogt dans Parlow 2011). En revanche, le flux de chaleur de stockage va dans le sens inverse; c'est donc ce flux qui compense totalement le rayonnement net négatif. Cela explique que les températures de l'air en ville pendant la nuit restent à un niveau significativement plus élevé que celles des milieux ruraux.

1.1.3 Facteurs influençant l'ICU

Les facteurs qui influent sur la présence et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain sont en réalité tous issus du phénomène d'urbanisation et seront présentés dans l'ordre suivant : d'abord les facteurs qui touchent de près au sol et qui traduisent les modifications faites aux écosystèmes initiaux : sols perméables, présence d'eau et de végétaux et matériaux; puis ceux qui sont en relation

avec la forme tridimensionnelle de la ville.

1.1.3.1 Sols imperméables

Le premier effet de l'urbanisation est l'imperméabilisation des sols. Or, le type de couverture du sol (végétation, sol nu, surface pavée) et l'utilisation du sol (résidentiel, commercial, industriel,...) interviennent dans la variation de température des villes et les effets de l'ICU s'accroissent à mesure que les surfaces sont imperméabilisées (Alberti 2008; Gaston 2010). Il a d'ailleurs été montré que plus la quantité d'aires de surfaces imperméables augmente et la quantité d'aires végétalisées diminue, plus la différence de température entre zones urbaines et rurales augmente (Landsberg, Carlson et Arthur dans Alberti 2008). Cela s'explique par le fait que les surfaces imperméables ont un effet réchauffant qui compense l'effet refroidissant des surfaces végétales. Cet impact est important aussi bien aux échelles locales que régionales.

D'autre part, la topographie influençant la variation de température dans l'aire urbaine, les modifications du niveau des sols lors de l'urbanisation ont un impact sur le changement du climat urbain et participent à l'effet d'ICU (Alberti 2008).

En effet, l'imperméabilisation des sols modifie les cycles hydrologiques et géologiques, provoque l'évacuation des eaux de pluie et de surface vers des systèmes de drains et d'égouttage et diminue la quantité de végétaux en présence, ce qui entraîne des changements des températures de la ville.

Afin de diminuer l'effet d'ICU, il est donc nécessaire de rétablir la perméabilité des sols, ce qui augmenterait les échanges entre le sous-sol et l'atmosphère, permettrait de stocker l'eau de pluie en profondeur sur place et ainsi amènerait une plus grande fraîcheur, tout en diminuant les problèmes dus aux inondations.

1.1.3.2 Présence d'eau et de végétaux

L'eau présente deux caractéristiques qui permettent de rafraîchir l'air ambiant :

La première caractéristique concerne les grands volumes d'eau (cours d'eau, plans d'eau,...). En effet, d'un point de vue physique, la chaleur spécifique de l'eau est plus élevée que celle de l'air. C'est-à-dire que pour augmenter d'un degré Celsius la température de l'eau, il faut un apport de chaleur sensible plus important que pour augmenter d'un degré Celsius la température de l'air. Cela signifie que l'eau peut emmagasiner plus de chaleur sans changer

de température que l'air. On dit que l'eau présente une certaine inertie thermique. L'eau se comporte donc comme un «piège à chaleur» : elle absorbe la chaleur tout en restant relativement fraîche. Ainsi, en période caniculaire, l'eau sera plus froide que l'air et aura un effet rafraîchissant (Campbell 2012; Bigorgne 2015).

La seconde caractéristique concerne tous les volumes d'eau, de la flaque aux grands fleuves. Il s'agit de la capacité de consommation de l'énergie sous forme de chaleur latente par évaporation, qui permet également la diminution de la température de l'air (Bigorgne 2015).

En absence d'eau liquide, la chaleur ne peut provoquer aucun phénomène d'évaporation, le flux est donc émis sous forme de chaleur sensible et non latente, ce qui augmente la température de l'air.

Lors d'une étude sur 51 bassins versants en cours d'urbanisation, Down et DeWalle en 2000 ont en effet identifié que la quantité d'eau s'évaporant de ces bassins versants diminuait au cours du temps alors que la quantité de chaleur sensible augmentait (Alberti 2008).

Il a été montré que les aires urbaines sont 2% plus sèches en hiver et 8 à 10% plus sèches en été que les zones rurales, ce qui montre bien le manque d'eau de la ville par rapport à la campagne. La proportion de neige diffère également entre ville et campagne : la ville reçoit en moyenne 5% de neige de moins que la campagne, ce qui signifie que la ville présente un environnement défavorable à la formation de neige, en raison du fort dégagement de chaleur (Alberti 2008).

D'autre part, la diminution des sites locaux de rétention d'eau comme les lacs, les mares, les étangs et les marais modifie les modèles de ruissellement et de drainage, par la redirection des eaux d'orages hors du système de surface via des réseaux de drains et de canaux. Ainsi l'eau de pluie est moins retenue en ville, malgré le fait que villes reçoivent 5 à 10% de pluie de plus que les zones avoisinantes et que les nuages se forment au-dessus des villes 10% plus fréquemment, avec des augmentations saisonnières qui peuvent mener à la formation de brouillards. Tout cela influe sur l'humidité de l'air et la température (McDonnell, Hahs, et Breuste 2009; Alberti 2008).

On comprend donc que la présence de l'eau en ville est un aspect très important de la lutte contre les îlots de chaleur et qu'il est capital de donner accès à des espaces présentant des plans d'eau ou même de l'eau sous forme

de vapeur, afin de réguler la température du sol et de l'air ambiant. De plus, il est à noter que l'eau est un élément nécessaire à la croissance des plantes et à leur activité régulatrice de la température, qui est présentée ci-dessous. C'est pourquoi il est indispensable de fournir suffisamment d'eau aux végétaux.

Concernant les végétaux, l'imperméabilisation des sols entraîne une diminution de la captation de l'eau par les sols en profondeur et diminue la quantité d'espace disponible pour la plantation. La présence de la végétation en ville est donc limitée. Or, cette végétation a un impact important sur le climat urbain puisqu'elle met en jeu deux phénomènes : l'évapotranspiration et l'effet d'ombrage.

L'évapotranspiration, d'abord, concerne tous les végétaux, quelle que soit leur taille. Ce processus consomme de l'énergie sous forme de chaleur latente. Cette chaleur étant prélevée dans l'air ambiant, l'évapotranspiration participe au refroidissement de l'environnement (fig 1.8 a) (Bigorgne 2015).

L'effet d'ombrage, ensuite, dépend du volume de la végétation. En effet, les arbres peuvent produire des ombres plus ou moins importantes selon leur densité foliaire, qui correspondent à des zones de confort thermique. Cela s'explique par le fait qu'à température de l'air sensiblement identique, un corps exposé aux rayons du soleil reçoit un surplus d'énergie qui peut compromettre son équilibre thermique, alors qu'un corps à l'ombre en est protégé (figure 1.8 b). L'impact de cet ombrage est aussi visible la nuit de façon différée. En effet, les portions de l'espace public qui ont bénéficié d'un bon niveau d'ombrage pendant la journée ne s'échauffent pas et ne stockent pas d'énergie solaire, ils restent donc frais le soir (Bigorgne 2015; McDonnell, Hahs, et Breuste 2009; Parlow 2011).

L'Etude EPICEA (Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne), qui cherchait à évaluer l'impact du changement climatique sur l'agglomération parisienne et à analyser le phénomène d'ICU, a d'ailleurs montré que durant les nuits de canicule, les zones les plus fraîches sont bien celles où la végétation est omniprésente (périphérie de la ville), comme le montre la figure 1.9 (Bigorgne 2015). Ainsi, si la quantité de végétaux diminue dans un espace, l'intensité du processus d'évapotranspiration ainsi que les effets d'ombrage sont moins importants et la température, qui n'est plus régulée par ces mécanismes, augmente. Cependant, les bénéfices accrus de la plantation de végétation en ville ne sont pas linéaires: ajouter de la végétation, même en petites quantités,

dans des endroits ne présentant pas de plantes produit un changement dans les températures plus important que de petites augmentations dans des endroits présentant une grande couverture végétale (Alexandri et Jones dans Gaston 2010).

Il s'agirait donc, du point de vue de la lutte contre les ICU, d'augmenter la présence de végétaux en ville, en particulier dans les endroits où ils sont absents. Le choix des arbres à mettre en place serait soumis aux caractéristiques de ces arbres en termes de capacité d'ombrage (qui dépend du volume et de la densité foliaire de la canopée) et à leurs besoins en eau. Un arbre nécessitant beaucoup d'eau ne pourrait pas effectuer l'évapotranspiration aussi efficacement qu'un arbre qui a de faibles besoins en eau.

1.1.3.3 Matériaux

L'imperméabilisation des sols dans l'espace urbain se fait par la mise en place de matériaux spécifiques à la ville. Depuis la deuxième moitié du 18^{ème} siècle, l'usage de ces matériaux a été généralisé pour des raisons de facilitation des transports, de redirection des eaux vers les égouts, et autres (Bigorgne non publié). D'autre part, les matériaux utilisés pour la construction du bâti ont également beaucoup évolué et se sont diversifiés. L'ensemble de ces matériaux, de revêtement comme de construction, ont des propriétés qui influent sur l'effet d'ICU et affectent la variation de température (Bonan dans Alberti 2008). Les matériaux urbains ont des caractéristiques variées, incluant l'albédo et la capacité de retenir et conduire la chaleur et l'humidité. Tout cela modifie l'équilibre de radiation à la surface, le stockage de chaleur dans le tissu urbain et la répartition de l'énergie en chaleur latente et sensible (Landsberg, Oke dans Alberti 2008).

En effet, bien que les aires rurales et urbaines reçoivent toutes deux l'énergie des processus radiatifs, elles n'en conservent pas la même proportion. Cela est dû au fait que beaucoup de bâtiments urbains et de revêtements routiers ont un faible albédo. Ainsi, une aire urbaine possède un albédo d'environ 0,05 alors qu'une forêt rurale a un albédo d'environ 0,25, ce qui signifie qu'elle réfléchit une plus grande part du rayonnement solaire incident. L'énergie nette journalière reçue par l'aire urbaine est donc plus élevée, ce qui implique que son potentiel d'augmentation de température est également plus important; il peut d'ailleurs aller jusqu'à 5-7°C (Alberti 2008; McDonnell, Hahs, et Breuste 2009).

Les matériaux de construction stockent plus de chaleur et diminuent la quantité d'humidité qui s'évapore, ce qui augmente la température urbaine. Les matériaux des bâtiments stockent eux aussi beaucoup de chaleur et une réflexion est menée sur ce sujet dans le cadre de la lutte contre les îlots de chaleur (Bigorgne 2015). S'ajoutent à ces spécificités propres aux revêtements, les questions de ventilation du bâtiment, de type de chauffage, d'entretien, etc. Le revêtement du bâti est donc important mais se combine avec ces autres aspects qui relèvent de l'architecture et sont à analyser en corrélation avec les questions paysagères selon les situations. Il ne sera donc pas traité des revêtements du bâti dans cette partie.

De nos jours, les matériaux de sol couvrant l'espace public obéissent à une nomenclature. Les usages de l'espace public déterminent aussi bien la nature des matériaux de surface que la nature et le dimensionnement des différentes sous-couches (Bigorgne non publié).

Une étude récente de l'APUR (Bigorgne non publié) a analysé les propriétés de certains matériaux, en association avec leurs sous-couches, fréquemment utilisés comme revêtements de sol dans le développement urbain. Par une comparaison des valeurs d'albédo, elle montre que la chaussée bitumeuse et le trottoir en asphalte sont très absorbants, c'est-à-dire qu'une grande part de l'énergie solaire qu'ils reçoivent est transmise dans le matériau, alors que le stabilisé*, le trottoir en granit et le gazon sont deux fois plus réfléchissants. Environ 30 % de l'énergie qu'ils reçoivent est réfléchi et ne participe pas à l'échauffement de la matière. En ce qui concerne l'émissivité*, qui caractérise la capacité des matériaux à rayonner la nuit et donc à se refroidir, sa valeur est proche de 1 pour tous les matériaux.

L'étude a montré que les matériaux analysés pouvaient se regrouper en trois familles le jour et en deux familles la nuit (tableau 1.2) (McDonnell, Hahs, et Breuste 2009; Bigorgne non publié)

Cependant, les ordres de grandeur des différences de température nocturnes entre matériaux dits « chauds » et « frais » sont moins importants que ceux que l'on observe en journée : la nuit, la différence est de seulement quelques degrés alors que le jour, un matériau peut être jusqu'à 20°C plus chaud qu'un autre. Il est à noter que le trottoir en asphalte qui était en journée moins chaud que le bitume devient le plus chaud des matériaux la nuit.

La température de surface permet donc de comprendre l'influence clima-

Matériaux	Température en fin de journée	Jour	Nuit
asphalte noir (trottoir)	plus de 60°C	très chaud	chaud
béton bitumeux		très chaud	chaud
dalles de granit	entre 50°C et 55°C	modérément chaud	chaud
stabilisé		modérément chaud	frais
gazon	jusqu'à 40°C	frais	frais

Tableau 1.2 : Tableau des familles thermiques de matériaux (d'après Bigorgne non publié)

Contribution à l'échauffement atmosphérique

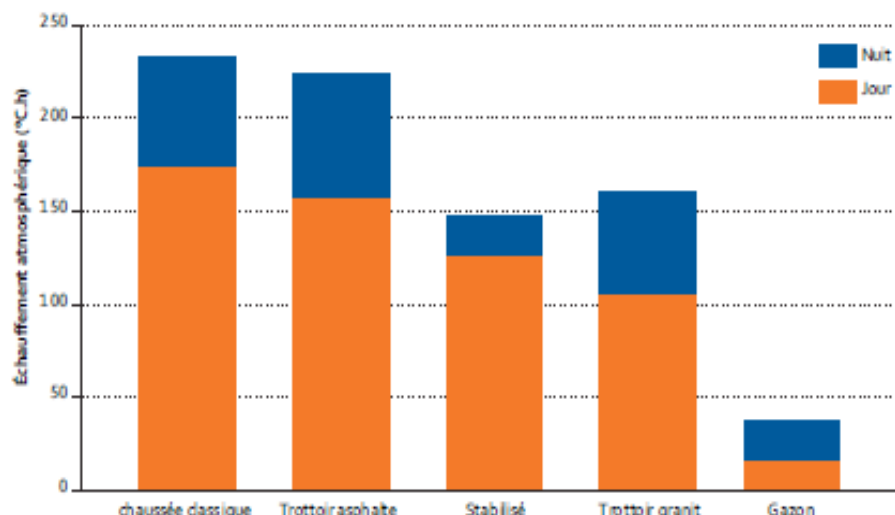


Figure 1.10 : Contribution à l'échauffement atmosphérique de différents types de revêtement (Bigorgne non publié)

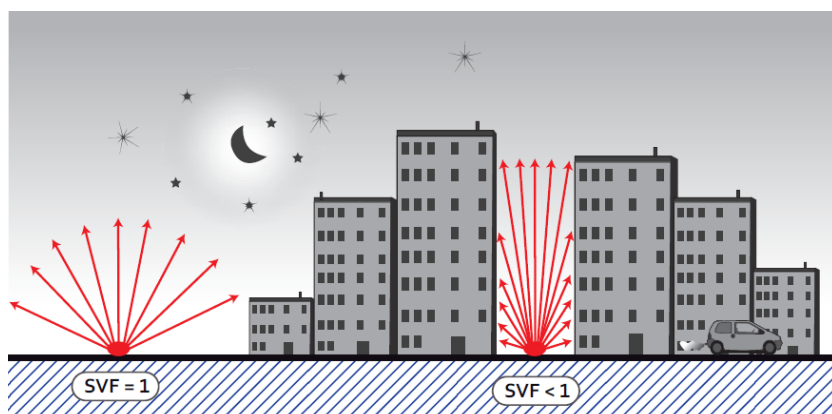


Figure 1.12: illustration du concept de facteur de vue du ciel (SVF) (Bigorgne 2015)

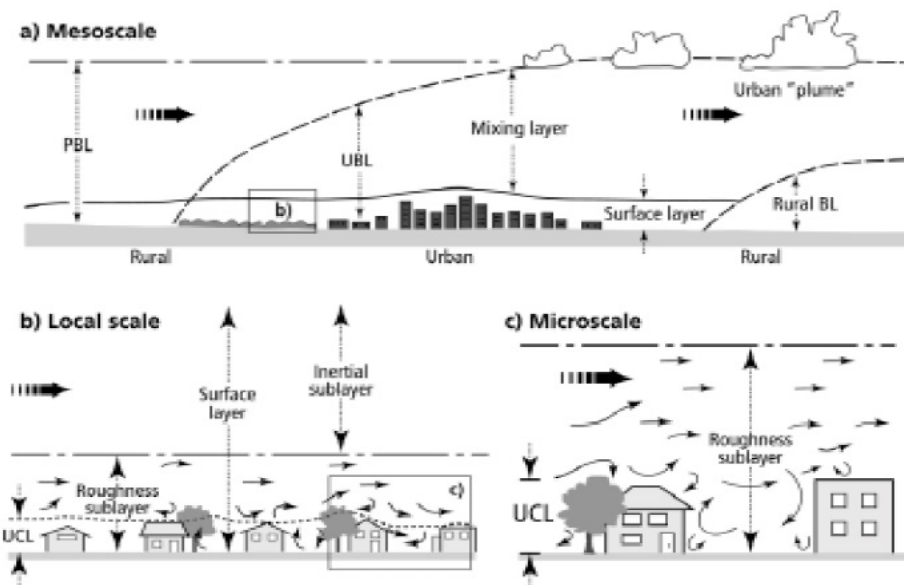


Figure 1.11 : Représentation schématique de l'atmosphère urbaine illustrant une classification en plusieurs couches et donc en plusieurs échelles d'analyse de l'atmosphère urbaine. UBL : Urban boundary layer (Couche limite urbaine) UCL : Urban canopy layer (couche de la canopée urbaine) (Oke 2006)

	Rural Natural	Mixed Use Institutional	Suburban Residential	Commercial Industrial	Medium Density Urban Residential	High Density Urban Residential	Downtown High Rise
Urban Gradient							
Degree of impact							
Late Afternoon Temperatures							
Roughness	4	5	6	5	7	7	8
Aspect ratio	>0.05*	0.1 - 0.5*	0.2 - 0.6*	0.05 - 0.2	0.5 - 1.5	1.0 - 2.5	>2
% Impervious	<10	<40	35-65	70-95	70-85	>85	>90

Figure 1.13. : Relations entre le gradient urbain et l'îlot de chaleur urbain basé sur les zones climatiques urbaines (Oke dans Alberti 2008)

tique des matériaux et notamment la façon dont ils participent à l'échauffement de l'air ambiant.

Sur la figure 1.10, on peut voir que la chaussée en bitume et le trottoir en asphalte, tout comme l'ensemble des enrobés et des matériaux minéraux, continuent à dégager de la chaleur la nuit. Cela est dû au fait qu'ils ont un fonctionnement de type captage/stockage : la couche de surface capte très bien l'insolation et la couche souterraine joue le rôle de réservoir de par sa densité. Or dans l'espace public, un revêtement est mis en place sur une sous-couche, laquelle est plus ou moins compacte et profonde selon le trafic qu'elle doit recevoir. Ainsi, plus la sous-couche est importante, plus elle stocke de chaleur le jour, qui sera libérée la nuit.

Le type de revêtement de sol choisi à un endroit donné contribue grandement à la qualité climatique de l'espace (annexe 1), en particulier dans les lieux très exposés à l'insolation journalière. Il est donc important de porter une grande attention aux matériaux utilisés, en particulier à leurs caractéristiques d'albédo de surface, d'inertie et d'émissivité. De même, le volume de la sous-couche est à prendre en compte, ainsi que l'impact sur les usagers (matériaux trop réfléchissants qui éblouissent, par exemple).

On notera également que les anciennes voiries pavées offrent de bonnes capacités de stockage de l'eau si les joints restent poreux et que le granit est très intéressant tant qu'il présente un aspect clair, cependant c'est un matériau qui s'use très vite et s'obscurcit avec le temps, devenant donc moins efficace (Bigorgne non publié).

1.1.3.4 Morphologie urbaine

Un autre effet de l'urbanisation* et facteur de l'îlot de chaleur urbain est la morphologie urbaine. La forme de la ville, c'est-à-dire la disposition de ses rues et de ses bâtiments, leurs tailles, formes et orientations, affecte les flux d'énergie et d'air, influençant des phénomènes comme l'ICU et les précipitations.

Par exemple, des vitesses de vent supérieures à 4m.s^{-1} (un peu moins de $14,5\text{km.h}^{-1}$) en présence de nuages bas diminuent très fortement l'intensité de l'ICU car ces vents forts dispersent la chaleur à travers l'atmosphère, bien que la vitesse de vent nécessaire à la limitation du développement de l'ICU dépende de la taille de la population et augmente avec elle (Oke dans Alber-

ti 2008). En absence de vent, des brises thermiques se forment en ville, en raison des différences de températures qui peuvent exister entre les diverses zones et des variations de reliefs au sein de la ville. L'air frais suit les pentes et les vallées, comme le fait l'eau, s'écoulant ainsi selon des réseaux spécifiques à la ville. Ces brises thermiques peuvent être formées par un air frais venant d'un espace boisé situé en hauteur par exemple et s'écoulant le long de la pente par les rues (souvent les canyons urbains) orientées dans le sens de la pente, vers une zone plus chaude en contrebas. Les rues par lesquelles circule ce flux d'air se retrouvent donc rafraîchies (Bigorgne et Bridier 2017).

La forme de la ville définit l'atmosphère urbaine. Celle-ci se découpe en trois couches (figure 1.11) : le sol, la couche de la canopée urbaine (entre le sol et les toits des bâtiments) et la couche limite urbaine ou dôme urbain (au dessus des toits et sous le vent de la ville). Ces trois couches définissent trois catégories d'îlots de chaleur selon l'endroit où on les détecte : l'îlot de chaleur urbain de surface, l'îlot de chaleur urbain de la canopée urbaine et l'îlot de chaleur urbain de la couche limite urbaine.

Les effets de l'urbanisation sur l'équilibre d'énergie sont différents selon le niveau des couches que l'on observe (Oke dans Alberti 2008), peuvent être spatialement complexes et peuvent s'exprimer dans chacune des couches de l'atmosphère urbaine (Gaffin et al, Arnfield dans Gaston 2010). Par exemple, sous le plafond de la canopée dans les microclimats créés par les bâtiments, les rues et la végétation, l'ombre des bâtiments peut créer des températures locales plus froides que dans les espaces ouverts (Alberti 2008). On a donc différentes expressions de l'ICU selon le niveau des couches de l'atmosphère urbaines que l'on observe.

Dans la couche limite, on peut rencontrer de grands flux de chaleur latente libérés par les aires végétales et les parcs, qui intègrent les microclimats de la canopée urbaine sur une grande aire. Dans la couche de la canopée urbaine, on retrouve les canyons urbains qui illustrent l'effet de la forme urbaine sur les microclimats (Alberti 2008).

La géométrie des rues et des bâtiments peut en effet capter le rayonnement et augmenter la vitesse des vents. Oke en 1987 a étudié les mécanismes par lesquels les caractéristiques urbaines changent l'équilibre d'énergie, créant ainsi l'ICU. L'urbanisation produit en effet des espaces dont l'ouverture, mesurée par le facteur de vue du ciel (la portion de ciel observable à partir de la surface considérée) présente une grande variabilité. Ainsi, un espace ouvert possé-

dant un facteur de vue du ciel proche de 1 présentera plus d'échanges directs avec la couche limite urbaine, ce qui lui permettra de se réchauffer plus vite le jour et de se refroidir plus vite la nuit; alors qu'un espace plus clos, dont le facteur de vue du ciel s'approche de 0, aura moins d'échanges directs avec la couche limite urbaine, ce qui ne lui permettra pas de se refroidir aussi vite la nuit (Colombert 2008). Une modélisation de ces espaces très fermés est le concept de canyon urbain (figure 1.12). Ces canyons sont des rues au facteur de vue du ciel très faible et dont le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue (ou ratio d'aspect) est supérieur ou égal à 0,7 (Wang et Ho 2013). Ces canyons urbains augmentent l'absorption de rayonnement solaire selon leur géométrie, leur ratio d'aspect et leur orientation et piègent l'énergie radiative et les polluants. La ville absorbe donc plus de radiations (Oke, Arnfield, Grimmond dans Alberti 2008).

Il a d'ailleurs été montré qu'il existe une relation entre l'intensité de l'ICU et la densité de la ville qui s'exprime comme le ratio d'aspect des canyons urbains dans le centre ville (Alberti 2008).

A ces éléments de la forme urbaine, on peut ajouter le concept de rugosité urbaine, qui rassemble les notions d'occupation des sols, de compacité au sol et de hauteur des bâtiments et de la végétation. Plus l'espace est rugueux, plus l'écoulement de l'air est perturbé et moins l'espace est efficacement ventilé. Cela signifie que les espaces rugueux présentent un effet d'obstacle aux vents (en particulier aux brises thermiques qui sont relativement faibles)(Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile-de-France 2016).

Pour préciser l'effet de la forme urbaine sur l'ICU, Ellefsen, en 1990, propose une cartographie des caractéristiques morphologiques urbaines pertinentes au regard du climat urbain. Sur dix villes, il distingue des types de zones morphologiques, basés sur le type de construction, les caractéristiques de ventilation, l'âge, la densité et les motifs des rues. De là, Oke, en 2004, développe un schéma des Zones Climatiques Urbaines (UCZ) (figure 1.13). Ce schéma rassemble l'ensemble des hypothèses qui ont été émises sur l'impact de la morphologie urbaine sur le climat (Alberti 2008). Il intègre à la fois le ratio de structure, qui est le rapport entre la hauteur moyenne des éléments rugueux (bâtiments, arbres) et la largeur moyenne des rues (ratio qui est fortement lié au flux, à l'ombrage solaire et à l'ICU nocturne), la couverture de surface, c'est-à-dire le pourcentage bâti (qui est lié au degré de perméabilité des surfaces), les matériaux, l'activité humaine et le potentiel de modifier le

climat naturel de la surface. Il obtient ainsi un schéma qui divise la ville en sept régions homogènes : les zones climatiques urbaines. Ces zones vont du semi-rural aux sites fortement développés (Stewart et Oke 2012).

Les catégories UCZ sont ordonnées selon leur capacité à modifier le climat en termes de vent, températures et humidité.

Pour terminer, il est à noter que l'îlot de chaleur ne s'exprime pas uniformément au sein d'une ville. Pour cette raison, la notion d'îlot de chaleur intra-urbain (ICIU) définit l'expression de la variabilité spatiale de l'effet d'ICU d'une agglomération. C'est-à-dire que l'ICIU apparaît aux endroits où l'îlot de chaleur s'exprime en particulier dans la ville. Les ICIU se développent spécifiquement en présence de surfaces emmagasinant de la chaleur, dans des lieux qui présentent les conditions favorables à l'apparition de l'ICU classique. Les ICIU s'observent aussi bien dans la canopée urbaine qu'à la surface (Levasseur 2014). Il peut s'agir soit de lieux où la forme urbaine permet une insolation durable du sol et une exposition maximale au pied des bâtiments, soit d'espaces confinés présentant des rejets de chaleur anthropique.

L'intensité de l'ICU dépend de la population urbaine (Oke dans Alberti 2008) notamment dans les grandes villes de 100 000 à 1 000 000 d'habitants, où la différence de température avec les zones rurales environnantes peut aller jusqu'à +8 à +12°C. Les activités humaines entraînent la pollution de la couche supérieure de l'atmosphère qui amplifie l'effet de dôme (ou effet de serre) au-dessus de la ville. Les rayonnements infrarouge sont donc conservés dans cette couche et renvoyés vers la surface, augmentant ainsi la chaleur de la ville.

D'autre part, les systèmes de chauffage et de climatisation ainsi que la circulation routière participent aussi à l'amplification de l'ICU (Alberti 2008).

Les facteurs contrôlant la formation et l'intensité d'un ICU sont donc nombreux et tous issus du processus d'urbanisation. C'est en association les uns avec les autres qu'ils agissent sur le climat urbain.

Pour résumer les interactions entre ces facteurs, Oke décrit en 2004 quatre aspects clefs de l'échelle locale :

- la structure urbaine (dimensions des bâtiments et espaces entre eux, largeur des rues et espacement des rues),
- la couverture urbaine (proportions de constructions, surfaces pavées ou végétalisées, sol nu, eau),

- les matériaux urbains (matériaux de construction et naturels),
- le métabolisme urbain (chaleur, eau, polluants dus à l'activité humaine) (Oke dans Alberti 2008).

De là naît le concept de Zones Climatiques Locales (LCZ), définies comme des régions où les quatre aspects sont uniformes, couvrant des surfaces horizontales pouvant aller d'une centaine de mètres à plusieurs kilomètres (Stewart et Oke 2012). Ce concept permet de caractériser des espaces, du morceau de ville à la région, selon leur homogénéité au regard des caractéristiques ayant une influence sur le climat et sur l'ICU en particulier (annexe 2).

1.2. Conséquences de l'îlot de chaleur urbain

Les conséquences de l'îlot de chaleur urbain ne sont pas encore totalement connues mais il est certain que ce phénomène modifie le fonctionnement des êtres vivants et leurs interrelations, a des effets sur la qualité de l'eau et de l'air et affecte la santé humaine; cela d'autant plus que l'ICU amplifie bien souvent certains effets du changement climatique.

Les augmentations de températures associées à l'urbanisation ont plusieurs conséquences écologiques, telles que des modifications phénologiques (moments et durée de germination, feuillaison, perte des feuilles, floraison, cycles de vie des animaux d'élevage, ...) dont certaines s'étendent hors de l'aire urbaine jusqu'à l'aire rurale. Ces modifications peuvent avoir des impacts indirects variés sur les niches écologiques et donc sur la survie des espèces et les dynamiques des communautés (Gaston 2010). En impactant les niches écologiques, c'est donc sur l'ensemble des modes de vie et d'adaptation à l'environnement que l'îlot de chaleur urbain provoque des modifications.

Les méthodes d'analyse des conséquences de l'ICU sont souvent basées sur des études comparatives entre ville et campagne.

1.2.1 Conséquences sur la flore et la faune

Les nouveaux aspects de l'environnement urbain entraînent plusieurs changements microclimatiques qui perturbent les organismes et leurs dynamiques. Ces changements sont notamment: la hausse des températures due à l'effet de serre, les augmentations de précipitations et de densité des nuages, la raréfaction des événements de gel, la réduction des chutes de neige, de la vitesse du vent et des événements de tempête, ainsi que la diminution de l'humidité

de l'air (liée à l'extension des surfaces imperméables qui accroissent le ruissellement et diminuent l'évapotranspiration).

Les conditions environnementales peuvent alors ne plus concorder avec les niches écologiques des espèces inféodées au milieu, ce qui les rend plus vulnérables. Cela peut par exemple favoriser l'installation de nouvelles espèces, dont les niches écologiques correspondent à des climats plus secs et plus chauds et qui peuvent devenir invasives car elles font concurrence aux espèces indigènes, moins adaptées à l'environnement changeant (Gaston 2010). De même, les processus de dispersion des espèces et de pollinisation peuvent se trouver altérés (Landsberg, Oke dans Gaston 2010).

1.2.1.1 Conséquences sur la flore

La variation de température de l'air est un facteur qui agit fortement sur la phénologie* des plantes. Ainsi, tant le changement climatique global que l'effet climatique urbain local entraînent des décalages temporels dans les phénophases.

Comme conséquence du réchauffement global, on observe dans tous les milieux une avancée des dates de floraison d'environ 15 jours toutes les dizaines d'années et une réduction de 25% des jours de gel entre 1901 et 2007 (Parlow 2011). En ce qui concerne le réchauffement urbain, il a été montré que les villes reçoivent 5% de neige de moins que les campagnes et que l'augmentation significative de la température nocturne de l'air diminue la probabilité de gel au printemps (Parlow 2011; Alberti 2008). Cet effet de l'ICU entraîne une réaction chez les plantes : selon des études, les dates de début de phénophases (feuillaison, floraison, fructification) sont plus précoces dans les agglomérations urbaines par rapport aux campagnes avoisinantes partout dans le monde (Zhang et al dans Gaston 2010; Lu et al, Menzel et Fabian, Neil et Wu, Luo et al dans Parlow 2011). Par exemple, sur dix villes d'Europe centrale, Rötzer et al montrent que, dans presque tous les cas, la floraison des perce-neige, forsythia, cerisier, et pommier commence plus tôt en ville.

Plus généralement, la situation du climat urbain avec un effet d'ICU prononcé amplifie la tendance du réchauffement climatique global et prolonge la période de végétation de façon significative dans les zones urbaines (Parlow 2011).

Cependant, le schéma n'est pas universel : il est particulièrement inhabituel dans les tropiques où la phénologie de la végétation est souvent dépendante

de l'humidité, qui est moins uniformément influencée par l'urbanisation que ne l'est la température (Gazal et al dans Gaston 2010).

1.2.1.2 Conséquences sur la faune

Plusieurs études ont montré que le climat urbain peut influencer différents aspects des animaux, tels que la morphologie, la physiologie, le cycle de vie, ou encore le comportement et la composition des communautés. Ces effets ne peuvent toutefois pas être généralisés et les mécanismes qui les provoquent ne sont pas encore bien identifiés.

Ainsi, l'environnement climatique urbain affecterait la taille du corps de certains oiseaux et invertébrés à travers divers mécanismes. Les différentes hypothèses formulées se basent par exemple sur la conservation et la dissipation de la chaleur (les individus seraient plus petits en ville en raison de la chaleur), sur des facteurs tels que la disponibilité de la nourriture, la résistance à la privation et la saisonnalité, ou encore sur les effets de la température sur la division cellulaire et sur la réplication ou sur la croissance et la différenciation (les individus seraient également plus petits en ville) (Gaston 2010).

En ce qui concerne la physiologie, les régimes climatiques fortement altérés des aires urbaines peuvent générer des divergences de tolérance à différents facteurs entre des individus de même espèce. Par exemple, les populations urbaines de moustiques *Aedes sp.* ont une plus grande tolérance à la dessiccation* que les moustiques de la même espèce à la campagne, peut-être en raison de la tendance des populations urbaines à se reproduire dans des points d'eau plus temporaires (Mogi et al dans Gaston 2010).

Autre exemple, les fourmis *Atta sexdens* urbaines ont une tolérance beaucoup plus importante aux hautes températures que celles de la campagne (Angilletta et al dans Gaston 2010). Toutefois, cette capacité d'adaptation thermique se trouvera sans doute limitée du fait de l'augmentation des températures prédites en ville, en particulier dans les régions fraîches où la différence de température entre ville et campagne sera accentuée et où l'adaptation sera plus difficile.

L'altération des cycles de vie peut être illustrée par la reproduction des invertébrés en ville : celle-ci peut se dérouler plus tôt qu'à la campagne dans les régions tempérées où l'humidité n'est pas cruciale, en raison d'une disponibilité précoce dans l'année des ressources alimentaires, probablement due à l'effet d'ICU (Gaston 2010).

Un autre aspect concerne la communication. Chez les Anoures* (Amphi-

biens sans queue), la hauteur des vocalisations augmente avec la température (Gerhardt et Mudry dans Gaston 2010); les changements de vocalisations observés dans les populations urbaines peuvent donc être expliqués par l'effet de l'îlot de chaleur urbain. Ce phénomène pourrait cependant être le résultat d'autres différences entre populations urbaines et rurales, comme l'absence de couverture végétale étouffant les sons, l'adaptation à l'environnement, ou la modification du taux de testostérone (Gaston 2010).

Concernant les communautés d'oiseaux, Canaday a identifié en 1997 les facteurs responsables du faible nombre d'espèces insectivores en ville par rapport à la campagne. Il s'agit principalement des changements microclimatiques (corrélés avec l'ICU) en relation avec la sensibilité de l'habitat, des changements de prédation sur ces oiseaux et de la compétition avec des omnivores opportunistes adaptés aux perturbations.

