



**HAL**  
open science

# Comment assurer le transfert de connaissances du paysagiste vers les maîtrises d'ouvrages pour orienter le projet d'aménagement paysager vers une meilleure capacité de lutte contre le phénomène de surchauffe urbaine ?

Mélanie Carron Dit L'Avocat

## ► To cite this version:

Mélanie Carron Dit L'Avocat. Comment assurer le transfert de connaissances du paysagiste vers les maîtrises d'ouvrages pour orienter le projet d'aménagement paysager vers une meilleure capacité de lutte contre le phénomène de surchauffe urbaine ?. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-03039786

**HAL Id: dumas-03039786**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03039786>**

Submitted on 4 Dec 2020

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

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



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

**AGROCAMPUS OUEST**

**CFR Angers**  **CFR Rennes**

<p>Année universitaire : 2019 – 2020</p> <p>Spécialité :</p> <p><i>Paysage</i></p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) :</p> <p><i>Paysage : Opérationnalité Projet</i></p>	<p><b>Mémoire de fin d'études</b></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement</p> <p><input type="checkbox"/> de master de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
--	---

## Comment assurer le transfert de connaissances du paysagiste vers les maîtrises d'ouvrages pour orienter le projet d'aménagement paysager vers une meilleure capacité de lutte contre le phénomène de surchauffe urbaine ?

Par : Mélanie CARRON dit l'AVOCAT

**Soutenu à Angers, le 12/11/2020**

**Devant le jury composé de :**

Président : Nathalie Carcaud

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Maître de stage : Sylvain Morin

Enseignant référent : Adeline Bulot

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



## REMERCIEMENTS

Je tiens tout premièrement à remercier Sylvain Morin, paysagiste associé de l'Atelier Altern qui a encadré ce stage et ses nombreux virages surprenants dus aux circonstances de cette année 2020. Je le remercie aussi pour avoir mis en place un stage à la croisée entre des missions de conceptions sur des projets variés et la réflexion sur les potentialités d'un aménagement paysager à lutter contre la surchauffe urbaine. La proposition d'un travail de diagnostic sur un des projets en cours à l'Atelier Altern en fin de stage a été riche de sens. Enfin, sa disponibilité a permis de nombreux échanges, à l'agence mais aussi en visioconférence, toujours très constructifs grâce à ses conseils éclairés de concepteur et d'interlocuteur avec les maîtrises d'ouvrage.

Merci à l'équipe de l'Atelier Altern, Houda Aarab et Coline Pelle pour leurs conseils avisés et leurs partages d'expériences multiples dans le milieu de l'architecture, du paysage, de l'urbanisme. Coline, merci pour avoir cadré avec disponibilité et bienveillance nos collaborations sur divers projets durant le temps de travail en confinement.

Je remercie Adeline Bulot pour l'encadrement et relecture fine de ce mémoire ainsi que pour sa confiance et son suivi tout au long de ce stage.

Merci à mes amis et mes proches, pour vos conseils, votre présence et la joie légère qui caractérise votre souffle. Merci Isa et Manu pour la courte parenthèse oxygénante lors de la rédaction de ce mémoire. François et Florence, merci pour la gentillesse de la porte ouverte sur votre jardin.

Un merci répété mais essentiel à mes parents, pour leur duo qui m'a offert un soutien à toute épreuve.

Je remercie Pierre qui, une fois de plus, a été mon premier supporter.

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS**

**BET** : Bureau d'Études Techniques

**CED** : Cooling Effect Distancy / Portée du rafraîchissement

**CEI** : Cooling Effect Intensity / Intensité du rafraîchissement

**ET** : Évapotranspiration

**GES** : Gaz à effet de serre

**FVC** : Facteur de Vue de Ciel

**HT** : Heat Index / Index de chaleur

**IBM** : Indicateur Biométéorologique

**ICU** : Îlot de Chaleur Urbain

**IFU** : Îlot de Fraîcheur Urbain

**IRE** : Indice de refroidissement éolien

**OAP** : Orientation d'Aménagement et de Programmation

**PDD** : Predicted Percentage Dissatisfied / Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits

**PET** : Physiological Equivalent Temperature / Température Physiologique Équivalente

**PLUi** : Plan Local d'Urbanisme Intercommunal

**PMV** : Predicted Mean Vote / Vote Moyen Prédit

**PT**: Perceived Temperature / Température perçue

**UTCI** : Universal Thermal Climate Index / Indice Universel du Climat Thermique

**WBGT** : Wet Bulb Globe Temperature

## GLOSSAIRE

**Béton drainant** : béton de ciment à structure ouverte permettant l'infiltration de l'eau de pluie qui s'utilise en dallage et chaussée. La mise en place de pores, représentant 15 à 25% du volume, permettant l'absorption et le drainage des eaux pluviales et de ruissellement est permise par la combinaison de ciment avec un granulats grossier.

**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 / Flux convectif** : quantité de chaleur échangée, sans changement de phase (ou d'état) physique. Elle est qualifiée de sensible car l'échange de chaleur modifie la température du corps et la variation peut être ressentie ou mesurée.

**Cycle de l'eau** : phénomène naturel qui représente le parcours entre les grands réservoirs d'eau liquide, solide ou de vapeur d'eau sur Terre : les océans, l'atmosphère, les lacs, les cours d'eau, les nappes d'eaux souterraines et les glaciers.

**Éclairement énergétique / irradiance** : quantifie la puissance d'un rayonnement électromagnétique frappant une unité de surface perpendiculaire à sa direction. C'est la densité surfacique du flux énergétique arrivant au point considéré de la surface ( $W/m^2$ )

**Espèces commensales de l'homme** : qualifie les espèces qui se nourrissent des déchets produits par l'homme.

**Évapotranspiration** : phénomène combiné de la transpiration végétale et de l'évaporation. Dans le cas de l'ET végétale, l'évaporation est le passage de l'eau liquide contenue dans le sol, les surfaces de la plante, en vapeur d'eau dans l'air sous l'action du soleil. La transpiration est quant à elle, le mouvement d'eau impliqué par la photosynthèse végétale.

**Flux de chaleur anthropique** : désigne la chaleur produite par les activités humaines (transport, chauffage/climatisation, activités industrielles).

**Saison végétative** : partie de l'année pendant laquelle les conditions météorologiques locales permettent une croissance normale des plantes. Chaque plante a une saison de croissance spécifique qui dépend de son adaptation génétique. En outre, plus la distance au pôle est faible et plus l'altitude est élevée, plus la saison de croissance est tardive.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vincent VAN GOGH, 1889. Paysage avec des oliviers

Figure 2 : BILAN RADIATIF DE LA TERRE - Les différentes énergies reçues et émises par la terre, par unité de temps et de surface ( $W/m^2$ ). On en déduit l'énergie piégée par effet de serre ( Source : Association Océan Polaire, 2018)

Figure 3 : Comparaison de l'équilibre thermique typique d'un espace rural et d'un espace urbain. Les valeurs sont en  $kWh/m^2/jour$ . (Source : Carron, 2020 d'après; Fahed 2018 et Ringenbach 2004 ; Shepherd, 2005)

Figure 4 : Cycle de stockage et déstockage de l'énergie solaire par les revêtements de sols (Source : Carron, 2020 d'après A.P.U.R., 2017)

Figure 5 : Bilan thermique du corps (Source : Pommier et al., 2014 dans CEREMA, Grand Lyon, 2017)

Figure 6 : Degrés de PET et confort thermique (Source : CEREMA, Grand Lyon, 2017)

Figure 7 : Degrés d'UTCI en d et confort thermique (Source : CEREMA, Grand Lyon, 2017)

Figure 8 : Communication commerciale pour un thermogrymètre et Degrés WBGT et risques de coup de chaleur (Source : Trotec, 2020)

Figure 9 : Profil de rue type pour différent ratios H/W (Source : Ali-Toudert, Mayer, 2006)

Figure 10 : FVC et piégéage radiatif (D'après : Tzu-Ping et al., 2010 dans (Athamena, 2013) et A.P.U.R., 2017)

Figure 11 : La géométrie d'un canyon urbain peut être décrite par son orientation, ratio H/W et FVC (Source : Mantazeri dans Boeters et al., 2012)

Figure 12 : Confort thermique selon les vitesses des brises thermiques pour un canyon où la  $T^{\circ}air = 30^{\circ}C$ ,  $T^{\circ}$  de l'environnement radiatif  $= 40^{\circ}C$  et Humidité = 30% (Source : A.P.U.R., 2017b)

Figure 13 : Effet négatif de l'ajout de climatiseurs côté cour sur le rafraîchissement des appartements traversants. (Source : A.P.U.R., 2012)

Figure 14 : Modes de réduction de la surchauffe par le tryptique Eau / Matériaux / Végétation (Source : Carron, 2020)

Figure 15 : Limiter la surchauffe par la rénovation ou la reconstruction de matériaux à albédo fort générateurs de chaleur.