En Californie, sur 12 espèces d'oiseaux recensées dans des aires rurales, la moitié était insectivore alors que dans les aires urbaines, aucune espèce n'était insectivore (Blair 1996). De la même façon, au Canada, Lancaster et Rees (1979) ont rapporté que 63% des espèces dans les forêts étaient insectivores, pour seulement 1% d'espèces insectivores dans des aires industrielles commerciales (McDonnell, Hahs et Breuste 2009). Beissinger et Osborne en 1982, Bolger et al en 1997, Rolando et al en 1997, Marzluff et al en 1998 et Marzluff en 2005 ont également travaillé sur ce sujet en documentant la façon dont l'urbanisation modifie la composition des communautés urbaines d'oiseaux par changement de climat, abondance de nourriture et d'eau, augmentation des sites de nidification et des petits prédateurs (Alberti 2008).

1.2.2 Conséquences sur la santé humaine

L'importance des conséquences de l'ICU sur la santé a été particulièrement frappante lors de la vague de chaleur de 2003 (probablement l'été le plus chaud depuis l'an 1500 après J.-C.), qui a causé un nombre inhabituellement élevé de décès en France, en Italie et en Allemagne (Stott et al dans Parlow 2011). En effet, l'ICU entraîne une hausse des températures, un stress hydrique et des concentrations élevées en polluants dans l'air, aussi bien en été qu'en hiver, ce qui a des impacts négatifs sur la santé.

Bien que l'îlot de chaleur urbain soit considéré positivement en hiver par les habitants, car il rend la ville moins froide que sa périphérie, donc plus agréable, et permet de diminuer la consommation de chauffage, pendant les canicules d'été, en revanche, la ville surchauffe, ce qui devient un problème

sanitaire pour les citadins (Bigorgne non publié).

Pour travailler sur le bien-être humain, on s'intéresse au bioclimat. Cette notion, approfondie par de nombreuses études épistémologiques (Basu et Samet, Curriero et al, Koppe et Jendritzky dans Parlow 2011) intègre tous les facteurs qui influencent le bilan thermique humain : les variables météorologiques, l'humidité de l'air, la vitesse du vent, le rayonnement de courtes longueurs d'onde et l'émission terrestre de grandes longueurs d'onde. Étant donné que l'homme doit garder une température corporelle de 37°C quelles que soient les conditions climatiques et que cette valeur ne tolère que de très faibles écarts, un stress thermique peut très vite affecter sa santé. Le bioclimat permet donc de développer des approches, telles que la chaleur ressentie et le confort thermique, afin d'identifier les besoins des habitants.

Ainsi, dans l'environnement, plusieurs facteurs vont influencer sur le confort thermique humain. D'abord, la présence de vent permet aux flux de chaleur latent et sensible d'être actifs. Ensuite, l'exposition au rayonnement solaire ne modifie pas la température de l'air, mais ce flux direct d'énergie peut compromettre l'équilibre thermique de l'organisme. Enfin, les surfaces chauffées émettent des rayonnements de grandes longueurs d'onde, que le corps humain absorbe en grande quantité. Ainsi, des conditions météorologiques telles que le beau temps, en été, une vitesse de vent faible et une faible humidité de l'air, en présence de surfaces chaudes entraînent un stress hydrique, qui diminue le confort thermique. Or on retrouve très souvent ces conditions dans l'environnement urbain, ce qui favorise une expression intense de l'ICU (Parlow 2011; Cantat 2004). De plus, il est probable que le réchauffement climatique entraîne une augmentation de l'intensité et de la fréquence des vagues de chaleur - comme celle de 2003 - (Meehl et Tebaldi dans Parlow 2011) qui produisent justement ce type de temps favorable à l'expression de l'ICU.

Un autre élément capital pour la santé humaine est la température de l'air la nuit. En effet, pendant les chaudes nuits d'été, la température ne descend pas en dessous de 20°C. Cela implique que la phase de repos thermophysiological pendant le sommeil n'est pas suffisante pour la plupart des gens. C'est un des facteurs qui peut expliquer l'augmentation significative du taux de mortalité lors de la vague de chaleur de l'été 2003 (Schär et Jendritzky dans Parlow 2011).

Une autre conséquence majeure du climat urbain pour la santé humaine est la pollution de l'air. Une étude dans vingt des vingt-quatre mégapoles du monde montre que les concentrations de polluants de l'air ambiant sont à des

niveaux entraînant de très sérieux effets sur la santé. En effet, chacune des 20 villes a au moins un polluant de l'air majeur qui apparaît à des niveaux supérieurs aux directives de protection de la santé de la WHO (World Health Organisation) (Baldasano et al dans Parlow 2011). La qualité de l'air ambiant dans la majorité des mégapoles empire à mesure que la population, le trafic, l'industrialisation et l'utilisation d'énergie augmentent. Ces problèmes de pollution de l'air requièrent donc une approche globale dans la recherche de solutions, et cela d'autant plus que, d'après une revue des tendances de Mage et al en 1996, les expériences des actuelles mégapoles dans les pays développés se répètent dans les pays en développement (Parlow 2011).

D'un point de vue médical, la chaleur accablante engendrée par les îlots de chaleur urbains peut provoquer des inconforts, des faiblesses, des troubles de la conscience, des crampes, des syncopes, des coups de chaleur, voire exacerber les maladies chroniques préexistantes comme le diabète, l'insuffisance respiratoire, les maladies cardiovasculaires, cérébrovasculaires, neurologiques et rénales, au point de causer la mort (Besancenot, Lubet et McGeehin dans Giguère 2009).

Les conséquences de l'ICU sont donc très nombreuses sur la flore, la faune et la santé, d'autant plus qu'elles interagissent entre elles. En effet, une modification dans la phénologie d'une espèce végétale par exemple va avoir des effets sur les espèces animales dépendantes de cette plante. De même, la santé humaine peut dépendre de la présence de certains végétaux pour le stockage de polluants par exemple et de la non prolifération d'espèces invasives en général.

Et bien que de nombreux mécanismes liés à l'environnement urbain restent à étudier, il est clair que les impacts en termes de hausse de température, de modification de la présence de l'eau et d'amplification des problèmes de qualité de l'air sont particulièrement importants, étant donné leurs conséquences significatives sur la santé humaine. Les impacts écologiques et biologiques, bien que moins connus dans les détails, ne sont pour autant pas à négliger, étant donné l'importance de la biodiversité dans l'environnement urbain.

1.2.3 Considérations en termes de gouvernance

Aujourd'hui, le phénomène d'îlot de chaleur urbain devient une problématique visible pour les décideurs. Étant donné qu'elle s'insère dans le contexte plus global du réchauffement climatique et de ses effets à long terme, en particulier sur les aires urbanisées, il s'agira ici de présenter les politiques

engagées par les nations pour se préparer aux effets de ces changements et les applications en France et à Paris en particulier.

À l'échelle internationale, le premier Sommet de la Terre prenant en compte le changement climatique est le Sommet de Rio de Janeiro (Brésil) en 1992, qui a mené à l'élaboration de la déclaration de Rio et des trois Conventions de Rio dont la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) (Croquet 2003). Il reconnaît l'existence d'un réchauffement climatique dû à l'activité humaine en donnant aux pays industrialisés la responsabilité de lutter contre ce phénomène (Gouvernement Français 2017). C'est ce Sommet qui a lancé le programme de lutte mondiale contre les changements climatiques (Croquet 2003). Depuis la ratification des Conventions de Rio par les Parties, les pays concernés se retrouvent pour une Conférence des Parties (COP) chaque année, dans le cadre de la CCNUCC (Actu-Environnement 2015; Gouvernement Français 2017). La COP3 à Kyoto (Japon) en 1995 crée le cadre juridiquement contraignant, qui permet d'appliquer les Conventions de Rio (United Nations Framework Convention on Climate Change 2014). C'est seulement en 1997 que ce cadre, le Protocole de Kyoto, est adopté. Il indique des objectifs obligatoires pour l'horizon 2012 sur la diminution des émissions de gaz à effet de serre pour les pays économiquement développés concernés. Depuis, l'Australie et les États-Unis se sont retirés du Protocole.

Dernièrement, la COP21 - puis la COP22, qui avait pour but la mise en œuvre des décisions de la COP21 et l'élaboration des plans nationaux d'adaptation par les signataires (Gouvernement Français 2017; Conférence des Nations Unies sur les Changements Climatiques 2016) - a produit l'Accord de Paris, premier accord universel pour le climat approuvé à l'unanimité par les 196 Parties (195 États + l'Union Européenne) et qui est entré en vigueur le 4 novembre 2016. Cet accord a pour but de maintenir l'augmentation de la température mondiale en-dessous de deux degrés (et limiter cette augmentation à 1,5 degré) et ses engagements doivent être révisés en 2020 (Gouvernement Français 2017).

En France, la politique climatique nationale a connu deux grandes étapes : l'élaboration d'un « Plan climat » (en réponse aux engagements pris lors du protocole de Kyoto de 1997) et le Grenelle de l'environnement.

Le Plan Climat (2004-2012 puis 2012-2020) regroupe des actions dans tous les secteurs pour stabiliser les émissions de gaz à effet de serre en 2010 à leur niveau de 1990. Il consiste à la fois en mesures réglementaires, fiscales et incitatives pour limiter dans les secteurs du bâtiment et des transports les

consommations d'énergie et favoriser les énergies renouvelables (Direction de l'information légale et administrative - Gouvernement Français 2009).

Le Grenelle Environnement s'est tenu en 2007 et a proposé des actions à mettre en œuvre afin de permettre une nouvelle politique environnementale. Pour décider de ces actions, différents thèmes ont été étudiés, dont un concernant la lutte contre les changements climatiques et la maîtrise de la demande d'énergie. Après consultation du public, le Grenelle a été mis en place sous la forme de deux lois Grenelle (1 et 2). L'une propose des mesures pour lutter contre l'ensemble des problématiques identifiées, la deuxième correspond à la mise en application d'une partie des engagements du Grenelle (Fondation d'entreprise ALCEN pour la connaissance des énergies 2017).

Le Grenelle Environnement appelle les régions à mettre en place des Schémas Régionaux du Climat, de l'Air et de l'Energie (SRCAE) qui donnent les orientations et les objectifs que devront respecter les collectivités territoriales lors de l'élaboration des programmes d'actions que sont les Plans Climat-Energie Territoriaux (PCET), également exigés par le Grenelle.

À Paris, le Plan Climat Energie Territorial a été mis en place sous la forme du Plan Climat de Paris en 2007 et a été revu en 2012 pour correspondre aux exigences du Grenelle de l'Environnement. Il vise à réduire les émissions et les activités de 75 % en 2050 par rapport à 2004. En ce qui concerne l'ICU, le Plan Climat de Paris prévoit différentes solutions dans son volet Adaptation, déjà appliquées ou encore au stade d'étude : l'amélioration de la conception et la réhabilitation thermique des bâtiments en prenant en compte le confort d'été, la végétalisation de l'espace public et des bâtiments, l'intégration et l'utilisation de l'eau en ville pour ses capacités de thermorégulation. De plus, en réaction directe à la crise, le Plan Canicule de Paris a été mis en place, permettant d'apporter une aide ponctuelle aux personnes âgées et handicapées qui en font la demande (Conseil de Paris 2012).

D'autre part, le Plan Biodiversité, voté en 2011 a été mis en cohérence avec les différents plans mis en place par la Mairie de Paris (dont le Plan local d'urbanisme et le Plan Climat). Ses objectifs sont de renforcer les continuités écologiques à différentes échelles de gouvernance, et de mieux intégrer la biodiversité dans le développement de la ville, afin de réduire l'empreinte écologique* de l'ensemble du territoire (Mairie de Paris 2011; Ville de Paris 2017). Cette ambition de végétalisation du territoire devrait faciliter l'adaptation du territoire parisien aux conséquences du dérèglement climatique (Conseil de Paris 2012).

Introduction

La ville de Paris a défini en 2012 un Plan Climat, à échéance 2050, dont l'un des objectifs est d'atténuer le phénomène d'îlot de chaleur urbain, flagrant sur son territoire. Cependant, bien que de nombreuses études soient réalisées sur le sujet et que de plus en plus d'aménagements participent à diminuer les effets de l'ICU, encore peu de projets sont à ce jour explicitement conçus dans ce but (Agence Parisienne du Climat 2017). Des mesures ponctuelles sont certes prises lors des vagues de chaleur mais il serait intéressant de mieux connaître l'expression de l'îlot de chaleur urbain, afin d'identifier les endroits les plus touchés, pour pouvoir proposer des solutions paysagères locales.

En 1990, Escourrou montre que «la spécificité du climat de l'agglomération parisienne se traduit par un puissant îlot de chaleur urbain». Pourtant, d'après Cantat en 2008, le climat régional de Paris semble défavorable à l'installation de topo-climats (climats locaux), puisque la position géographique de la ville favorise un climat océanique à «grande variabilité des types de circulation» qui défavorise «l'expression des facteurs locaux sur les basses couches de l'atmosphère». Cependant, localement, l'urbanisation installée d'abord dans les vallées se trouve à l'abri de l'influence du climat océanique, ce qui explique le peu d'intensité des vents, qui permet aux caractéristiques urbaines et donc à l'îlot de chaleur de s'exprimer (Cantat 2004).

L'ampleur de l'ICU, c'est-à-dire la différence entre la température en ville (Tour Saint Jacques) et la température en milieu rural (Melun) entre 1971 et 1980 est déjà de 8°C à 9°C en juillet dans la publication d'Escourrou (1990) et reste dans le même ordre de grandeur de nos jours en été. La moyenne annuelle est quant à elle de 2,5°C (Bigorgne 2015).

Dans ce travail, l'analyse se portera sur la ville de Paris intra-muros. En effet, la densité urbaine y est relativement homogène par rapport à la banlieue, ce qui se note particulièrement lorsque l'on essaie de placer la ville de Paris dans la classification des LCZ (Local Climate Zone) de Stewart et Oke. Elle entre principalement dans la catégorie LCZ2, bien que certaines zones relèvent plutôt de la catégorie LCZ1, que les parcs se retrouvent principalement dans les catégories LCZA et LCZB et que la Seine relève de la catégorie LCZG (voir annexe 1), alors que les alentours sont beaucoup plus divers. Cette homogénéité de l'urbanité permettra de se concentrer sur l'effet d'ICU sans rencontrer le biais de variations de la densité entre les différents

exemples.

Cependant, nous aurions pu élargir l'analyse aux éléments urbains limitrophes de Paris et de même densité. Le choix a été fait de s'arrêter aux limites administratives pour des raisons de disponibilité des données.

2.1. Présentation de la carte thermique

2.1.1 Présentation de la carte

Afin d'identifier les manifestations de l'îlot de chaleur (ou îlots de chaleur intra-urbains) dans la ville de Paris, l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) utilise une carte thermographique aérienne réalisée par la société AERO-DATA à la demande de la Ville de Paris, dont le cliché a été pris à minuit dans la nuit du 18 au 19 août 2015 (figure 2.2.).

Cette carte thermographique est issue d'un relevé du rayonnement proche infrarouge instantané lors d'un vol en avion à 400 mètres d'altitude au-dessus de la ville et a une résolution de 1 mètre. Le proche infrarouge (0.7 μm à 1,6 μm) est la partie du spectre électromagnétique qui correspond à une partie du rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre. Ce domaine du spectre est très utilisé en télédétection pour différencier les surfaces végétalisées des surfaces minérales.

Pour analyser cette carte, on considère que les températures sont liées au rayonnement de surface. On observe donc ici l'îlot de chaleur urbain de surface de Paris.

Cependant il est à noter que, pour des raisons techniques, cette carte représente une photographie qui montre la présence de l'îlot de chaleur et ses lieux d'expression principaux, mais qui ne peut pas caractériser son intensité. Par ailleurs, la nuit de la mesure n'était pas une nuit caniculaire. Pour cette raison, les plans d'eau apparaissent plus chauds que les surfaces de gazon car l'eau, de par sa grande stabilité thermique n'a pas eu le temps de refroidir autant que le gazon. Par exemple, pour une température de journée de 30°C, la température de l'eau étant très stable, la Seine peut avoir atteint une température de 25°C à minuit, alors que le gazon sera redescendu à 17°C. Lors d'une nuit caniculaire, on aurait observé une température de la Seine inférieure à celle du gazon. Pour autant, la présence d'eau a tout de même un effet rafraîchissant sur l'air puisqu'elle conserve plus longtemps la chaleur et ne la relâche pas dans l'air ambiant.

Ne pouvant pas disposer des valeurs précises concernant le rayonnement me-

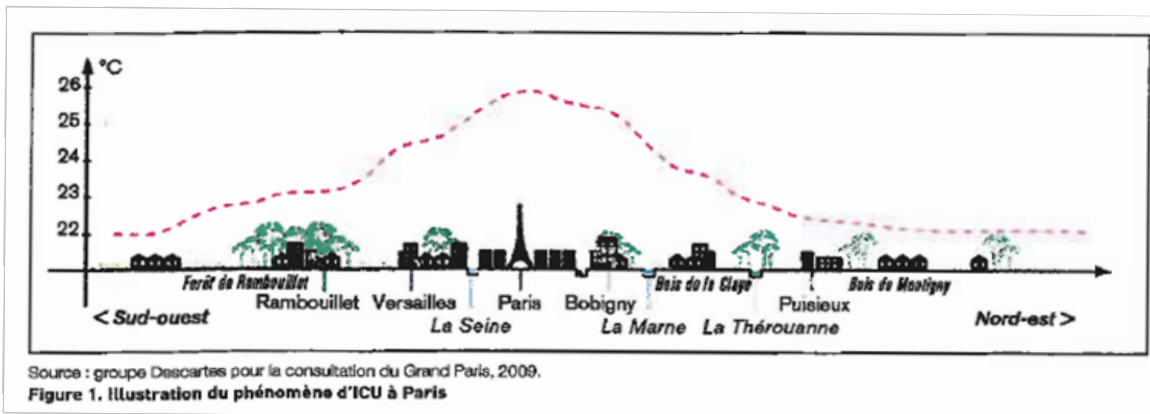


Figure 2.1 : Illustration du phénomène d'ICU (Maillard et al. 2014)

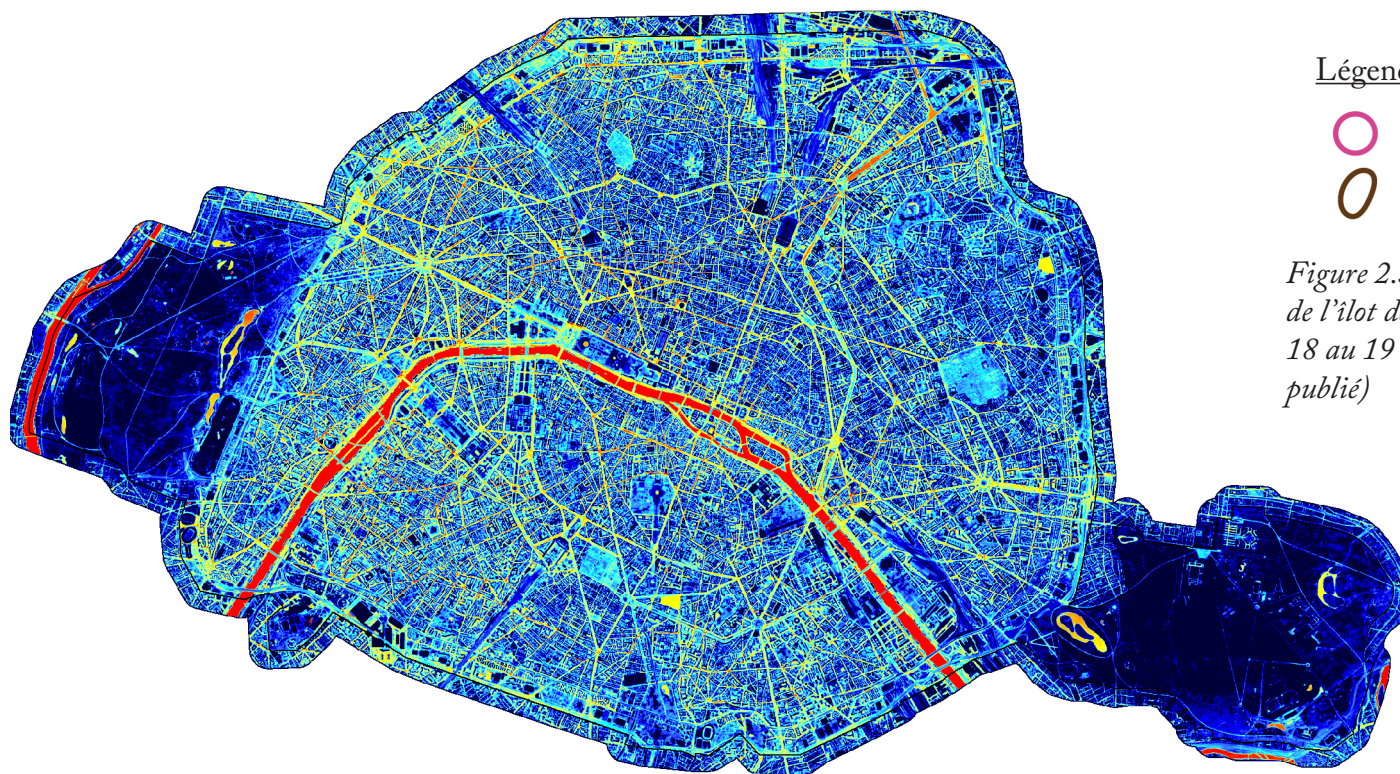
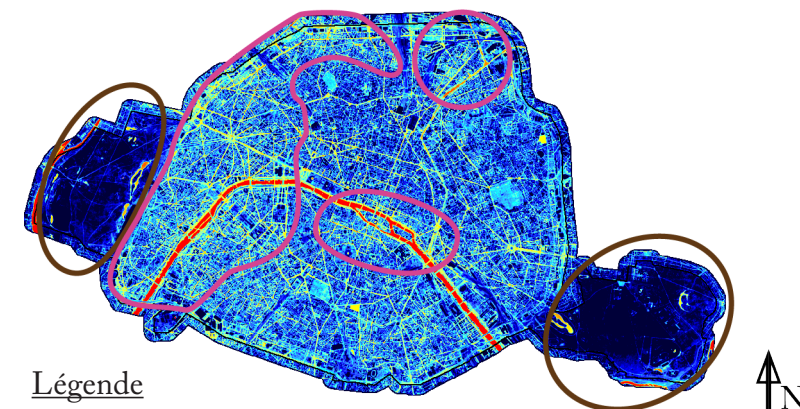


Figure 2.2 : Carte thermique de l'îlot de chaleur urbain de Paris à l'échelle 1:200 000 de la nuit du 18 au 19 août 2015 à minuit (AERODATA, Bigorgne, non publié)



Légende

- Zones où l'on retrouve les principaux ICU
- Zones les plus fraîches

Figure 2.3 : Identification des lieux principaux d'expression de l'îlot de chaleur urbain. à l'échelle 1:20 000 de la nuit du 18 au 19 août 2015 à minuit (AERODATA, Bigorgne, non publié)

suré ou des températures correspondantes, la carte sera lue de la façon suivante : la température la plus froide est représentée par le bleu foncé, la plus chaude par le rouge et les températures intermédiaires suivent ce gradient bleu-rouge de la plus froide à la plus chaude. En revanche le noir est considéré comme illisible et ne sera pas pris en compte.

L'ensemble des cartes thermiques présentées dans cette partie est tiré de la carte présentée sur la figure 2.2,. Cette carte est reprise soit dans son intégralité, soit sous forme d'agrandissements localisés.

Un exemple de lecture de la carte est donné grâce aux figures 2.6 et 2.7.

Pour commencer, on peut voir que la surface rouge 1 est la surface la plus chaude de la figure 2.7. Cette zone correspond à de l'eau (la Seine), comme on peut le voir sur la figure 2.6. Il a été expliqué précédemment pourquoi la Seine (et l'eau en général) apparaît si chaude sur cette carte. Sur la zone 2, la carte thermique présente une coloration bleu moyen qui signifie une fraîcheur relative de la surface. Or, sur l'orthophotoplan, on peut voir que cette zone est constituée d'une strate végétale arbustive, ce qui explique la fraîcheur observée. En ce qui concerne, la zone 3, il s'agit d'un ouvrage en pierre blanche. Cet ouvrage apparaît sur la carte thermique en bleu très clair, donc relativement frais mais moins que la zone 2 par exemple. Or on remarque que la zone 5, bien qu'elle présente la même tonalité de couleur que l'ouvrage sur le plan, est représentée sur la carte thermique par un bleu plus sombre. Elle semble donc plus fraîche. Cette différence de températures peut être expliquée par une différence d'exposition, la zone 5 étant à l'ombre alors que la zone 3 est exposée au soleil. L'endroit le plus sombre et donc le plus frais de la carte thermique est la zone 4. Cet espace correspond à un périmètre engazonné sur le plan. Le gazon étant ras, il se refroidit plus vite que les autres végétaux qui conservent de la chaleur dans leurs volumes. Ainsi, bien que les végétaux plus volumineux rafraîchissent plus l'air ambiant, ce sont les surfaces de gazon qui apparaîtront toujours comme les plus fraîches. Cela se confirme en observant la zone 6, bleu très clair sur la carte thermique qui correspond au houppier* d'un arbre sur le plan. Ce houppier est plus chaud que le gazon de la zone 4 et que la zone 2 arbustive, car il conserve plus la chaleur au niveau de sa structure. La zone 7, pour terminer, correspond à une rue bitumeuse classique de la ville de Paris. Sur la carte thermique, cette zone est représentée en orange, ce qui signifie qu'elle est assez chaude. En effet,

les revêtements bitumeux stockent énormément la chaleur et la relâchent la nuit, ce qui explique cette couleur.

2.1.2 Analyse globale de la carte

Sur la figure 2.3, il est visible que les zones les plus fraîches, les bois de Vincennes à l'est et de Boulogne à l'ouest se trouvent à l'extérieur de la ville. Les zones les plus chaudes en revanche, se situent dans Paris, en particulier à l'ouest, au nord et au centre. C'est donc dans ces zones-là que l'îlot de chaleur urbain s'exprime le plus et que l'on retrouve la majorité des ICIU (îlots de chaleur intra-urbains).

Il est cependant important de noter que le réseau de chaleur urbaine de la Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain (CPCU), qui assure une grande part du chauffage de l'agglomération parisienne, est un élément perturbateur dans la lecture de l'ICU (figure 2.4). En effet, ce réseau transporte de la chaleur sous forme de vapeur dans des canalisations souterraines jusqu'aux bâtiments (tertiaire, résidentiel social, résidentiel privé, bâtiments de collectivités), afin de permettre le chauffage et l'approvisionnement en eau chaude sanitaire (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain 2017). Or ce réseau est repéré par la thermographie car il réchauffe les surfaces au sol, y compris en été puisqu'il fonctionne toute l'année.

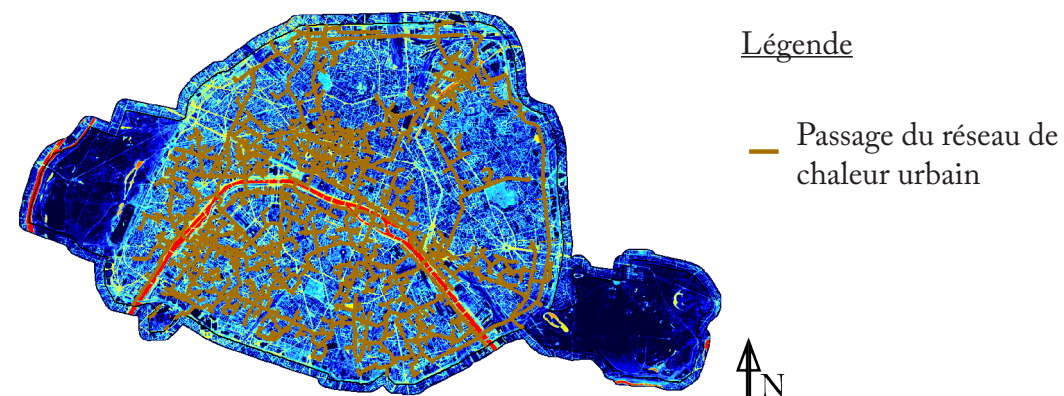
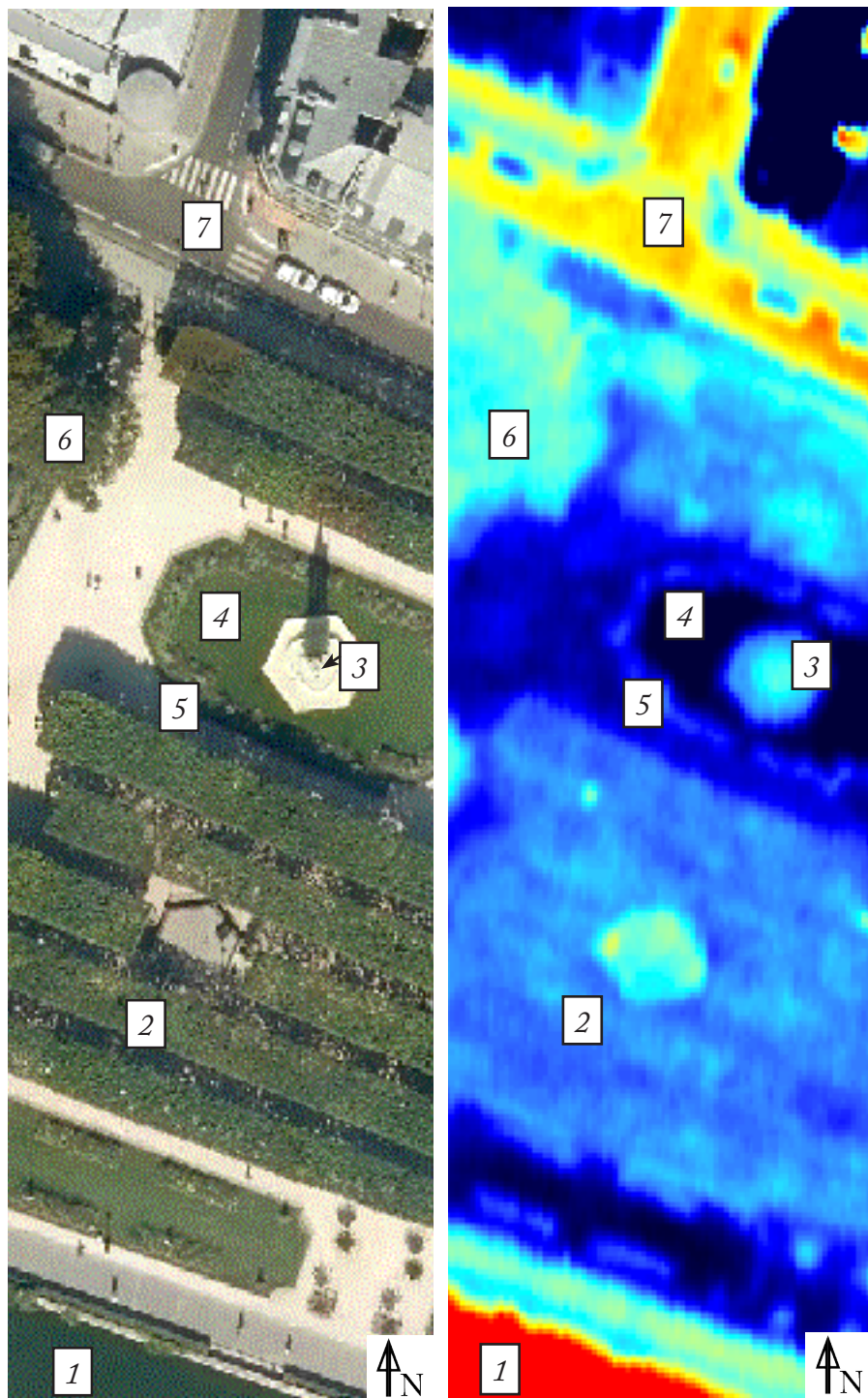


Figure 2.4 : carte thermique et réseaux de chaleur à l'échelle 1:20 000 de la nuit du 18 au 19 août 2015 à minuit (AERODATA, Bigorgne, non publié)

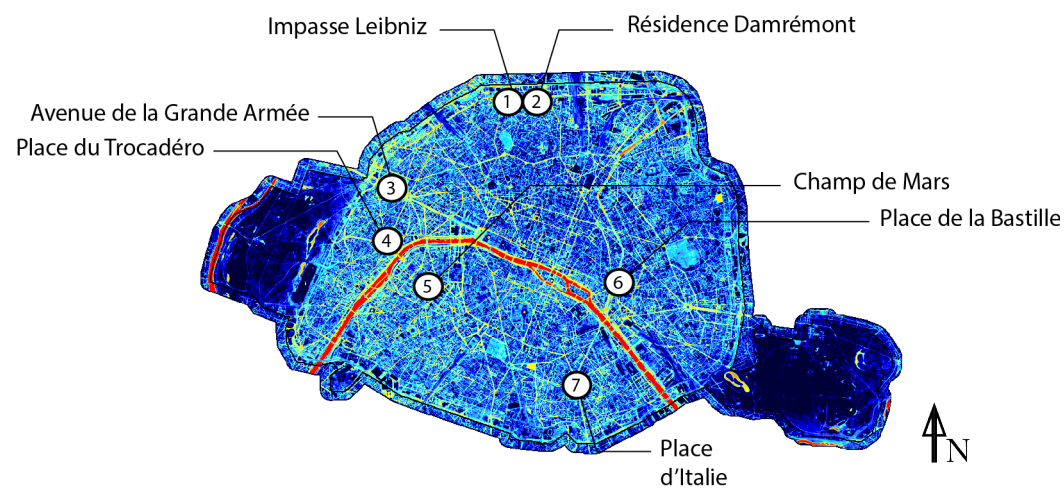


Figure 2.5 : Carte de localisation des ICIU analysés à l'échelle 1: 20 000 de la nuit du 18 au 19 août 2015 à minuit (AERODATA, Bigorgne, non publié)

A gauche : Figure 2.6 : Orthophotoplan du square Jean XXIII au pied de la Cathédrale Notre-Dame, 4ème arrondissement de Paris. Echelle : 1:1000. (APUR et al. 2017)

A droite : Figure 2.7 : Carte thermique du square Jean XXIII au pied de la Cathédrale Notre-Dame, 4ème arrondissement de Paris. Echelle : 1:1000. Nuit du 18 au 19 août 2015 à minuit (AERODATA, Bigorgne, non publié)

2.2. Les manifestations de l'ICU

Sept sites ont été choisis pour illustrer l'ICU de la ville de Paris car ils présentent une grande variété de caractéristiques qui permet de visualiser clairement les relations entre la température observée et les facteurs responsables de la formation et de l'intensité des ICU. L'attention est portée sur le fait que les phénomènes observés ici sont des ICU de surface.

Les sept exemples, localisés sur la figure 2.5, sont :

1. L'impasse Leibniz dans le 18ème arrondissement
2. La résidence Damrémont dans le 18ème arrondissement
3. L'avenue de la Grande Armée dans les 15ème et 16ème arrondissements
4. La place du Trocadéro dans le 16ème arrondissement
5. Le Champ de Mars dans le 7ème arrondissement
6. La place de la Bastille dans le 11ème arrondissement
7. La place d'Italie dans le 13ème arrondissement

Pour chaque exemple sera d'abord présentée sa structure au regard des facteurs influençant l'ICU, puis ces aspects seront mis en relation avec l'observation de la carte.

2.2.1. Impasse Leibniz

On peut constater, sur le plan de la figure 2.9, que dans l'impasse (1 et 2), les sols sont recouverts d'une chaussée bitumeuse, donc imperméables. Dans l'espace planté (3), les sols sont plantés de gazon et d'arbres, donc probablement perméables. D'autre part, sur ce site, aucun plan d'eau n'est présent. Il n'y a donc pas d'eau en surface. Cependant, de l'eau peut être présente en sous-sol, dans la zone 3.

En ce qui concerne la végétation, la zone 1 ne présente pas de plantations alors que l'on peut voir deux arbres et un gazon plantés sur la zone 3. De même, alors que l'espace vert 3 est caractérisé par son gazon, le sol de l'impasse est un sol bitumeux au centre et constitué de pavés clairs en pied de bâtiment. Pour terminer avec la forme urbaine, cet exemple présente le contraste entre un canyon urbain ; l'impasse Leibniz (1 et 2) et la zone plantée (3). Ce canyon a un ratio d'aspect de 0,66 en 1 et de 0,52 en 2 et est clos à son extrémité nord.