Figure 16 : Albédo de bétons drainants de différentes porosités ( Source : ZHANG et al., 2015)

Figure 17 : Propriétés essentielles d'un matériau frais générateur d'IFU (Source : Carron, 2020)

Figure 18 : Le phénomène journalier de la photosynthèse comme moteur de l'évapotranspiration (Source : Carron, 2020)

Figure 19 : Caractéristiques de trois grandes familles d'arbres d'alignement rencontrées sur les voies parisiennes. (Source : (A.P.U.R., 2014)

Figure 20 : Part de l'ombrage et évapotranspiration dans le rafraîchissement assuré par les arbres (Source : Carron, 2020)

Figure 21 : L'apport des différents éléments végétalisés urbains à la gestion des eaux de ruissellement. (Source : Feix et al., 2017)

Figure 22 : Typologie de noues (Source : (SYMASOL, 2016)

Figure 23 : Technique et exemple de tranchée (Source : SYMASOL, 2016)

Figure 24 : Typologie de bassins à ciel ouvert ( Source : SYMASOL, 2016)

Figure 25 : Typologie des jardins de pluie ( Source : Bruxelles Environnement, 2020)

Figure 26 : Temperatures d'air à 2m mesurées à l'ombre d'un arbre (SHADED 2m) et au-dessus d'asphalte pour un espace ouvert ( OPEN 2m) (Source : Golden et al., 2007)

Figure 27 : Synthèse graphique des résultats de l'étude du rafraîchissement opéré par des espaces végétalisés (Source : Aram et al., 2019)

Figure 28 : Affaiblissement de l'arbre en ville (Source : Gillig et al., 2008)

Figure 29 : Présentation en ligne du projet Lisière d'une Tierce Forêt par Fieldwork. (Source : <http://www.fieldwork.archi>)

Figure 30 : Logo des modes de réduction de la chaleur accumulée par diminution du rayonnement et applications (Source : Carron, 2020)

Figure 31 : Infographie vulgarisant les avantages d'un arbre en ville (Source : leparisien.fr)

Figure 32 : Identification des zones critiques d'irradiation solaire dans un îlot à la géométrie simple (Source : Carron, 2020)

Figure 33 : Zones ensoleillées d'un cœur d'îlot à chaque heure au 21 juin (Source : Carron, 2020)

Figure 34 : Identification d'un oasis urbain (Source : A.D.E.M.E., 2018)

Figure 35 : Time bomb, 2016. Collage par YoungUnknowns. A partir de deux photographies du 20ème siècle : Promotion du quartier résidentiel "Sikornik", Gliwice, Pologne (photo par S. Ciesielska) et document du Royal Mail Publicity (photo par Robert Shackleton).

Tableau 1 : Albédo de différentes villes dans le monde. (Source : Euroméditerranée, 2010)

Tableau 2 : Variation des taux de surface ombragées dans un canyon en mai-août selon les orientations et ratio H/W (Source : Andreou, Axarli, 2012)



## LISTE DES ANNEXES

**Annexe n°1** : Frise de valeur d'albédo de différents matériaux d'aménagements urbains ou paysagers (Source : Carron, 2020 d'après 1(Grand Lyon -Communauté urbaine, 2010) ; 2 (Takebayashi, Moriyama, 2012) ; 3 (ICARE/ALTO ingénierie pour le compte de l'ADEME, 2012); 4(Santamouris et al., 2012) ; 5(Hendel et al., 2015) ; 6(Dobos, 2015) ; 7(Yaghoobian et al., 2010)

**Annexe n°2** : Frise classant les matériaux du plus chaud (asphalte) au plus frais (herbe) (Source : Carron, 2020 d'après 1-(Takebayashi, Moriyama, 2012) et 2-( Mullaney, Lucke, 2014 dans Qin, 2015)

**Annexe n°3**: Impact du renouvellement des revêtements des cheminements du parc Flisvos à Athènes avec un matériau plus clair sur les pics estivaux de température d'air (Source : Carron, 2020 d'après Santamouris et al., 2012)

**Annexe n°4** : Réduction de température opérée par un un arbre isolé ou un groupement d'arbres dans un contexte minéral ou engazonné (Source : Carron, 2020 d'après 1-(Petralli et al., 2020); 2- (Gillner et al., 2015) ; 3-(Napoli et al., 2016) ;-4 -(Petralli et al., 2009); 5-(Golden et al., 2007) ; 6- (Petralli et al., 2020) 7-) - (Taha et al., 1989) ; 8 -(Renaud et al., 2011) )

**Annexe n°5** : Extrait du rapport S.E.S.A.M.E, Services écosystémiques rendus par les arbres, modulés selon l'essence (Source : C.E.R.E.M.A Est, 2019)

**Annexe n°6** :Article de Traits Urbains n°110 sur le projet *Tierce Forêt à Aubervilliers* (Source : Traits urbains, 2020)

**Annexe n°7** : Compilation de résultats d'études de mesures et de modélisations de l'intensité et la portée de rafraîchissement de parcs et végétation urbaine (Source : McDonald et al., 2016)

**Annexe n°8** : Stratégies de conception qui permettent de maximiser le rafraîchissement par les parcs et les arbres (Source : Vaz et al., 2019)

## CONTEXTE DU MEMOIRE

Le stage de fin d'étude réalisé avec l'Atelier Altern a nourri la réflexion menée dans ce mémoire. Cela fut un stage de six mois concluant mes études d'ingénieur paysagiste, au sein d'une agence qui développe depuis plusieurs années une approche du territoire par le paysage, dans une démarche pluridisciplinaire et collaborative à la recherche de solutions ingénieuses, esthétiques et écologiques.

Les projets qui ont jalonné ce stage par contribution directe ou par suivi du travail des collaborateurs de l'agence ont été des opérations d'espaces publics ou d'espaces venant en accompagnement de logements et d'équipements à des échelles variées. Je peux notamment citer parmi les projets auxquels j'ai pu participer plus directement la requalification des abords d'une basilique à Clermont-Ferrand, des roof-tops et patio d'une grande entreprise sur le plateau de Saclay et enfin des abords de logements ou jardins en cœur d'îlot dans le cadre de renouvellement urbain à Mérignac, Pantin ou encore Paris 15<sup>ème</sup>.

L'Atelier Altern, par son développement de nouvelles manières de concevoir des projets porteurs d'ambitions écologiques, dans une écriture paysagère et urbaine renouvelée a constitué une structure propice à la réflexion de la limitation de la surchauffe par les projets paysagers urbains. Bien que morcelé par les différents épisodes de l'année 2020, ce stage a été riche de la complémentarité des deux missions principales : la capitalisation des initiatives et approches écologiques du paysage et du projet urbain sur la question des ICU mais aussi la participation aux études urbaines et projets de maîtrise d'œuvre de l'agence cités plus haut.

## AVANT-PROPOS

Le regard que pose le botaniste sur le tableau de Van Gogh *Paysage avec des Oliviers* dans (Drénou, 2018) est apparu comme un avant-propos pertinent pour ce mémoire de fin d'étude.

Les composants de ce paysage sont unis par un graphisme ondulatoire évoque le mouvement de l'eau : le sol se soulève comme la houle, les oliviers évoquent l'architecture d'un réseau d'hydrique.

L'auteur du livre, *Un botaniste au musée* ne peut s'empêcher de lier cette œuvre de Van Gogh au concept scientifique du «Continuum Sol-Plante-Atmosphère ». Ce continuum est défini comme le transport de l'eau du sol vers l'atmosphère à travers la plante. (Lambers et al., 2008). L'eau liquide contenue entre les particules du sol captée par les racines transite à travers la plante via le xylème avant de rejoindre l'atmosphère en sortant par les stomates de la feuille.

Ce concept, lié étroitement au cycle de l'eau, assoit le rôle du végétal dans la climatique globale. Le paysagiste, à sa mesure, a un rôle à jouer dans la microclimatique des villes, notamment par son jeu de composition avec le triptyque Matériaux / Eau / Végétation.

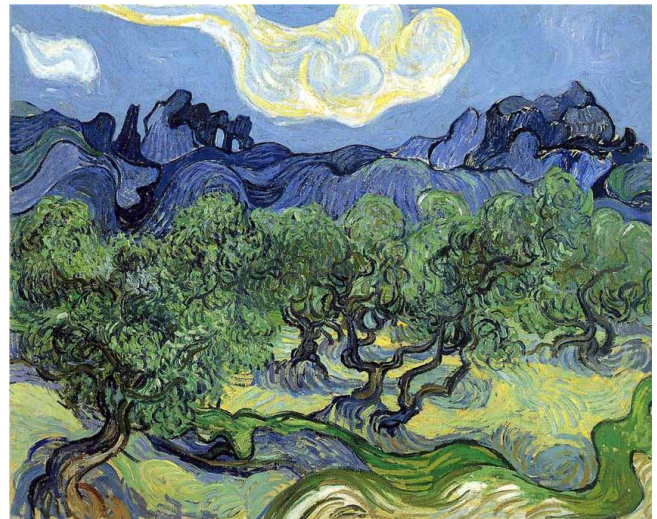


Figure 1 : Vincent VAN GOGH, 1889. *Paysage avec des oliviers*  
Huile sur toile, 72,5 x 92 cm  
New York, Museum of Modern Art

# SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>3</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b>	<b>4</b>
<b>GLOSSAIRE</b>	<b>5</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>6</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b>	<b>8</b>
<b>CONTEXTE DU MEMOIRE</b>	<b>9</b>
<b>AVANT-PROPOS</b>	<b>10</b>
<b>SOMMAIRE</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>1. LE MÉCANISME DE MODIFICATIONS DU CLIMAT PAR LES VILLES ET SES CONSÉQUENCES</b>	<b>4</b>
1.1. <i>Fondamentaux explicatifs de la surchauffe urbaine</i>	4
1.1.1 Bilan radiatif terrestre	4
1.1.2 Bilan de flux de chaleur	6
1.1.3 Accumulation, échanges et restitution de chaleur	6
1.2. <i>Les espaces urbains modifient le climat et génèrent des surchauffes entraînant le phénomène plus élargi d'ICU</i>	8
1.2.1 Modification du climat par les villes	8
1.2.2 Le phénomène d'ICU	9
1.2.3 La surchauffe des espaces urbains influe sur le confort thermique	10
1.3. <i>Variabilité de la surchauffe et des ICU selon les formes bâties</i>	13
1.3.1– La profondeur des canyons urbains limite la quantité d'énergie solaire reçue	13
1.3.2 – Effet antagoniste nocturne des voies étroites	14
1.3.3 Les différences de géométrie de canyon modifient les brises et le confort thermiques	15
1.4. <i>Conséquences des ICU</i>	16
1.4.1 Conséquences sur la faune et la flore	16
1.4.2 Conséquences sur la santé humaine	17
1.4.3 La lutte contre la surchauffe urbaine par les climatiseurs génère de la chaleur anthropique	17
<b>2. LE TRIPTYQUE MATÉRIAUX / EAU/ VÉGÉTATION CONFÈRE AUX ESPACES PAYSAGERS URBAINS UN RÔLE D'IFU</b>	<b>19</b>
2.1 <i>Les matériaux</i>	19
2.1.1 Revêtements réfléchissants	20
2.1.2 Revêtements perméables	21
2.1.3 Revêtements et inertie	22
2.2 <i>Potentiel rafraîchissant de la végétation</i>	23
2.2.1 La végétation prend part dans le cycle de l'eau	23
2.2.2 Pouvoir rafraîchissant de la végétation	23

2.2.3	L'Arbre, forme végétale optimale en termes de rafraîchissement	24
2.3	<i>La végétalisation et bâti</i>	26
2.3.1	Toitures végétales	26
2.3.2	Murs végétaux	27
2.3.3	Cours végétalisées sources de confort thermique pour les habitations	27
2.3.4	Voies urbaines végétalisées	27
2.4	<i>L'eau</i>	28
2.4.1	Effet rafraîchissant des points d'eau	28
2.4.2	Gestion alternative des eau pluviales	29
2.5	<i>La création d'îlot de fraîcheur</i>	32
2.5.1	Intensité du rafraîchissement des parcs	32
2.5.2	La portée rafraichissante des parcs	34
2.5.3	Un rafraîchissement très contextuel	35
<b>3</b>	<b>LE TRANSFERT DE CONNAISSANCES DU PAYSAGISTE AU MAÎTRE D'OUVRAGE</b>	<b>38</b>
3.1	<i>À mesure que se dégrade la situation climatique, l'intégration des stratégies de réduction de la surchauffe urbaine émerge</i>	38
3.1.1	Urbanisme	38
3.1.2	Les maîtrises d'ouvrages	39
3.1.3	Le paysagiste	39
3.2	<i>La force d'un argumentaire paysager favorisant les IFU</i>	40
3.2.1	Synthèse des concepts essentiels	40
3.2.2	Données et exemples appropriés	41
3.2.2	Adaptation au site	42
3.3	<i>Couplage judicieux de l'argumentaire en faveur des IFU avec d'autres problématiques d'aménagement</i>	44
3.3.1	L'oasis thermique constitue une parenthèse urbaine	44
3.3.2	Possibles adéquations avec les ambiances, les usages, les capacités d'accueil de la biodiversité	45
3.3.3	Mise en avant des plus-values financières	46
	<b>CONCLUSION</b>	<b>47</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>48</b>
	<b>SITOGRAFIE</b>	<b>55</b>
	<b>ANNEXES</b>	<b>56</b>
	<b>POSTFACE</b>	<b>71</b>

## INTRODUCTION

L'espace urbain des prochaines décennies concentre les défis d'une population de plus en plus citadine, qui doit pouvoir bénéficier d'un espace viable dans un milieu urbain qui par ses propriétés amplifie les hausses de températures du réchauffement climatique. En 2019, ce sont 55 % de la population qui vit en ville à l'échelle mondiale et 80 % en France. (La banque mondiale, 2020)

Cette urbanisation et densification des villes peuvent être jugées essentielles pour la préservation des zones naturelles. En effet, il sera plus complexe de limiter la pression que celles-ci subiront pour faire face aux autres besoins humains que limiter l'étalement de l'habitat sur ces dernières.

Pour répondre à la problématique de la nécessaire densification urbaine dans un contexte de réchauffement climatique, l'intégration dans le maillage urbain d'espaces paysagers végétalisés est lourde d'enjeux. Non seulement, cela réduit la scission entre vie urbaine et lien à la nature mais aussi ces espaces, lorsqu'ils intègrent une conception réfléchie pour limiter la surchauffe lors des situations critiques estivales, peuvent constituer de véritables îlots de fraîcheur. L'amélioration du confort thermique de ces espaces peut s'entendre jusqu'aux espaces urbains et logements adjacents.

Apparentable à celui des trames vertes, la mise en place d'un réseau d'îlots de fraîcheur, connectés par des voies urbaines sous l'ombrage d'arbres adéquat permettrait la circulation d'un air rafraîchi et donc d'un abaissement des températures dans une ville aux formes bâties adaptées. Ainsi, c'est à une échelle élargie que les aménagements des plus petits espaces paysagers urbains (cours d'immeubles, cœur d'îlot, placette, etc.) visant la fraîcheur réduit le phénomène d'îlot de chaleur caractérisé par le décalage des températures nocturnes ville-campagne.

L'identification des zones urbaines critiques en termes de climatologie urbaine est largement documentée. En revanche, le paysagiste qui souhaite s'informer sur les manières dont son dessin et choix de matérialité dans le cadre de la conception de petits espaces paysagers urbains peut se trouver démuné. Ne disposant que d'un premier niveau d'information sur les moyens de lutte contre le phénomène de surchauffe, il sera plus difficile de convaincre les maîtrises d'ouvrages, décideurs du projet.

### **Comment assurer le transfert de connaissances du paysagiste vers les maîtrises d'ouvrage pour orienter le projet d'aménagement paysager vers une meilleure capacité de lutte contre le phénomène de surchauffe urbaine ?**

Dans un premier temps, il s'agit d'identifier le mécanisme de modification du climat par les villes, les processus physiques impliqués et les conséquences engendrées. Dans un second temps, la présentation du triptyque matériaux/eau/végétation constitutifs des îlots de fraîcheur permettra d'expliquer leur potentialité de réduction de la surchauffe estivale mais aussi, quand il est possible, de présenter des données chiffrées notamment concernant l'abattement de températures engendré.

Enfin, le transfert de connaissances du paysagiste au maître d'ouvrage, qui oriente par ses choix finaux et financiers, est primordial afin de pouvoir défendre ces ambitions d'aménagements qui permettent la mise en place d'îlots de fraîcheur.

# 1. LE MÉCANISME DE MODIFICATIONS DU CLIMAT PAR LES VILLES ET SES CONSÉQUENCES

## 1.1. Fondamentaux explicatifs de la surchauffe urbaine

Afin de comprendre les processus de la surchauffe urbaine, il est crucial de comprendre les comportements physiques qui expliquent la surchauffe à l'échelle élargie et donc la formation des îlots de chaleur. La manière dont sont gérés les flux de chaleurs arrivant sur la surface terrestre est modélisée par le **bilan radiatif terrestre**. Leur répartition par la suite dans le milieu, urbain dans le cas étudié, est caractérisée par le **bilan de flux de chaleur**. Il est aussi essentiel de comprendre les processus de transfert de la chaleur à l'échelle fine, celui d'un composant à un autre dans l'espace que l'on souhaite aménager.

### 1.1.1 *Bilan radiatif terrestre*

La quantité de radiation solaire retenue par l'environnement est décrite par le bilan radiatif terrestre. C'est la différence entre la radiation solaire arrivant et celle sortant de la Terre. L'unité  $W/m^2$  utilisée ici l'éclairement énergétique solaire ou irradiance.

D'une part, le soleil rayonne à des longueurs d'ondes courtes (*Figure 2, flèches Jaunes-orangées*). En effet, l'énergie émise est d'autant plus importante que le corps est chaud. Plus l'énergie émise est grande, plus la longueur d'onde de ce rayonnement est courte (Lehoucq, 2018). Ainsi, le soleil rayonne une énergie de  $1365 W/m^2$  à une distance moyenne Terre-Soleil. La moyenne quotidienne de l'énergie arrivant sur la partie sommitale de l'atmosphère est seulement de  $341 W/m^2$ . Il faut en effet diviser cette énergie par 4 : seulement la moitié de la Terre est éclairée par le soleil et les rayons sont inclinés par rapport à la surface terrestre (Kandel, Planton, 2013). Enfin, 30 % du rayonnement incident est réfléchi par l'atmosphère. Ce sont donc en moyenne  $239 W/m^2$  qui sont absorbés par la surface et l'atmosphère terrestre (Trenberth et al., 2009 dans Kandel, Planton, 2013). Puis, par filtration par l'atmosphère, le rayonnement solaire arrivant à la surface est de  $160 W/m^2$ .

D'autre part, la surface terrestre en s'échauffant réémet un rayonnement vers l'univers. En effet, toute surface dont la température est supérieure à 0 K émet des ondes électromagnétiques qui forment le rayonnement thermique (Castagnède, Daniel, 2018). La Terre rediffuse donc l'énergie thermique provenant du soleil. Le rayonnement terrestre est plus faible en énergie, il s'exprime donc à une plus grande longueur d'onde qui correspond au domaine des infrarouges (*Figure 2, flèches ocre rouges*).

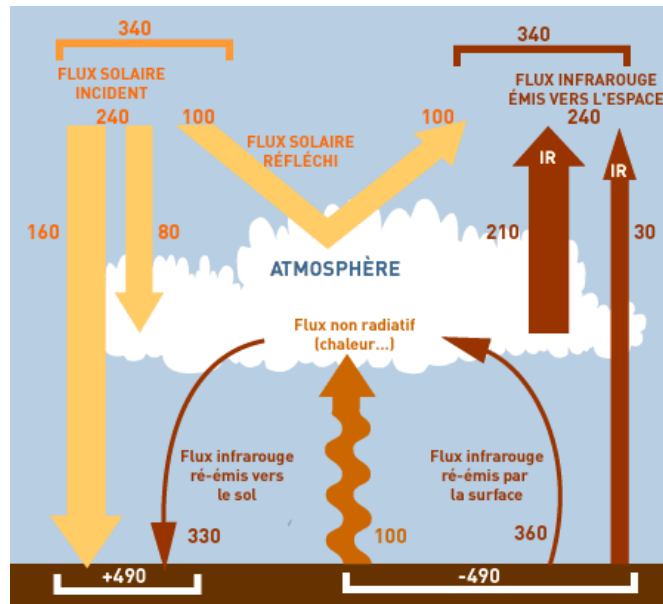


Figure 2 : BILAN RADIATIF DE LA TERRE - Les différentes énergies reçues et émises par la terre, par unité de temps et de surface ( $W/m^2$ ). On en déduit l'énergie piégée par effet de serre ( Source : Association Océan Polaire, 2018)

Le flux d'énergie non-radiatif présenté dans la Figure 2 se décompose à 80 % de l'énergie absorbée par évapotranspiration de l'eau et à 20 % par la convection de l'air à la surface terrestre. La troposphère, soit la couche de l'atmosphère en contact avec la surface, n'est que très faiblement chauffée par les radiations solaires. Elle reçoit la majeure partie de son énergie de la part de la Terre (Daniel, 2003).