Or, sur la carte thermique (figure 2.8), on peut voir que la zone 3 est représentée par des couleurs plus proches du bleu que l'impasse (1 et 2). Cela traduit donc une fraîcheur plus importante que viennent confirmer les facteurs de perméabilité du sol, de présence de végétation (et éventuellement d'eau), de nature des matériaux et de forme urbaine. Pour mieux comprendre les effets de chaque facteur, prenons quelques éléments particuliers sur la carte thermique qui ne présentent la variation que d'un facteur.

D'abord, la zone jaune claire sur les bords de l'impasse. Cette différence de température avec le coeur de l'impasse pourrait s'expliquer par la différence de revêtements entre les deux. A l'extérieur des pavés clairs qui reflètent plus les rayons, et à l'intérieur une chaussée bitumeuse qui absorbe la chaleur.

Second exemple, la zone 2, en rouge, alors que le reste de l'impasse est dans les tons orangés. Cette différence de couleur ne peut s'expliquer que par la forme de la rue, c'est-à-dire le fait qu'elle soit fermée à cette extrémité, ce qui arrête les écoulements d'airs et ne permet pas le rafraîchissement de la zone. Cela peut être également dû au fait que ce troisième mur participe à la réflexion des rayons, ce qui réchauffe d'autant plus l'espace.

Pour terminer, on remarque dans l'espace planté une zone bleu foncé, proche de l'impasse et une zone orangée en pied du bâtiment nord. Ces différences de températures s'expliquent par le fait qu'au sud, le sol bénéficie de l'ombrage du bâtiment de l'impasse alors qu'au nord, le pied de bâtiment est directement exposé au rayonnement, malgré la présence du végétal.

Figure 2.8 : Carte thermique de l'impasse Leibniz 18ème arrondissement de Paris. 48°53'47.60"N; 2°19'55.93"E. Echelle 1: 1000. (AERODATA, Bigorgne, non publié)

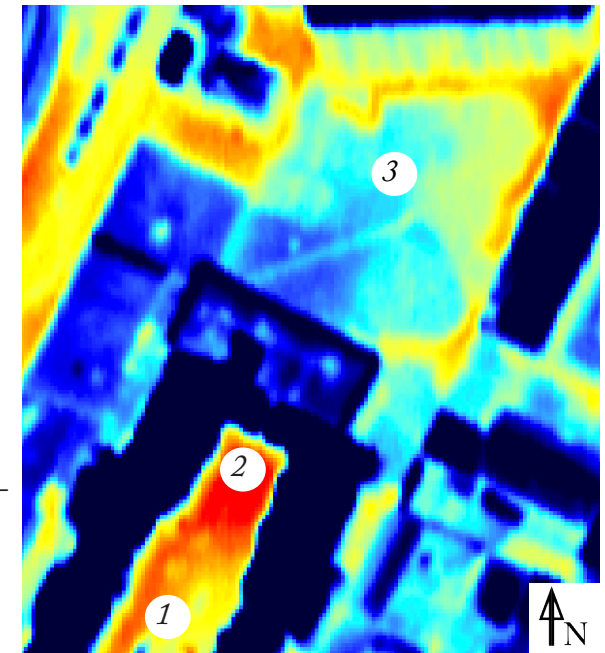


Figure 2.9 : Vue en orthophotoplan de l'impasse Leibniz, 18ème arrondissement de Paris. 48°53'47.60"N; 2°19'55.93"E. Echelle 1: 1000. (APUR et al. 2017)



2.22. Résidence Damrémont

Dans cet exemple, on peut voir que la carte thermique de la figure 2.10 présente des espaces très contrastés au regard de leurs températures. Sur le plan satellite de la figure 2.11, on peut voir que l'ensemble du site est imperméable, à l'exception de la zone 1 au nord, qui est une ancienne voie ferrée. Ainsi, aucune surface d'eau n'est visible, bien que comme dans l'exemple précédent, on peut supposer que de l'eau est stockée dans l'espace perméable de la voie ferrée et non dans la résidence au sol imperméable, où l'eau est certainement évacuée à travers les canalisations. De même, les végétaux sont absents de l'ensemble du site à l'exception de la zone 1 où ils sont très présents. Concernant les matériaux, on retrouve la chaussée bitumeuse et les trottoirs en asphalté de la ville de Paris partout sur le site, sauf sur la zone 1 et sur les trottoirs qui bordent les cours qui sont en pavé auto-bloquant couleur rouge pâle. Dans l'espace planté de la zone 1, on retrouve un gravier clair. La forme urbaine en revanche est particulière : le bâtiment est organisé autour de deux séries de deux cours chacune, l'une au sud et l'autre au nord. Ces cours présentent des formes en T ou en Y.

En observant la carte thermique (figure 2.10), il semble qu'un gradient de températures du plus chaud au plus frais depuis le sud (zone 2) vers le nord (zone 1).

Cela ne peut pas être dû à la différence de matériaux entre les rues des zones 2 et 5, car ils sont sensiblement les mêmes.

Par contre, cela peut être dû à l'exposition : les cours nord restent fraîches car elles sont à l'ombre aux heures les plus chaudes de la journée, à l'exception de leurs angles exposés au sud (zones 3 et 4 par exemple) alors que les cours au sud sont plus exposées. Cependant, il est à noter que le réseau de chaleur urbain de la ville de Paris passe justement à proximité de ces cours sud. Bien que représenté au milieu de la résidence, il passe plus probablement en bord de bâtiment, dans la rue de la zone 2 et rejoint le bâtiment par les cours, là où la couleur rouge est le plus intense. Cela a donc certainement une influence sur l'intensité de la chaleur observée.

Toutefois, il est probable que l'effet de fraîcheur observé au nord soit principalement dû à l'influence de la zone 1, dont la fraîcheur se répand sur la rue 5 et dans les cours nord, se combinant à leur exposition favorable pour en faire des espaces relativement frais. Cette fraîcheur de la zone 1 serait due à la présence de sols perméables, de végétaux et probablement d'eau dans sol.

Légende

— Passage du réseau de chaleur urbain

Figure 2.10 : Carte thermique de la résidence Damrémont, 18ème arrondissement de Paris. 48°53'47.01"N; 2°20'25.62"E. Echelle 1: 1000. (AERODATA, Bigorgne, non publié)

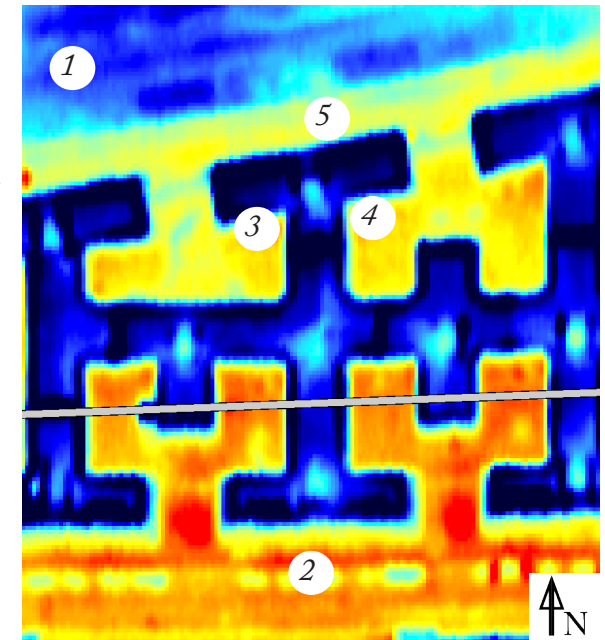
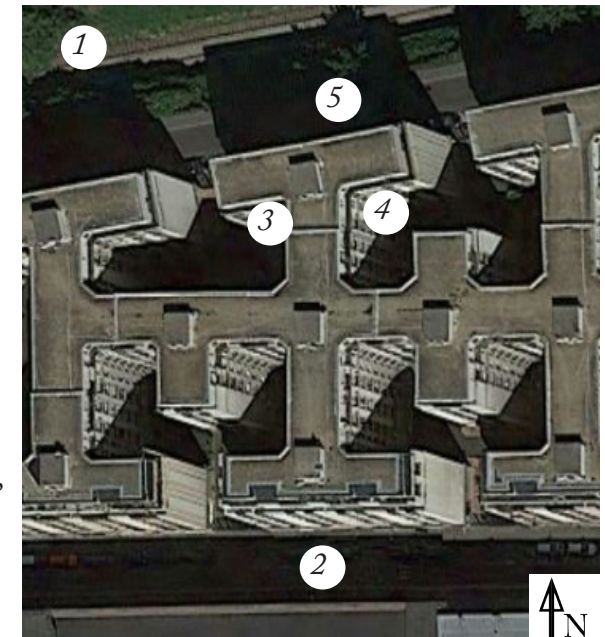


Figure 2.11 : Vue en orthophotoplan de la résidence Damrémont, 18ème arrondissement de Paris. 48°53'47.01"N; 2°20'25.62"E. Echelle 1: 1000. (APUR et al. 2017)



2.2.3. Avenue de la Grande Armée

Dans cet exemple, d'après le plan de la figure 2.13, les sols semblent être tous relativement imperméables, sauf éventuellement au pied des arbres plantés. L'eau n'est pas présente à la surface et les matériaux sont les mêmes sur l'ensemble du site : une chaussée bitumeuse et des trottoirs en asphalte.

Des arbres sont plantés en double alignements de chaque côté de l'avenue, laquelle est orientée selon un axe globalement est-ouest. De plus, la rue étant large, le facteur de vue du ciel est élevé et les matériaux peuvent se refroidir rapidement.

Or on remarque sur la carte thermique de la figure 2.12, que le sud de l'avenue (1) présente des couleurs bleu clair et jaune qui contrastent avec le nord (2), lequel présente des couleurs tirant beaucoup plus vers le rouge. Ici, cela ne s'explique apparemment pas par le passage du réseau de chaleur.

Ainsi, l'ICIU est présent au nord de la rue alors qu'il est absent au sud.

La seule différence entre les deux zones est l'exposition. Au sud, la chaussée et la végétation sont protégées par les bâtiments qui leur fournissent de l'ombre, ce qui permet aux végétaux de rafraîchir effectivement l'air car ils ne reçoivent pas l'énergie des rayons du soleil directs. Au nord, en revanche, l'effet de rafraîchissement n'est pas observé. Les arbres sont effectivement plus frais que la chaussée mais celle-ci reste d'une coloration rouge qui traduit une chaleur très élevée. Par contre, ces arbres de la zone 2 semblent plus chauds que les arbres de la zone 1. Cela pourrait s'expliquer par le fait que, exposés au soleil, les arbres de la zone 2 sont soumis à un stress hydrique qui a pour conséquence de faire cesser l'évapotranspiration. Ces arbres ne seraient donc pas source de fraîcheur pour l'espace alentour.

Les espaces les plus frais du site (zones 3) sont caractérisés par leur proximité à la végétation du sud et leur situation à l'ombre de ces arbres. De plus, ce sont les seules espaces où les matériaux changent puisqu'il s'agit de terre-pleins centraux plus clairs et de lignes blanches au sol.

Figure 2.12. : Carte thermique de l'Avenue de la Grande Armée, 16-17ème arrondissements de Paris. 48°52'33.13"N; 2°17'18.25"E. Echelle 1: 1000.

(AERODATA, Bigorgne, non publié)

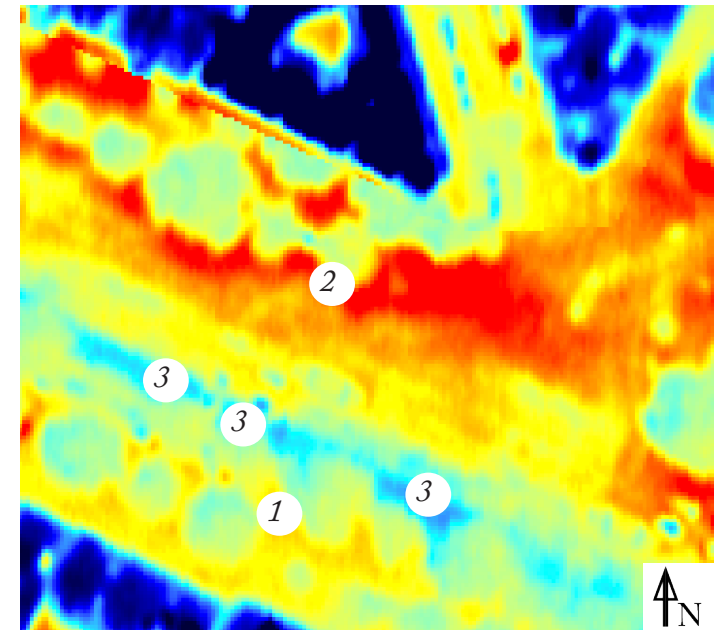
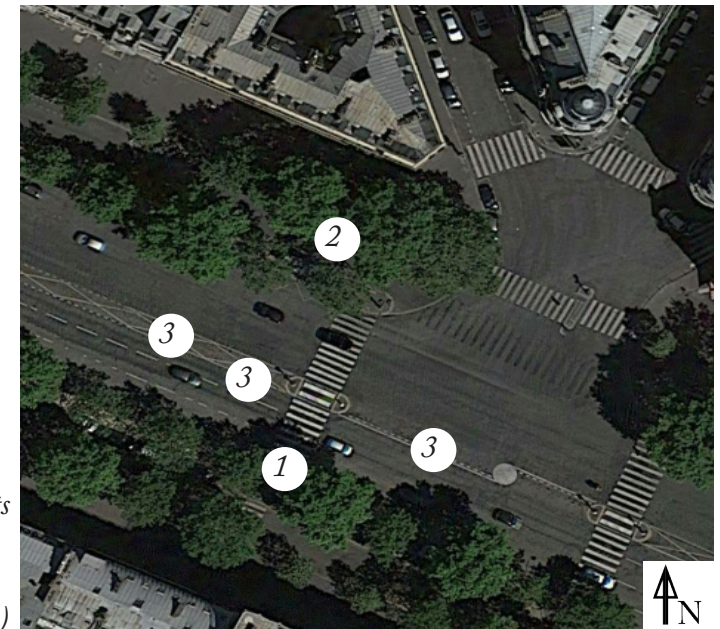


Figure 2.13 : Vue en orthophotoplan de l'Avenue de la Grande Armée, 16-17ème arrondissements de Paris. 48°52'33.13"N; 2°17'18.25"E. Echelle 1: 1000. (APUR et al. 2017)



2.2.4. Place du Trocadéro

Sur ce site, le plan de la figure 2.15 montre que les espaces perméables sont situés au niveau de la zone plantée 1 au nord. Les reste du site présente des sols imperméables. L'eau n'est pas présente en surface, mais il est probable que le sol perméable de la zone 1 infiltre l'eau de pluie. La végétation se limite à du gazon et un massif d'arbustes en arc de cercle sur la zone 1.

Quant aux matériaux, si le végétal domine la zone 1, la zone 2 est principalement constituée de bitume et la zone 3 est revêtue d'un dallage lisse et clair qui semble être en marbre. L'ensemble du site présente une forme très ouverte avec un facteur de vue du ciel proche de 1.

On peut remarquer sur la carte thermique de la figure 2.14 que la zone 2 est relativement chaude, ce qui s'explique par la nature de son revêtement à faible albédo, l'importante épaisseur de sa sous-couche et le fait qu'elle ne bénéficie de presque aucune ombre (à l'exception des espaces 4 et 5). En revanche, les zones 1 et 3 restent relativement fraîches. Or cette fraîcheur ne peut s'expliquer que par la nature du sol. Cela nous permet de comparer l'effet rafraîchissant des plantations et du dallage de couleur claire à fort albédo. En effet, on peut observer que l'esplanade au sud présente des couleurs du bleu foncé au bleu clair selon que l'esplanade reçoit de l'ombre ou non. On peut voir également sur la carte thermique le détail des motifs de cette esplanade. Les parties les plus claires sont représentées dans un bleu plus foncé que les parties les plus foncées, ce qui signifie que même à cette échelle, la différence de tons dans la couleur du revêtement peut jouer un rôle dans l'expression de l'ICIU.

Pour en revenir à la comparaison avec la végétation, on observe que la partie nord de l'esplanade exposée au soleil présente les mêmes couleurs que la strate arbustive de la zone 1. De même, la zone ombragée de l'esplanade, au sud, présente des couleurs proches de celles du gazon, bien que plus claires. On peut donc en déduire un gradient de l'efficacité des différents types de zones au regard de l'effet de fraîcheur. L'espace le plus frais est le gazon, puis viennent les matériaux clairs ombragés. Suivent les matériaux clairs exposés, au même niveau que la strate arbustive. Puis le bitume ombragé que suit de près le bitume exposé au soleil. Toutefois, notons une fois de plus que ces mesures concernent des ICIU de surface. On connaît donc la température des surfaces mais pas celles de l'air ambiant. Ainsi, la strate arbustive est certes plus chaude elle-même que la dalle claire ombragée, mais elle dégage a priori une fraîcheur que ne dégage pas la dalle.

Figure 2.14 : Carte thermique de la Place du Trocadéro, 16ème arrondissement de Paris. 48°51'45.63"N; 2°17'15.58"E. Echelle 1: 1000. (AE-RODATA, Bigorgne, non publié)

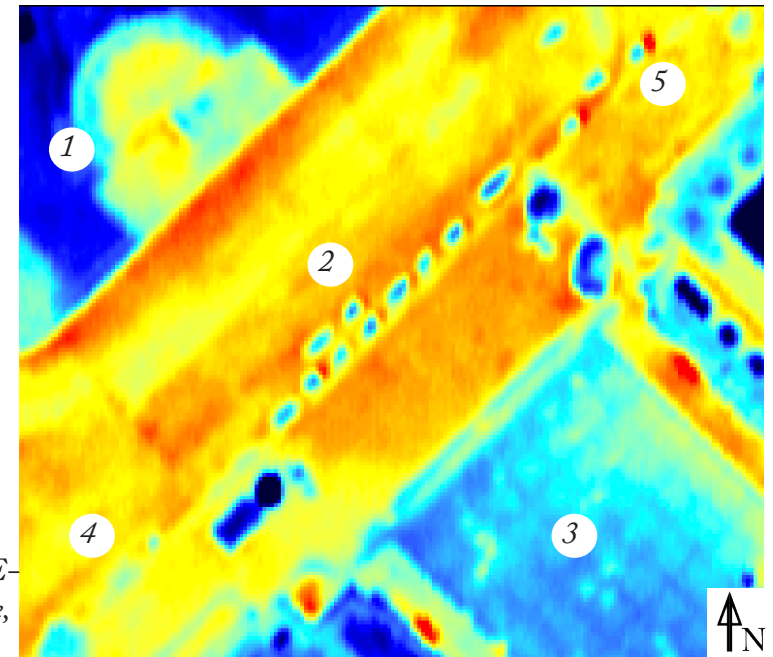
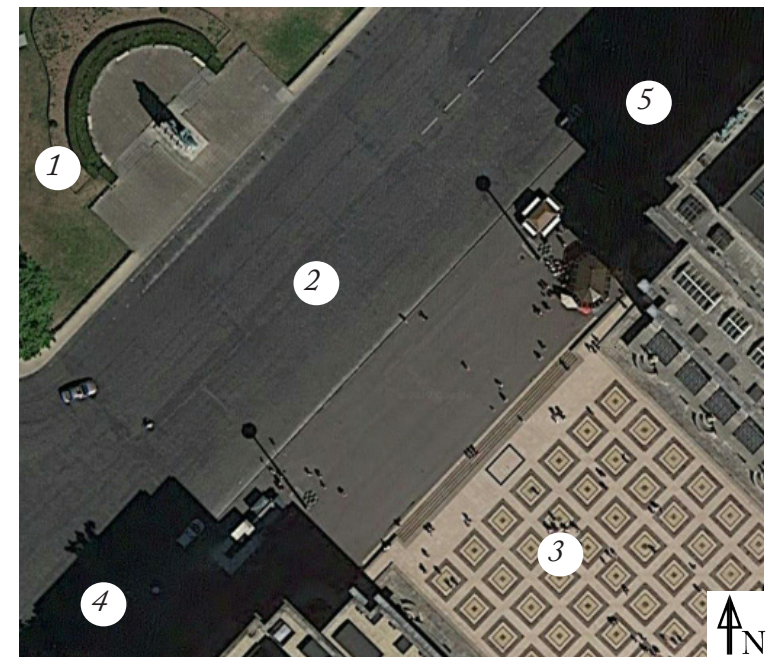


Figure 2.15 : Vue en orthophotoplan de la Place du Trocadéro, 16ème arrondissement de Paris. 48°51'45.63"N; 2°17'15.58"E. Echelle 1: 1000. (APUR et al. 2017)



2.2.5. Champ de Mars

Cet exemple a été choisi pour montrer les différences entre les différents types de végétaux. Il s'agit ici non pas d'un îlot de chaleur intra-urbain mais d'un puits de fraîcheur, c'est-à-dire un lieu qui fournit une grande fraîcheur à la population.

Sur la figure 2.17, on peut voir que la majorité du site est constituée de sols perméables, à l'exception des allées en stabilisé qui sont probablement imperméables.

Il n'y a pas de surface d'eau mais de l'eau est certainement infiltrée dans les sols perméables engazonnés.

Les allées présentent un matériau clair qui revoie les radiations et l'ensemble du site est ouvert avec un facteur de vue du ciel proche de 1.

Des végétaux sont présents : principalement des arbres et des surfaces gazonnées.

Or sur la carte thermique de la figure 2.16, on observe tout de même des différences de coloration, donc de températures, bien qu'elles soient faibles.

Les éléments les plus clairs sont les arbres les plus denses (1). De par leurs volumes importants, ils conservent une part de chaleur tout en rafraîchissant leur entourage.

Les parties des allées les plus exposées au soleil présentent la même coloration que ces arbres, ce qui signifie qu'elles restent relativement chaude, sans diffuser de chaleur en revanche.

Les arbres plus petits, que l'on retrouve par exemple en 3, sont plus frais que les grands arbres. Cela s'explique par le fait que leur volume est plus faible. Toutefois, ils semblent rafraîchir l'espace autour d'eux puisque le sol est plus frais près d'eux, pour une même exposition.

Pour terminer, les zones les plus fraîches sont celles constituées de gazon (4) qui se refroidissent très vite, en particulier dans un lieu présentant une telle ouverture.

Cet exemple permet également l'influence des arbres sur leur entourage. En effet, l'allée est certes constituée d'un matériau clair mais elle bénéficie également de la fraîcheur et de l'ombre apportée par les arbres, car nous avons vu plus haut que dans d'autres situations, les matériaux clairs peuvent présenter des températures plus élevées.

Figure 2.16 :
Carte thermique
du Champ de
Mars, 7ème
arrondissement de
Paris.
48°51'20.68"N;
2°17'54.67"E.
Echelle 1:1000.
(AERODATA,
Bigorgne, non
publié)

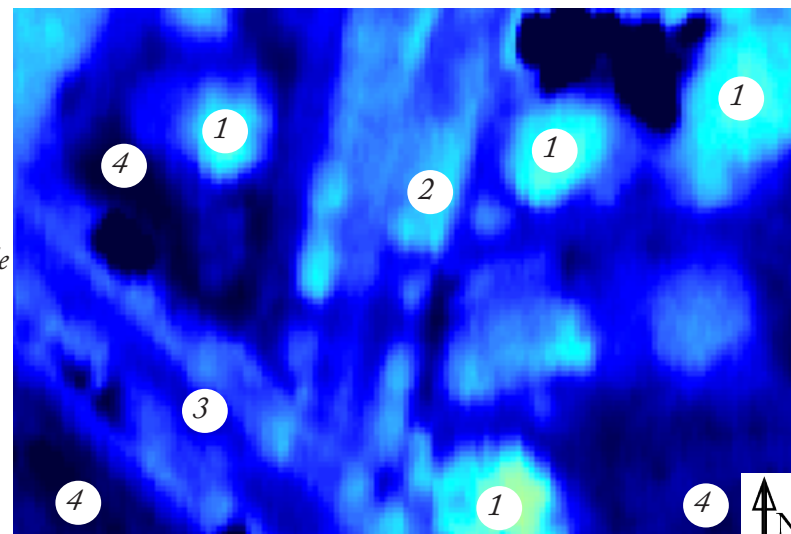
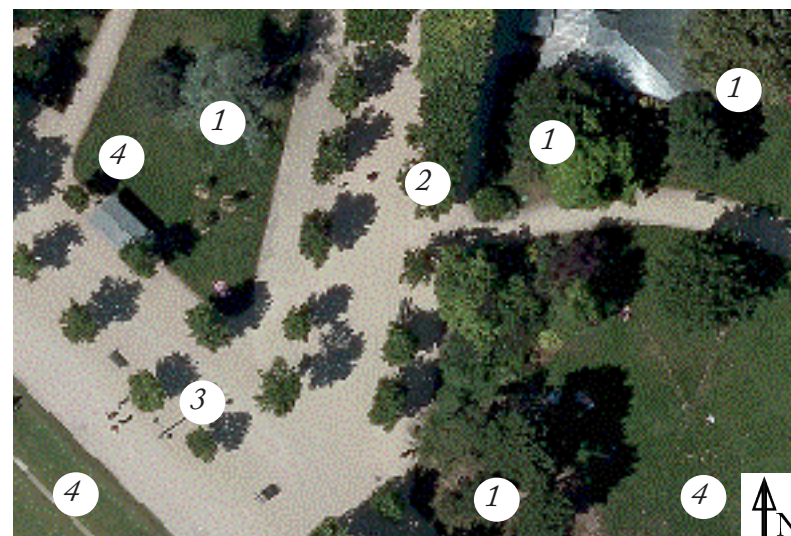


Figure 2.17 :
Vue en ortho-
photoplan du
Champ de Mars,
7ème arrondis-
sement de Paris.
48°51'20.68"N;
2°17'54.67"E.
Echelle 1:1000.
(APUR et al.
2017)



2.2.6. Place de la Bastille

La place de la Bastille, comme on peut le voir sur la figure 2.19, présente un sol uniformément imperméable, une absence totale de végétation et d'eau de surface et une forme urbaine extrêmement ouverte.

Cet exemple montre donc l'importance des couleurs de revêtements. En effet, la place est principalement constituée d'un revêtement bitumeux d'albédo très faible (1), à l'exception de quelques bandes plus claires (2) autour de la statue et du socle de la statue lui-même qui présente une couleur claire également.

Or, sur la carte thermique de la figure 2.18, on peut voir que les lignes claires formant le motif autour de la statue sont d'une couleur bleu clair alors que le bitume est orangé. Leur température est donc inférieure à celle du bitume. Cette différence ne peut s'expliquer que par la différence d'albédo, puisque l'ensemble est très certainement porté par la même épaisseur de sous-couche, voire une fondation plus importante pour la colonne.

Il est assez étonnant de voir qu'un détail d'aménagement peut avoir sa propre réaction à la chaleur et participer à la diminution de l'intensité de l'ICIU aussi efficacement.

De même, on remarque que la partie de la chaussée qui semble avoir été modifiée au sud ouest (3) paraît plus fraîche sur la carte thermique que le bitume (1). Or on peut voir sur le plan que cette chaussée modifiée présente une tonalité à peine plus claire que le bitume de la zone 1. Il semblerait donc que de légères modifications de l'albédo aient un grand impact sur la réaction à la chaleur.

Cet exemple montre donc comment l'expression de l'ICIU de surface peut être diminuée avec simplement la mise en place de matériaux à l'albédo plus élevé.

Figure 2.18 : Carte thermique de la Place de la Bastille, 11ème arrondissement de Paris. 48°51'11.38"N; 2°22'08.92"E. Echelle 1: 1000. (AERODATA, Bigorgne, non publié)

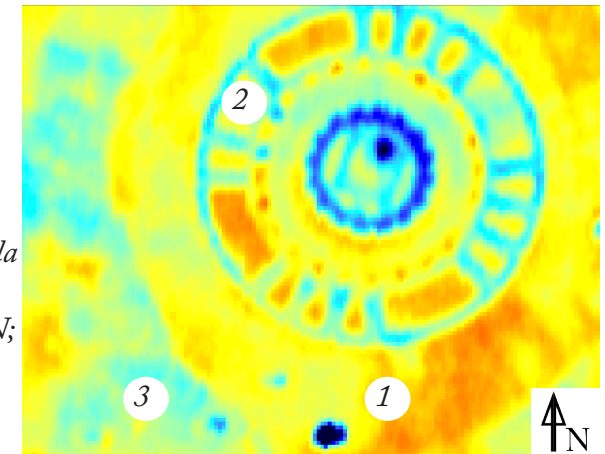
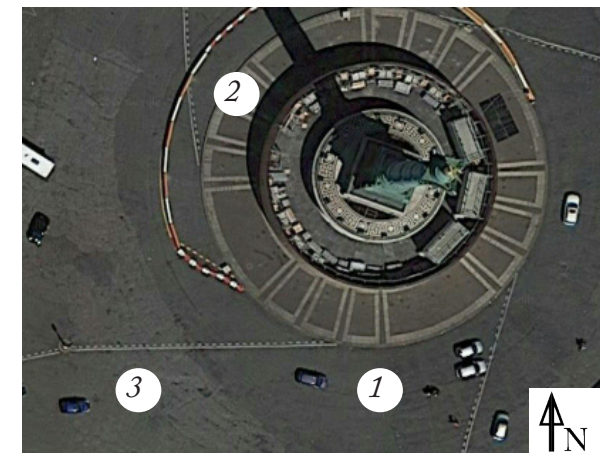


Figure 2.19 : Vue en orthophotoplan de la Place de la Bastille, 11ème arrondissement de Paris. 48°51'11.38"N; 2°22'08.92"E. Echelle 1: 1000. (APUR et al. 2017)



2.2.7. Place d'Italie

La Place d'Italie, comme on peut le voir sur la figure 2.21, est formée d'un grand rond-point central (1), de la chaussée du rond-point (2), d'une contre allée (4) et d'un espace végétalisé entre la chaussée du rond-point et la contre-allée (3). Les sols semblent imperméables dans l'ensemble, à l'exception des surfaces engazonnées des zones 1 et 3. Une pièce d'eau est présente au centre du rond-point et l'eau s'infiltre certainement dans les sols engazonnés. La zone 1 présente des matériaux de revêtement assez clair, la chaussée de la zone 2 est revêtue de pavés d'une couleur assez foncée. Concernant la zone 3, elle présente des matériaux plus sombres que la zone 1 mais la zone présentant l'albédo le plus élevée est la zone 4 qui présente un bitume très sombre. L'ensemble du site est assez ouvert.

Sur la carte thermique de la figure 2.20, on peut voir que cette zone 4 est justement l'espace le plus chaud de la place. Cela s'explique principalement par le revêtement et l'exposition de cette partie du site.

Ensuite viennent l'espace 3 et la fontaine du centre de la zone 1. La fraîcheur relative du premier peut s'expliquer par le fait que le revêtement du sol reste peu réfléchissant, ce qui ne permet pas d'obtenir une fraîcheur maximale. Par contre, concernant la pièce d'eau, nous avons vu que ces éléments apparaissent normalement en rouge sur cette carte. Ici deux explications peuvent exister. D'abord, la fontaine n'était peut-être pas en activité de jour-là et sa température s'expliquerait simplement par la couleur du fond du bassin. La seconde explication consisterait à vérifier la profondeur du bassin. Si celui-ci est très peu profond, alors la fontaine contiendrait peu d'eau, ce qui ferait que sa capacité de rétention de la chaleur serait réduite.

Les espaces les plus frais sont l'espace planté de la zone 1 et la zone 2. La couleur de la zone 1 s'explique par la présence de végétaux et de surfaces claires au sol. Par contre, celle de la zone 2 est assez difficile à expliquer. En effet, cet espace apparaît sombre sur la figure 2.20. Ce sol est composé de pavés, il est donc plus rugueux, avec des aspérités. Cela devrait induire un albédo plus faible et les rayonnements devraient être piégés plus fortement qu'avec un matériau lisse. Cela n'explique donc pas la fraîcheur du site. Cependant, la température de surface et la chaleur stockée et relâchée par une surface dépend de beaucoup d'autres facteurs (composition du sol, albédo de surface, inertie des matériaux, émissivité, milieu environnant, météo, etc). Il serait donc intéressant d'analyser plus précisément ces pavés afin de comprendre les raisons de leur effet rafraîchissant. (Colombert, communication personnelle 13 août 2017)

Figure 2.20 : Carte thermique de la Place d'Italie, 13ème arrondissement de Paris. 48°49'53.06"N; 2°21'20.17"E. Echelle 1: 1000. (AERODATA, Bigorgne, non publié)

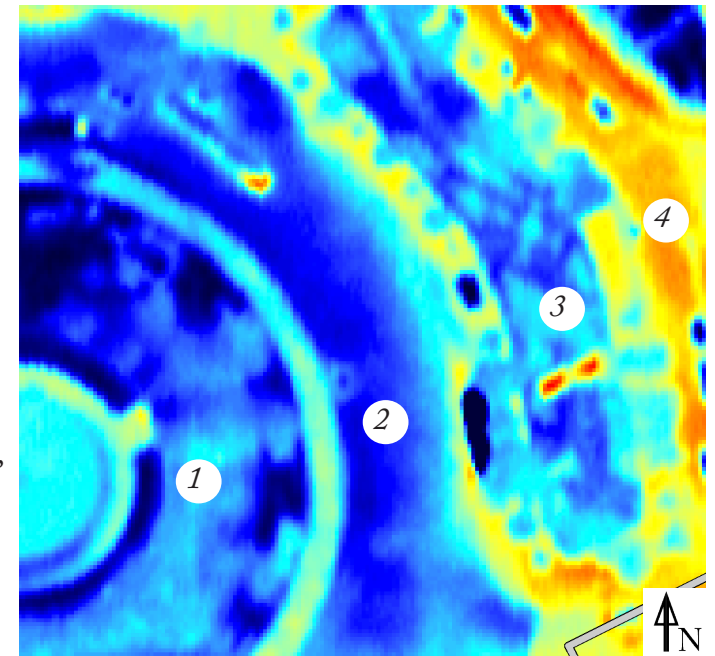
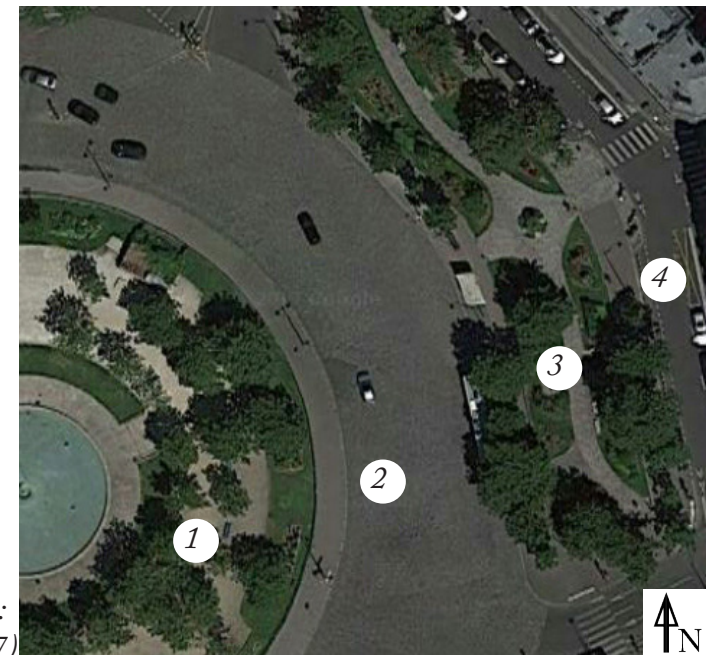


Figure 2.21: Vue en orthophotoplan de la Place d'Italie, 13ème arrondissement de Paris. 48°49'53.06"N; 2°21'20.17"E. Echelle 1: 1000. (APUR et al. 2017)



Introduction

Plusieurs projets ont été proposés à travers le monde afin de répondre à la problématique des îlots de chaleur urbains, par exemple au Japon avec le projet des jardins suspendus d'Osaka en 2003.

En France, l'îlot de chaleur est souvent traité indirectement par les projets d'écoquartiers, comme à Paris avec l'écoquartier Clichy-Batignolles. Lors de la conception de ces aménagements, le principe d'îlot de chaleur urbain n'est pas mis en lumière, mais les propositions développées pour réintégrer de la végétation dans les quartiers permet souvent de résorber en partie l'effet d'ICU à un endroit donné. Cependant, cette conséquence n'est pas toujours certaine et n'est pas mesurée.

Il s'agit donc ici de présenter deux exemples d'intervention, un en France, l'autre au Québec, axés directement sur la lutte contre l'îlot de chaleur et qui ont été évalués quantitativement et/ou qualitativement. Ainsi, il sera possible par la suite de comparer ces deux interventions et de s'en inspirer dans le cadre d'un projet sur un site parisien. Ces deux exemples ont été choisis à deux échelles différentes : l'un porte sur un quartier, la Part-Dieu à Lyon, l'autre porte sur l'agglomération de Montréal au Québec.

3.1 Lyon, une intervention sur le quartier de la Part-Dieu

La Métropole de Lyon, située dans la région Rhône-Alpes, est sous l'influence d'un climat de type semi-continental, avec des étés souvent très chauds et des hivers froids. Elle compte environ 1 282 000 habitants et son emplacement dans la circulation nord-sud lui confère une position stratégique (Observatoire Régional des Effets du Changement Climatique Rhône-Alpes 2015). Dans le cadre du Plan Climat de la Métropole de Lyon, le Grand Lyon et l'Agence de l'Urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise, avec la participation de Veolia, ont tenté de comprendre l'îlot de chaleur (figure 3.1) afin de pouvoir le limiter efficacement. Dans ce but, un terrain d'expérimentation a été retenu : le quartier de la Part-Dieu. Il s'agit du deuxième quartier d'affaires au niveau national (après La Défense à Paris). Cette zone, que la Métropole de Lyon souhaite étendre et rénover, devient un terrain d'innovation pour de nouvelles solutions et pratiques urbaines (figure 3.2). Trois zones caractéristiques ont été identifiées comme lieux d'action intéressants pour des projets climatiques :

- la place Béraudier, au pied de la Gare Lyon Part-Dieu, qui est un espace public minéral très fréquenté,
- la rue Garibaldi, représentative du quartier lyonnais typique,
- la ZAC de la Buire, quartier neuf, dense, présentant de nombreux espaces verts. (Maillard et al. 2014)

Dans un premier temps, l'équipe a caractérisé le phénomène d'ICU dans le quartier pour pouvoir ensuite tester des solutions. Cette caractérisation est en effet indispensable pour l'étude de la vulnérabilité du site, en fonction de facteurs sociaux, économiques ou environnementaux. Cette étude a été réalisée grâce à :

- une approche topoclimatique (utilisation des bases de données d'un système d'information géographique, d'occupation du sol et de télédétection);
 - une approche microclimatique utilisant des bases de données urbaines;
 - des mesures physiques (hygrométrie et température) réalisées lors de l'été 2011 dans la ville de Lyon.
- (Observatoire Régional des Effets du Changement Climatique Rhône-Alpes 2015)

Les cartographies, réalisées à partir des bases de données, ont permis de déterminer les probabilités d'apparition des ICIU et de décomposer le quartier en mailles de 250m x 250m possédant chacune une typologie et une forme urbaine spécifique. Les mesures physiques, elles, ont donné les résultats suivants en 2011 (figure 3.3):

- des valeurs de température moyenne journalière dépassant 20°C et 25°C au cours de la période de l'alerte canicule, qui a eu lieu du 18 au 22 août 2011, mais aussi en dehors de cette période,
 - un abaissement de la température de 0,5°C à 0,8°C à proximité du Rhône et du parc de la Tête d'Or, l'effet étant perceptible jusqu'à une distance de 300m environ,
 - un abaissement de la température, dû aux petits squares, sensible jusqu'au trottoir opposé,
 - des valeurs maximales relevées au niveau de plusieurs points, notamment au niveau de la ZAC de la Buire.
- (Maillard et al. 2014)

Des projets ont été effectués sur deux des trois sites identifiés : dans la ZAC de la Buire, la solution d'humidification de la chaussée a été testée, alors que

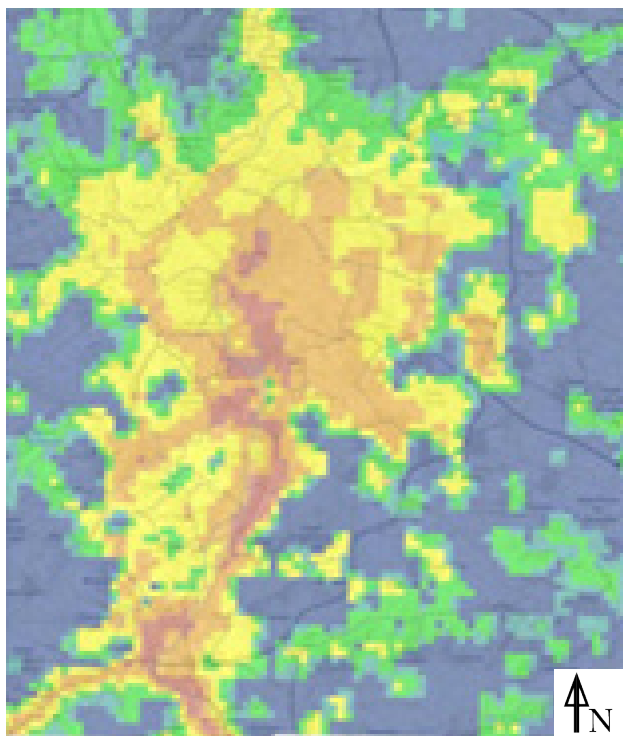


Figure 3.1. : Illustration de l'îlot de chaleur sur le Grand Lyon - Modélisation des températures de 30 avril 2011 (Julita Dudek dans Ponsar 2016)

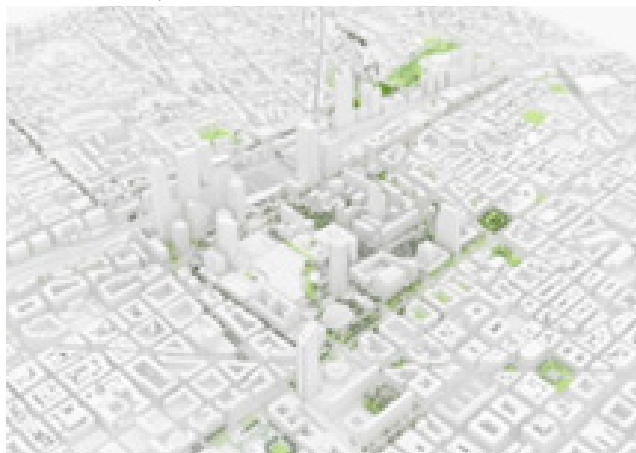


Figure 3.2. : Projet de rénovation du quartier de la Part-Dieu (Ville de Lyon 2017)

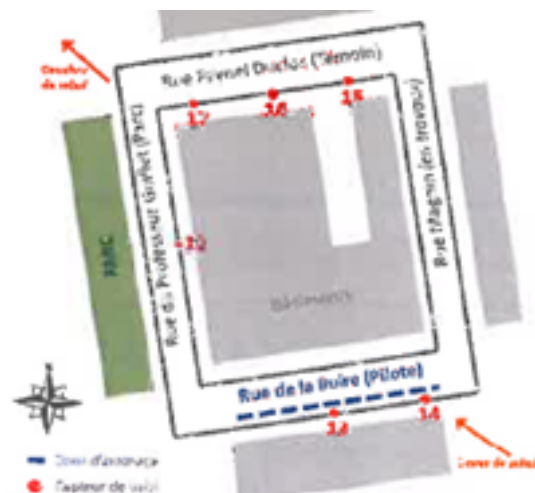


Figure 3.4: Plan d'installation des buses et des capteurs dans les rue de la Buire et Faynel Duclos (Maillard et al. 2014)



Figure 3.3 : Cartographie de l'ICU de la ZAC de la Part-Dieu à Lyon (Maillard et al. 2014)

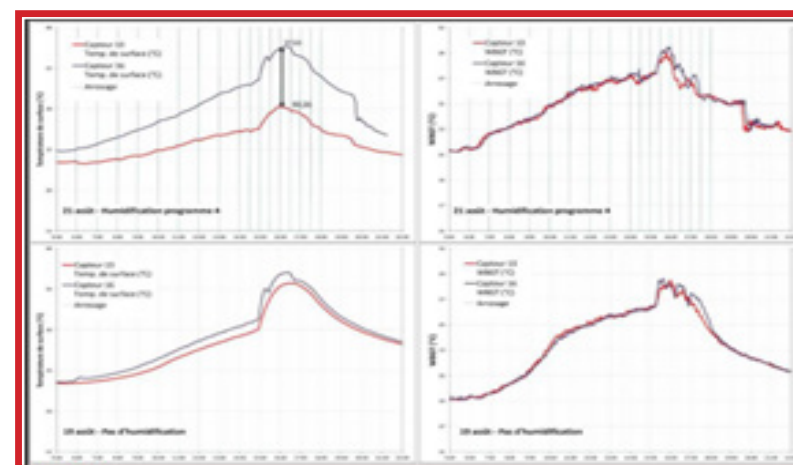


Figure 3.5.: Mesures de la température de la chaussée et de la température ressentie lors de l'expérience, rue de la Buire (Ponsar 2016)

la rue Garibaldi est actuellement aménagée de façon à laisser une plus grande place à la végétation et en particulier utiliser la solution des réserves d'eau de pluie en sous-sol. La réorganisation de la place Béraudier, en revanche, est en cours d'étude mais il semble que c'est sa fonction de pôle multimodal qui sera mise en avant. La trame verte de la ville y sera poursuivie et il semble que des brumisateurs seront installés pour diminuer la température lors des vagues de chaleur (SPL Lyon Part-Dieu 2017).

3.1.1 La rue de la Buire : humidification de la chaussée

En 2011, Le Grand Lyon, avec l'aide de Veolia, a commencé une expérience qui consistait à humidifier une rue pilote (la rue de la Buire) comme indiqué sur la figure 3.4 et à mesurer certains paramètres, comme la température de chaussée et la température ressentie, puis de les comparer avec ceux d'une chaussée non arrosée de référence : la rue Faynel Duclos (figure 3.5) (Observatoire Régional des Effets du Changement Climatique Rhône-Alpes 2015). Le but était d'obtenir des mesures de l'efficacité de cette solution de rafraîchissement, et de les comparer à d'autres solutions permettant de réduire les effets des îlots de chaleur urbains. Pour mener à bien cette expérience, des buses ont été disposées dans la bordure de la rue pour humidifier la chaussée (selon différents programmes) et 6 stations de mesures climatiques ont été mises en place pour évaluer l'effet des différents programmes. L'expérimentation a continué chaque été jusqu'en 2014, permettant de tester plusieurs programmes d'humidification de la chaussée pilote (différentes fréquences d'arrosage, différents horaires d'arrosage, etc.) (Observatoire Régional des Effets du Changement Climatique Rhône-Alpes 2015).

Après comparaison des résultats obtenus sur la rue témoin avec ceux de la rue pilote, la solution d'humidification de chaussée a permis :

- de réduire la température de chaussée, au sol, de 3 à 5° C;
- de réduire la température ressentie par le piéton de 0,5° C environ : cette température ressentie a été mesurée à l'aide de l'indicateur WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) qui prend en compte la température de l'air, l'hygrométrie de l'air et le rayonnement solaire sur l'homme.

La consommation d'eau des différents programmes d'humidification a été estimée à 4 litres/jour/m² de chaussée pour une journée caniculaire, dans le cadre d'un futur projet d'aménagement, en mode opérationnel (Observatoire Régional des Effets du Changement Climatique Rhône-Alpes 2015).

3.1.2 La rue Garibaldi : aménagement d'une promenade plantée

D'après l'étude d'impact effectuée pour ce projet (figure 3.6), l'orientation nord-sud de la rue Garibaldi ne favorise pas la formation de l'îlot de chaleur. Les sections les plus étroites de la rue possèdent un profil en U qui leur permet d'être protégées grâce à l'ombre offerte par les bâtiments à l'est et à l'ouest et la courte durée d'exposition. Cependant, certaines parties présentent des voies plus larges où le phénomène de surchauffe est plus marqué, car ces voies sont exposées plus longtemps au soleil de l'après-midi et du début de soirée pendant l'été, pour les bâtiments situés à l'est de la rue (figure 3.6) (Grand Lyon Communauté Urbaine 2011)

Il y a donc bien une expression de l'îlot de chaleur sur cette rue, en particulier en juillet et août où les températures sont très élevées, bien qu'il ne soit pas maximal. De plus, d'autres facteurs non climatiques aggravants s'ajoutent, comme par exemple la forte activité du quartier, la présence de climatisations et le trafic élevé (Grand Lyon Communauté Urbaine 2011).

Le projet de la rue Garibaldi consiste à instaurer sur 2,6 km un aménagement favorisant la végétation et les modes de transport doux, pour limiter la présence de la voiture. L'aménagement paysager retisse les liens entre les quartiers situés à l'est et à l'ouest de la voie et propose à terme une continuité verte entre les parcs de la Tête d'or et Blandan. Les îlots végétalisés représentent 4 500 m² qui contribuent à préserver la biodiversité urbaine, tout en limitant les îlots de chaleur (Métropole de Lyon 2017).

Les anciens tunnels pour automobiles ont été transformés en réservoirs, qui permettent un stockage de l'eau de pluie et facilitent son infiltration dans le sol (figure 3.7). Cette eau est utilisée pour l'irrigation des plantations en période de canicule. Les espèces étant choisies de façon à s'adapter au climat, leur survie n'est pas en jeu, il s'agit simplement de leur fournir suffisamment d'eau pour permettre l'évapotranspiration, qui ne se fait plus en période de sécheresse, puisque l'arbre n'a plus d'eau à disposition. La ville de Lyon estime que cet apport d'eau permettra de diminuer localement la température d'un ou deux degrés.

C'est le changement d'état de l'eau lié au phénomène d'évapotranspiration qui permet de refroidir l'air, plus encore que l'humidification. Les autres services fournis par la végétation (ombrages directs et indirects, ventilation, etc.) ont également un impact important mais moindre que l'évapotranspiration (CEREMA 2016).

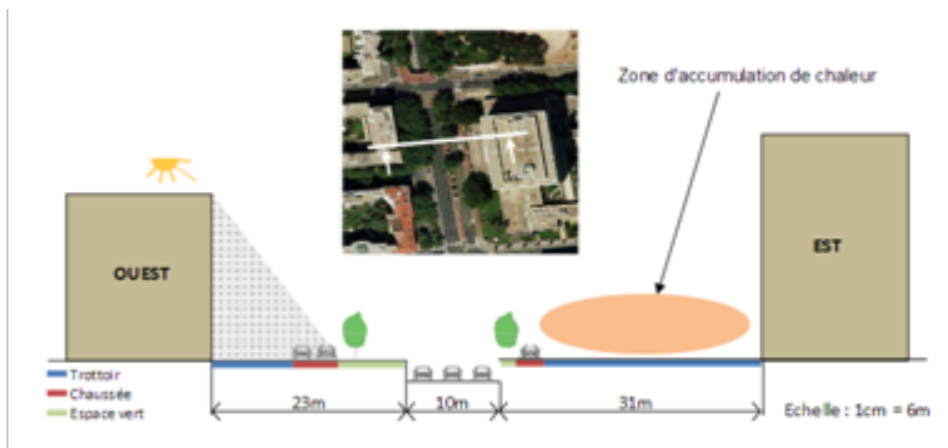


Figure 3.6 : Schéma permettant de visualiser l'insolation des façades est et ouest de la rue Garibaldi en été à 15h (Grand Lyon Communauté Urbaine 2011)

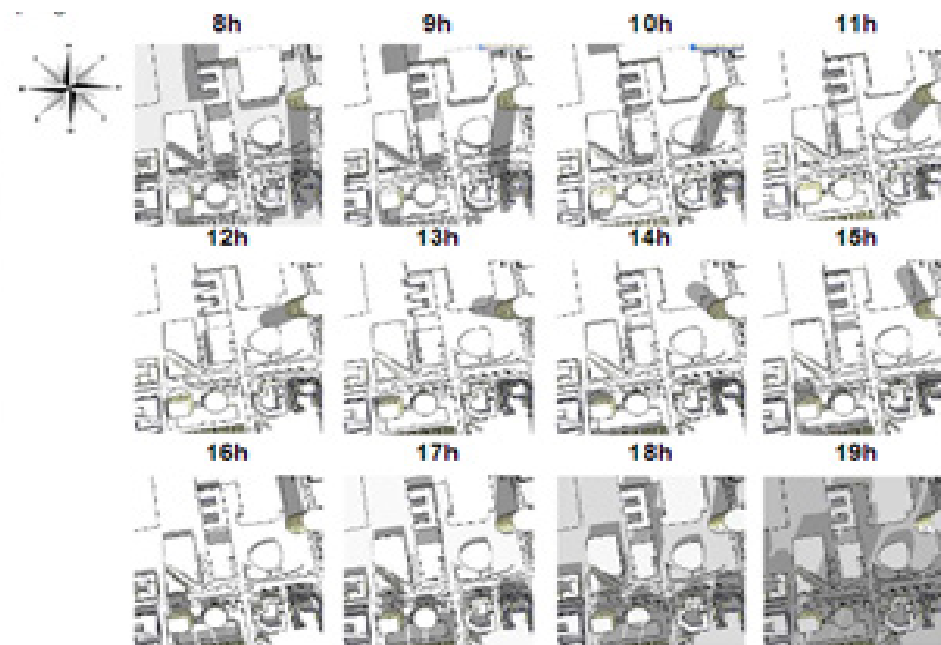


Figure 3.8: Modélisation des ombres portées et héliodons au droit de la rue Garibaldi au niveau de la Part-Dieu (Grand Lyon Communauté Urbaine 2011)

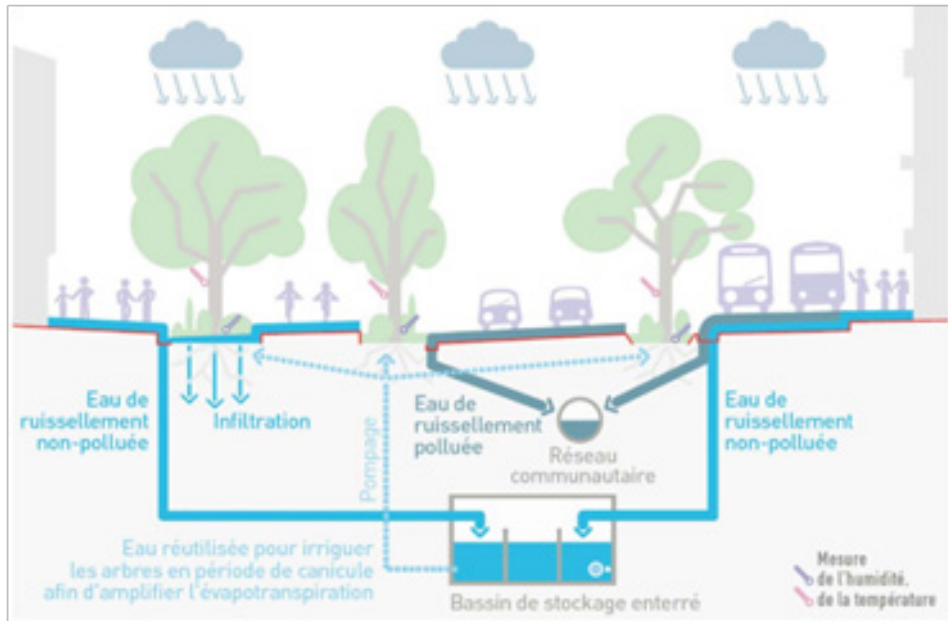


Figure 3.7 : Schéma de description du système mis en place pour le recueillement des eaux rue Garibaldi (Ponsar 2016)



Figure 3.9 : Dispositifs de mesures de températures dans la rue Garibaldi (Ponsar 2016)

L'étude d'impact indique que le projet, grâce à l'importance de la couverture végétale qu'il propose, la massification de la canopée et l'augmentation de la rugosité des sols par végétalisation (surtout au droit des angles des îlots), participe à l'atténuation des effets aggravants de l'îlot de chaleur urbain, en particulier dans les parties les plus exposées à l'est de la rue Garibaldi, et de ralentir les vents dominants nord-sud (orientés dans le même sens que la rue et sources de gêne un jour sur dix)

Une modélisation des ombres portées et effets de masques (héliodons) au niveau du secteur de la Part-Dieu montre les sections les plus exposées au soleil (figure 3.8). Le trottoir à l'est de la rue est le plus exposé au phénomène de surchauffe estivale.

D'autre part, cette étude a identifié que dans ce secteur, les précipitations sont de forte intensité et réparties sur des temps relativement courts. L'aménagement participe donc à la régulation des pluies en même temps qu'il diminue l'effet d'ICU (Grand Lyon Communauté Urbaine 2011).

Suite à ce projet, la ville de Lyon a lancé une campagne de mesures pendant l'été 2016, afin de mieux comprendre l'effet de la végétation sur le confort thermique, en particulier pendant les fortes chaleurs (figure 3.9). Quinze capteurs fixes (protégés par des abris météorologiques) ont été installés sur les arbres ou les mâts d'éclairage de la rue Garibaldi, qui mesurent toutes les heures la température et l'humidité de l'air. Quatre autres capteurs mesurent l'humidité du sol et deux capteurs (PépiPIAF) ont été fixés sur les arbres afin de mesurer leur croissance et ainsi connaître leurs besoins, en particulier en eau (Métropole du Grand Lyon - PCET 2016; Adam, Ameglio, et Coste, s. d.).

3.1.3 Commentaire

Le quartier de la Part-Dieu a donc vu se développer deux projets très différents : une expérimentation à caractère scientifique et un aménagement plus traditionnel.

L'expérimentation rue de la Buire a essentiellement joué sur le facteur de la présence d'eau. C'est grâce à l'apport d'eau sur le site que l'air s'humidifie et que l'îlot de chaleur diminue à l'échelle de la rue, aussi bien à la surface que dans l'air ambiant (entre la surface et la canopée urbaine). Cependant, on peut se demander si l'utilisation de 4 litres d'eau par jour et par m² lors des vagues de chaleur est acceptable dans le cadre du réchauffement climatique et de la préservation des ressources, en particulier en eau.

L'aménagement sur la rue Garibaldi, en revanche, a joué principalement sur le facteur de présence de végétaux mais aussi sur la présence d'eau (souterraine) et sur la perméabilité du sol qui a été restaurée. La vitesse des automobiles a également été diminuée, bien que cela provoque à certains carrefours une élévation de la quantité de polluants présents dans l'air, puisque les véhicules consomment plus de carburant à des vitesses réduites. L'ensemble a ainsi joué sur la rugosité de la forme urbaine, qui a augmenté avec la présence des végétaux.

Selon les estimations de la ville, la température de l'air ambiant diminue de 1 à 2°C grâce à l'aménagement. On peut comparer cette estimation avec le résultat de l'humidification de la rue de la Buire, pour laquelle a été observée une diminution de 0,5°C seulement de la température de l'air ressentie bien que la température de la chaussée ait diminué de 3 à 5°C.

Il est certes nécessaire d'attendre les résultats finaux des études sur la rue Garibaldi, mais il semble tout de même que l'installation de végétaux, en particulier d'arbres est plus efficace que l'humidification de la chaussée. Cependant, toutes les rues ne peuvent pas être végétalisées et l'humidification reste une solution efficace pour les petits espaces.

3.2 Montréal, une action à l'échelle de la ville

Dans le cadre de l'adaptation au changement climatique et de l'Agenda 21, le gouvernement du Québec a mis en place le Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012. La région de Montréal, afin de mettre en place ce plan, a tout d'abord identifié l'îlot de chaleur présent sur son territoire (figure 3.10).

Avec le soutien de l'Institut National de Santé Publique, elle a par la suite mis en place de nombreuses mesures de lutte contre les îlots de chaleur, en particulier des projets de création d'îlots de fraîcheur, entre 2011 et 2012, dans certains arrondissements de la ville et plus généralement dans la région de Montréal. Ces projets constituent principalement en la végétalisation de cours d'écoles, de terrains de sport et de stationnements, ainsi qu'en la mise en place de surfaces réfléchissantes (Levasseur 2014).

Ici nous présenterons les projets dont l'effet sur l'ICU a été évalué par Environnement Canada dans le Bulletin d'Information en Santé Environnementale en Novembre 2014. Il s'agit des projets repris dans le tableau 3.1 et localisés sur la figure 3.11.

Ces six projets ont été soumis à trois techniques d'évaluation : la modélisation à haute résolution, l'imagerie thermique satellitaire et la campagne de mesures.

La modélisation à haute résolution, d'abord, consiste à simuler les effets des projets sur les bilans radiatifs et les températures ambiantes pendant des épisodes d'ICU significatifs. Ces simulations numériques ont permis de comparer les réductions de température produites par l'aménagement de quatre des six sites pendant quatre épisodes d'ICU significatifs (des descriptions détaillaient manquaient pour les deux sites non traités). Pour chacun des quatre épisodes, deux simulations ont été réalisées, l'une représentant la situation avant travaux et la deuxième représentant la situation après travaux. L'imagerie thermique satellitaire produit des photos aériennes sur lesquelles sont indiquées les modifications thermiques dues à l'aménagement. Les images sont prises sous conditions météorologiques similaires et sont sélectionnées dans des banques de données adaptées (Landsat) puis normalisées avant d'être utilisées. Ensuite, les valeurs relatives obtenues sont transposées sur des orthophotoplans (Google Earth). Ces valeurs n'ont pas d'unité et représentent un gain ou une perte de chaleur par rapport à la situation avant travaux (Levasseur 2014).

La campagne de mesures devait comparer les températures de l'air pour chaque projet avec la température moyenne calculée en milieu rural et la température moyenne calculée en milieu urbain avant et après aménagement. Les comparaisons avant aménagement ont donné le résultat suivant : les six sites présentaient des ICIU relativement intenses, c'est-à-dire que les températures de l'air y étaient plus élevées que les températures de l'air aux stations urbaines de référence. Cependant, l'échantillonnage n'a pas permis de comparer les changements de températures liés aux aménagements (Levasseur 2014).

3.2.1 Verdun fait sa fraîche

Dans le quartier Wellington-De l'Eglise, dans l'arrondissement de Verdun, le projet «Verdun fait sa fraîche» vise à atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain. Pour cela, 587 arbres ont été plantés à la fois sur les espaces publics, dont le parc Philippe Zotique Millette et certains espaces privés. Les cours de quatre institutions ont été plantées, ainsi que six ruelles, avec la participation de plus de 50 citoyens et une Place fraîcheur où des abris ombragés, des aménagements horticoles, des jeux d'eau, des brumisateurs, ainsi que des pavés réfléchissants, accompagnent la végétalisation, afin de maximiser les aires de rafraîchissement (Institut National de Santé Publique Québec 2017g; Nature-Action Québec 2011).

Pour ce projet, c'est l'aménagement du parc Philippe-Zotique-Millette d'une superficie de 467,50 m² (Ville de Montréal - Arrondissement de Verdun 2013a), qui a été évalué par le Service Météorologique du Canada - Région du Québec (SMC-QC) d'Environnement Canada (EC).

Ce parc était constitué d'une surface en béton comportant un arbre. Il a été réaménagé et présente depuis deux espaces gazonnés et plantés et un espace proposant des jeux d'eau grâce à l'implantation de brumisateurs (figure 3.12). Les pastilles sont séparées par des surfaces de caoutchouc, ce qui réduit la proportion de béton et de pierre à 16% de la surface du parc (Levasseur 2014; Ville de Montréal - Arrondissement de Verdun 2013b).

Résultats :

Grâce à la technique de modélisation à haute résolution, Environnement Canada a pu montrer que les réductions de température obtenues grâce ce nouvel aménagement peuvent aller jusqu'à 3,7°C, avec une réduction moyenne de 1,35°C, aussi bien le jour que la nuit. La technique d'imagerie thermique satellitaire a en revanche été difficile à utiliser sur ce site car la

superficie du site n'est couverte que par un pixel, c'est-à-dire que la résolution de la technique n'est pas suffisante pour observer en détail les modifications de température. Cependant, un gain global de fraîcheur est tout de même observé, avec une réduction de la chaleur d'environ 26% (Levasseur 2014).

3.2.2 Place fraîcheur à l'école Calixa-Lavallée

Dans l'arrondissement Montréal-Nord, entre l'École secondaire Calixa-Lavallée et l'École hôtelière de Montréal Calixa-Lavallée et proche d'une résidence de personnes âgées, se trouvait un vaste terrain qui avait été identifié comme un îlot de chaleur important dans le secteur. La Commission scolaire de la Pointe-de-l'Île (CSPÎ) a procédé à son réaménagement sur 6 hectares. Cet aménagement vient renforcer l'ensemble de l'arrondissement, qui présente un déficit en parcs et espaces verts de 50% par rapport au reste de l'île de Montréal. 200 arbres indigènes, 500 arbustes et 5000 vivaces et graminées ont donc été plantés, augmentant ainsi la surface végétale, et des revêtements perméables à albédo élevé ont été mis en place (presque la moitié de la surface en asphalte a été changée pour des plantations ou des surfaces claires) (Institut National de Santé Publique Québec 2017d).

Résultats :

L'évaluation du projet a porté sur deux aires : les terrains sportifs de la cour de l'école et le stationnement, au sud de la place. La technique de modélisation à haute résolution a montré que l'aménagement a provoqué une réduction moyenne de température d'environ 1 °C et une réduction maximale de 2,9°C (figure 3.13). D'après les résultats de la technique d'imagerie thermique satellitaire, il semblerait que c'est uniquement la plantation d'arbres sur le stationnement sud-ouest qui a créé un effet de fraîcheur. La construction d'un pavillon d'hôtellerie et d'un stationnement au nord du site a en revanche eu tendance à réchauffer le site. De plus, des modifications au projet initial ont été faites. Ainsi, au lieu d'être construite avec du Bituclair® comme prévu, la piste d'athlétisme a été couverte par un tapis sportif bleu, nécessairement moins réfléchissant (Levasseur 2014).

3.2.3 Verdissement du pôle d'Entraide

Proche de Montréal, la Ville de Brossard a elle aussi élaboré un projet de verdissement et de création d'îlots de fraîcheur dans un secteur habité en majorité par des populations dites vulnérables aux effets des îlots de chaleur urbains (personnes âgées, jeunes enfants, personnes à faible revenu, etc.). Au

sein de ce secteur ont été identifiées quatre zones favorisant particulièrement l'expression de l'îlot de chaleur. La première zone est l'aire résidentielle de la rue Aumont, où la piste cyclable a été réaménagée et où on a planté les abords d'immeubles locatifs à haute densité. La deuxième zone est le parc Aumont, où on a effectué une relocalisation et une mise en valeur du jardin communautaire, aménagé la piste cyclable, un jeu d'eau et un espace paysager. La troisième zone est l'École Tourterelle et Sainte-Claire où on a planté des végétaux et où des aires de repos ombragées ont été aménagées. La dernière zone est une zone commerciale le long du boulevard Taschereau où les aires de stationnement ont été plantées de vignes (Institut National de Santé Publique Québec 2017f; « Brossard - Ville de Brossard- Environnement » 2017).

Résultats :

Ce sont les aménagements du parc Aumont (d'une superficie de presque 8000 m²) qui ont été évalués (voir figure 3.14). Il s'agissait de déplacer le jardin communautaire, d'installer des jeux d'eau, de retracer la piste cyclable et de planter arbres, plates-bandes florales et vignes.

La technique de modélisation à haute résolution montre que ces aménagements ont eu un impact neutre, voire qu'il a provoqué des augmentations de température de 0,19 °C. En effet, le jardin communautaire a été déplacé mais non agrandi, la piste cyclable a été déplacée mais revêtue d'une surface en asphalte rouge et les jeux d'eau ont été aménagés sur une dalle de béton à albédo élevé. Tout ceci a participé à la réduction de la surface végétale initiale. La technique d'imagerie thermique satellitaire a montré qu'il y a un gain thermique général de 42 et 45 %, non biaisé par l'ombrage de bâtiments (Levasseur 2014).

3.2.4 Vague de fraîcheur au Palais Culti-Vert

Au centre-ville de Montréal, le Palais des congrès a pris la décision, avec l'aide du Centre d'écologie urbaine de Montréal, d'aménager son toit avec le projet «Culti-Vert». Cela consiste en la mise en place d'un potager sur une partie du toit mesurant 360 m², afin de montrer les technologies d'agriculture en bacs sur toits, comme Biotop, Alternatives et Smart pots. Un toit vert (tapis végétaux) de 139 m² a également été aménagé, tout comme une partie «plantes grimpantes» de 65m², utilisant les structures en acier déjà présentes. Tout cela afin d'apporter ombre et fraîcheur au toit. Le but du projet était de faire de ce site un exemple de combinaison de techniques visant à réduire



Figure 3.10 : Carte présentant en rouge l'îlot de chaleur de Montréal (« I.G.O. - Données Québec » 2017).

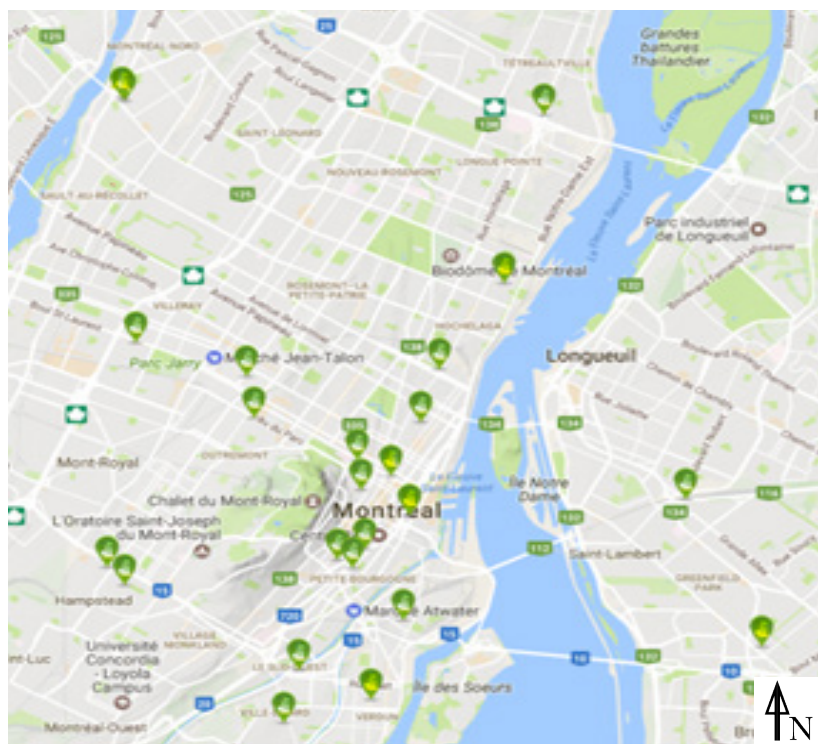


Figure 3.11. : Carte présentant les projets réalisés Les épingles vert et jaune représentent les projets évalués et les épingles vert et blanc représentent les autres projets (Institut National de Santé Publique Québec 2017e)

PROJET	ARRONDISSEMENT / VILLE
Verdun fait sa fraîche	Verdun, Montréal
Place fraîcheur à l'école Calixa-Lavallée	Montréal-Nord, Montréal
Verdissement du pôle d'Entraide	Brossard
Vague de fraîcheur au Palais Culti-Vert	Ville-Marie, Montréal
Îlots de fraîcheur urbains : Les écoles d'abord	Mercier-Hochelaga-Maisonneuve, Montréal
Effet de terre aux Habitations Jeanne-Mance	Ville-Marie, Montréal

Tableau 3.1 : Tableau récapitulatif des projets évalués (Levasseur 2014)



Figure 3.12 : Vue de l'aménagement du parc Philippe-Zotique-Milette (Ville de Montréal - Arrondissement de Verdun 2013b)

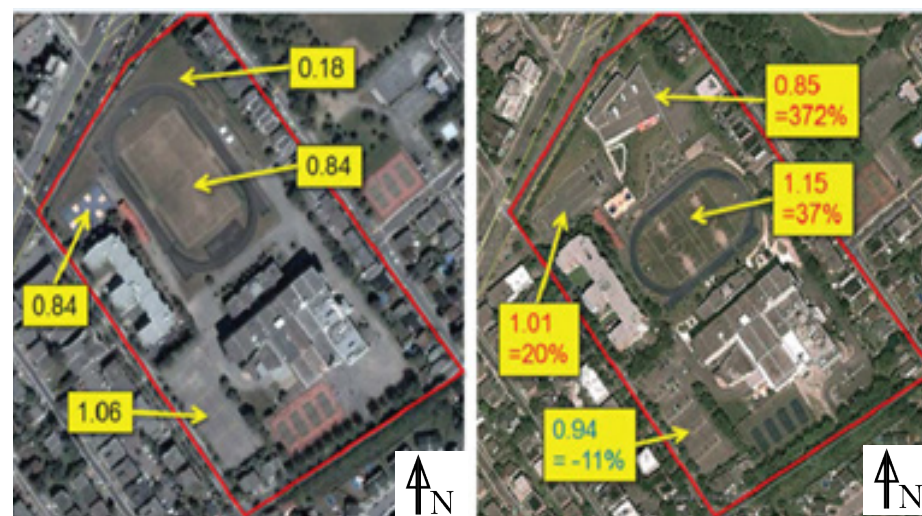


Figure 3.13 : Vues aériennes du site de l'école Calixa-Lavallée en 2008 (à gauche) et en 2013 (à droite) et évaluation de l'évolution de la température d'après la méthode d'imagerie thermique satellitaire (Levasseur 2014)

la température, d'améliorer la qualité de l'air et d'augmenter la rétention des eaux pluviales (Institut National de Santé Publique Québec 2017a).