Le piégeage de l'énergie entre flux infrarouge réémis par la surface et réémis vers le sol (Cf. Figure 2) correspond à l'effet de serre. Dans la configuration naturelle, les Gaz à Effet de Serre (GES) et les nuages absorbent et réémettent en grande partie le rayonnement émis par la surface vers le sol. Les GES permettent cet effet de serre car ils laissent passer les rayonnements solaires de courte longueur d'onde mais sont presque totalement opaques au rayonnement infrarouge. Grâce à ce phénomène, la température moyenne sur terre est de  $15^{\circ}C$  contre  $-19^{\circ}C$  si nous en étions privés. Ce phénomène naturel et primordial est déséquilibré par les activités humaines. En conséquence, le bilan d'énergie en partie sommitale de l'atmosphère est excédentaire de  $0,9 W/m^2$ . Ce surplus est responsable d'un réchauffement du système terre-atmosphère (Météo France, 2015).

Le bilan radiatif s'écrit (Ringneck, 2004):

$$Q_r = (1 - a)R_g + R_a - R_t \quad (1)$$

Avec :

**$Q_r$**  : bilan radiatif ou flux de rayonnement

**$R_g$**  : rayonnement global. Il s'agit de la somme des rayonnements direct et diffus incidents en courte longueur d'onde (rayonnement solaire)

**$a$**  : albédo, qui caractérise la part du rayonnement solaire réfléchi par une surface. Cette caractérisation du pouvoir réfléchissant d'une surface sera développée plus en détail partie 1.1.3. Si  $aR_g$  est la part de rayonnement réfléchi,  $(1-a)R_g$  est la part absorbée du rayonnement solaire.



**R<sub>a</sub>** : rayonnement atmosphérique propre. Il s'effectue dans les grandes longueurs d'onde (rayonnement thermique, domaine des infrarouges)

**R<sub>t</sub>** : rayonnement terrestre. Émission par la surface de rayonnement de grande longueur d'onde (rayonnement thermique, domaine des infrarouges)

Par la suite, nous verrons que les termes de ce bilan radiatif sont potentiellement affectés par la présence d'une ville.

### 1.1.2 Bilan de flux de chaleur

La répartition de ces radiations dans l'environnement est caractérisée par le bilan de flux de chaleur. À l'échelle d'une ville, il regroupe les différents flux de chaleur qui se manifestent dans cette zone urbaine. Il dépend des caractéristiques propres à la surface ainsi que des gradients de température et d'humidité entre la surface et l'atmosphère. Ces flux sont positifs s'ils sont dirigés vers la surface de référence, donc la ville. À l'inverse, ils sont négatifs s'ils se dirigent hors de la surface de référence.

Le bilan de flux de chaleur à l'échelle de la ville peut donc s'écrire (Fahed, 2018):

$$Q_r + Q_f = Q_h + Q_l + \Delta Q_s + \Delta Q_a \quad (2)$$

Avec :

**Q<sub>r</sub>** : bilan radiatif

**Q<sub>f</sub>** : flux de chaleur anthropique

**Q<sub>h</sub>** : flux convectif

**Q<sub>l</sub>** : flux de chaleur latente

**Q<sub>c</sub>** : flux convectif (chaleur sensible)

**ΔQ<sub>s</sub>** : flux stocké

**ΔQ<sub>a</sub>** : flux advectif (négligé dans le cas des études en milieu urbain)

À noter que le flux advectif correspond à la quantité d'énergie par le mouvement dans le milieu, le plus souvent le vent. Ce flux est souvent négligé dans les études en milieu urbain car sa valeur est relativement faible à l'échelle urbaine (Pigeon et al., 2007 , Eliasson et al., 1999 dans Fahed, 2018).

Pour permettre à un petit espace paysager urbain de constituer un IFU (Îlot de Fraîcheur Urbain), le paysagiste peut par ses choix de conception avoir un impact sur les flux de chaleur sensible, latente ainsi que les flux de chaleur dans le sol et les bâtiments. En modifiant l'albédo général d'un espace, il augmente la quantité de rayonnement réfléchi et agit donc sur le bilan du rayonnement solaire  $Q_r$ . En suggérant des usages et des pratiques, il peut avoir un effet indirect sur l'énergie anthropique, cependant il s'agit d'une autre échelle spatiale d'aménagement que celle qui est traitée ici. C'est-à-dire que cela joue un rôle à une plus large échelle urbaine quand ce mémoire étudie les petits espaces paysagers urbains.

### 1.1.3 Accumulation, échanges et restitution de chaleur

Après avoir évoqué ces principes de balance thermique à l'échelle terrestre mais aussi à l'échelle de la ville, la compréhension de l'accumulation et des transferts de chaleur à une

échelle plus fine est nécessaire. Ces mécanismes permettent la compréhension de la répartition de la chaleur dans les espaces aménagés par le paysagiste.

- D'une part, les variations d'albédo impactent l'énergie absorbée par un matériau mais aussi par un espace donné. En effet, l'albédo caractérise le pouvoir réfléchissant donc l'énergie absorbée par un élément sans soucis d'échelle. Puisqu'il peut caractériser un espace donné, comme une ville, une forêt, un glacier mais aussi un matériau de construction, il rentre en compte comme élément fondamental physique explicatif de la surchauffe urbaine. Plus tard, dans ce mémoire, il sera présenté comme propriété orientant le choix des matériaux de surface pour le paysagiste qui vise la création d'un IFU.

L'albédo désigne le pouvoir réfléchissant d'une surface. C'est la fraction de l'énergie solaire globale réfléchiée par une surface, en fonction de sa couleur mais aussi de sa texture et porosité. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo se rapproche de 1.

- D'autre part, les trois modes de transmissions de chaleur que l'on distingue généralement sont (Castagnède, Daniel, 2018) :

**Conduction thermique** : La conduction est le mode de transmission de la chaleur de deux milieux en contact physique ou encore au sein d'un même solide, si celui-ci comporte deux régions de températures différentes. La conduction a lieu dans les milieux solides sans déplacement de matière : c'est une propagation de proche en proche de l'agitation thermique du chaud vers le froid. La conduction est étudiée principalement pour des solides : dans le cas des fluides liquides ou gazeux la conduction est couplée avec un déplacement de matière, donc de convection.

**Convection thermique** : La transmission de chaleur par convection implique le déplacement d'un fluide gazeux ou liquide. Dans le cas de l'air au contact d'une surface plus chaude, l'air s'échauffe, se dilate et s'élève. Il est remplacé par un air plus froid qui va s'échauffer à son tour et ainsi de suite.

**Rayonnement thermique** : Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre plus froid sans nécessité de support matériel. Le rayonnement thermique est un cas particulier du rayonnement électromagnétique qui diffère uniquement par son origine : la température. Comme il a déjà été dit précédemment, tout corps dont la température est supérieure à 0 K (-273,15°C) rayonne.

Ces trois mécanismes d'échange de chaleur s'appliquent à une portion urbaine qui sera amenée à s'échauffer et à renforcer l'îlot de chaleur. Les surfaces de cet espace vont s'échauffer par rayonnement thermique, échauffer l'air environnant par convection, transmettre la chaleur aux matériaux à leur contact par conduction. Nous traiterons également le rayonnement vers les autres surfaces environnantes par la suite en partie 1.3.2, notamment avec le cas du piégeage radiatif entre matériaux de surface et le bâti.

- Enfin, l'inertie thermique est la capacité d'un matériau à accumuler puis à restituer un flux thermique. Ainsi, plus l'inertie est forte plus le temps d'absorption et de restitution est long. De manière générale, plus un matériau est lourd et épais, plus il est inerte. La chaleur circule donc moins vite à l'intérieur, il met également plus de temps à atteindre une température uniforme. Pour monter en température, il devra recevoir un flux thermique plus important. Une fois chaud, à l'inverse, il mettra tout autant de temps à se refroidir. Les matériaux urbains sont plus inertes, et cela est une des premières raisons de la formation d'ICU (IAU îdF, 2010).

L'inertie thermique dépend de:

**La capacité de conductivité** : soit la capacité à répartir la chaleur dans un matériau.

**La capacité thermique massive** : soit la capacité de réchauffement d'un matériau.

**La densité** : le rapport entre le poids et le volume.

## 1.2. Les espaces urbains modifient le climat et génèrent des surchauffes entraînant le phénomène plus élargi d'ICU

Les villes connaissent une modification de leur climat en comparaison avec les espaces ruraux environnants. Cet écart caractérise le phénomène d'ICU. Ainsi, l'usager des villes devra faire face localement à des situations d'inconfort thermique.

### 1.2.1 Modification du climat par les villes

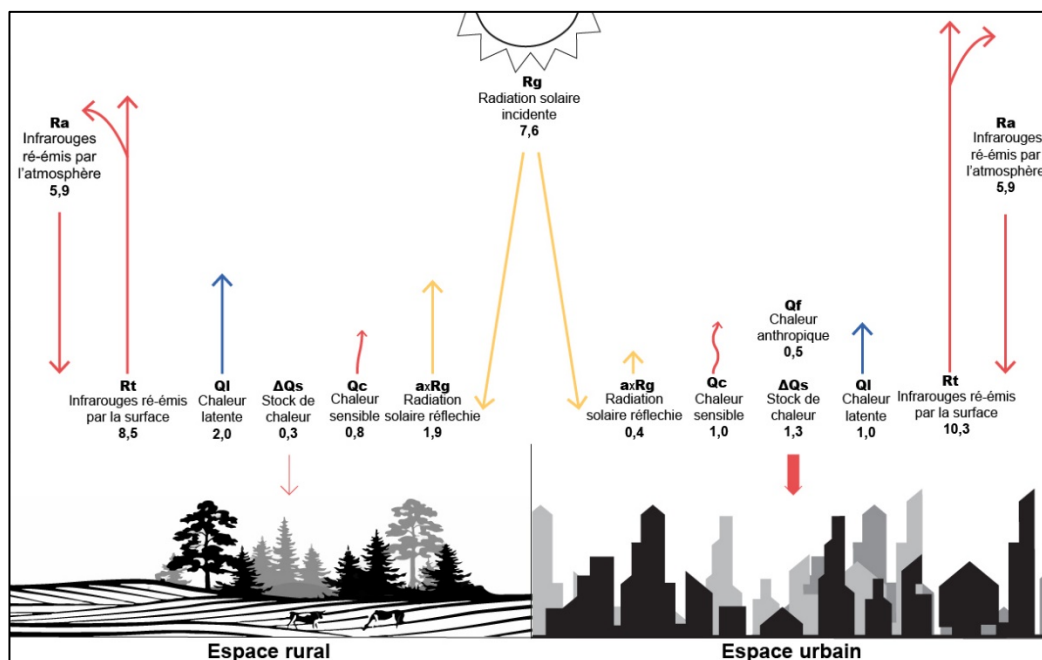


Figure 3 : Comparaison de l'équilibre thermique typique d'un espace rural et d'un espace urbain. Les valeurs sont en kWh/m<sup>2</sup>/jour. (Source : Carron, 2020 d'après; Fahed 2018 et Ringenbach 2004 ; Shepherd, 2005)

Les systèmes ruraux et urbains n'ont pas la même gestion des flux thermiques. La Figure 3 compare les équilibres thermiques entre une ville typique et ses environs ruraux. La ville prise pour référence est Houston, située aux États-Unis. Ces deux espaces n'ont notamment pas le même albédo (Cf. 1.1.3). Il est de 0,25 pour l'espace rural boisé et de 0,05 pour la partie étudiée d'Houston (Shepherd, 2005). A savoir que cet albédo est relativement bas, donc critique en termes de surchauffe urbaine et d'îlot de chaleur.

Il est possible d'expliquer les termes de l'équilibre thermique de la Figure 3 par les équations (1) et (2) tout en négligeant le flux advectif. Cela donne :

$$(1 - a)Rg + Ra - Rt + Qf = Qh + Ql + \Delta Qs \quad (3)$$

Ou bien

$$\Delta Qs = (1 - a)Rg + Ra - Rt + Qf - Qh - Ql \quad (3')$$

Il apparaît donc que la quantité de chaleur absorbée par le système est supérieure quand la chaleur anthropique est plus élevée, que l'albédo est plus faible et que la quantité de chaleur latente est plus faible. Ainsi, les espaces urbains stockent davantage de chaleur, réémettent davantage d'infrarouges mais surtout échauffent sensiblement plus les premières couches de l'air par convection thermique via le flux de chaleur sensible.

Ces deux particularités, échauffement de l'air par les matériaux de surface et stockage de la chaleur, sont en partie responsables respectivement de la surchauffe et du phénomène d'îlot de chaleur. Ces deux phénomènes sont liés mais doivent être distingués par leurs échelles temporelle et spatiale. Ils sont définis dans les deux sous-parties suivantes.

### 1.2.2 Le phénomène d'ICU

L'expression d'ICU désigne le différentiel de température observé entre les milieux urbains et les espaces ruraux environnants. Les écarts de températures des centres urbains sont en moyenne 4°C supérieurs, leurs maximums peuvent atteindre jusqu'à 12°C de plus que les régions limitrophes. L'intensité de l'ICU varie de manière quotidienne et saisonnière, elle est en général plus forte la nuit que le jour (ICARE/ALTO ingénierie pour le compte de l'ADEME, 2012).

Il est la conséquence des apports de chaleurs naturels emmagasinés puis restitués avec un déphasage durant la nuit par les matériaux minéraux plus présents dans l'espace urbain (Cf. Figure 4).

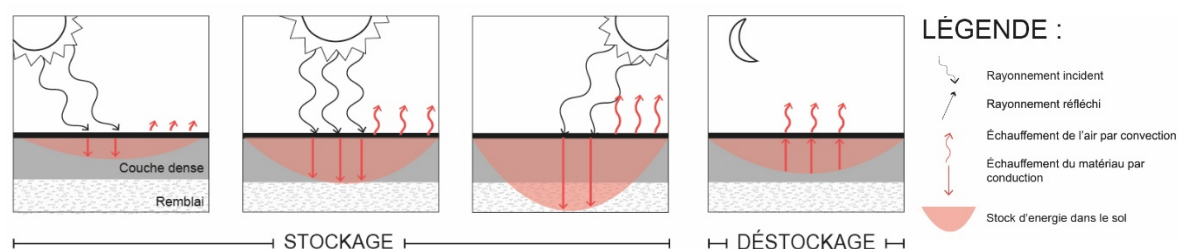


Figure 4 : Cycle de stockage et déstockage de l'énergie solaire par les revêtements de sols (Source : Carron, 2020 d'après A.P.U.R., 2017)

Il s'agit d'un phénomène de large échelle, celle de la ville et de ses environs ruraux. De manière isolée, le petit espace paysager urbain ne peut répondre à l'enjeu de réduction de cette surchauffe à l'échelle d'une ville. Ce sont plutôt des choix d'urbanisme comme par exemple la végétalisation systématique des toitures plates, des campagnes de plantations d'arbres d'alignements, des minimums imposés de surfaces perméables ou végétalisées, etc.

Puisque les villes ont des albédos différents révélateurs de leur densité et matérialité (Cf. Tableau 1) et sont soumises à des conditions climatiques différentes, il est logique que les intensités d'ICU soient variables d'une ville à une autre.

Tableau 1 : Albédo de différentes villes dans le monde. (Source : Euroméditerranée, 2010)

Site	Los Angeles USA	Madison USA	St Louis USA	Hartford USA	Adelaïde Australie	Hamilton USA	Munich Allemagne	Vancouver Canada	Tokyo Japon	Ibadan Nigeria
Albédo	0,20	0,15	0,12	0,19	0,09	0,27	0,16	0,16	0,10	0,12

Un aménagement bien pensé par le concepteur paysagiste permettra davantage d'agir sur le confort thermique ressenti dans cet espace en limitant sa surchauffe. La multiplication de tels aménagements vertueux sur le plan microclimatique impactera par la suite le phénomène d'ICU.

### 1.2.3 La surchauffe des espaces urbains influe sur le confort thermique

La surchauffe d'un espace urbain impacte le ressenti thermique d'un individu. Elle s'exprime dans un environnement urbain minéral et confiné. Elle dépend des paramètres de l'individu (physiologie, habillement, mouvement, transpiration) mais aussi des paramètres physiques relatifs à cet espace urbain. Les plus influents sont le rayonnement solaire, la température des surfaces, la température de l'air, la vitesse du vent et l'humidité de l'air ambiant (Marie et al., 2017). La conception de petits espaces paysagers urbains peut permettre d'améliorer le confort thermique en modifiant localement ces paramètres.

Pour l'étude des performances thermiques, de nombreux indicateurs de confort ont été développés depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle. Ceux-ci ont d'abord été élaborés pour les ambiances thermiques intérieures, donc pour étudier le confort dans un bâtiment. L'environnement extérieur a été caractérisé dans les années 1970 (Walther, Goestchel, 2018)

Les paramètres du confort thermique sont (C.E.R.E.M.A, Grand Lyon, 2017) :

- **La température de l'air** : impacte les échanges convectifs cutanés et respiratoires.
- **La vitesse de l'air** : impacte les échanges cutanés par convection et intensifie l'évaporation à la surface de la peau.
- **Le métabolisme** : la production d'une chaleur interne par le corps permet d'assurer une température de 37°C. Cette température corporelle varie selon la nature de l'activité.
- **L'habillement** : permet l'isolation par rapport à la chaleur extérieure et l'évacuation de la sueur.
- **L'humidité relative de l'air** : plus élevée entraîne plus probablement une sensation de moiteur pour une même température d'air. Cette sensation s'explique par l'impossibilité d'évacuer la transpiration dans un air plus saturé en eau.
- **La température des parois** : en extérieur, la « température de globe noir » mesure la température rayonnante des différentes parois d'un site.

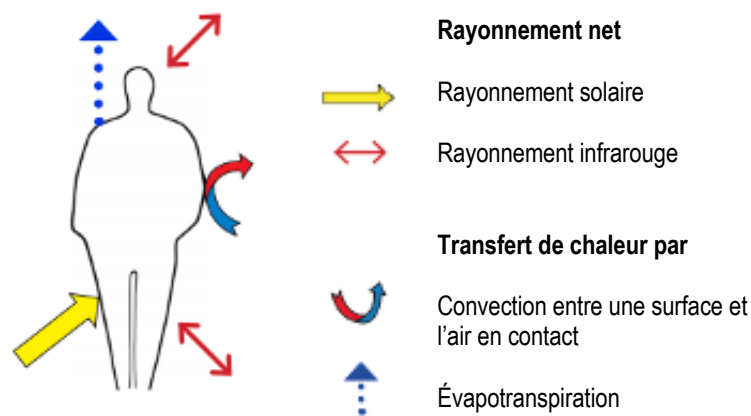


Figure 5 : Bilan thermique du corps (Source : Pommier et al., 2014 dans CEREMA, Grand Lyon, 2017)

Afin de donner une indication au plus proche du confort perçu dans un espace, de nombreux indices, exprimés en degrés, ont été mis en place. Les degrés de PET, UTCI ou encore WBGT sont fréquemment rencontrés dans les études d'évaluation du confort thermique en milieu urbain extérieur.