La figure 3.15 montre l'aménagement du toit à l'été 2011.

Résultats :

L'évaluation a porté sur l'ensemble du projet. La technique de modélisation à haute résolution a montré que les modifications effectuées ne touchaient pas une assez grande surface par rapport à la superficie modélisée. La réduction moyenne de la température n'est donc que de 0,27°C avec un maximum de 0,73 °C. Il n'y a donc pas d'effet fraîcheur clairement établi pour ce site. Selon la technique d'imagerie thermique satellitaire, la partie aménagée du toit a permis de réduire l'effet d'ICU de 13% à cet endroit précis, ce qui est notable (Levasseur 2014).

3.2.5 Îlots de fraîcheur urbains : les écoles d'abord

Ce projet a constitué en l'aménagement des cours de quatre écoles primaires de l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve de Montréal: Saint-Clément, Saint-Bernardin, Notre-Dame de l'Assomption et Rose-des-Vents. Des arbres ont été plantés entre les aires de jeux, les pourtours des cours ont été végétalisés et on a installé des pare-soleil et des récupérateurs d'eau de pluie. Dans l'école Saint-Clément, la technique d'implantation de cellules Silva® (structure souterraine offrant à l'infrastructure de voirie un maximum d'espace utilisable, tout en fournissant un espace libre pour l'enracinement des arbres) a été expérimentée. Elle permet de favoriser le déploiement des racines des arbres et d'optimiser leur croissance (Institut National de Santé Publique Québec 2017c).

Résultats :

L'évaluation a porté sur la cour de l'école Saint-Clément (mesurant environ 3600 m²), située dans un secteur qui présente un bâti dense. Il s'agissait de mesurer l'impact de plusieurs éléments : l'ajout de végétaux, la réduction des surfaces imperméables, l'installation d'un jardin et la mise en place d'éléments créant de l'ombre.

Ce projet n'a pas pu être évalué par la technique de modélisation à haute résolution car l'équipe n'a pas disposé d'une description détaillée des aménagements. Selon la technique d'imagerie thermique satellitaire cependant, il semble y avoir eu un gain thermique de 86% et 113% (pour chacun des deux sites étudiés dans l'école) suite aux aménagements, donc une augmentation de l'effet d'ICU. Pourtant, la surface au sol présente un albédo plus faible

qu'avant l'aménagement, mais il existe un manque d'informations relatives à la surface qui ne permet pas de trouver la raison exacte de l'augmentation de température. Cependant on peut noter que les images satellite ont été prises à des dates sensiblement différentes dans l'année, ce qui peut influencer sur les résultats (Levasseur 2014).

3.2.6 Effet de terre aux Habitations Jeanne-Mance

La Corporation d'Habitation Jeanne-Mance (CHJM) et l'Éco-quartier Saint-Jacques (EQSJ) ont mené le projet de lutte contre l'ICU dans cette copropriété, située au centre-ville de Montréal. Il s'agissait ici de verdir les stationnements de la résidence pour diminuer la température, tout en agissant sur la gestion des eaux pluviales, par la mise en place d'un bassin de biorétention intégré à l'un des stationnements. Cinq stationnements et plusieurs dizaines d'entrées de bâtiments ont été traités par la plantation de 120 arbres, 800 arbustes et 2000 vivaces, tous indigènes et adaptés aux conditions locales. Cela a permis de perméabiliser plus de 750 m², précédemment couverts par de l'asphalte (Institut National de Santé Publique Québec 2017b).

Résultats :

L'évaluation a porté sur cinq stationnements aménagés et sur un sixième qui servait de témoin, puisqu'il n'avait subi aucune transformation.

Ce projet n'a pas pu être évalué grâce à la technique de modélisation à haute résolution car l'équipe n'a pas disposé de descriptions détaillées des aménagements.

La technique d'imagerie thermique satellitaire a montré que les aménagements ont permis de fortes réductions de l'effet d'ICU (figure 3.16), avec un maximum de réduction d'environ 50 %. Tous les espaces plantés d'arbres ont gagné en fraîcheur. Cela peut être accentué par le fait que des toitures blanches réfléchissantes ont été mises en place sur le site, ce qui n'était pas prévu au début (Levasseur 2014).

3.2.7 Commentaire

Sur les six projets, seuls quatre ont pu être évalués par la technique de modélisation à haute résolution, ils ont été comparés dans le tableau 3.2. Les deux autres («Les écoles d'abord» et celui des Habitations Jeanne-Mance) ont été évalués uniquement par imagerie satellitaire.

Ainsi, seuls deux projets sur les quatre évalués par modélisation atteignent le but initial d'apporter un gain de fraîcheur. Il s'agit des projets «Verdun fait



Figure 3.14 Projet d'aménagement du parc Aumont (Levasseur 2014)

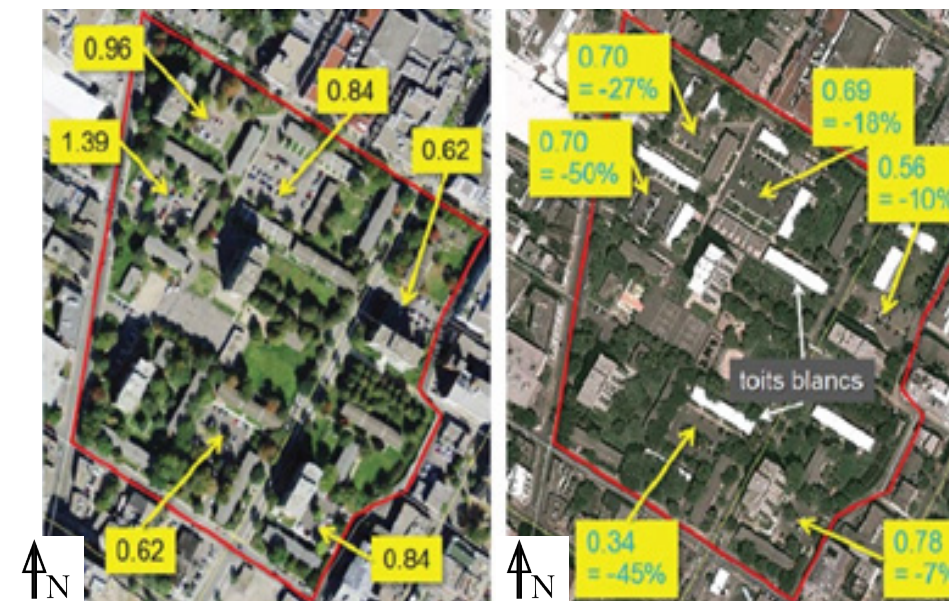


Figure 3.16 : Vue aérienne du site des Habitations Jeanne-Mance en 2008 (à gauche) et en 2013 (à droite) et évaluation de l'évolution de la température d'après la méthode d'imagerie thermique satellitaire (Levasseur 2014)

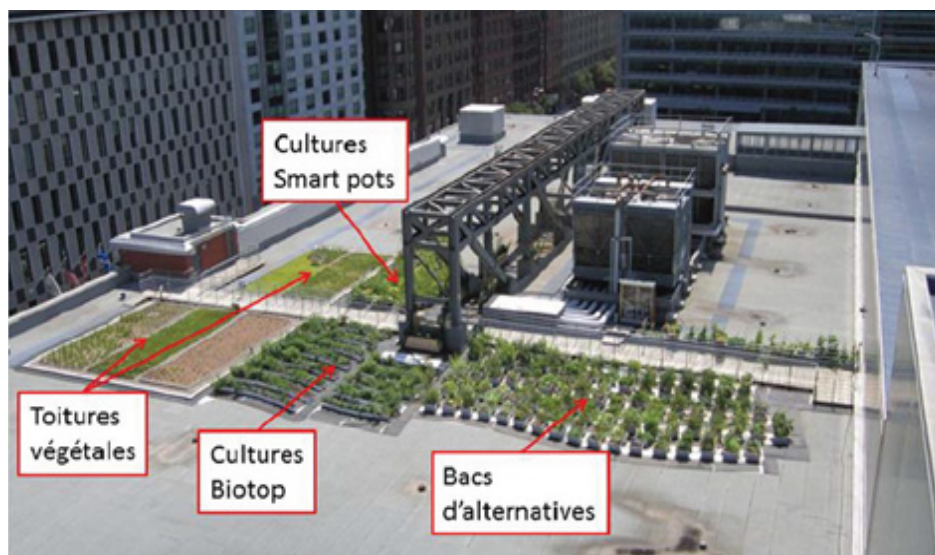


Figure 3.15 : Vue aérienne de l'aménagement du toit du Palais des Congrès à l'été 2011 (Levasseur 2014)

Date de l'événement	Verdun		Palais des congrès		Calixa-Lavallée		Brossard	
	Réduction maximale	Réduction moyenne	Réduction maximale	Réduction moyenne	Réduction maximale	Réduction moyenne	Réduction maximale	Réduction moyenne
14 au 17 juillet 2011	-3,71	-1,24	-0,7	-0,26	-2,73	-0,99	0	0,18
25 au 31 juillet 2011	-3,3	-1,2	-0,62	-0,23	-2,6	-0,96	0,01	0,16
9 au 15 juillet 2012	-3,71	-1,49	-0,73	-0,3	-2,92	-1,19	-0,04	0,2
20 au 27 août 2012	-3,36	-1,47	-0,62	-0,29	-2,52	-1,15	0	0,2
Moyennes	-3,52	-1,35	-0,67	-0,27	-2,69	-1,07	-0,01	0,19

Tableau 3.2: réductions thermiques moyennes et maximales en °C pour les quatre sites évalués et les quatre épisodes d'ICU significatifs par la technique de modélisation à haute résolution (Levasseur 2014)

sa fraîche» et «Calixa-Lavallée», qui atteignent des diminutions moyennes de chaleur notables, respectivement de $-1,2^{\circ}\text{C}$ à $-1,47^{\circ}\text{C}$ et de $-0,96^{\circ}\text{C}$ à $-1,19^{\circ}\text{C}$. Dans le cas du projet de Verdun, la réduction a pu être constatée malgré sa petite superficie, qui se prête mal à l'évaluation. Concernant le projet de l'école Calixa-Lavallée, il y a un gain de fraîcheur global, bien que l'effet d'ICU de surface soit amplifié à certains endroits.

Le Palais des congrès montre des réductions importantes de la température de surface, bien que l'étude ne porte pas sur une zone suffisamment étendue pour avoir un effet global. De plus, sa situation sur un toit ne lui permet pas de participer au rafraîchissement de l'espace public (Levasseur 2014).

Les résultats des aménagements dans les Habitations Jeanne-Mance montrent eux-aussi des réductions importantes de la température de surface.

Il est à noter que tous les projets sauf un ont consisté au moins en partie en une augmentation de la présence de végétaux sur les sites, ce qui apporte de l'ombre et augmente les flux d'évapotranspiration (tableau 3.3). Le projet qui fait exception est le projet du pôle d'Entraide du parc Aumont, pour lequel la surface plantée a finalement été réduite.

Le projet de Verdun, qui permet la meilleure réduction thermique, d'après la modélisation à haute résolution (et qui, d'après la technique d'imagerie satellitaire, permet une réduction globale de la chaleur de 25%), ajoute à cette végétalisation un apport d'eau grâce à des brumisateurs, ainsi qu'un changement de texture des sols (le caoutchouc remplace une grande part du béton). Le projet Calixa-Lavallée, qui permet la deuxième meilleure réduction thermique d'après la modélisation à haute résolution, semble avoir été efficace en termes de réduction thermique uniquement dans l'un des secteurs du site, qui a été planté (figure 3.13).

Pour les Habitations Jeanne-Mance, l'imagerie satellite a permis d'observer une réduction de l'effet d'ICU de 50%. Sur ce site, la végétalisation a été la principale action, couplée avec la perméabilisation du sol (qui permet une meilleure infiltration de l'eau) et l'augmentation de l'albédo des toitures, qui réduit la quantité de rayonnement absorbée et stockée par les bâtiments (Levasseur 2014).

Les sites de Verdun et du Palais des congrès mettent en évidence l'importance de la taille et de la situation du projet par rapport au site d'étude. En effet, pour le projet du Palais des Congrès, des végétaux ont été plantés mais ces modifications ont eu lieu sur une surface trop réduite par rapport à l'en-

semble du toit et n'ont permis une diminution de température que de $0,27^{\circ}\text{C}$ en moyenne sur l'ensemble, même si, d'après les images satellitaires, l'effet d'ICU est réduit de 13% à l'endroit de l'aménagement. Cela montre que la végétalisation des sites n'est pas toujours suffisante et que les résultats dépendent de l'échelle du projet.

Le projet du pôle d'Entraide réalisé au parc Aumont a, quant à lui, entraîné une diminution de la surface plantée et une diminution de l'albédo des surfaces (piste cyclable rouge et dalle de béton pour les jeux d'eau). Ainsi, malgré la mise en présence d'eau, les aménagements ont réduit la capacité de refroidissement par évapotranspiration et par effet d'ombrage et ont augmenté la quantité de rayonnement absorbé par les surfaces sombres : l'impact a été négatif puisque l'effet d'ICU a augmenté sur ce site.

Pour terminer, le projet de l'école Saint-Clément, qui a consisté en un apport de végétaux, d'ombre et une réduction des surfaces imperméables, n'a pas eu l'effet attendu. D'après l'imagerie thermique satellitaire, l'augmentation de la température a été très élevée. Cela pourrait être dû à la diminution de l'albédo de la surface au sol et/ou à d'autres raisons non encore bien identifiées à ce jour. On comprend ainsi que les solutions à l'effet d'ICU, pour être véritablement efficaces, doivent prendre en compte non seulement la végétalisation, mais également tout un panel d'autres facteurs, parmi lesquels la texture et la couleur du sol, la présence d'eau, etc (Levasseur 2014).

3.3 Conclusion partielle

Les modes d'action divergent entre Lyon et Montréal. Dans le cadre de la modernisation et de l'aménagement urbain de la ville de Lyon, un projet a porté sur le quartier de «la Part Dieu». Il a eu pour objectif d'établir une continuité entre les différents espaces, en créant par exemple une trame verte irriguant l'ensemble du quartier. C'est dans ce cadre que sont menés les essais de refroidissement de chaussée par arrosage dans la rue de la Buire, afin de déterminer l'intérêt de la technique et pouvoir décider de son installation ou non dans d'autres rues. La solution de végétalisation de la rue Garibaldi a été quant à elle mise en œuvre d'emblée sur les 2,6 km de la rue.

À Montréal en revanche, l'initiative des projets émane des acteurs locaux (groupes d'habitants, responsables d'écoles, représentants d'arrondissements,...), sur incitation du gouvernement qui met à leur disposition des

	Lyon	Montréal
Initiative	Ville, métropole	Gouvernement puis citoyens
Echelle	quartier	ville
Type d'espaces	Espace public	Principalement espace privé
Superficies	De 780 m ² à 15,6 ha	De 360 m ² à 6 ha
Lieux d'intervention	Rues (place)	Ecoles, parcs, toit, stationnements, logements
Action sur les facteurs de l'ICU	Perméabilisation des sols	Un projet sur deux
	Ajout de végétal	Cinq projets sur six
	Ajout d'eau	Deux projets sur six
	Augmentation de l'albédo des surfaces	Ensemble des projets
	Augmentation de la rugosité	Cinq projets sur six
Diminution maximale de la température de l'air	1 à 2°C	3,52°C
Diminution minimale de la température de l'air	0,5°C	Augmentation de 0,19°C
Techniques d'évaluation	capteurs	Modélisation et images satellites

Tableau 3.3: Tableau comparatif des actions menées à Lyon et à Montréal pour la lutte contre les îlots de chaleur (source personnelle)

	Apport d'eau		Végétalisation et perméabilisation		Végétalisation, perméabilisation et apport d'eau	
	Température ressentie	Température de la chaussée	Température de l'air	Gain ou réduction thermique de l'ICU	Température de l'air	Gain ou réduction thermique de l'ICU
Rue de la Buire	-0,5°C	-3°C à -5°C				
Rue Garibaldi					-1°C à -2°C	
Verdun fait sa fraîche					-3,52°C	Réduction de l'ICU de 25%
Place fraîcheur à l'école Calixa-Lavallée			-2,69°C	Gains thermiques pour deux zones de 20% et 37% Réduction de l'ICU de 11% pour une autre zone		
Verdissement du pôle d'Entraide					-0,01 °C	Gain thermique de 42% et 45 %
Vague de fraîcheur au Palais Culti-Vert			-0,67 °C	Réduction de l'ICU de 13%		
Ilots de fraîcheur urbains : les écoles d'abord			Données non disponibles	Gains thermiques de 86% et 113%		
Effet de terre aux Habitations Jeanne-Mance			Données non disponibles	Réduction de l'ICU de 50%		

Tableau 3.4: Tableau de comparaison de l'effet des différents types d'intervention sur la température de l'air et sur l'intensité de l'ICU (source personnelle).

TEMPÉRATURE RESENTIE PAR REFROIDISSEMENT ÉOLIEN				
VENT MOYEN	TEMPÉRATURE			
	5°C	0°C	-5°C	-10°C
10 km/h	3°C	-3°C	-9°C	-15°C
20 km/h	1°C	-5°C	-12°C	-18°C
30 km/h	0°C	-6°C	-13°C	-20°C
40 km/h	-1°C	-7°C	-14°C	-21°C
50 km/h	-2°C	-8°C	-15°C	-22°C

Tableau 3.5 : Tableau des températures ressenties en fonction des températures réelles et des vitesses de vent (MeteoConsult 2017)

subventions pour des actions de lutte contre les îlots de chaleur urbains. Les projets sont donc nombreux, diversifiés, ne sont pas nécessairement harmonisés mais se répartissent sur l'ensemble de la ville, principalement là où l'îlot de chaleur se manifeste le plus.

En ce qui concerne les surfaces des projets, on peut d'ailleurs voir que les projets de la ville de Lyon ont globalement de plus grandes étendues que ceux de Montréal.

Les modes d'intervention varient eux aussi. Les projets étudiés proposent trois types de modification : soit l'apport d'eau uniquement (rue de la Buire, Lyon), soit la plantation de végétaux et la perméabilisation des sols (école Calixa-Lavallée, projet «Culti-Vert» sur le toit du Palais des Congrès, école Saint-Clément, Habitations Jeanne-Mance à Montréal), soit la végétalisation et perméabilisation couplées à la présence d'eau en surface ou souterraine (rue Garibaldi à Lyon, «Verdun fait sa fraîche» et pôle d'Entraide à Montréal). Bien entendu, les détails de ces interventions varient aussi selon les projets.

D'après le tableau 3.4, les projets qui mêlent végétalisation et présence d'eau sont parmi les plus efficaces en termes de diminution de la température de l'air (jusqu'à -2°C ou $-3,52^{\circ}\text{C}$) et de l'ICU, à l'exception du parc Aumont, pour les raisons mentionnées précédemment. L'apport d'eau seul permet également une diminution de la température de l'air et du sol, mais dans une moindre mesure (diminution de la température ressentie de $0,5^{\circ}\text{C}$ sur la rue de la Buire). Ces deux types de projet semblent donc répondre aussi bien aux ICU de surface qu'à ceux qui s'expriment entre la surface et la canopée urbaine. Cependant on note que le projet d'apport d'eau ne donne pas d'aussi bons résultats que les deux autres projets de végétalisation et d'apport d'eau combinés. On voit d'ailleurs, grâce au projet du parc Aumont, que l'apport d'eau a une efficacité moins grande que la surface plantée, puisque les jeux d'eau ne suffisent pas à compenser la perte en végétaux. En ce qui concerne les projets de plantation uniquement, les résultats sont mitigés. Pour deux des projets, des gains thermiques ont été observés jusqu'à 113%, intensifiant l'effet d'ICU. Cependant, sur trois des projets des réductions de l'effet d'îlot de chaleur urbain ont été observées jusqu'à 50% et des diminutions de températures de l'air jusqu'à $-2,69^{\circ}\text{C}$, ce qui n'est pas négligeable. Cela montre que la solution de végétalisation seule peut être efficace, à condition de prendre en compte les éléments extérieurs, tels que la construction de bâ-

timents ou la couleur des revêtements choisis (cas de l'école Calixa-Lavallée). Les solutions proposant à la fois la végétalisation, la perméabilisation, l'apport d'eau si nécessaire et l'augmentation de l'albédo seraient donc a priori les solutions les plus efficaces.

Dans le contexte de réchauffement climatique et de nécessité de parcimonie dans l'utilisation des ressources, il est également important de veiller à limiter la consommation d'énergie lors de la conception des solutions, notamment en ce qui concerne les apports en eau. En effet le projet de la rue de la Buire consomme beaucoup d'énergie pour alimenter les pompes à eau, alors que celui de la rue Garibaldi permet le stockage sur place de l'eau de pluie et ne consomme pas d'énergie supplémentaire pour l'irrigation des plantes.

D'autre part, le tableau 3.3 montre les disparités dans les méthodes de mesure de l'ICU selon les projets. A Lyon, des capteurs sont utilisés, soit pour mesurer la température ressentie et la température de la chaussée, soit pour mesurer la croissance des arbres, associée à une estimation de la diminution de la température de l'air à proximité de l'aménagement. A Montréal, on utilise la technique de modélisation à haute résolution et la technique d'imagerie thermique satellitaire. Cette variabilité dans les techniques de mesures rend les comparaisons difficiles et complexifie l'évaluation des types d'intervention les uns par rapport aux autres.

De ce fait, on a comparé température ressentie avec température de l'air car, n'ayant pas les données nécessaires (humidité, vitesse du vent, etc), il était impossible de faire la conversion. Cependant, malgré le fait que ces deux types de valeurs soient difficilement comparables, on peut voir, sur le tableau 3.5, qu'une différence de température réelle de 5°C entraîne une différence de température ressentie de 6 à 7°C , quelle que soit la vitesse du vent et la température réelle. Ainsi, une différence de température ressentie de $0,5^{\circ}\text{C}$ (comme dans la rue de la Buire) signifie que la différence de température réelle est moindre. La comparaison ne fausse donc pas le raisonnement, puisqu'on ne sous-estime pas l'impact de l'aménagement.

Il est également difficile de comparer les réductions ou augmentations de l'effet d'ICU de surface mesurées en pourcentages à une réduction de température de chaussée mesurée en degrés. De même, il est impossible de comparer des données concernant l'effet d'ICU de surface (pourcentages ou température de la chaussée) avec des données concernant l'ICU de la canopée

urbaine (température ressentie ou température de l'air) sans informations sur la forme urbaine, l'albédo, etc.

Par ailleurs, ces exemples permettent de mettre en évidence la question d'échelle de projet. Les différences d'effets dues à l'échelle ne sont pas mises en évidence par les études de performance sur les projets présentés. Cependant pour le projet «CultiVert», il est mentionné que la surface de 360 m² n'est pas suffisante pour observer significativement une diminution de l'ICU sur l'ensemble du toit. De plus sa localisation très en hauteur ne permet pas de faire profiter la chaussée des bénéfices des plantations. On se situe ici plutôt à la limite entre la canopée urbaine et l'atmosphère urbaine. Le projet agirait donc plutôt sur le dôme urbain que sur les ICU de surface et sous la canopée.

De même, le projet de Verdun, sur une superficie de 467 m² environ, profite très localement aux habitations voisines et aux usagers de l'espace, alors que le projet de la rue Garibaldi sur 15,6 ha environ permet une réduction de la température sur une rue de 2,6 km de long, améliorant la qualité de vie d'un plus grand nombre de personnes.

Concernant la ville de Paris, il existe des solutions qui limitent quelque peu l'effet d'ICU. Cependant, comme ces actions n'ont pas été pensées dans ce but précis, elles ne comportent pas d'évaluation ni de suivi (en terme, notamment, de température), qui permettraient de proposer des améliorations. Il serait donc nécessaire de proposer des projets en toute conscience de la problématique d'ICU et d'évaluer leurs impacts. Pour cela, on peut s'inspirer des études analysées dans cette partie, en choisissant les méthodes d'analyse les plus adaptées au site concerné et en proposant des aménagements correspondant aux enjeux que présente chaque lieu.

Pour Paris, par exemple, les sites d'intervention peuvent avoir une superficie relativement faible. Dans une optique de politique d'aménagement de la ville, il serait donc judicieux de proposer de nombreux projets, afin de diminuer significativement la température de la ville. D'autre part, l'espace disponible étant globalement restreint, la solution d'arrosage des chaussées pourrait sembler pertinente pour les rues étroites, qui ne peuvent pas accueillir de végétaux. Pourtant, en termes d'efficacité, la solution à préférer serait la végétalisation accompagnée de la perméabilisation du sol, de l'irrigation des plantes et de l'augmentation de l'albédo des revêtements. Ces quatre éléments de solution seraient à moduler en fonction de l'espace, de ses carac-

téristiques et de son identité.

4.1 Diagnostic

4.1.1 Localisation du site

Le site se trouve au nord du 18^{ème} arrondissement de Paris comme présenté dans les figure 4.1 à 4.4. Situé près du boulevard des Maréchaux qui ceinture la ville de l'intérieur, et au nord de la Butte Montmartre, il appartient au quartier des Grandes Carrières.

Une partie du site a été analysée dans la partie 2, lors de la description de la carte thermique.

4.1.2 Analyse de la situation globale du site

4.1.2.1 Aspects physiques

Tout d'abord, la carte géologique de la figure 4.5 montre que le site est situé sur une zone de versant constituée d'éboulis et de colluvions. En effet, le site est situé à 52m d'altitude au bas de la pente formée par la butte Montmartre (qui atteint 125m d'altitude), comme le montre la figure 4.7, à une cinquantaine de mètres d'altitude. Or la butte Montmartre est constituée géologiquement dans sa pente par une strate de ludien moyen. C'est-à-dire une couche gypseuse. Les colluvions se sont déposés en bas de pente sur cette couche de gypse antéludien mais le site repose donc bien sur un sous-sol gypseux, comme le montre la figure 4.6. Or le gypse est un matériau très sensible à la présence d'eau. En présence d'une trop grande quantité d'eau, cette roche a tendance à se dissoudre, ce qui peut créer des cavités. Ces cavités présentent des risques d'affaissement, comme par exemple le fontis sous la Gare du Nord à Paris (Atelier Parisien d'Urbanisme 2015). Toutefois, la nappe phréatique concernée est assez profonde, environ 20m de profondeur, comme le montre la figure 4. 8. Les modifications de la structure du gypse de ce terrain ne sont donc a priori pas dépendantes des mouvements de la nappe. Le danger vient donc généralement des eaux d'infiltration.

Il est donc important de vérifier la capacité du sous-sol à recevoir de l'eau, avant de proposer des solutions impliquant la perméabilisation du sol.

D'autre part, le fait que la couche de ludien soit recouverte d'une couche de colluvions peut permettre à cette infiltration de se mettre en place sans risques majeurs, d'autant plus que les volumes d'eau concernés par l'infiltration sont bien plus faibles que ceux qui peuvent se déverser dans le sol lors d'une fuite dans les canalisations. Ce sont d'ailleurs plutôt ces types d'événements

qui causent les effondrements. Malgré cela, il serait nécessaire d'analyser plus en détails le sous-sol du site et ses capacités de réception en eau. Il est donc important de vérifier la capacité du sous-sol à recevoir de l'eau, avant de proposer des solutions impliquant la perméabilisation du sol.

4.1.2.2 Aspects patrimoniaux

Concernant le patrimoine naturel visible sur la figure 4.9, le site se trouve au bord de la ceinture verte et de la petite ceinture (corridor écologique régional), entre les réservoirs de biodiversité du cimetière parisien de Saint-Ouen, du cimetière de Montmartre au sud-ouest et des parcs de la Butte Chaumont et de la Villette à l'est. De plus petits réservoirs de biodiversité se trouvent un peu plus près du site comme le square Léon Serpollet (qui est une zone humide) au sud et le square des Epinettes à l'ouest. Le site est d'ailleurs entouré de corridors écologiques à renforcer et se situe à une centaine de mètres du square Sainte Hélène à l'est qui constitue un élément de continuité écologique. Ce site serait donc un endroit intéressant dans le renforcement de la biodiversité dans la ville de Paris. En effet, c'est un site qui peut venir accompagner le développement de la ceinture verte à une échelle locale et participer au renforcement des corridors écologiques.

Sur la figure 4.10, on peut voir que le site est situé sur une zone où se rencontrent un bâti ancien érigé entre 1851 et 1890 et un bâti plus récent (dont une grande part bâtie entre 1915 et 1939 et une plus petite part construite de 1940 à 1989). Le bâti ancien se trouve vers le centre de la ville alors que le bâti plus récent se trouve vers l'extérieur, illustrant ainsi l'extension de la ville du centre vers la périphérie.

Le site lui-même est composé de bâtiments principalement construits entre les années 1915 et 1939, à l'exception d'un ensemble construit avant 1920. Au nord, au dessus du boulevard des Maréchaux, se trouve un ensemble d'Habitations à Bon Marché (HBM) construit entre 1915 et 1939 alors qu'au sud du site, les bâtiments des années 1815 à 1989 sont insérés dans la trame du bâti plus ancien des années 1851 à 1890.

Ce lieu a donc un intérêt patrimonial architectural tout particulier puisqu'il se trouve à la rencontre entre deux types d'urbanisme : l'urbanisme comportant des bâtiments serrés, présentant des cours fermées et des rues relativement étroites d'avant les travaux haussmanniens et l'urbanisme postérieur,



Figure 4.1 : Localisation du site à l'échelle de la France (Google Earth. 2017)

Figure 4.2 : Localisation du site à l'échelle de l'Ile de France (Google Earth. 2017)



Figure 4.3 : Localisation du site à l'échelle de la ville de Paris (Google Earth. 2017)



Figure 4.4: Localisation du site à l'échelle du 18ème arrondissement de Paris (Google Earth. 2017)



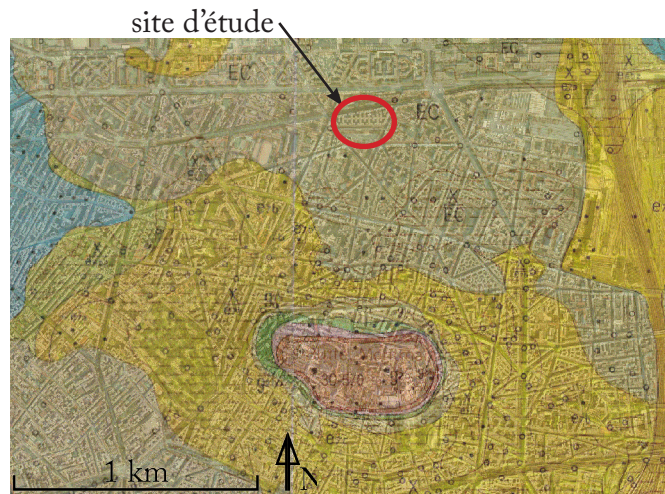
limite du 18ème arrondissement



Légende

- courbes principales
- courbes secondaires

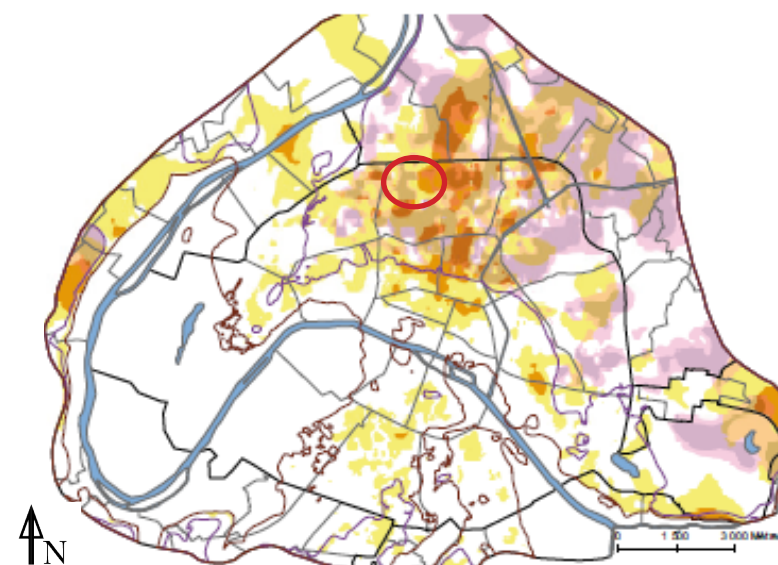
 site d'étude



Légende

- X Remblais anthropiques sur substrat déterminé (surélévation ou comblement de carrières)
- X remblais sur alluvions
- EC Formations de versant, éboulis et colluvions
- ECF formations de versant et alluvions sur substrat déterminé
- g_{2a} Stampien inférieur : Marnes à Huîtres (3 mètres à Montmartre)
- g_{2b} Sannoisien inférieur : Argile verte (6 à 8 mètres à Montmartre)
- g_{2c} Ludien supérieur : Marnes supragypseuses (11 à 16 mètres à Montmartre)
- G Ludien moyen : Masses et marnes du Gypse (ou Calcaire de Champigny)
- G₁ 1^{ère} Masse du Gypse (14 à 19 mètres à Montmartre)
- MFL Marnes à fers de lance (4 à 7 mètres à Montmartre)
- G₂ 2^{ème} Masse du Gypse (4 à 6 mètres à Montmartre)
- ML Marnes à Lucines (2 à 5 mètres à Montmartre)
- G₃ 3^{ème} Masse du Gypse (2 à 3 mètres à Montmartre)

Figure 4.5: Carte géologique du Nord de Paris (APUR et al. 2017)



Légende

- site d'étude
- Calcaire de Saint-Ouen
- épaisseur de gypse d'env. 0,5 m
- épaisseur de gypse pouvant être sup. à 6 m
- Marnes et Caillasses
- épaisseur de gypse comprise entre 0,5 m et 4 m
- épaisseur de gypse comprise entre 4 m et 15 m
- Limite des Marnes et Caillasses
- Limite du Calcaire de Saint-Ouen

Figure 4.6: Carte de l'épaisseur des bancs gypseux dans les Marnes et Caillasses et dans le Calcaire de Saint-Ouen associé aux zones de dissolution du gypse antéludien (Lamé dans Atelier Parisien d'Urbanisme 2015)

Figure 4.7 : Carte du relief du Nord de Paris (APUR et al. 2017)

plus espacé, illustré par les HBM, les grandes avenues et les bâtiments de grandes dimensions.

4.1.2.3 Aspects socio-économiques

Le 18ème arrondissement de Paris présente les aspects suivants. Tout d'abord, c'est l'arrondissement le plus peuplé après le 15ème arrondissement. La population est pourtant relativement stable puisqu'elle a augmenté de moins de 10% entre 2006 et 2011 (Moreau et Bouvier 2017).

Le 18ème arrondissement est un quartier dynamique qui connaît depuis quelques années un phénomène de gentrification, ce qui transforme profondément les profils économiques et sociaux des quartiers. D'ailleurs, on remarque que la population immigrée dans l'ensemble de l'arrondissement en 2011 y était de moins de 10% et que la population de plus de 60 ans est la plus représentée.

Malgré cela, l'arrondissement figurait en 2011 parmi les plus pauvres de Paris bien que pas plus de 12% des ménages ne bénéficiaient du RSA. Des zones identifiées comme quartiers prioritaires se situent d'ailleurs à proximité du site

Les bâtiments dans cet arrondissement hébergent principalement de l'habitat.

Dans le quartier des Grandes Carrières, la densité est de 750 à 1000 habitants à l'hectare (on compte également les personnes travaillant sur place).

Les centralités à l'échelle du quartier sont le boulevard Ornano, la rue Orde-ner et la rue du Poteau.

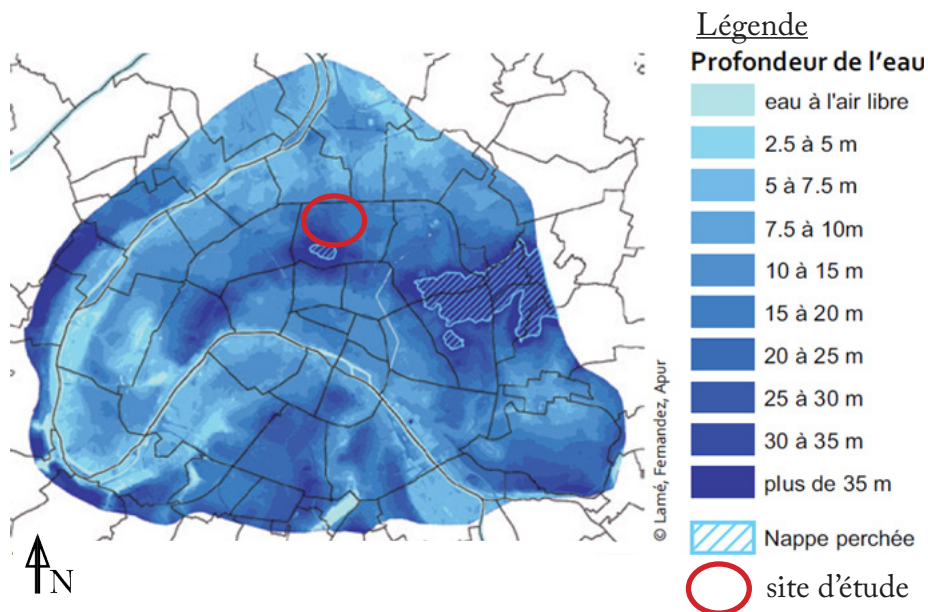


Figure 4.8: Carte des nappes phréatiques de Paris (Lamé dans Atelier Parisien d'Urbanisme 2015)



Figure 4.9: Carte de la végétation biodiversité de Paris (Hanappe 2017b)

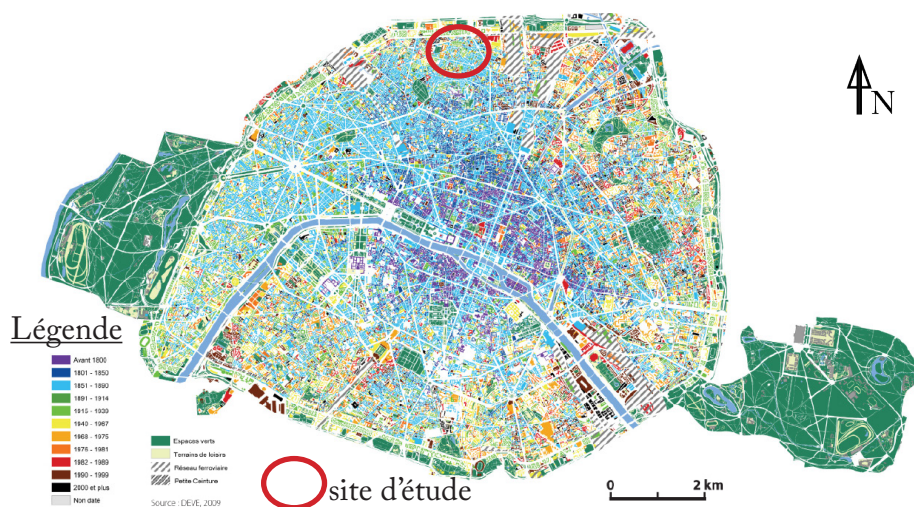


Figure 4.10: Carte des périodes de construction des bâtiments parisiens (Atelier Parisien d'Urbanisme 2009)

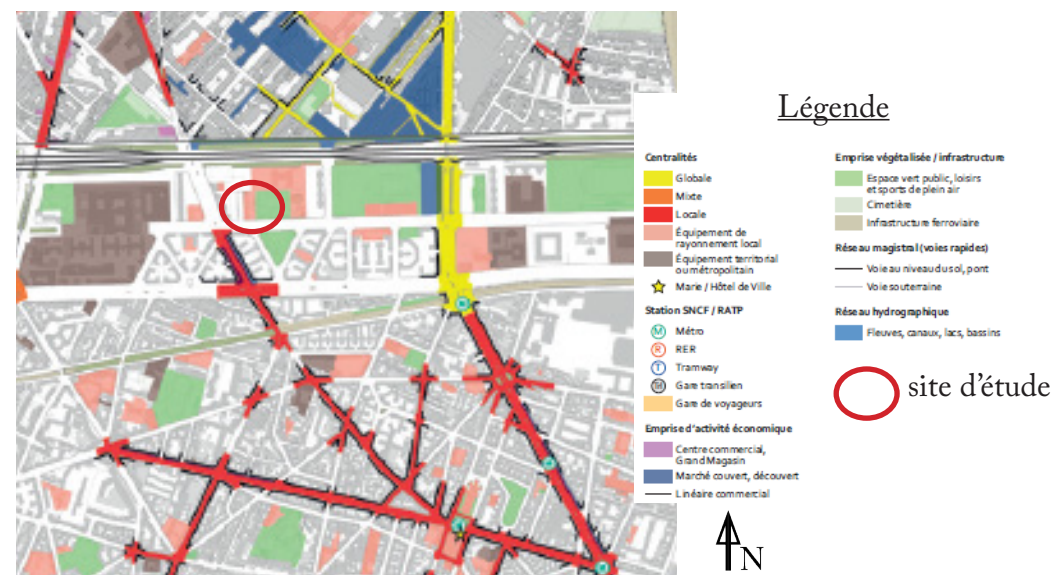


Figure 4.11: Carte des centralités du quartier des Grandes Carrières (Hanappe 2017a)

4.1.3 Analyse du site

4.1.3.1 Justification du choix du site

Le site comprend d'une part l'ensemble de l'îlot nord, principalement occupé par la résidence Damrémont (construite en 1930) mais dont la partie nord-est est constituée de bâtiments plus anciens, prototypes de HBM construits avant 1920 (Atelier Parisien d'Urbanisme 2017). D'autre part, le site comprend également l'école Gustave Rouanet au sud, dont le bâtiment date des années 1935. Sont comprises également les rues Rouanet, du Ruisseau, du Poteau et Belliard à proximité du site.

Ce site a été choisi en premier lieu parce qu'il présente une expression particulièrement intense de l'effet d'ICU, comme on peut le voir sur la figure 4.12. D'autre part, c'est un site très dense qui présente, pour la résidence Damrémont, une forme particulière avec des cours presque identiques exposées différemment, ce qui donne des possibilités en termes d'expérimentation pour l'adaptation climatique.

Cette forme du bâti est également intéressante car elle présente des points communs avec par exemple les Habitations Bon Marché (HBM) qui bordent la ceinture de Paris (figure 4.13 et 4.14). Ces bâtiments sont certes de dimensions beaucoup plus importantes mais la forme des cours est parfois ressemblante et des analogies pourraient peut-être être établie. De même, les bâtiments plus anciens comme celui de la cité Condorcet (construite principalement entre 1850 et 1900) présentée sur la figure 4.15 peuvent présenter des cours de formes semblables à celles de la résidence Damrémont, bien que l'ensemble soit d'une taille plus réduite. Il serait donc intéressant de voir comment les considérations et conclusions développées ici pourraient ou non s'adapter à ces autres types de constructions.

L'équipement public de l'école Gustave Rouanet est également un exemple intéressant dans le cadre de la lutte contre l'îlot de chaleur urbain puisqu'il s'agit d'un espace présentant un fort ICIU qui accueille des enfants à des âges où l'organisme est particulièrement sensible à la chaleur. Il est donc important de voir comment réduire l'effet d'ICU dans ce type d'espaces et pour ce type de public.

Ainsi, le site comporte à la fois des espaces privés, des espaces publics et des équipements publics, ce qui le rend très riche en matière de diversité des usages et des contraintes. Il est particulièrement intéressant de voir comment une solution paysagère peut être apportée en mettant en relation ces diffé-

rents types d'espaces.

4.1.3.2 Aspects patrimoniaux

La partie nord de l'îlot de la résidence est occupée par une construction datant d'avant 1920, un «prototype de HBM», du tout début de l'époque des logements sociaux. En 1930, la résidence Damrémont est construite dans la continuité du bâti existant, également dans une optique de logement social. L'architecture présente un style art déco (figure 4.18) que l'on reconnaît dans l'attention à éviter les angles droits (figure 4.16), et la décoration des ferronneries (figure 4.17). Les habitations se développent autour de cours, qui permettent d'assainir l'air. Aujourd'hui, c'est une copropriété qui présente une forte densité bâtie d'environ 1200 logements pour une surface au sol du bâti d'environ 0,5 ha (hors cours).

Au sud du site, se trouve l'école Gustave Rouanet, construite en 1934-1935, dans le style sobre mais imposant, typique des établissements scolaires sous la III^{ème} République. Son architecte, Emile Bois, a choisi des façades en brique rouge avec des parements également en brique mais disposées en forme de losange. Le bâtiment présente aussi une demi rotonde à l'entrée (Beaumont, 2017) (figure 4.19). Cette architecture est protégée par la Ville de Paris.

Concernant le patrimoine végétal, l'espace vert (non accessible) le plus proche du site est la petite ceinture qui le borde au nord. C'est une ancienne voie ferrée qui passe tout autour de Paris dans les années 1800. Aujourd'hui elle n'est plus utilisée mais elle présente une réserve intéressante de biodiversité et un patrimoine historique important.

La cour de l'école G. Rouanet est aussi plantée de nombreux arbres.

4.1.3.3 Aspects socio-économiques

Sur le site, la population de l'îlot est constituée principalement par des personnes âgées avec une proportion de 1 à 2 seniors pour un jeune (Hanappe 2017a) C'est un quartier dynamique qui n'est pas encore atteint par le phénomène de gentrification. D'ailleurs, on remarque que la population immigrée en 2011 du site se situait entre 30% et 40% (Hanappe 2017b).

C'est un site à dominante d'habitat qui pour le reste suit les tendances de l'arrondissement.

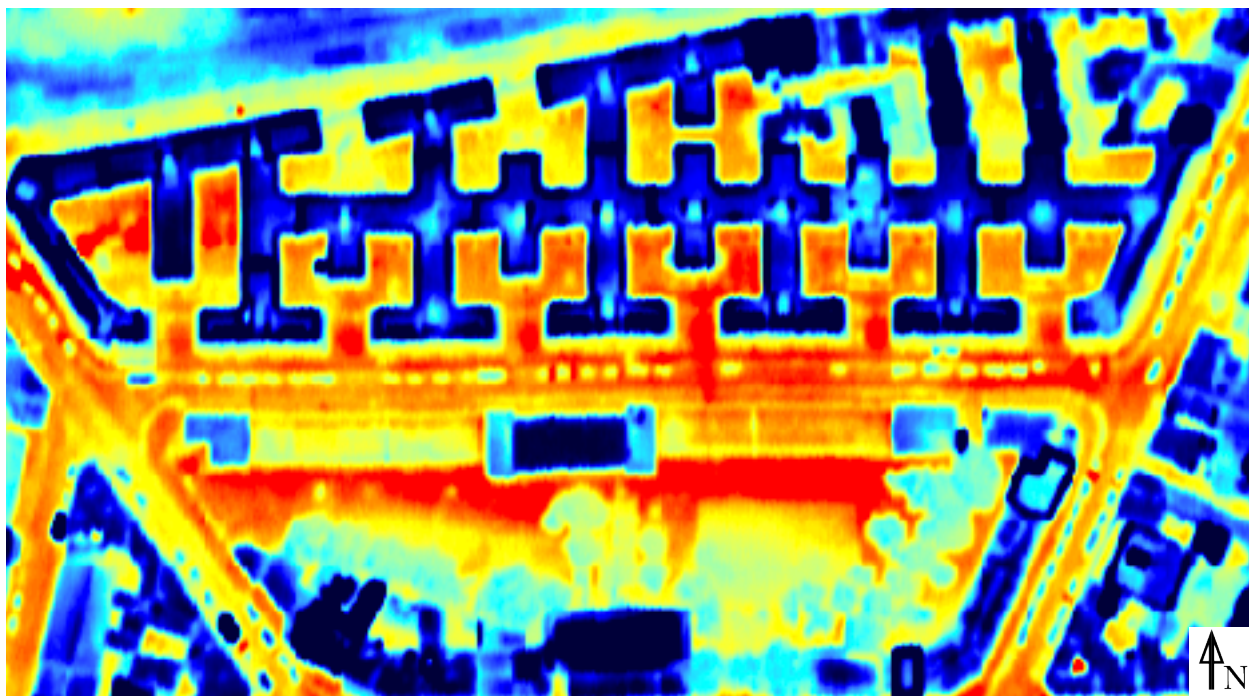


Figure 4.12 : Mise en évidence de la présence d'un ICIU sur le site. Echelle 1:2000 (APUR. non publié)



Figure 4.13 : Vue de la morphologie d'un HBM square Marcel Sambat, 18ème arrondissement de Paris. 48°53'55.13"N; 2°20'17.98"E. Echelle 1:2000. (APUR et al. 2017)



Figure 4.14: Vue de la morphologie d'un HBM boulevard Mortier, 20ème arrondissement de Paris. 48°52'07.00"N; 2°24'35.82"E. Echelle 1:2000. (APUR et al. 2017)

4.1.4 Analyse des facteurs responsables de l'ICIU sur le site

4.1.4.1 Perméabilité des sols

A l'exception de l'espace constituant la petite ceinture, ancienne voie de chemin de fer en contrebas du niveau du sol actuel (figure 4.21), réinvestie aujourd'hui par des jardins partagés et des terrasses vertes, l'ensemble du site présente des sols imperméables (figure 4.22). Cette imperméabilité ne permet donc pas à l'eau de pluie d'infiltrer les sols et de les rafraîchir. En revanche, elle accroît le risque potentiel d'inondations puisque le site se situe en bas de la pente qui mène à la butte Montmartre.

4.1.4.2 Présence d'eau

Il n'y a aucun plan d'eau sur le site, ni à proximité. Cette absence d'eau a pour effet d'augmenter l'effet d'ICIU sur le site, bien que la végétation de la petite ceinture capte certainement l'eau de pluie et participe à sa rétention.

4.1.4.3 Présence de végétation

Les végétaux se situent principalement sur l'espace de la petite ceinture. On retrouve des espèces telles que l'armoise, l'églaïer, le genêt, le pêcher et le merisier. L'ensemble fournit un ombrage important sur les côtés de l'espace (anciens quais) mais le centre ne présente pas de plantations. En dehors de la petite ceinture, on retrouve des arbres dans la cour de l'école Gustave Rouanet, à l'est et au sud. Dans les rues, les plantations sont absentes (figure 4.23) sauf sur le côté de la rue Belliard qui longe la petite ceinture et qui est accompagné de ses végétaux (figure 2.24) et dans la rue du Ruisseau où on trouve un arbre planté devant l'église Sainte Hélène.

L'emplacement et la faible présence des plantations tend donc à intensifier l'effet d'ICIU que l'on observe. En effet, les plantations existantes dans la cour ne sont pas placées au nord là où les bâtiments sont le plus exposés au soleil mais au sud où les bâtiments donnent déjà de l'ombre.

4.1.4.4 Matériaux

L'espace public sur le site est principalement constitué de revêtement bitumeux noir pour la chaussée, de bordures gris clair et de trottoirs en asphalte gris foncé (figures 4.22, 4.23 et 4.24). L'espace de la petite ceinture en revanche présente des graviers de couleur claire (figure 4.21). La cour de l'école G. Rouanet est également revêtue d'asphalte bien que certaines parties soient

plus claires que d'autres (figure 4.27). Ces couleurs sombres tendent à capter la chaleur et à la stocker en journée (d'autant plus que toutes les rues doivent présenter une sous-couche importante qui conserve d'autant plus la chaleur) pour la relâcher le soir. Les cours de la résidence, sont revêtues de bitume et présentent des trottoirs en pavé autobloquant rouge clair, qui rappelle le rouge du bâtiment et la brique qui le constitue à l'intérieur (figure 4.25). Ces cours sont donc principalement de couleurs très foncées qui absorbent les rayonnements et la chaleur.

En ce qui concerne les matériaux des bâtiments, l'école est en brique rouge (à gauche sur la figure 4.23), alors que la résidence est majoritairement peinte d'une couleur claire avec des aplats rouges (à droite sur la figure 4.23 et figure 4.25). Ces couleurs du bâti sont donc plutôt un avantage car relativement claires. Les parois des bâtiments auront donc tendance à réfléchir les rayonnements. Il est certain qu'une analyse plus poussée devrait prendre en compte la structure même des bâtiments avec leurs aérations internes et leurs modes de fonctionnement au regard de la chaleur, mais il s'agit là de considérations architecturales qui ne peuvent être abordées ici.

Notons également que le toit de la résidence présente une surface sombre mais recouverte d'un gravier clair (figure 4.26) qui permet de lui donner un aspect relativement clair, donc peu capteur du rayonnement.

4.1.4.5 Forme urbaine

Ici nous développerons la forme urbaine du site depuis le nord vers le sud. Tout d'abord, on remarque que la ceinture verte est encaissée par rapport au niveau du sol, ce qui la rend potentiellement plus fraîche qu'un espace vert classique, étant donné que l'air froid va avoir tendance à rester au fond de l'encaissement alors que l'air chaud lui va s'élever au-dessus de l'encaissement. Cette ceinture verte aura donc tendance à apporter une fraîcheur importante aux parties du site qui la jouxtent.

La rue Belliard, entre la petite ceinture et la résidence Damrémont, n'est pas très large (environ 12m) et est orientée est-ouest (Besse 2017). Les rayonnements arrivent donc principalement sur la petite ceinture qui ne stocke pas la chaleur. Le pied de bâti de la résidence se trouvant exposé au nord dans cette rue, il ne stocke que peu de chaleur en journée.

On peut voir l'influence de la ceinture verte dans les cours ouvertes sur la rue au nord de la résidence, relativement fraîches. Cette fraîcheur peut s'expliquer à la fois par leur orientation au nord, donc protégée des rayonnements



Figure 4.15 : Vue de la morphologie de l'îlot de la Cité Condorcet, 9ème arrondissement de Paris. $48^{\circ}52'46.06''N$; $2^{\circ}20'40.59''E$. Echelle 1:2000. (APUR et al .2017)



Figure 4.19 : Vue sur un élément de décor de la résidence Damrémont (source personnelle)



Figure 4.16 : Vue sur la forme réduisant la présence d'angles droits dans la résidence Damrémont (source personnelle)



Figure 4.17 : Vue sur les ferronneries dans la résidence Damrémont (source personnelle)



Figure 4.18 : Vue sur un élément de décor de la résidence Damrémont (source personnelle)

venant du sud aux heures les plus chaudes et dans une plus grande mesure par la relation directe avec la petite ceinture qui vient rafraîchir ces cours. En revanche, les cours ouvertes sur la rue au sud de la résidence n'ont pas de contact avec la petite ceinture. Elles ne profitent donc pas de cet apport de fraîcheur. En effet, la hauteur du bâtiment (environ 24 m) ne permet pas la propagation de la fraîcheur de ce côté (Besse 2017). De plus, l'exposition au sud augmente la quantité de rayonnement absorbée pendant la journée, en particulier au pied des bâtiments situés au nord de ces cours.

La forme de ces cours ouvertes d'autre part, est très particulière. Il y a à la fois des effets d'ombre et d'exposition au soleil, aussi bien au sud qu'au nord, qui justifient que l'on analyse l'ensoleillement journalier de l'ensemble de l'îlot. Cela permettra aussi d'analyser le comportement des cours fermées au nord de l'îlot.

Pour continuer vers le sud du site, passons à la rue Gustave Rouanet qui présente un ratio d'aspect de 1,75 (environ 12 mètres de large pour 21 m de haut (moyenne entre les deux bâtiments)). Cette rue n'est donc pas un canyon urbain puisque son ratio d'aspect est supérieur à 0,7. Cependant son orientation est-ouest rend les espaces en pied de bâtiment orientés sud plus vulnérables que ceux qui se trouvent en pied de bâtiment exposés au nord qui sont protégés par l'ombre portée du bâti.

Au niveau de la rue G. Rouanet, la disposition est différente de celle que l'on rencontre dans la résidence. Ici, les bâtiments s'articulent autour d'une cour, en pourtour de parcelle. Ils se situent principalement au nord et à l'est, bien que l'on retrouve un bâtiment plus au moins au centre de la parcelle. Cette configuration rend vulnérables la cour, en particulier au nord et en pied du bâti nord.

Cependant, on note l'existence d'une terrasse végétalisée sur le toit du bâtiment est. Cette terrasse est très récente. Elle permettra certainement une diminution de la chaleur localement dans le futur, mais il semble peu probable que son influence atteigne le niveau du sol. Il est à noter également qu'un projet de végétalisation de la terrasse du bâtiment nord est en cours d'élaboration (Centrale des Marchés 2017).

Il est également important de remarquer au regard de la rencontre entre forme urbaine et relief, que les brises thermiques, qui permettent la ventilation, en absence de vent dominant ou de vent de campagne, ne se forment pas au niveau du site (figure 4.28). En effet, le site se trouve en bas de pente et on peut supposer que les courants frais sont arrêtés dans leur descente

par les remblais de la butte Montmatre qui les détournent vers l'est et l'ouest. Les solutions étant des actions sur les facteurs de l'ICU, elles seront présentées par facteur d'abord, puis les enseignements tirés des projets exemples seront analysés pour évaluer leur adaptabilité au site étudié.

4.2.1 Identification des solutions d'après les facteurs

4.2.1.1 Sols imperméables

Etant donné l'importance de la présence de sols imperméables sur le site, il serait intéressant de proposer des solutions comportant des sols perméables, lesquels permettent d'infiltrer l'eau dans le sol, donc de le rafraîchir et sont plus accueillants dans l'hypothèse d'un ajout de végétation.

Cependant, il a été noté que le site se situe sur un sous-sol gypseux, très sensible aux apports d'eau. Il serait donc nécessaire d'étudier le sol en détails avant de mettre en place un projet de perméabilisation du sol pour vérifier la constitution du sous-sol et le risque que l'eau l'atteigne. De plus, la nappe phréatique présente sous ce site est très en profondeur. Il est donc peu probable que l'eau infiltrée y soit stockée. Il est donc d'autant plus nécessaire de vérifier la capacité de rétention en eau de ce sol. Cependant, il est possible de nuancer ce propos par le fait que le gypse est certes sensible aux apports en eau mais en général pas dans les quantités relatives à l'infiltration (au contraire des fuites de canalisations qui peuvent causer des affaissements du sol). Il est donc probable que la perméabilisation des sols sur ce site ne soit pas un facteur de dissolution du sol gypseux.

4.2.1.2 Présence d'eau

A l'exception de la petite ceinture qui peut être considérée comme un capteur d'eau, il n'existe aucun espace qui recueille l'eau sur place ni aucun plan d'eau à l'échelle du site. Or la présence d'eau est l'un des principaux facteurs de diminution de l'effet d'ICU. Il serait donc intéressant de proposer une solution qui permette la récolte et la mise en valeur de l'eau de pluie et de ruissellement (d'autant plus que le site est situé en bas de pente), en particulier en complément de l'installation de végétaux - si cette solution est choisie. En dehors de la solution végétale, des plans d'eau peuvent être aménagés s'ils ne nuisent pas aux usages. Si ces plans d'eau ne sont pas adaptés, il est possible de se tourner vers une solution d'humidification de la chaussée.



Figure 4.20: Vue sur la voie ferrée de la Petite Ceinture. Photo du 21 août 2016 (source personnelle)



Figure 4.21 : détail du sol de la rue G. Rouanet. Photo du 21 août 2017 (source personnelle)



Figure 4.22 : Vue sur la rue G. Rouanet; Photo du 21 août 2017 (source personnelle)



Figure 4.23 : Vue sur la rue Belliard. Photo du 21 août 2016 (source personnelle)



Figure 4.24: Vue sur une cour de la résidence Damrémont. Photo du 21 août 2016 (source personnelle)



Figure 4.25 : Détail de la composition de la surface du toit de la résidence Damrémont. Photo du 11 juillet 2017 (B. Cazenave)

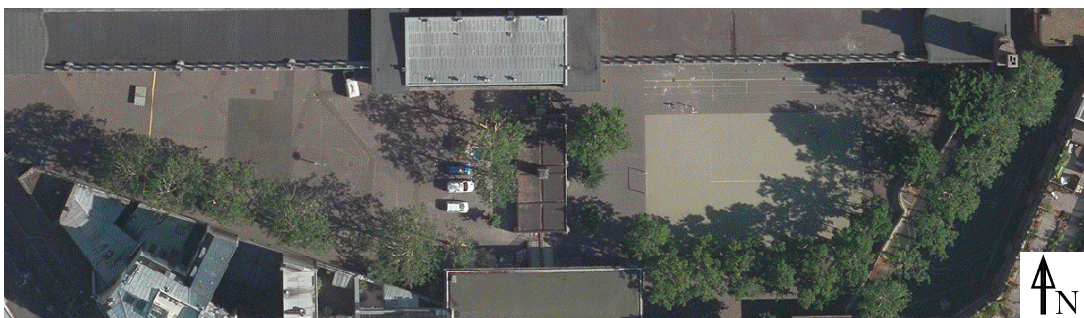


Figure 4.26: Vue sur la cour de l'école Gustave Rouanet (APUR et al. 2017)

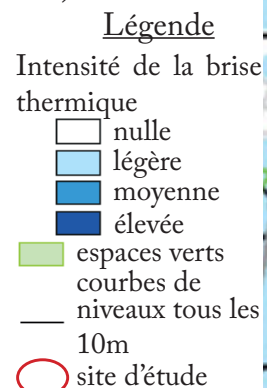


Figure 4.27 : Carte des brises thermiques à proximité du site d'étude (Bigorgne et Bridier 2017)

4.2.1.3 Présence de végétation

Comme cela a été vu plus haut, à l'exception de la ceinture verte, les arbres de la cour de l'école et quelques plantations en bacs dans la résidence, la végétation est absente du site.

Or c'est l'apport de végétation qui permet les meilleurs résultats en terme de diminution de l'effet d'îlot de chaleur. Il serait donc intéressant d'apporter des plantations sur le site, d'autant plus que la ceinture verte est un espace intéressant du point de vue de la biodiversité et de son renforcement et que c'est un espace qui a été retenu dans le Plan Biodiversité de la Ville de Paris pour amplifier la présence de la végétation en ville (Ville de Paris 2017).

4.2.1.4 Matériaux

Concernant les matériaux présents sur le site, il est clair que leurs couleurs très sombres amplifient beaucoup l'effet d'îlot de chaleur. Il s'agirait donc de proposer une solution présentant des matériaux plus clairs, en particulier sur le toit de la résidence, dans la cour de l'école et éventuellement dans les cours de la résidence.

4.2.1.5 Forme urbaine

La forme urbaine sur ce site a une identité très forte avec l'école G. Rouanet qui fait partie du patrimoine historique de Paris (construite par l'architecte Emile Blois sous la III^{ème} République) et la résidence Damrémont qui est la plus grande résidence de logements sociaux (historiquement) de Paris, accolée à un ensemble de bâtiments hérités des débuts des HBM. Le sujet n'est donc pas de modifier cette forme urbaine mais de prendre en compte les orientations qu'elle propose, de prendre parti de la présence de la petite ceinture et de la forme originale des bâtiments pour s'y adapter et proposer une solution qui s'adapte à l'existant et le mette en valeur.

4.2.2 Identification des solutions d'après les exemples

4.2 Identification des solutions applicables au site

4.2.2.1 D'après les exemples de Lyon

Les aménagements observés sur le quartier de la Part-Dieu ont tout deux montré l'importance de la présence d'eau, que ce soit en surface ou en profondeur. Le projet de la rue de la Buire a prouvé une certaine efficacité de la proposition d'humidification de la chaussée. Cette solution est particulièrement intéressante dans des endroits de surface restreinte où il est difficile d'implanter de la végétation ou des zones non favorables au développement des plantes. La présence d'eau de façon plus générale sous forme par exemple d'une lame d'eau peut se révéler utile dans des espaces de rencontre car elle participe à améliorer l'ambiance du lieu.

D'autre part, le projet de la rue Garibaldi a montré l'importance de la présence d'eau en sous-sol dans le cas où des végétaux sont plantés afin qu'ils puissent effectivement participer au rafraîchissement de l'air par évapotranspiration, puisque s'ils n'ont pas d'eau à disposition, ce phénomène ne se produit pas. Dans le cas de la rue Garibaldi, la présence d'eau pour l'irrigation était assurée par la présence d'anciens tunnels aménagés de façon à recevoir l'eau de pluie. Dans le cas de la résidence Damrémont, ces tunnels n'existent pas mais il serait possible en revanche de récupérer l'eau de pluie sur le toit de la résidence. Notons d'ailleurs que ce toit a par ailleurs été identifié comme suffisamment grand pour accueillir une activité de production d'énergie solaire par l'APUR et la Ville de Paris (Atelier Parisien d'Urbanisme et Ville de Paris 2015);

4.2.2.2 D'après les exemples de Montréal

Les exemples analysés dans la région de Montréal ont montré l'importance d'augmenter effectivement la présence de végétal ainsi que la grande efficacité de l'augmentation de l'albédo des matériaux du sol. Il a également été montré que l'apport de présence d'eau et l'apport de végétation simultanément semble être la solution qui apporte les meilleurs résultats en termes de diminution de la température de l'air. Il s'agira donc dans la solution proposée de prendre en compte ces éléments et de s'inspirer des différentes méthodes d'évaluation présentées.

Ces indications de solutions ne sont bien sûr pas à mettre en œuvre toutes en même temps et aux mêmes endroits. Il s'agit au contraire de chercher, selon

les endroits, les combinaisons de solutions les plus adaptées. De plus, il est important de noter que les climats des lieux étudiés dans les exemples sont différents de celui de Paris. L'effet d'ICU est certes présent sur tous les sites mais il s'exprime différemment selon le climat et les latitudes. Il est donc nécessaire de s'assurer que les solutions choisies sont adaptées au climat parisien avant de les mettre en œuvre.

4.3 Proposition du projet

4.3.1 Schéma directeur

Le projet, présenté dans la figure 4.29, part de la végétation de la petite ceinture et doit permettre de diffuser sa présence au sein de la trame urbaine. Cela se diffuse dans les rues Belliard au nord, du Poteau à l'ouest et du Ruisseau à l'est. Les deux cours exposées nord dans la résidence Damrémont sont donc particulièrement impactées par cette diffusion, tout comme la rue Belliard. Cette extension du végétal répond par ailleurs aux exigences du Plan Local d'Urbanisme de la Ville de Paris, qui prône la mise en valeur du végétal.

Au sud de la résidence, la rue G.ustave Rouanet présente un intérêt particulier. D'abord elle est marquée par une forte expression de l'ICU (figure 4.28) qu'il convient d'atténuer. Ensuite, elle est constituée de pavés calpinés en queue de paon qui sont malheureusement à moitié recouverts par une couche de bitume. Il sera donc intéressant de découvrir ces pavés et de les remettre en valeur. Ce type de revêtement, bien que foncé, peut participer à l'atténuation de l'ICU si on met en place des joints non poreux qui permettent l'infiltration de l'eau.

Pour continuer sur la résidence Damrémont, les deux places, en jaune, aux extrémités est et ouest ont été identifiées comme pouvant devenir des lieux de rencontre pour les habitants, qu'il conviendrait donc d'aménager comme tels.

Les cours fermées, en violet, à l'intersection entre le bâti d'avant 1920 et celui de 1930 pourraient devenir des espaces de rencontre entre les habitants des différentes copropriétés et participer au renforcement du lien social intra-îlot. Il convient aussi de les aménager de façon à diminuer l'effet de l'ICU qui y est important (figure 4.28).

Ces aménagements, aussi bien des cours que de l'espace public, permettront de mettre en valeur le bâti de la partie nord-est de l'îlot (en orange sur la figure 4.29) qui présente une valeur patrimoniale importante.

D'autre part il a été remarqué que les cours colorées en rouge et numérotées ont presque toutes exactement les mêmes formes et dimensions. Il serait donc intéressant d'y développer des expérimentations sur les effets des facteurs sur l'ICU, autres que la forme du bâti, puisque celle-ci est quasi identique d'une cour à l'autre. Toutefois, on note, sur la figure 4.28, que deux de ces cours sont certainement traversées en sous-sol par l'arrivée du réseau de chaleur urbain qui modifie donc les caractéristiques locales.

Pour terminer avec la résidence, il a été identifié que la très grande superficie

de toit pourrait accueillir des fonctions de terrasse plantée, de récolte d'eau de pluie ou de production d'énergie solaire.

Ici, c'est la récolte d'eau de pluie qu'il a été choisi d'implanter. En effet, cette fonction pourrait se corréliser avec l'apport de végétaux et la réintégration de la présence d'eau en surface qui sont les solutions que les parties précédentes ont permis d'identifier comme les plus efficaces dans la lutte contre l'ICU.

Concernant l'école G. Rouanet, ce bâtiment patrimonial sera mis en valeur, tout d'abord par la requalification de la rue G. Rouanet en zone de rencontre avec des trottoirs clairs et perméables qui permettront une amélioration de la lecture de l'espace en même temps qu'une atténuation de l'ICU. Cet aménagement sera complété par la plantation d'arbres et de massifs au pied du bâtiment de la résidence, zone la plus exposée.

A l'intérieur de l'école, les arbres présents seront conservés. La seule modification se fera au niveau du revêtement des cours de récréation. Il passera d'un asphalte dans des tons de gris à un revêtement perméable clair.

Les parcelles dans l'angle sud-ouest de l'îlot de l'école n'ont pas été traitées car elles apparaissent assez fraîches sur la carte thermique.

Pour les plans d'aménagement, deux options sont proposées.

La première consiste à uniquement utiliser les solutions identifiées comme plu efficaces dans la lutte contre l'îlot de chaleur urbain, d'après les parties précédentes

La deuxième consiste à appliquer ces méthodes sur une partie du site et à proposer des expérimentations dans les quatre cours numérotées afin de tester les effets des différents facteurs séparément et de pouvoir comparer les résultats. Cela afin de contribuer à l'étude du fonctionnement des facteurs responsables du phénomène d'ICU.