### PET (Physiological Equivalent Temperature /Température Physiologique Équivalente)

Il s'agit d'un des indices de confort les plus récents. Il se base sur le bilan thermique humain. (Cf. Figure 5). Il se définit comme la température de l'air pour laquelle le bilan thermique du corps est égal aux températures internes du corps et de la peau. Contrairement aux Humidex et PMV, décrits par la suite il est basé sur un bilan physiologique et est donc indépendant du ressenti individuel.

Valeurs PET en C°	Perception thermique ressentis par un individu
>41	très chaud
35-41	chaud
29-35	chaud modéré
23-29	légèrement chaud
18-23	confortable
13-18	légèrement frais
8-13	froid modéré
4-8	froid
< 4	très froid

Figure 6 : Degrés de PET et confort thermique (Source : CEREMA, Grand Lyon, 2017)

### UTCI (Universal Thermal Climate Index / Indice Universel du Climat Thermique)

Cet indice a été développé pour pallier les faiblesses des autres indices. Ainsi, il corrige la température de l'air pour estimer une température ressentie en fonction de l'humidité de l'air, du vent et de la température radiative (Pinson, 2016).

Échelle UTCI (°)	Niveau de stress
au-dessus de +46	Stress thermique extrême
+38 à +46	Stress thermique très élevé
+32 à +38	Stress thermique élevé
+26 à +32	Stress thermique modéré
+9 à +26	Pas de stress thermique

Figure 7 : Degrés d'UTCI en d et confort thermique (Source : CEREMA, Grand Lyon, 2017)

L'UTCI est déterminé par (Fahed, 2018):

- La température de l'air
- La vitesse du vent.
- La pression de vapeur d'eau.
- La température moyenne radiante.
- Le niveau de métabolisme.
- L'isolation des vêtements

### WBGT (Wet Bulb Globe Température /Température au thermomètre-globe mouillée)

Cet indice de confort thermique intègre la température de l'air sec, la température de globe noir qui décrit le rayonnement en plus de l'humidité relative pour évaluer la charge de chaleur à l'air libre. Il est utilisé par l'armée des USA pour déterminer si les conditions extérieures permettent d'effectuer certains exercices physiques ou encore par les centres sportifs pour prévenir des coups de chaleur à l'effort. Contrairement aux indices UTCI et PET qui doivent être déterminés par le calcul, le WBGT peut être déterminé avec des stations de mesures ou des Thermohygromètre (Cf. Figure 8).

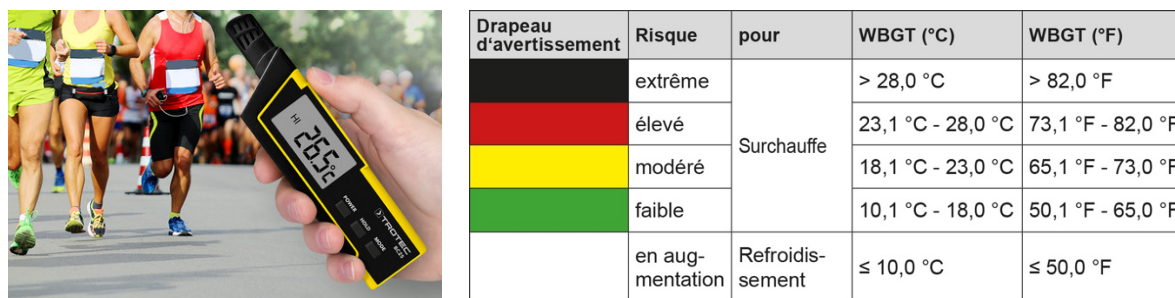


Figure 8 : Communication commerciale pour un thermohygromètre et Degrés WBGT et risques de coup de chaleur (Source : Trotec, 2020)

Les autres principaux indicateurs de confort thermique pour l'extérieur sont (Pinson, 2016) :

- **HT (Heat Index)** : combine la température ambiante et l'humidité relative de l'air. Il donne un niveau d'inconfort dû à la température et à une humidité élevée. Il donne différents niveaux d'alertes allant de la fatigue, coup de soleil, crampes musculaires, épuisement physique, coup de chaleur, extrême danger stress thermique.
- **Humidex ou Indice d'humidité** : est utilisé depuis 1965 et permet d'indiquer de quelle manière le temps chaud et humide est perçu par la moyenne des habitants. Cet indice est en quelque sorte le HT combiné à la variation subjective de la perception de confort thermique chez les individus.
- **Windchill / IRE (Indice de refroidissement éolien)** : est défini comme la température fictive ressentie par le corps dans des conditions de température faibles et de vent plus ou moins fort. L'objectif principal est la détermination de la modulation de sensation de froid par le vent dans le cas de très faibles températures extérieures. Il n'est donc pas adapté pour décrire le phénomène d'inconfort lié à la surchauffe urbaine.
- **PT (Predicted Temperature)** : qualifie le confort ressenti par une personne normale, marchant dans un milieu extérieur. L'environnement de référence est caractérisé par plusieurs paramètres dont les principaux sont la température de l'air, la température radiante moyenne (rayonnement solaire direct, diffus et infrarouge), la vitesse du vent et l'émissivité de la peau et des vêtements (Staiger et al., 1997 dans Pinson, 2016).
- **PMV (Predicted mean vote)** : permet d'évaluer le confort thermique en calculant le vote moyen de sensation thermique d'un groupe important de personnes. Généralement, cet indice est couplé au PDD (Predicted Percentage Dissatisfied ou Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits). Cet indice révèle qu'aucune situation thermique ne peut satisfaire la totalité des individus. En effet, même dans les conditions les plus favorables, il subsiste 4 % d'insatisfait.
- **IBM (Indicateur Biométéorologiques)** : est un indice français qui a été mis en place pour faire aux phénomènes caniculaires. Il est établi à partir des seuils d'alertes météorologique départementaux et des données quotidiennes de mortalité. Les villes étudiées pour établir cet indicateur sont très variées en termes de variable climatiques.

En revanche, ces indicateurs ne sont pas vraiment adaptés pour décrire les situations de confort thermique des petits espaces paysagers urbains. Par exemple, l'Humidex prend en compte le fait que quand l'humidité est grande, la sensation d'inconfort liée à la température est exacerbée. Toutefois, en France, les vagues de chaleur rencontrées sont plutôt des vagues de chaleur sèches (Pinson, 2016).

### 1.3. Variabilité de la surchauffe et des ICU selon les formes bâties

Certains centres-villes sont plus chauds que les autres durant la nuit. Des recherches ont établi une corrélation nette entre les hausses des températures nocturnes urbaines en comparaison avec la campagne environnante et la configuration de la ville. Une ville avec un maillage urbain structuré à l'instar des villes nord-américaines, emmagasine plus de chaleur que les villes « chaotiques » comme les villes plus anciennes telle que Londres. Une forme urbaine ordonnée piège la chaleur par ses rues droites et perpendiculaires dont les immeubles se renvoient la chaleur émise par ceux d'en face (Sobstyl et al., 2018).

Pour comprendre plus en détail ces variations d'intensité d'une ville à l'autre, il est capital de saisir l'impact des formes bâties.

#### 1.3.1– *La profondeur des canyons urbains limite la quantité d'énergie solaire reçue*

La rue canyon est la forme la plus élémentaire du tissu urbain. Il s'agit d'une rue bordée d'immeubles de manière quasi-ininterrompue dont la hauteur est au moins deux fois supérieure à la largeur de la rue (Izard, 1999 dans Athamena, 2013). Un canyon urbain est défini par trois paramètres principaux : la hauteur du bâti (H), la largeur (W) et la longueur (L). Un canyon peut donc être caractérisé par son ratio H/W.

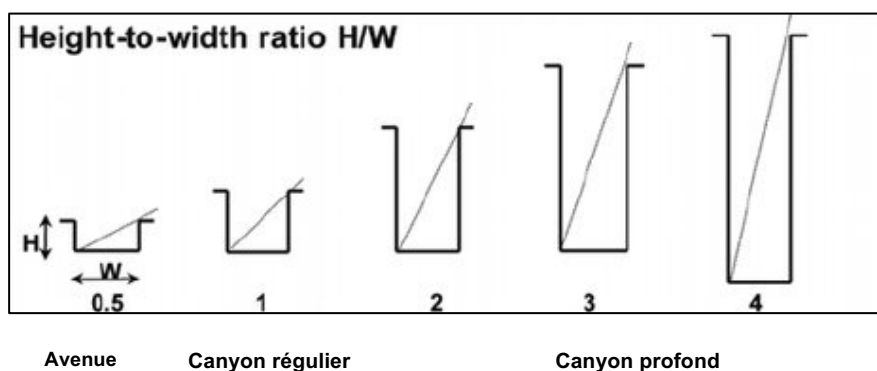


Figure 9 : Profil de rue type pour différents ratios H/W (Source : Ali-Toudert, Mayer, 2006)

Il apparaît donc de manière évidente que le ratio H/W affecte considérablement la quantité de rayonnement solaire perçue (Cf. Figure 9). En effet, des études expérimentales montrent que sur des rues canyons présentant différents ratios H/W ont montré une réduction d'absorption de l'énergie solaire incidente de 27% à 13 % lorsque le ratio H/W passe de 0,5 à 2 en comparaison avec un espace ouvert (Aida, 1982 dans Athamena, 2013). De même, les pics de température de surfaces verticales des bâtiments sont de 53°C pour un ratio H/W de 0,5 alors qu'il ne dépasse pas 46°C lorsque ce ratio est de 2 (Bourbia et Awbi, 2004 dans Athamena, 2013).



Ainsi, en limitant l'apport d'énergie par rayonnement solaire, une rue ayant un ratio H/W élevé limite l'échauffement en journée.