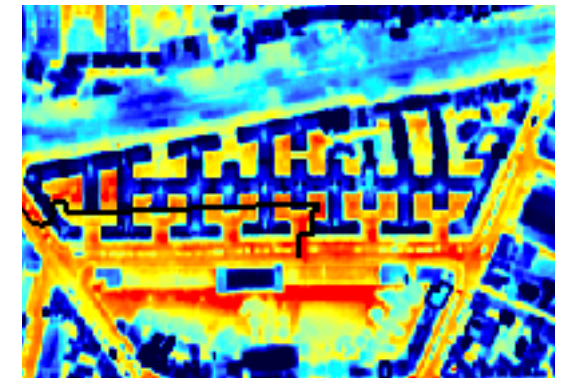


Figure 4.28 : Mise en évidence de la présence d'un ICIU sur le site. Echelle 1:5000 (APUR. non publié)



Légende :

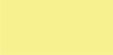
- | | | | | | |
|---|---|---|--|---|-----------------------------|
|  | Espace végétalisé de la petite ceinture |  | Cours identifiées comme pouvant être aménagées comme centralités de la copropriété |  | Revêtements à perméabiliser |
|  | Présence de la végétation à prolonger dans la trame urbaine |  | Cours identiques identifiées comme pouvant faire l'objet de tests des solutions d'adaptation |  | Bâti à valeur patrimoniale |
|  | Toit principalement plat, à aménager pour recueillir les eaux de pluie |  | Numérotation des cours identifiées comme pouvant faire l'objet de tests des solutions d'adaptation |  | Périmètre du site |
|  | Cours fermées entre la résidence Damrémont et le bâti plus ancien, à aménager comme zones de rencontre entre copropriétés | | | | |

Figure 4.29 : Schéma des orientations Echelle : 1: 1500

4.3.2 Plan d'aménagement - option 1

Dans la première option d'aménagement proposée, présentée sur la figure 4.30, l'ensemble des cours de la résidence Damrémont, des cours fermées de l'ensemble de bâtiments à l'angle nord-est, et les cours de l'école Gustave Rouanet sont revêtues d'un pavé perméable de couleur claire.

Les trottoirs sont également revêtus de ce matériau, ce qui permet une liaison visuelle entre l'espace privé et l'espace public.

Dans les cours de l'école, ce revêtement présentera des motifs en queue de paon qui rappellent à la fois le calepinage du pavé de la rue Rouanet et les ferronneries de la résidence Damrémont.

Les chaussées des rues Belliard, du Ruisseau et du Poteau sont modifiées de manière à présenter des tonalités de gris plus clair et à assurer une certaine porosité.

La rue G. Rouanet, quant à elle, voit le pavé constitutif de sa chaussée être remis à jour. Cela est corrélé à la mise en place d'un joint poreux entre les pavés pour augmenter la porosité de la chaussée. Ainsi, on allie la réponse à l'ICIU à la mise en valeur du petit patrimoine parisien.

Dans ces quatre rues, des plantations d'arbres et de massifs arbustifs et herbacés sont installées.

Dans la rue Belliard, ces végétaux sont positionnés le long du trottoir sud, car la petite ceinture est déjà présente côté nord, qui rafraîchit l'air ambiant. Dans la rue du Ruisseau, les végétaux sont installés en alternance des deux côtés de la rue, en raison de son orientation nord-sud, qui ne permet pas aux bâtiments d'apporter une ombre suffisante à la rue.

Dans la rue du Poteau, la végétation est mise en place le long du trottoir nord-est, qui est le plus exposé aux rayonnements.

Dans la rue G. Rouanet, les plantations sont installées le long du trottoir nord, le plus exposé au rayonnement et le plus chaud d'après la carte thermique de la figure 4.12.

Dans la cour de l'école, des bandes de gazon sont ajoutées au pied des bâtiments exposés au sud. Cela permettra de rafraîchir ces derniers en cas de chaleur intense.

En ce qui concerne l'aménagement de l'îlot de la résidence Damrémont, les

deux cours ouvertes sur la rue Belliard sont tapissées de parterres végétalisés avec espèce couvre-sol de petite taille. Un arbre est planté à l'entrée de chaque cour pour faire le lien avec la Petite Ceinture. Au centre de chacune, une lame d'eau à utilisation ponctuelle (déclenchée en cas de chaleur) est installée sur une dalle de même couleur que le revêtement.

Pour les cours fermées, différentes combinaisons entre lame d'eau, arbres et arbustes sont proposées, afin d'obtenir un ensemble varié dans les formes, mais qui permette partout une atténuation de l'effet d'ICIU.

Les deux cours identifiées comme points de rencontres sont aménagées, toujours de façon à réduire l'effet d'ICIU, en particulier en protégeant les pieds de bâtiments donnant sur le sud par de la végétation. Cependant, une attention particulière est portée sur la disponibilité d'espace praticable, nécessaire aux activités des habitants. Du mobilier tel que des bancs et des tables pourrait même être installé.

Concernant les quatre cours centrales ouvertes sur la rue G. Rouanet, l'aménagement consiste là encore à combiner la présence d'eau et des surfaces de couvre-sol ou d'arbres afin de diminuer l'effet d'îlot de chaleur. Les formes des parterres sont inspirées des tracés des cours et cherchent à offrir des espaces agréables pour les habitants.

Pour chaque cour, un espace de passage est laissé en plus des trottoirs déjà existants afin de faciliter les déplacements. De plus, le choix de parterres de couvre-sols et de lames d'eau est motivé par la nécessité d'accessibilité pour les véhicules d'intervention en cas d'incendie ou d'accident. Ces parterres et dalles peuvent être facilement traversés par les véhicules et ne les empêchent pas de procéder à des manoeuvres.

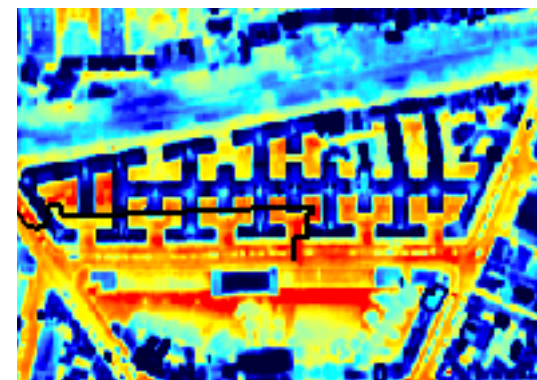
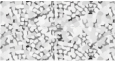


Figure 4.28 : Mise en évidence de la présence d'un ICIU sur le site. Echelle 1:5000 (APUR. non publié)



Figure 4.30 : Plan d'aménagement - option 1 Echelle : 1: 1500

Légende :

	Chaussée à albédo élevé et imperméables		Massifs arbustifs et herbacés		Arbres existants
	Trottoirs imperméables		Remise en valeur du pavé		Arbres du projet
	Gazons de plantes à très faible développement		Trottoirs en pavé autobloquant rouge existants		Bouches d'aération pour le sous-sol
	Lames d'eau à utilisation ponctuelle				

4.3.3 Plan d'aménagement - option 2

Cette option d'aménagement, présentée dans la figure 4.31 est identique à l'option 1, excepté pour les quatre cours centrales de la résidence Damrémont donnant sur la rue G. Rouanet.

Ces cours sont en effet les lieux où l'on expérimente diverses solutions jouant sur un ou deux facteurs à la fois.

Pour la cour n°1 (la plus à l'ouest), on propose une solution où des végétaux (arbres et couvre-sols) sont combinés à l'ajout d'une lame d'eau. Le revêtement au sol, lui, n'est pas modifié. Il reste donc imperméable et de faible albédo, puisqu'il est composé de bitume.

Dans la cour n°2, on choisit de n'apporter que des éléments végétaux. L'eau reste donc absente et le revêtement du sol n'est pas modifié. Cela permettra de comparer les effets de la végétation accompagnée d'une surface d'eau avec les effets de la végétation seule.

Dans la cour n°3, des lames d'eau sont mises en place. Les végétaux sont absents (on retirera les jardinières présentes actuellement, comme dans l'ensemble des cours) et le revêtement reste, là encore, inchangé. On pourra donc évaluer dans ce cas l'efficacité de la présence d'eau seule sur la diminution de l'effet d'ICIU.

La cour n°4 présente un test sur l'effet de la couleur du revêtement. Ici, le sol est repeint dans une teinte très claire mais n'est pas remplacé, afin de ne pas modifier le degré de perméabilité. On pourra ainsi évaluer l'effet de la couleur du revêtement sur l'intensité de l'ICIU en comparant les résultats obtenus dans cette cour avec ceux des trois autres.

Les valeurs mesurées dans chaque cour seront donc comparées entre elles. Elles seront aussi comparées avec une série de mesures prises dans chaque cour avant la mise en œuvre du projet, ce qui permettra de quantifier l'impact du projet global et de chaque solution testée, par rapport à l'état initial.

Les autres cours, ainsi que les rues, feront aussi l'objet de mesures (quelle que soit l'option choisie) avant et après la mise en œuvre, afin de quantifier l'impact de la solution globale proposée.

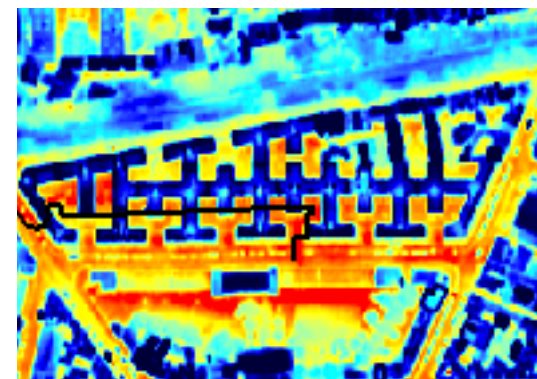


Figure 4.28 : Mise en évidence de la présence d'un ICIU sur le site. Echelle 1:5000 (APUR. non publié)



Figure 4.31 : Plan d'aménagement – option 2 Echelle : 1: 1500

Légende :

Chaussée à albédo élevé et imperméables



Trottoirs imperméables



Gazons de plantes à très faible développement



Lames d'eau à utilisation ponctuelle



Massifs arbustifs et herbacés



Remise en valeur du pavé



Trottoirs en pavé autobloquant rouge existants



Arbres existants



Arbres du projet



Bouches d'aération pour le sous-sol

4.3.4 Détails d'aménagement

4.3.4.1 Récupération de l'eau de pluie sur le toit

La récupération de l'eau de pluie se fera depuis le toit vers une citerne installée en sous-sol comme présenté dans les figures 4.32 et 4.33. Le toit sera aménagé de façon à ce que l'eau qui y arrive s'écoule grâce à la pente vers les gouttières. Celles-ci seront branchées sur une citerne située dans le sous-sol de la résidence d'après le principe de la figure 4.34. Le taux de récupération de l'eau de pluie d'un toit en gravier étant de 60%, cette caractéristique sera conservée, d'autant plus que les graviers clairs confèrent un albédo relativement élevé à la surface du toit.

Les feuilles mortes devront être retenues grâce à des crapaudines associées à des flotteurs par exemple à l'embouchure des gouttières. En effet, les débris végétaux et les impuretés nuiraient à la conservation de l'eau stockée.

Cette eau pourrait tout d'abord être utilisée dans l'arrosage des plantations installées et dans l'alimentation des lames d'eau lors des moments de chaleur. À terme et si les quantités d'eau récoltées le permettent, on peut considérer l'idée d'approvisionner la résidence en eau de pluie non potable pour les usages ménagers et sanitaires grâce à cette récolte du toit.

4.3.4.2 Les lames d'eau

Les lames d'eau installées dans les cours ressemblent dans leur forme à celle montrée sur les figures 4.34 et 4.35. Il s'agit d'une dépression dans le sol qui profite de la pente existante. Par contre, contrairement à la lame d'eau présentée sur les figures, elle est alimentée par une pompe qui prélève l'eau depuis la citerne et l'amène dans la cour. Cette pompe peut être alimentée en énergie par des capteurs solaires sur le toit réservés à cet usage.

4.3.4.3 La végétation

La végétation, dans la rue, s'implantera là où se trouvent actuellement des places de stationnement. Cela ne pose pas de problème si l'on considère que la densité du trafic dans la ville a vocation à diminuer suite aux politiques en cours.

Pour la végétation, on s'inspire des espèces présentes dans la Petite Ceinture et des espèces de milieux urbains en général.

On choisira donc pour les parterres bas des gazons fleuris comprenant des espèces indigènes *Agrostis tenuis*, *Lolium perenne*, *Lotus corniculatus*, *Poa*

Pratensis, *Trifolium repens*, *Achillea millefolium*, *Centaurea thuillieri*, *Viola odorata* et *Prunella vulgaris*.

Dans les parterres arbustifs, on retrouvera les mêmes espèces qu'en couvre-sol mais en plus petites proportions et elles accompagneront des espèces telles que *Hypericum androseanum*, *Viburnum opulus*, *Viburnum lantana*.

Les arbres, eux seront des *Acer pseudoplatanus*. La figure 4.37 montre en effet que ce sont des arbres qui possèdent une opacité du feuillage importante de 60%, bien qu'inférieure à celle des marronniers et platanes. Or ces derniers sont des arbres pus volumineux et ils ne conviennent pas à l'aménagement des petits espaces concernés. L'*Acer pseudoplatanus* a des feuilles qui rappellent le platane, ce qui ne dénote pas avec les plantations habituelles de la ville de Paris.

D'autre part, on trouve des érables sur la Petite Ceinture alors qu'on ne trouve pas de platanes et peu de marronniers. C'est donc un choix plus pertinent dans l'optique de liaison avec la Petite Ceinture.

4.3.4.4 Matériaux de revêtement

Pour les cours, le matériau choisi est un pavé perméable de couleur claire qui s'engazonne à proximité des parterres comme montré dans la figure 4.38. Il faudra donc prêter une attention particulière à la composition des joints pour obtenir cet effet. Ce pavé permet de s'intégrer dans l'unité paysagère parisienne. Sa mise en oeuvre est présentée sur la figure 4.40.

Les trottoirs sont traités de la même façon que les cours, avec la mise en place de pavés perméables de couleur claire qui s'engazonneront à proximité des plantations.

Concernant les chaussées (autres que celle de la rue G. Rouanet dont nous avons déjà parlé), elles seront constituées de bitume perméable, (figure 4. de couleur un peu plus claire que le bitume classique. Ce choix est fait dans le but d'assurer une certaine liaison visuelle entre l'espace aménagé et les alentours, tout en participant à l'atténuation de l'effet d'ICIU. Ce type de revêtement est mise en oeuvre selon la technique présentée sur la figure 4.39.



Figure 4.32 : Vue du toit de la résidence Damrémont. Photo du 11 juillet 2017 (B. Cazenave)



Figure 4.33 : Vue du sous-sol de la résidence Damrémont avec figuration de la citerne Photo du 11 juillet 2017 (B. Cazenave)



Figure 4.34 : Principe de la récupération de l'eau de toiture en citerne souterraine (Bertrand 2011)

Les revêtements des cours de l'école sont remplacés par un matériau perméable mêlant résine et graviers et qui permet de proposer une grande variété de motifs comme celui de la figure 4.41. Le motif choisi pourrait être des losanges qui rappelleraient le bâtiment de l'école ou des tracés en forme de queue de paon qui rappelleraient les pavés de la rue. Dans tous les cas le revêtement présente une couleur beaucoup plus claire que sur la figure.

4.3.4.5 Méthodes d'évaluation

Afin de pouvoir analyser l'impact des solutions apportées au niveau du site sur l'intensité d'expression du phénomène d'ICU, on proposera dans ce projet une méthode d'évaluation.

Pour déterminer cette méthode, il est nécessaire de s'inspirer des méthodes utilisées dans les exemples de la partie 3.

Ces méthodes, proposées dans les exemples de Lyon et de Montréal, sont les suivantes.

A Lyon, pour la rue de la Buire, des stations de mesures climatiques ont été installées dans la rue pilote et dans une rue témoin. Cela a permis d'obtenir des mesures de température de la chaussée et de température ressentie (grâce à l'indicateur Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) qui prend en compte la température de l'air, l'hygrométrie de l'air et le rayonnement solaire).

Pour la rue Garibaldi, la campagne de mesures a été lancée après l'aménagement et uniquement pendant l'été. La température et l'humidité de l'air, ainsi que l'humidité du sol et la croissance des arbres ont été mesurées.

A Montréal, les exemples ont été évalués principalement grâce à deux techniques : la modélisation à haute résolution et l'imagerie thermique satellitaire. La modélisation à haute résolution consiste à simuler les effets des projets sur les bilans radiatifs et les températures ambiantes pendant les épisodes d'ICU. Elle dépend donc de la précision de la description du projet et de la fidélité de la réalisation à cette description. Les simulations se font pour plusieurs épisodes caniculaires, avant et après travaux.

L'imagerie thermique satellitaire consiste à utiliser des cartes thermiques sous conditions météorologiques similaires avant et après la mise en place du projet. Les gains et pertes de chaleur entre les deux situations sont extraits et transposés sur des orthophotoplans par la suite.

L'évaluation des projets de Montréal est également passée par une campagne de mesures qui devait comparer les températures de l'air des sites avant et après aménagement avec les températures moyennes de l'air en milieu rural et en milieu urbain. Avant l'aménagement, cette campagne de mesures a permis de confirmer que les sites subissaient des effets d'ICIU intenses (température plus élevée que la température moyenne urbaine). Cependant, elle n'a pas permis d'obtenir de résultats utilisables pour la situation après aménagement en raison de l'échantillonnage.

Il est donc évident que la méthode de campagne de mesures, avec la mise en place de capteurs, est une constante dans l'étude de l'effet d'ICIU, bien qu'elle puisse parfois ne pas donner de résultats. Les méthodes de modélisation et d'imagerie thermique semblent moins répandues, alors qu'elles offrent des résultats plus fins qui permettent, au sein d'un même site de voir les différences d'efficacité locales de l'aménagement sur l'intensité de l'ICIU.

Pour Paris, la méthode choisie est donc l'association de deux techniques : l'imagerie thermique, pour laquelle des données existent déjà, et la campagne de mesures, qui permet de vérifier directement sur le site les observations aériennes. L'imagerie thermique permet d'analyser l'îlot de chaleur intra-urbain de surface, tandis que la campagne de mesures permet d'avoir des informations sur l'îlot de chaleur intra-urbain qui se développe entre la surface et la canopée urbaine.

Cependant, la carte thermique étudiée dans ce mémoire ne présentant qu'une mesure, son caractère représentatif de l'îlot de chaleur urbain n'est pas avéré. Il sera donc nécessaire de travailler sur des valeurs moyennées sur plusieurs mois puis sur plusieurs années. Il faudra donc effectuer des vols régulièrement au-dessus du site et de ses alentours afin de pouvoir évaluer précisément l'évolution de l'îlot de chaleur.

Concernant la campagne de mesures, des capteurs seront implantés sur le site et mesureront la température du sol (afin de comparer cette mesure avec l'imagerie thermique), la température de l'air et son humidité, la vitesse du vent, le rayonnement solaire, ceci afin de pouvoir comparer température réelle et température ressentie. Si cela est possible, il serait également intéressant de pouvoir comparer ces valeurs avec d'autres mesures effectuées dans la ville et en milieu rural, afin de caractériser plus précisément l'effet d'ICIU de la couche de la canopée et sa réaction aux aménagements.



Figure 4.35: Illustration du principe de la lame d'eau à sec (Atelier Parisien d'Urbanisme 2015)



Figure 4.36: Illustration du principe de la lame d'eau en eau (Atelier Parisien d'Urbanisme 2015)



Figure 4.38: Pavés engazonnés, rue Cardinet, ZAC de Batignolles, Paris 17eme (Atelier Parisien d'Urbanisme 2015)

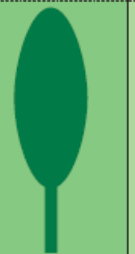
essences	platane	marronnier	érable	tilleul	sophora
hauteurs	25 à 30 m	25 à 30 m	10 à 15 m	15 à 20 m	15 à 20 m
« silhouette de la canopée (lorsque l'arbre est jeune) »					
« transparence de la canopée »	20 %	20 %	40 %	40 %	60 %

Figure 4.37: Tableau comparatif des effets rafraichissants de différentes espèces d'arbres (Bigorgne et Mangold 2014)

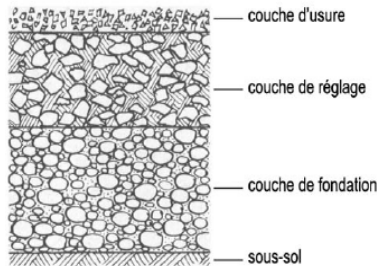


Figure 4.39: Coupe de principe pour les revêtements perméables (Ville de Neuchâtel 2004)

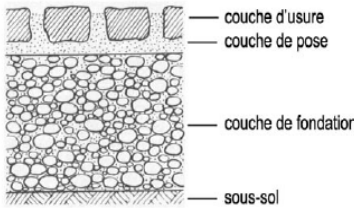


Figure 4.40: Coupe de principe pour les revêtements perméables de type pavés et dalles alvéolées (Ville de Neuchâtel 2004)



Figure 4.41: Exemple de motif de revêtement perméable (Permeaway 2016)

4.5 Discussion

Tout d'abord, proposer deux options ne diminue pas l'intérêt de l'une ou l'autre. En effet, ces deux variantes se situent depuis des points de vue différents. La première consiste à proposer un projet à destination des habitants principalement en utilisant les solutions les plus efficaces retenues grâce aux exemples. La seconde s'insère dans une démarche plus scientifique de recherche sur l'effet de l'îlot de chaleur intra-urbain et de ses modalités d'atténuation mais du point de vue de l'habitant, elle traite le site de manière différentielle, avec des aménagements a priori très efficaces à certains endroits et d'autres qui atténuent beaucoup moins l'effet d'îlot de chaleur.

Ensuite, il est important de remarquer que le projet présenté dans cette partie a été élaboré dans l'optique de proposer une solution de mitigation à l'îlot de chaleur urbain. Cela oriente donc l'attention lors de la conception principalement sur ce thème et peut avoir pour effet de prendre le pas sur d'autres aspects qui auraient pu paraître plus importants dans la démarche classique de conception paysagère.

D'autre part, le choix de la méthode d'évaluation présente des difficultés. Les mesures permettent en effet d'observer des données physiques comme la température, l'hygrométrie ou le rayonnement solaire, mais ces données ne décrivent pas bien l'effet de chaque facteur sur l'intensité de l'ICIU. C'est d'ailleurs la raison qui a motivé la proposition de l'option 2, qui permet justement de mieux comprendre les effets individuels de chaque facteur.

Pour en revenir à la méthode d'évaluation, celle qui a été choisie ici semble la mieux adaptée à l'étude du site. Malgré tout, il est possible que d'autres techniques plus efficaces existent, qui n'ont pas été mises en évidence ici puisque les inspirations viennent des exemples et que c'est uniquement de l'analyse de ces exemples que sont tirées les différentes méthodes d'évaluation. Toutefois, il est à noter que ces deux exemples ont été retenus car ils sont parmi les seuls à proposer des méthodes d'évaluation de l'effet climatique des aménagements.

Un élément qui peut soulever des questionnements est le choix de la récolte de l'eau de pluie sur le toit de la résidence Damrémont. En effet, d'autres fonctions comme la production d'énergie solaire ou l'installation de toits-ter-

rases pourrait être envisagés. Ces fonctions pourraient être intéressantes mais toutes ne sont pas compatibles : l'association de toits terrasses associés avec des panneaux solaires semble difficile, d'autant que la quantité de panneaux devrait être importante. De même, la récolte d'eau de pluie semble incompatible avec la production d'énergie électrique solaire. Par contre la récupération de l'eau de pluie et les toits-terrasses pourraient éventuellement se partager l'espace du toit (pour éviter la contamination des eaux de pluie récupérées par les organismes vivants des jardins). Il serait donc possible de mettre en place des terrasses, à condition que la quantité d'eau récoltée soit suffisante dans ces conditions pour alimenter les lames d'eau et irriguer toutes les plantations.

Pour terminer, les choix d'aménagement pourraient être modifiés, à condition qu'ils respectent l'intention exprimée.

Par exemple, les végétaux choisis peuvent être remplacés par d'autres qui seraient également indigènes et qu'une partie d'entre eux soient potentiellement présents dans la Petite Ceinture (à proximité ou non).

De même, d'autres matériaux peuvent être utilisés s'ils permettent la perméabilisation du sol et une unité paysagère au sein du site et avec le reste du quartier.

Ce projet présente donc une grande variabilité potentielle, tant que les intentions de base sont respectées.

A ce jour, il existe encore peu de projets orientés spécifiquement vers l'atténuation de l'ICU, alors que c'est un phénomène connu depuis presque deux siècles. Cela tient certainement au fait que les disciplines d'aménagement (paysagisme, architecture, urbanisme, etc) ont développé des processus d'élaboration de projet, qui doivent prendre en compte les nombreux facteurs et contraintes spécifiques aux sites. De ce fait, l'ICIU n'étant pas toujours documenté ni repérable sur site, il a tendance à ne pas être traité directement par la profession et encore moins à devenir le centre d'un projet. Toutefois, on note que cette problématique prend de l'importance dans les politiques d'aménagement, à l'instar de la biodiversité, et que des aménagements expérimentaux voient le jour partout dans le monde.

De plus, la question de l'adaptation thermique en ville, comme tous les sujets qui touchent à la société, met en jeu de nombreux facteurs, qui interagissent entre eux. Les expérimentations sur le climat urbain ne sont donc pas comparables avec des expériences scientifiques classiques. La ville se transforme en laboratoire, tout en présentant des contraintes nettement plus importantes. La variété des échelles prises en compte ajoute une autre difficulté, aussi bien dans la conception que dans l'analyse.

Au travers des exemples de solutions étudiés, on se rend compte qu'il existe une grande lacune au niveau de l'évaluation des effets des aménagements mis en place pour diminuer l'intensité de l'îlot de chaleur. Non seulement l'évaluation du projet n'est pas systématique, mais lorsqu'elle a lieu, les responsables du projet prennent en compte les paramètres qui leur paraissent pertinents au regard du site. Or la diversité des mesures et simulations effectuées, autant que la variété des sites, rendent difficile la comparaison entre les différents projets. Il n'est donc pas aisé de tirer des enseignements généralisables de ces solutions. Il paraît dès lors primordial de mettre en place un référentiel de base recensant les différentes mesures à effectuer et les critères (en particulier de superficie) à prendre en compte pour choisir un site d'aménagement.

Il serait également intéressant de compiler en détail les effets de tous les facteurs sur la réduction de l'ICU. Ce travail pourrait être complété par des expérimentations en laboratoire (ou ex-situ) sur les végétaux, les volumes d'eau, le degré de perméabilité des sols, la caractérisation des paramètres définissant l'albédo des revêtements de sol, les matériaux des bâtiments, leurs

types d'isolation, etc. De même, des simulations pourraient être effectuées pour analyser précisément les effets de la géométrie urbaine en termes d'insolation journalière, d'effets d'ombre, de brises thermiques, etc.

A ce sujet, le thème des matériaux des bâtiments n'a pas été développé dans ce mémoire, car il constitue un sujet à lui seul, qu'il serait intéressant d'approfondir avec des architectes et ingénieurs du bâtiment.

Un autre paramètre du microclimat urbain, qui n'a pas été détaillé dans ce travail, est la forte concentration de l'air en polluants. Ce choix a été motivé par le fait que les polluants amplifient certes l'effet d'îlot de chaleur urbain, mais qu'ils n'en sont pas la source première. De plus, ce paramètre est lié aux modes de consommations et de productions et ne peut donc pas se résoudre uniquement au moyen d'aménagements paysagers.

Il convient aussi de mentionner que la vapeur d'eau est un puissant gaz à effet de serre. Or, dans ce mémoire, l'évaporation et l'évapotranspiration sont vivement recommandées comme solutions à l'effet d'îlot de chaleur urbain, bien que ces processus dégagent beaucoup de vapeur d'eau. En effet, ce gaz renvoie certes beaucoup les rayons infrarouge vers la surface mais il reste très peu de temps dans l'atmosphère, au contraire des autres gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone ou le méthane.

Notons d'autre part que la carte thermique de Paris, utilisée dans la seconde partie pour caractériser l'îlot de chaleur urbain, présente un certain nombre de biais. Tout d'abord, c'est une image ponctuelle. Elle n'est donc pas représentative du phénomène au cours du temps. Il faudrait pouvoir la comparer avec des images thermiques de différents mois et différentes années pour établir de façon plus certaine l'emplacement des îlots de chaleur intra-urbains, leurs intensités et étudier leur évolution saisonnière.

Le second biais concerne le traitement de la carte, dont la procédure de transformation est la suivante:

La caméra utilisée reçoit des rayonnements infrarouges, qu'elle traduit sous forme de pixels, dont la valeur correspond à une couleur précise entre le noir et le blanc. Par la suite, les données sont traitées pour obtenir une carte en couleurs sur une échelle allant du rouge au bleu. A partir de là, un second traitement permet de transformer les valeurs des couleurs en températures. La carte utilisée provient de la première étape de la procédure et a été modifiée par l'APUR, de façon à observer des couleurs rendant compte des diffé-

rences de température. La carte en annexe 3 correspond à la deuxième étape de la procédure. On peut donc y observer l'intensité en couleurs de l'ICU, mais pas en déduire les températures. Cependant, ce document a été obtenu trop tard pour être utilisé dans ce mémoire. En comparant les deux cartes, on se rend compte que l'intensité de l'ICU n'est pas rendue de la même façon avec les modifications de l'APUR qu'avec le traitement conventionnel. Cela peut entraîner des erreurs dans l'analyse et l'interprétation de la carte.

Pour conclure, ce travail a permis de déterminer que l'ICU est régit par des facteurs spécifiques, qui sont: la perméabilité du sol, la présence d'eau, la présence de végétaux, les caractéristiques des matériaux et la forme urbaine. Les facteurs et leurs paramètres sont modifiables et constituent des leviers permettant d'atténuer l'effet d'ICU.

Concernant Paris, il a été possible de caractériser l'ICU de la ville malgré les biais d'interprétation de la carte. Le phénomène est plus intense au nord, à l'est et au centre de la ville. De plus, on peut observer des ICIU qui se regroupent principalement dans ces zones. Au niveau des ICIU, on peut mettre en relation les écarts de température observés sur la carte avec les facteurs qui régissent les mécanismes de l'ICU.

Pour répondre à l'effet d'ICU à Paris, ce travail s'est intéressé à des projets réalisés à Lyon et à Montréal. Ainsi, il a été possible de confirmer que certains de ces aménagements ont effectivement permis de réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain, en combinant des actions sur plusieurs facteurs: augmentation de la surface végétalisée et de la présence d'eau, changement des matériaux de revêtement pour des couleurs plus claires. D'autres projets n'ont, en revanche, pas eu les résultats escomptés, ce qui est également source d'enseignements.

Enfin, le projet élaboré pour le site de la résidence Damrémont propose une façon d'adapter les solutions identifiées comme les plus efficaces à Paris. Toutefois, l'effectivité de cet aménagement reste à confirmer. C'est la raison pour laquelle des évaluations de l'intensité de l'ICU sont préconisées dans ce projet.

Ainsi, en proposant des projets qui intègrent la problématique de l'îlot de chaleur urbain, c'est-à-dire qui agissent sur les facteurs qui le déterminent, et

en prenant en compte la complexité de chaque site, il est sans doute possible d'utiliser l'approche et les techniques paysagères pour diminuer l'effet d'ICU à l'échelle de la ville de Paris.

A l'avenir, il serait intéressant de développer la thématique de l'îlot de chaleur urbain parallèlement à celle de la biodiversité.

En effet, l'intégration de ces deux aspects dans les projets d'aménagement peut avoir des effets bénéfiques sur la ville.

Le développement des corridors et des réserves écologiques permet de réintégrer l'eau et les végétaux dans le milieu urbain, ce qui participe à la diminution de l'effet d'ICU. De même, les aménagements visant à diminuer l'ICU peuvent participer au renforcement de la biodiversité en ville, en rendant disponibles de nouveaux espaces pour les espèces, lorsqu'ils sont conçus de façon adéquate.

Ce type de combinaison peut aussi être réalisé avec des projets d'agriculture urbaine. Il s'agit en général d'une agriculture raisonnée, qui fonctionne en circuit court et participe à la modification des modes de production actuels. Or ces modes de production sont parmi les causes principales de l'effet d'ICU et du changement climatique. Des projets locaux pourraient donc contribuer à améliorer globalement le climat urbain.

L'interaction entre ces trois thématiques pourrait aussi améliorer considérablement le cadre de vie et la santé des citoyens, ce qui est d'autant plus important que la population en ville augmente continuellement. Cette augmentation et la densification des villes constituent un grand défi et amènent l'ensemble des acteurs à repenser la ville.

Les mots repérés par une astérisque dans le texte sont définis dans cette section.

- Albédo : rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente. Les valeurs de l'albédo sont comprises entre 0 et 1. 0 correspond à un corps ne réfléchissant pas la lumière (noir) et 1 à un corps réfléchissant toute la lumière (miroir parfait).
- Anoure : Amphibien dépourvu de queue (grenouilles, crapauds).
- Chaleur latente : quantité d'énergie à apporter pour qu'une certaine quantité de matière change d'état physique, comme dans le cas de l'évapotranspiration.
- Chaleur sensible : quantité de chaleur échangée, sans changement de phase (ou d'état) physique. Elle est dite sensible car l'échange de chaleur modifie la température du corps et la variation peut être ressentie ou mesurée.
- Convection : la convection est un des trois modes de transfert de chaleur avec la conduction et le rayonnement. Le terme de convection fait référence aux transferts de chaleur se produisant entre une surface et un fluide en mouvement lorsque ceux-ci sont à des températures différentes.
- Dessiccation : suppression naturelle ou artificielle de l'humidité contenue dans un corps.
- Ectotherme : se dit d'un organisme vivant qui absorbe la chaleur externe au lieu de produire sa propre chaleur et qui utilise des adaptations comportementales pour réguler sa température corporelle (reptiles sauf «oiseaux», «poissons» et amphibiens).
- Emissivité : grandeur physique qui caractérise la capacité des matériaux à rayonner la nuit et donc à se refroidir. C'est le résultat du rapport entre la valeur du flux radiatif émis par un élément de surface à température donnée et la valeur du flux émis par un corps noir à cette même température. Cette valeur varie entre 0 et 1 et n'a pas d'unité.

- Empreinte écologique : surface correspondante de terre productive et d'écosystèmes aquatiques nécessaires à produire les ressources utilisées et à assimiler les déchets produits par une population définie, à un niveau de vie de matériel spécifié.
- Evapotranspiration : désigne le processus de transformation d'eau liquide en vapeur d'eau qui a lieu lors de la photosynthèse ou lors de la régulation thermique des tissus de la plante. De l'eau liquide est prélevée dans le sol puis est diffusée par la plante dans l'air ambiant sous forme de vapeur d'eau.
- Houppier : ensemble des branches, des rameaux et du feuillage d'un arbre.
- Isoplèthes : lignes joignant les points d'égale valeur, ici de température
- Phénologie : étude de l'influence des variations climatiques sur certains phénomènes périodiques de la vie des plantes (germination, floraison) et des animaux (migration, hibernation).
- Réflectivité : proportion d'énergie électromagnétique réfléchi par la surface d'un matériau.
- Urbanisation : désigne le processus de l'extension des villes. En termes écologiques, c'est le procédé de conversion des écosystèmes préexistants en zones de forte densité d'habitations humaines, que l'on peut considérer comme un écosystème en soi, l'écosystème urbain.
- Stabilisé : ou sol stabilisé. Matériau compacté lors de sa mise en œuvre, mélange de graviers, de sables, de fines et éventuellement de liant.
- Zéro absolu : valeur théorique de température à laquelle plus aucun mouvement moléculaire n'est possible. C'est-à-dire qu'à cette température, un corps ne peut plus émettre de chaleur et donc n'émet plus aucun rayonnement électromagnétique. Cette valeur est de 0 Kelvin, soit $-273,15^{\circ}\text{C}$.

Les abréviations sont répertoriées dans cette section.

- APUR : Atelier Parisien d’Urbanisme
-
- BUBBLE : Basel Urban Boundary Layer Experiment
-
- CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
-
- COP : Conférence des Parties
-
- CPCU : Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain
-
- EPICEA : Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l’Echelle de l’Agglomération parisienne
-
- GIEC : Groupe Intergouvernemental d’experts sur l’Evolution du Climat
-
- HBM : Habitations Bon Marché
-
- LCZ : (Local Climate Zone) Zones Climatiques Locales
-
- PCET : Plans Climat-Energie Territoriaux
-
- SRCAE : Schémas Régionaux du Climat, de l’Air et de l’Energie
-
- UCZ : (Urban Climate Zone) Zones Climatiques Urbaines
-
- WHO : World Health Organization
-
- ZAC : Zone d’Aménagement Concerté

Articles de colloque

Christen, Andreas et Roland Vogt. 2002. « First results from BUBBLE I : Profiles of fluxes in the urban roughness sublayer. » In .Norfolk, VA, USA: s.n.

Articles de revue

Cantat, Olivier. 2004. « L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. » *Norois* 191.

Escourrou, Gisèle. 1990. « La spécificité du climat de l'agglomération parisienne / The unique character of the Paris urban area's climate. » *Revue de Géographie de Lyon* 65 (2): 85-89.

Kiehl, J.T. et Kevin E. Trenberth. 1997. « Earth's Annual Global Mean Energy Budget. » *Bulletin of the American Meteorological Society* 78 (2).

Levasseur, Marie-Eve. 2014. « Étude de performance de projets de lutte aux îlots de chaleur urbains dans la région de Montréal. » *Bulletin d'Information en Santé Environnementale*.

Maillard, Philippe, F David, M Dechesne, J.-B. Bailly et E Lesueur. 2014. « Caractérisation des îlots de chaleur urbains et test d'une solution d'humidification de chaussée dans le quartier de la Part-Dieu à Lyon. » *Techniques Sciences Méthodes* 6: 23-35. doi:<https://doi.org/10.1051/tsm/201406023>.

Stewart, I.D. et Tim R. Oke. 2012. « Local climate zones for urban temperature studies. » *Bulletin of the American Meteorological Society* 98 (5). doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1. <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.

Cartes

Atelier Parisien d'Urbanisme et Ville de Paris. 2015. « Paris 2050 - climat, air et énergie. » Paris: Ville de Paris.

Besse, Marie-Thérèse. 2017. « Hauteur Bâti 2012. » s.l.: Atelier Parisien d'Urbanisme. <http://opendata.apur.org/datasets/hauteur-bati-2012>.

Chapitres de livres

Parlow, Eberhard. 2011. « UrbanClimate. » In *Urbanecology : patterns, processes, and applications*, Jari Niemelä, sous la dir. de Jürgen H. Breuste et Thomas Elmqvist, Oxford Biology, 31-44; 374. Great Britain: Oxford University Press.

Documents

Adam, Boris, Thierry Ameglio et Didier Coste. s.d. « Système PEPPIAF - Système de surveillance et d'expertise de la croissance des plantes et des arbres. » INRA - U.M.R. PIAF.

Atelier Parisien d'Urbanisme. Les Habitations à Bon Marché de la ceinture de Paris : étude historique. Atelier Parisien d'Urbanisme; 2017.

Atelier Parisien d'Urbanisme M de P. Périodes de construction des bâtiments parisiens. Paris; 2009

Atelier Parisien d'Urbanisme. Préservation et valorisation de la ressource en eau brute - une gestion parisienne des eaux pluviales. Atelier Parisien d'Urbanisme; 2015.

Bertrand V. Récupération d'eau de pluie, les bonnes pratiques [Internet]. XPair. 2011 [cité 16 août 2017]. Disponible sur: https://conseils.xpair.com/actualite_experts/recuperation-eau-pluie-bonnes-pratiques.htm

Bigorgne, Julien. 2015. « Les îlots de chaleur urbains à Paris, Cahier #1. » Atelier Parisien d'Urbanisme.

———. s.d. « Les îlots de chaleur urbains à Paris, Cahier #4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris. » Atelier Parisien d'Urbanisme.

Bigorgne J, Mangold A. Les îlots de chaleur urbains à Paris - Cahier #2 - simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements. Atelier Parisien d'Urbanisme; 2014.

Bigorgne, Julien et Sébastien Bridier. 2017. « Les îlots de chaleur urbains de l'agglomération parisienne. Cahier #3 : brises thermiques. » Atelier Parisien d'Urbanisme.

Bogaert, Jan. 2017. « Cours d'écologie urbaine - 2ème année de Bachelier. » Beaumont F. Paris Promeneurs - Ecole élémentaire rue Gustave Rouanet [Internet]. 2017 [cité 15 août 2017]. Disponible sur: <http://www.paris-promeneurs.com/Architecture-moderne/Ecole-elementaire-rue-Gustave>

Conseil de Paris. 2012. « Plan Climat Énergie de Paris. » Décembre 2012.

Giguère, Mélissa. 2009. « Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains - Revue de littérature. » Institut National de Santé Publique du Québec.

Grand Lyon Communauté Urbaine. 2011. « Dossier d'enquête publique - réaménagement de l'île Garibaldi. » Grand Lyon Communauté Urbaine.

Hanappe F. Atlas de l'espace public parisien - 18ème arrondissement. Atelier Parisien d'Urbanisme; 2017.

Hanappe F. Les lieux singuliers de l'espace public à Paris, une stratégie de la petite échelle - Accompagnement de la stratégie Paris piéton. Atelier Parisien d'Urbanisme; 2017.

Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile de France. 2016. « Chaleur en ville. » Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile de France.

Mairie de Paris. 2011. « Plan Biodiversité de Paris - Programme d'actions pour préserver et enrichir la biodiversité à Paris. »

Moreau E, Bouvier B. Les quartiers parisiens de la politique de la ville - Contrat de ville 2015-2020 - Principales données de l'Observatoire des quartiers prioritaires. Atelier Parisien d'Urbanisme; 2017.

Observatoire Régional des Effets du Changement Climatique Rhône-Alpes. 2015. « Fiche initiative : Caractérisation d'îlots de chaleur urbains et humidification de chaussée à Lyon. » Observatoire Régional des Effets du Changement Climatique Rhône-Alpes.

Ponsar, Luce. 2016. « Adaptation au changement climatique et « Ilot de Chaleur Urbain » Territoire du Grand Lyon. » Métropole Grand Lyon - PCET.

SPL Lyon Part-Dieu. 2017. « Réunion de restitution des ateliers de concertation espaces publics. » SPL Lyon Part-Dieu.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2015. « World Urbanization Prospects: The 2014 Revision. » United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

Ville de Montréal - Arrondissement de Verdun. 2013. « Classification et superficie des parcs. » Ville de Montréal - Arrondissement de Verdun.

Ville de Neuchâtel. Les revêtements perméables - Conseils pour la réalisation et l'entretien. 2004.

Enregistrements vidéo

CEREMA. 2016. La nature en ville comme élément de confort climatique. s.l.:s.n. <http://blogs.grandlyon.com/plan-climat/tag/ilot-de-chaleur/>.

Livres

Alberti, Marina. 2008. *Advances in urban ecology. Integrating Humans and Ecological Processes in Urban Ecosystems*. Seattle, Washington, USA: Springer US.

Benson, Harris. 2009. *Physique - Tome 1 : Mécanique*, 4ème édition. s.l.: De Boeck Université.

Campbell, Neil A. 2012. *Biologie*, 9ème édition. s.l.: Pearson.

Gaston, Kevin J, dir. 2010. *UrbanEcology. Ecological Reviews*. s.l.: Cambridge University Press.

McDonnell, Mark J., Amy K. Hahs et Jürgen H. Breuste. 2009. *Ecology of Cities and Towns. A Comparative Approach*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Pages Web

Actu-Environnement. 2015. « Conférence des Parties (COP) - Définition. » https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/conference_des_parties_cop.php4.

Agence Parisienne du Climat. 2017. « Une forêt en ville pour lutter contre l'îlot de chaleur urbain. » Agence Parisienne du Climat. 14 mars. <http://www.apc-paris.com/actualite/foret-ville-pour-lutter-contre-lilot-chaleur-urbain>.

APUR, Ville de Paris, Conseil Général 92, Conseil Général 93, Conseil Général 94, BSPP, DGFIP, RATP, ESRI et InterAtlas. 2017. « Arcopole. » 8 août. http://carto.apur.org:8080/ibdppc_envi/client/client.jsp#app=ccde&fcc5-selectedIndex=1&1f87-selectedIndex=0&99ce-selectedIndex=0&13c3-selectedIndex=4.

« Brossard - Ville de Brossard- Environnement. » 2017. 27 juin. <http://www.ville.brossard.qc.ca/services-citoyens/Environnement/Environnement/Air-changements-climatiques.aspx>.

Centrale des Marchés. 2017. « Marché public : Travaux de modernisation et végétalisation de la toiture terrasse de l'école élémentaire - 7 rue Gustave Rouanet 75018 Paris -. » Juillet. <https://centraledesmarches.com/marches-publics/Ville-de-Paris-Mairie-de-Paris-Travaux-de-modernisation-et-vegetalisation-de-la-toiture-terrasse-de-l-ecole-elementaire-7-rue-Gustave-Rouanet-75018-Paris/2888204>.

Climate Challenge. 2013. « Le bilan radiatif de la Terre. » <http://www.climatechallenge.be/fr/des-infos-en-mots-et-en-images/le-changement-climatique/leffet-de-serre/leffet-de-serre-naturel/le-bilan-radiatif-de-la-terre.aspx>.

Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain. 2017. « Fonctionnement du réseau de chaleur - CPCU. » 26 juin. <http://www.cpcu.fr/Le-reseau-de-chaleur/LE-FONCTIONNEMENT>.

Conférence des Nations Unies sur les Changements Climatiques. 2016. « Les enjeux de la COP22 - La COP22 à Marrakech : la COP de l'action. » COP22. <http://cop22.ma/fr/>.

Croquet. 2003. « Convention de Rio, 1992. » <http://droitnature.free.fr/Shtml/ConvRio.shtml>.

Direction de l'information légale et administrative - Gouvernement Français. 2009. « Politique climatique : le dispositif français - Dossier d'actualité. » Text. Décembre. <http://www.vie-publique.fr/actualite/dossier/copenhague-2009-cop15/politique-climatique-dispositif-francais.html>.

Fondation d'entreprise ALCEN pour la connaissance des énergies. 2017. « Grenelle Environnement. » Connaissance des Énergies. Mai. <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/grenelle-environnement>.

Gouvernement Français. 2017. « La COP 21. » Gouvernement.fr. Mai. <http://www.gouvernement.fr/action/la-cop-21>.

Habert. 2017. « Bilan radiatif de la Terre - Rayonnement infrarouge émis. » 12 juin. <http://eduscol.education.fr/obter/appliped/climat/pistpeda/bilan-rad/bilan5.htm>.

« I.G.O. - Données Québec. » 2017. 27 juin. <http://geoegl.msp.gouv.qc.ca/gouvouvert/>.

Institut National de Santé Publique Québec. 2017a. « Culti-Vert - Mon Climat, Ma Santé. » 27 juin. <http://www.monclimatmasante.qc.ca/culti-vert.aspx>.

———. 2017b. « Effet de terre - Mon Climat, Ma Santé. » 27 juin. <http://www.monclimatmasante.qc.ca/effet-de-terre-.aspx>.

———. 2017c. « Les écoles d'abord - Mon Climat, Ma Santé. » 27 juin. <http://www.monclimatmasante.qc.ca/les-ecoles-d-abord.aspx>.

———. 2017d. « Place fraîcheur à l'école Calixa-Lavallée - Mon Climat, Ma Santé. » 27 juin. <http://www.monclimatmasante.qc.ca/place-fra%C3%AE-cheur-%C3%A0-1%E2%80%99%C3%A9cole-calixa-lavall%C3%A9e.aspx>.

———. 2017e. « Projets de lutte aux îlots de chaleur INSPQ. » 27 juin. <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1BObT7oS1PLK79f-TZJ4D9EGZyOP8>.

———. 2017f. « Verdissement du Pole d'Entraide - Mon Climat, Ma Santé. » 27 juin. <http://www.monclimatmasante.qc.ca/verdissement-du-pole-d%E2%80%99entraide.aspx>.

———. 2017g. « Verdun fait sa fraîche - Mon Climat, Ma Santé. » 27 juin. <http://www.monclimatmasante.qc.ca/verdun-fait-sa-fraiche.aspx>.

Lehoucq, Roland. 2016. « Le rayonnement thermique et les longueurs d'onde. » Futura. novembre. <http://www.futura-sciences.com/sante/dossiers/biologie-vision-viennent-superpouvoirs-superman-1566/page/2/>.

MeteoConsult. 2017. « Froid ou très froid : température réelle ou ressentie ? » La Chaîne Météo. 27 juin. <http://actualite.lachainemeteo.com/actualite-meteo/2015-02-08-13h28/froid-ou-tres-froid---temperature-reelle-ou-ressentie---27422.php>.

Métropole de Lyon. 2017. « Lyon Rue Garibaldi. » 27 juin. <https://www.grandlyon.com/projets/lyon-rue-garibaldi.html>.

Métropole du Grand Lyon - PCET. 2016. « Coup de fraîcheur sur la rue Garibaldi ! » mai. <http://blogs.grandlyon.com/plan-climat/2016/05/19/coup-de-fraicheur-sur-la-rue-garibaldi/>.

Nature-Action Québec. 2011. « Un vent de fraîcheur pour Verdun. » Nature-Action Québec. 28 avril. <http://nature-action.qc.ca/site/PACC-verdun>.

United Nations Framework Convention on Climate Change. 2014. « La passerelle climat de Doha. » http://unfccc.int/portal_francoophone/la_passerelle_climat_de_doha/items/7469.php.

Ville de Lyon. 2017. « Accueil. » Lyon Part-Dieu. 27 juin. <http://www.lyon-partdieu.com/>.

Ville de Montréal - Arrondissement de Verdun. 2013. « Fin des travaux du parc Philippe-Zotique-Millette - Une nouvelle “ Place fraîcheur ” dans l'arrondissement de Verdun. » octobre. http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=8637,96339573&_dad=portal&_schema=PORTAL&id=7851&ret=/pls/portal/url/page/arrond_ver_fr/rep_annonces/rep_actualites/coll_actualites.

Ville de Paris. 2017. « Le Plan Biodiversité 2011-2015. » Mai. <https://www.paris.fr/services-et-infos-pratiques/environnement-et-espaces-verts/nature-et-espaces-verts/biodiversite-66>.

Wang, Annie et Bonny Ho. 2013. « Characterizing Potential Urban Street Canyons in Downtown Vancouver - Methodology. » <http://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob370/students/class13/bho/methodology.html>.

Rapports

Oke, Tim R. 2006. « Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. » 81. Instruments and observing methods. s.l.: s.n.

Thèses

Colombert, Morgane. 2008. « Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. » Thèse de doctorat - Génie urbain, Paris: Université Paris-Est.

Kotchi, Serge Olivier. 2004. « Détection du stress hydrique par thermographie infrarouge. Application à la culture de la pomme de terre. » Québec, Canada: Université Laval. <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/22198/22198.html>.

Figure 1.1 :Schéma de la dynamique des rayonnements du Soleil arrivant sur la Terre. Les unités sont en $W.m^{-2}$. Ce schéma montre le bilan radiatif global annuel moyen de la Terre (Kiehl et Trenberth 1997)

Figure 1.2 : Schéma représentant les différences d'émission ascendante de surface de grande longueur d'onde (Elu) entre la ville et la campagne(Source personnelle).

Figure 1.3 : Illustration des flux de chaleur en ville le jour et du lien entre l'énergie et les échanges en eau à la surface urbaine (Grimmond et Oke dans Bogaert 2017)

Figure 1.4.1: Moyenne des radiations et des flux de chaleur le jour pour deux sites ruraux (R1 et R2), un site périurbain (S1) et deux sites urbains (S1 et S2) pendant l'étude BUBBLE (Christen et Vogt dans Parlow 2011)

Figure 1.4.2 : Moyenne des radiations et des flux de chaleur la nuit pour deux sites ruraux (R1 et R2), un site périurbain (S1) et deux sites urbains (S1 et S2) pendant l'étude BUBBLE (Christen et Vogt dans Parlow 2011)

Figure 1.5 : *Figure 1.5 : Schéma de la répartition du rayonnement net en flux de chaleur. Le sol est considéré comme une surface sans épaisseur, comme surface de référence. a) environnement rural le jour, b) environnement rural la nuit, c) environnement urbain le jour, c) environnement urbain la nuit d) (source personnelle)*

Figure 1.6.1: dynamique annuelle des différences de températures journalières (Christen et Vogt dans Parlow 2011)

Figure 1.6.2 : dynamique sur 24h avec des valeurs annuelles moyennes (Christen et Vogt dans Parlow 2011)

Figure 1.6.3 : Thermo-isoplèthes des différences de température de l'air entre la zone urbaine et la zone rurale dans la station de Basel. Les lignes de contour indiquent des différences de température positives ou négatives entre le site urbain et le site rural avec les variations journalières et annuelles (Christen et Vogt dans Parlow 2011)

Figure 1.7 : Variations diurnes et annuelles du flux de chaleur sensible

moyennées sur 9 ans (Parlow 2011).

Figure 1.8 : Effet d'un arbre sur son environnement (Bigorgne 2015)

Figure 1.9 : Température de l'air à 2 m du sol le 10 août 2003 à 6h du matin (4h UTC) (Bigorgne 2015).

Figure 1.10 : Schéma des familles thermiques de matériaux (d'après Bigorgne non publié)

Figure 1.10 : Contribution à l'échauffement atmosphérique de différents types de revêtement (Bigorgne non publié)

Figure 1.11 : Représentation schématique de l'atmosphère urbaine illustrant une classification en plusieurs couches de l'atmosphère urbaine (Oke 2006)

Figure 1.12 : illustration du concept de facteur de vue du ciel (SVF) (Bigorgne 2015)

Figure 1.13. : Relations entre le gradient urbain et l'îlot de chaleur urbain basé sur les zones climatiques urbaines (Oke dans Alberti 2008)

Figure 2.1. : Illustration du phénomène d'ICU (Maillard et al. 2014)

Figure 2.2. : Carte thermique de l'îlot de chaleur urbain de Paris à l'échelle 1:200 000 (Bigorgne, non publié)

Figure 2.3. : Carte thermique et réseaux de chaleur à l'échelle 1:20 000 (Bigorgne, non publié)

Figure 2.4. : Identification des lieux principaux d'expression de l'îlot de chaleur urbain. à l'échelle 1:20 000. (Bigorgne, non publié)

Figure 2.5. : Carte de localisation des ICIU analysés à l'échelle 1:20 000. (Bigorgne, non publié)

Figure 2.6 : Orthophotoplan du square Jean XXIII au pied de la Cathédrale Notre-Dame, 4ème arrondissement de Paris. Echelle : 1:1000. (APUR et al. 2017)

Figure 2.7 : Carte thermique du square Jean XXIII au pied de la Cathédrale Notre-Dame, 4ème arrondissement de Paris. Echelle : 1:1000. (Bigorgne, non publié)

Figure 2.8 : Carte thermique de l'impasse Leibniz 18ème arrondissement de Paris. 48°53'47.60"N; 2°19'55.93"E. Echelle 1:1000. (Bigorgne, non publié)

Figure 2.9 : Vue en orthophotoplan de l'impasse Leibniz, 18ème arrondissement de Paris. 48°53'47.60"N; 2°19'55.93"E. Echelle 1:1000. (APUR et al. 2017)

Figure 2.10 : Carte thermique de la résidence Damrémont, 18ème arrondissement de Paris. 48°53'47.01"N; 2°20'25.62"E. Echelle 1:1000. (Bigorgne, non publié)

Figure 2.11 : Vue en orthophotoplan de la résidence Damrémont, 18ème arrondissement de Paris. 48°53'47.01"N; 2°20'25.62"E. Echelle 1:1000. (APUR et al. 2017)

Figure 2.12. : Carte thermique de l'Avenue de la Grande Armée, 16-17ème arrondissements de Paris. 48°52'33.13"N; 2°17'18.25"E. Echelle 1:1000. (Bigorgne, non publié)

Figure 2.13 : Vue en orthophotoplan de l'Avenue de la Grande Armée, 16-17ème arrondissements de Paris. 48°52'33.13"N; 2°17'18.25"E. Echelle 1:1000. (APUR et al. 2017)

Figure 2.14 : Carte thermique de la Place du Trocadéro, 16ème arrondissement de Paris. 48°51'45.63"N; 2°17'15.58"E. Echelle 1:1000. (Bigorgne, non publié)

Figure 2.15 : Vue en orthophotoplan de la Place du Trocadéro, 16ème arrondissement de Paris. 48°51'45.63"N; 2°17'15.58"E. Echelle 1:1000. (APUR et al. 2017)

Figure 2.16 : Carte thermique du Champ de Mars, 7ème arrondissement de Paris. 48°51'20.68"N; 2°17'54.67"E. Echelle 1:1000. (Bigorgne, non publié)

Figure 2.17 : Vue en orthophotoplan du Champ de Mars, 7ème arrondissement de Paris. 48°51'20.68"N; 2°17'54.67"E. Echelle 1:1000. (APUR et al. 2017)

Figure 2.18 : Carte thermique de la Place de la Bastille, 11ème arrondissement de Paris. 48°51'11.38"N; 2°22'08.92"E. Echelle 1:1000. (Bigorgne, non publié)

Figure 2.19 : Vue en orthophotoplan de la Place de la Bastille, 11ème arrondissement de Paris. 48°51'11.38"N; 2°22'08.92"E. Echelle 1:1000. (APUR et al. 2017)

Figure 2.20 : Carte thermique de la Place d'Italie, 13ème arrondissement de Paris. 48°49'53.06"N; 2°21'20.17"E. Echelle 1:1000. (Bigorgne, non publié)

Figure 2.21: Vue en orthophotoplan de la Place d'Italie, 13ème arrondissement de Paris. 48°49'53.06"N; 2°21'20.17"E. Echelle 1:1000. (APUR et al. 2017)

Figure 3.1. : Illustration de l'îlot de chaleur sur le Grand Lyon (Julita Dudek dans Ponsar 2016)

Figure 3.2. : Projet de rénovation du quartier de la Part-Dieu (Ville de Lyon 2017)

Figure 3.3 : Cartographie de l'ICU de la ZAC de la Part-Dieu à Lyon (Maillard et al. 2014)

Figure 3.4: Plan d'installation des buses et des capteurs dans les rues de la Buire et Faynel Duclos (Maillard et al. 2014)

Figure 3.5.: Mesures de la température de la chaussée et de la température ressentie lors de l'expérience, rue de la Buire (Ponsar 2016)

Figure 3.6 : Schéma permettant de visualiser l'insolation des façades est et ouest de la rue Garibaldi en été à 15h (Grand Lyon Communauté Urbaine

2011)

Figure 3.7 : Schéma de description du système mis en place pour le recueillement des eaux rue Garibaldi (Ponsar 2016)

Figure 3.8: Modélisation des ombres portées et héliodons au droit de la rue Garibaldi au niveau de la Part-Dieu (Grand Lyon Communauté Urbaine 2011)

Figure 3.9 : Dispositifs de mesures de températures dans la rue Garibaldi (Ponsar 2016)

Figure 3.10 : Carte présentant l'îlot de chaleur de Montréal (« I.G.O. - Données Québec » 2017)

Figure 3.11. : Carte présentant les projets réalisés (Institut National de Santé Publique Québec 2017e)

Figure 3.12 : Vue de l'aménagement du parc Philippe-Zotique-Milette (Ville de Montréal - Arrondissement de Verdun 2013b)

Figure 3.13 : Vues aériennes du site de l'école Calixa-Lavallée en 2008 (à gauche) et en 2013 (à droite) et évaluation de l'évolution de la température d'après la méthode d'imagerie thermique satellitaire (Levasseur 2014)

Figure 3.14 : Projet d'aménagement du parc Aumont (Levasseur 2014)

Figure 3.15 : Vue aérienne de l'aménagement du toit du Palais des Congrès à l'été 2011 (Levasseur 2014)

Figure 3.16 : Vue aérienne du site des Habitations Jeanne-Mance en 2008 (à gauche) et en 2013 (à droite) et évaluation de l'évolution de la température d'après la méthode d'imagerie thermique satellitaire (Levasseur 2014)

Figure 4.1 : Localisation du site à l'échelle de la France (Google Earth. 2017)

Figure 4.2 : Localisation du site à l'échelle de l'Ile de France (Google Earth. 2017)

Figure 4.3 : Localisation du site à l'échelle de la ville de Paris (Google Earth. 2017)

Figure 4.4: Localisation du site à l'échelle du 18ème arrondissement de Paris (Google Earth. 2017)

Figure 4.5: Carte géologique du Nord de Paris (APUR et al. 2017)

Figure 4.6: Carte de l'épaisseur des bancs gypseux dans les Marnes et Caillasses et dans le Calcaire de Saint-Ouen associé aux zones de dissolution du gypse antéludien (Lamé dans Atelier Parisien d'Urbanisme 2015)

Figure 4.8: Carte des nappes phréatiques de Paris (Lamé dans Atelier Parisien d'Urbanisme 2015)

Figure 4.9: Carte de la végétation biodiversité de Paris (Hanappe 2017b)

Figure 4.10: Carte des périodes de construction des bâtiments parisiens (Atelier Parisien d'Urbanisme 2009)

Figure 4.11: Carte des centralités du quartier des Grandes Carrières (Hanappe 2017a)

Figure 4.12 : Mise en évidence de la présence d'un ICIU sur le site. Echelle 1:1500 (APUR. non publié)

Figure 4.13 : Vue de la morphologie d'un HBM square Marcel Sambat, 18ème arrondissement de Paris. 48°53'55.13"N; 2°20'17.98"E. Echelle 1:2000. (APUR et al. 2017)

Figure 4.14: Vue de la morphologie d'un HBM boulevard Mortier, 20ème arrondissement de Paris. 48°52'07.00"N; 2°24'35.82"E. Echelle 1:2000. (APUR et al. 2017)

Figure 4.15 : Vue de la morphologie de l'îlot de la Cité Condorcet, 9ème arrondissement de Paris. 48°52'46.06"N; 2°20'40.59"E. Echelle 1:2000.

(APUR et al .2017)

Figure 4.16 : Vue sur la forme réduisant la présence d'angles droits dans la résidence Damrémont (source personnelle)

Figure 4.17 : Vue sur les ferronneries dans la résidence Damrémont (source personnelle)

Figure 4.18 : Vue sur un élément de décor de la résidence Damrémont (source personnelle)

Figure 4.19 : Vue sur un élément de décor de la résidence Damrémont (source personnelle)

Figure 4.20: Vue sur la voie ferrée de la Petite Ceinture. Photo du 21 août 2016 (source personnelle)

Figure 4.21 : détail du sol de la rue G. Rouanet. Photo du 21 août 2017 (source personnelle)

Figure 4.22 : Vue sur la rue G. Rouanet; Photo du 21 août 2017 (source personnelle)

Figure 4.23 : Vue sur la rue Belliard. Photo du 21 août 2016 (source personnelle)

Figure 4.24: Vue sur une cour de la résidence Damrémont. Photo du 21 août 2016 (source personnelle)

Figure 4.25 : Détail de la composition de la surface du toit de la résidence Damrémont. Photo du 11 juillet 2017 (B. Cazenave)

Figure 4.26: Vue sur la cour de l'école Gustave Rouanet (APUR et al .2017)

Figure 4.27 : Carte des brises thermiques à proximité du site d'étude (Bigorgne et Bridier 2017)Figure 4.27 : Carte des brises thermiques à proximité du site d'étude (Bigorgne et Bridier 2017)

Figure 4.32 : Vue du toit de la résidence Damrémont. Photo du 11 juillet 2017 (B. Cazenave)

Figure 4.33 :Vue du sous-sol de la résidence Damrémont avec figuration de la citerne Photo du 11 juillet 2017 (B. Cazenave)

Figure 4.34 : Principe de la récupération de l'eau de toiture en citerne souterraine (Bertrand 2011)

Figure 4.35: Illustration du principe de la lame d'eau à sec (Atelier Parisien d'Urbanisme 2015)

Figure 4.36: Illustration du principe de la lame d'eau en eau (Atelier Parisien d'Urbanisme 2015)

Figure 4.37: Tableau comparatif des effets rafraîchissants de différentes espèces d'arbres (Bigorgne et Mangold 2014)

Figure 4.38: Pavés engazonnés, rue Cardinet, ZAC de Batignolles, Paris 17eme (Atelier Parisien d'Urbanisme 2015)

Figure 4.39: Coupe de principe pour les revêtements perméables (Ville de Neuchâtel 2004)

Figure 4.40: Coupe de principe pour les revêtements perméables de type pavés et dalles alvéolées(Ville de Neuchâtel 2004)

Figure 4.41: Exemple de motif de revêtement perméable (Permeaway 2016)

Tableau 1.1 : Albédos selon les types de surfaces (Parlow 2011)

Tableau 1.2 : Tableau des familles thermiques de matériaux (d'après Bi-gorgne non publié)

Tableau 3.1 : réductions thermiques moyennes et maximales en °C pour les quatre sites évalués et les quatre épisodes d'ICU significatifs par la technique de modélisation à haute résolution (Levasseur 2014)

Tableau 3.2: Tableau comparatif des actions menées à Lyon et à Montréal pour la lutte contre les îlots de chaleur

Tableau 1.1 : Albédos selon les types de surfaces (Parlow 2011)

Tableau 3.1 : Tableau récapitulatif des projets évalués (Levasseur 2014)

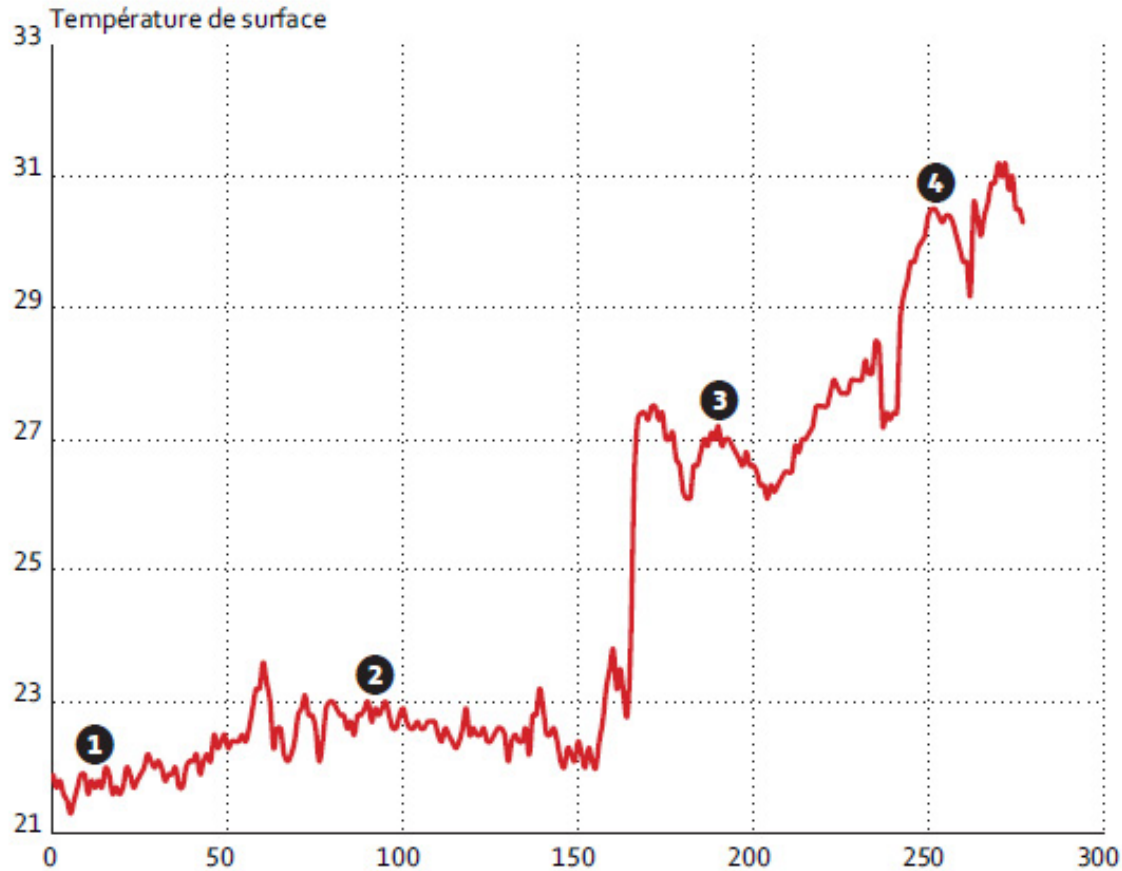
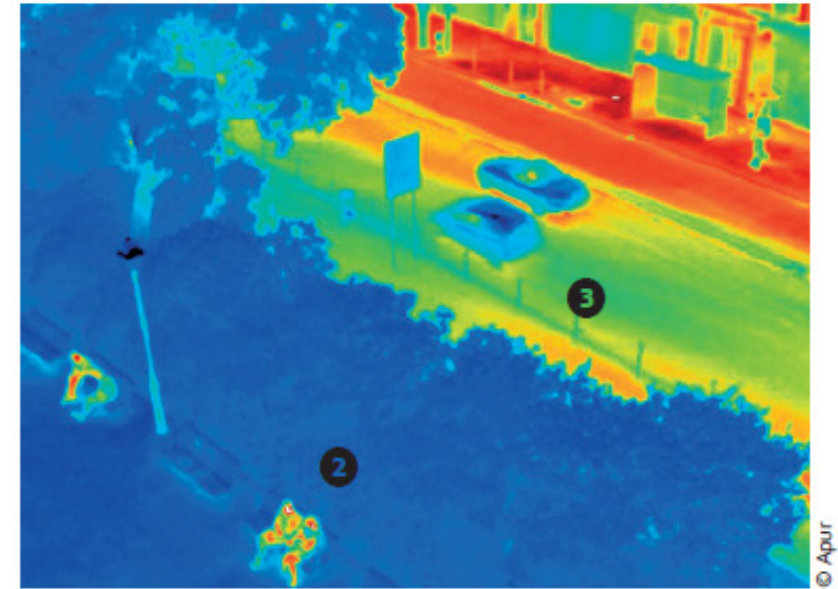
Tableau 3.1 : réductions thermiques moyennes et maximales en °C pour les quatre sites évalués et les quatre épisodes d'ICU significatifs par la technique de modélisation à haute résolution (Levasseur 2014)

Tableau 3.2: Tableau comparatif des actions menées à Lyon et à Montréal pour la lutte contre les îlots de chaleur

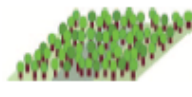
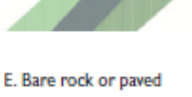
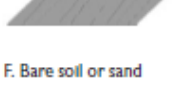
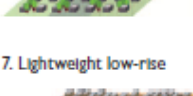
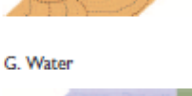
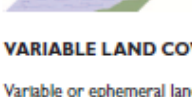
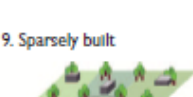
Annexe 1 : Comparaison du comportement de différents matériaux lors d'une fin de journée d'été (Bigorgne non publié)

Différences de températures de surfaces d'une série de matériaux en fin de journée, au square St-Jacques et la rue de Rivoli (Paris 4^e)

- ❶ Stabilisé (22 °C)
- ❷ arbres (22,5 °C)
- ❸ chaussée en bitume (27 °C)
- ❹ trottoir granit (32 °C)



Annexe 2 : Définitions abrégées des zones de climat local (LCZ). Les LCZ 1 à 9 correspondent aux zones de climat urbain de Oke en 2004 ((Stewart et Oke 2012))

Built types	Definition	Land cover types	Definition
1. Compact high-rise 	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	A. Dense trees 	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
2. Compact midrise 	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	B. Scattered trees 	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
3. Compact low-rise 	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	C. Bush, scrub 	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
4. Open high-rise 	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	D. Low plants 	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
5. Open midrise 	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	E. Bare rock or paved 	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
6. Open low-rise 	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	F. Bare soil or sand 	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
7. Lightweight low-rise 	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	G. Water 	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
8. Large low-rise 	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	VARIABLE LAND COVER PROPERTIES	
9. Sparsely built 	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	b. bare trees	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
10. Heavy industry 	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	s. snow cover	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		d. dry ground	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		w. wet ground	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Annexe 3 : Carte thermique fournie par AERODATA le 10 août 2017. Cette carte présente l'îlot de chaleur urbain de la ville de Paris à minuit dans la nuit du 18 au 19 août 2015. Echelle : 1: 25 000.