Il faut noter que selon l'orientation des rues, pour un même ratio H/W, le taux d'ombrage ne sera pas le même. Les modélisations de pourcentage d'ombrage en Mai-Août pour différentes orientations et profondeurs de voies obtenues par Andreou, Axarli, 2012 sont décrits dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Variation des taux de surface ombragées dans un canyon en mai-août selon les orientations et ratio H/W  
(Source : Andreou, Axarli, 2012)

H/W	Orientation		
	E.W	N.S	Oblique ( Nw.Se ou Se.Nw)
0,6	20-25%	60%	40-50%
3	65-80%	90%	85-90%

### 1.3.2 – Effet antagoniste nocturne des voies étroites

La morphologie des canyons profonds avec des immeubles hauts et compacts évoquée dans la partie précédente se révèle critique pour évacuer durant la nuit la chaleur accumulée en journée. Les rayonnements infrarouges sont retenus entre les surfaces du bâti et des rues, cela constitue le phénomène de piégeage radiatif (Cf. Figure 10).

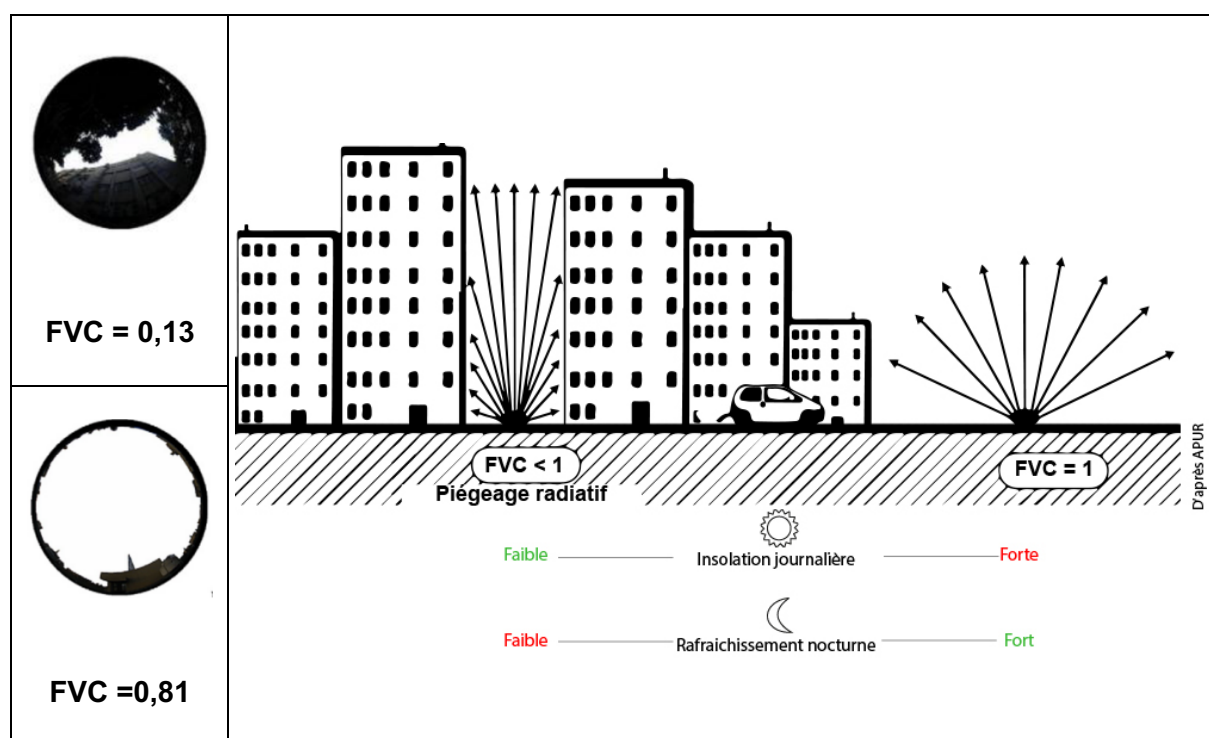


Figure 10 : FVC et piégeage radiatif (D'après : Tzu-Ping et al., 2010 dans (Athamena, 2013) et A.P.U.R., 2017)

Le ratio H/W a un rapport étroit avec le Facteur de Vue de Ciel (FVC). Ce facteur mesure l'angle solide sous lequel le ciel est vu depuis un point de l'espace urbain. Lorsque celui-ci est égal à 1, la vue du ciel est dépourvue de toute obstruction et les températures de l'air sont par conséquent très proches des valeurs météorologiques. En revanche, un SVF égal à 0 signifie

que la vue du ciel est totalement obstruée et que les températures seront ainsi fortement influencées par le contexte urbain (Athamena, 2013).

Ainsi, la géométrie urbaine mesurée par le ratio H/W ou le FVC a un impact antagoniste sur la surchauffe nocturne et journalière. Il est important pour désamorcer l'ICU de lutter contre son échauffement nocturne. Le FVC est un paramètre influençant les phénomènes d'ICU journaliers et nocturnes. Toutefois, la hausse de 10 % du SVF augmente de 2,1% l'ICU journalier et diminue l'ICU nocturne de 0,3 % (Giridharan et al., 2007). Puisque les effets du FVC sont plus prononcés sur l'ICU le jour que la nuit, les stratégies de conception pour tendre vers des îlots de fraîcheur, doivent se focaliser plutôt sur l'apport d'ombrage dans l'environnement.

### 1.3.3 Les différences de géométrie de canyons urbains modifient les brises et le confort thermiques

En synthèse, les principaux éléments de géométrie des canyons urbains ayant un impact sur la surchauffe et les ICU sont décrits en Figure 11.

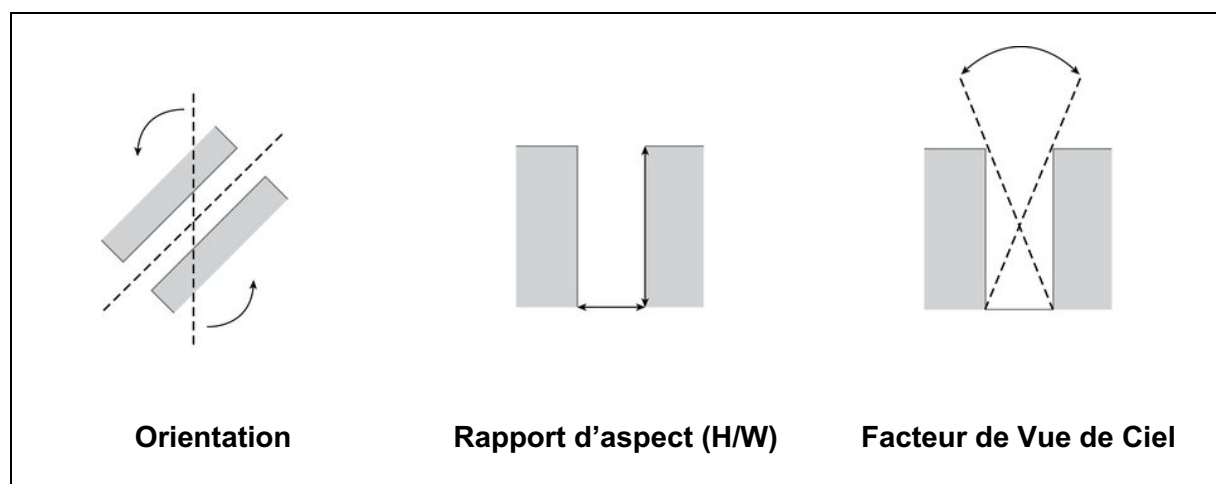


Figure 11 : La géométrie d'un canyon urbain peut être décrite par son orientation, ratio H/W et FVC (Source :Mantazeri dans Boeters et al., 2012)

Les trois facteurs identifiés en Figure 11 affectent la quantité de rayonnements solaires perçus mais aussi modifient l'écoulement de l'air. La direction du vent est impactée par l'orientation des boulevards et la vitesse peut être accrue par le ratio.

Les brises urbaines soutenues dans les voies des villes en hiver peuvent s'avérer inconfortables. En période de chaleur critique, c'est le phénomène inverse : la vitesse des brises thermiques fait diminuer la température ressentie. Par exemple, une vitesse de vent de 4 m/s fait diminuer de 4°C la température perçue dans un canyon de référence ayant une température d'air de 30°C, une température de l'environnement radiatif de 40°C et une humidité de 30% (Cf. Figure 12). Ces conditions climatiques sont des conditions pouvant être rencontrées dans une ville française telle que Paris. Les mouvements d'air sont bénéfiques pour le confort thermique du piéton tant que la température d'air n'est pas supérieure à 40°C (A.P.U.R., 2017b).

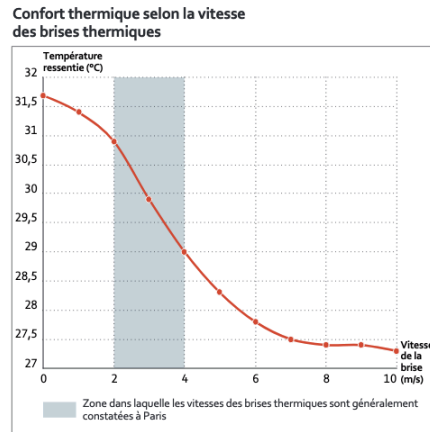


Figure 12 : Confort thermique selon les vitesses des brises thermiques pour un canyon où la  $T^{\circ}\text{air} = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $T^{\circ}$  de l'environnement radiatif  $= 40^{\circ}\text{C}$  et Humidité = 30% (Source :A.P.U.R., 2017b)

## 1.4. Conséquences des ICU

### 1.4.1 *Conséquences sur la faune et la flore*

Les villes sont seulement propices à une fraction très réduite du vivant, les espèces dites commensales de l'homme dans le cas de la faune et pionnières dans le cas de la flore.

Les modifications du climat urbain qui peuvent impacter le vivant sont :

- La hausse des températures due à l'effet de serre
- Les précipitations accrues
- Les événements de gel et la chute de neige réduits
- La vitesse du vent modifiée
- L'humidité de l'air diminuée en lien avec l'augmentation des surfaces imperméables

Ces conditions plus rudes rendent les espèces plus vulnérables, en particulier celles qui ont un spectre précis de conditions nécessaires pour la survie de leurs populations. Les villes en créant un espace hostile aux espèces locales peuvent favoriser l'installation de nouvelles espèces, adaptées à des climats plus secs et plus chauds. Celles-ci, en faisant concurrence aux espèces indigènes, moins adaptées à l'environnement, peuvent devenir invasives (Gaston, 2010 dans Hirsch, 2017).

Le milieu urbain, par son climat plus chaud modifie la phénologie végétale, soit l'apparition d'événements périodiques, le plus souvent annuels (floraison, feuillaison, chute des feuilles). Ainsi, partout dans le monde, les feuillaisons, floraisons et fructifications sont plus précoces dans les villes par rapport aux campagnes avoisinantes (Gaston, 2010 dans Hirsch, 2017). La ville amplifie l'effet des modifications climatiques globales : le réchauffement climatique à l'échelle mondiale a avancé dans tous les milieux les dates de floraison d'environ 15 jours (Parlow et al, 2011 dans Hirsch, 2017). Par exemple, à l'échelle de l'Europe centrale, la floraison des perce-neige, forsythia, cerisier, et pommier commence plus tôt en ville (Rötzer et al, 2000 dans Hirsch, 2017). La présence de surface imperméable est un des facteurs importants de ces décalages de phénologie (Zipper et al., 2016).

Plus globalement, les ICU étendent la durée de la saison végétative de manière significative dans les zones urbaines (Parlow et al, 2011 dans Hirsch, 2017). Ces modifications temporelles

des saisons végétatives peuvent avoir un impact substantiel sur les échanges d'eau, d'énergie et de carbone, qui à leur tour agissent sur le climat (Penuelas et al, 2009 ; Richardson et al, 2013 ; Keenan et al, 2014 dans Zipper et al., 2016). Par exemple, sur la période 2012-2014, la saison végétative a été plus longue de 5 jours dans la ville de Madison, Wisconsin que dans la campagne environnante (Zipper et al., 2016).

Les conséquences sur la faune sont quant à elles davantage à l'état d'hypothèse. La plus petite taille de certains oiseaux pourrait s'expliquer par la chaleur urbaine, qui impacte la division et répliation cellulaire et la croissance mais aussi par de nombreux autres facteurs comme la disponibilité en nourriture (Gaston, 2010 dans Hirsch, 2017)

Les insectes, bien que plus coriaces en ville, y sont plus rares. Les populations urbaines de moustiques *Aedes sp.* ont une plus grande tolérance à la dessiccation que les populations rurales de la même espèce. De même, les fourmis *Atta sexdens* urbaines supportent davantage les hautes températures que celles de la campagne. Les espèces d'oiseaux insectivores sont donc moins présentes en ville qu'à la campagne, 63 % en forêt contre 1 % dans les aires urbaines commerciales (Gaston, 2010 dans Hirsch, 2017).

#### 1.4.2 Conséquences sur la santé humaine

Lorsque le confort thermique devient trop dégradé, la santé humaine peut être impactée. L'homme doit garder une température corporelle de 37°C quelles que soient les conditions climatiques. Les modes d'adaptation du corps humain à la chaleur décrits précédemment ne permettent que de faibles écarts, un stress thermique peut donc survenir. Si ce stress est soutenu, il génère des inconforts, des faiblesses, des troubles de la conscience, des crampes, des syncopes, des coups de chaleur. Des maladies chroniques déjà existantes peuvent se voir exacerber comme le diabète, l'insuffisance respiratoire ou les maladies cardiovasculaires, cérébrovasculaires, neurologiques et rénales. Un stress thermique prolongé, couplé ou non à une déshydratation, peut donc être létal (Besancenot, 2007 ; Lubet et McGeehin, 2008 Giguère et al., 2010).

L'ICU a été un facteur important de surmortalité pendant la canicule de 2003. Celle-ci a été 40 % plus forte dans les petites et moyennes villes, 80% plus élevée à Lyon et enfin 141 % plus élevée à Paris que dans le reste de la France (Vandentorren et al., 2004 dans CEREMA, Grand Lyon, 2017).

En parallèle de l'augmentation des épisodes caniculaires dus au dérèglement climatique, la population française est vieillissante, donc plus sensible à ces périodes critiques. Cela accélère l'urgence de rafraichir les villes génératrices d'ICU (C.E.R.E.M.A, Grand Lyon, 2017).

#### 1.4.3 La lutte contre la surchauffe urbaine par les climatiseurs génère de la chaleur anthropique

Pour pallier l'inconfort généré par la surchauffe, l'habitant des villes cherche à générer de la fraîcheur par le biais de climatiseurs. L'ajout de végétation ou la modification de la forme et des performances thermiques du bâti peut être difficile à mettre en œuvre dans le cas d'un logement en location. L'intensité de l'ICU d'une ville aura donc des conséquences sur la consommation énergétique et les dépenses engendrées par la climatisation.

Paradoxalement, la quête de fraîcheur par l'utilisation d'air conditionné est génératrice de chaleur anthropique. Elle peut même parfois annihiler le bénéfice apporté par la végétalisation des cours. L'ajout de climatiseurs sur les façades donnant sur un cœur d'îlot végétalisé

compromet voire annule la ventilation permise dans les appartements traversants de l'îlot car la différence de température entre la cour et la rue disparaît (Cf. Figure 13).

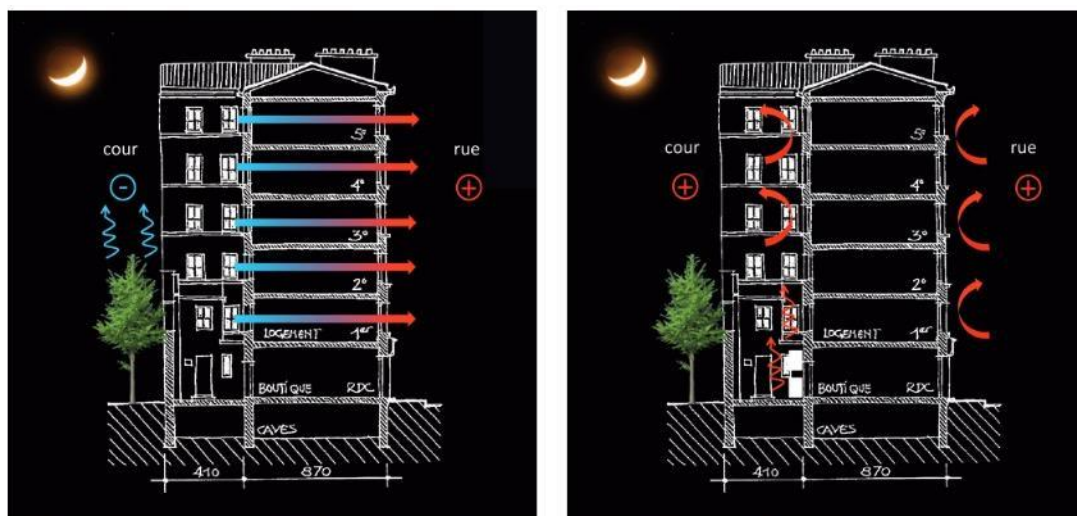


Figure 13 : Effet négatif de l'ajout de climatiseurs côté cour sur le rafraîchissement des appartements traversants. (Source : A.P.U.R., 2012)

Pour ce qui concerne le recours à la climatisation, la situation parisienne n'est pas comparable avec l'usage fait dans le sud de la France, ou dans une encore dans une autre mesure dans le cas de la climatisation de couloirs urbains à Kuala Lumpur reliant les stations de métro aux immenses *malls* ou encore des trottoirs, marchés, centres commerciaux à ciel ouvert du Qatar (Le point.fr, 2019). La comparaison entre des rues recevant le rejet de chaleur de climatiseurs et des rues sans climatiseur a révélé une hausse de température de 0,5°C. Les écarts de températures sont plus importants la nuit, bien qu'à ce moment les climatiseurs déchargent moins de chaleur (de Munck et al., 2013). La période nocturne est susceptible de générer des déshydratations chez les individus en raison du temps prolongé sans apport d'eau, cet ajout de chaleur nocturne par les climatiseurs est donc d'autant plus préjudiciable.

La chaleur des climatiseurs constitue une faible part de la chaleur anthropique générée par la ville, lui-même négligeable à l'échelle de l'équilibre thermique modifié des villes (Cf. Figure 3). Toutefois, les climatiseurs ont un fort impact sur le confort thermique, surtout quand ceux-ci se trouvent dans des situations critiques, comme dans le cas d'un rejet d'air chaud sur un axe de cheminement piéton, une zone de repos ou encore à proximité d'une chambre à coucher.

## 2. LE TRIPTYQUE MATÉRIAUX / EAU/ VÉGÉTATION CONFÈRE AUX ESPACES PAYSAGERS URBAINS UN RÔLE D'IFU

La préservation ou l'introduction d'espaces végétalisés à l'intérieur du maillage urbain s'accompagne de manière évidente d'un rafraîchissement local. Il est parfois compliqué d'évaluer l'intensité du rafraîchissement apporté. Nous verrons dans cette partie que la présence d'éléments du triptyque matériaux/eau/végétation permet toutefois de préserver un IFU. La présente réflexion tente de quantifier quand il est possible le rafraîchissement apporté. Il faut toutefois souligner que celui-ci est très contextuel.

Les paysagistes et les urbanistes jouent un rôle important pour le confort thermique à l'échelle du piéton. En effet, les surfaces horizontales des espaces libres reçoivent davantage d'énergie solaire que les façades verticales des bâtiments qui ne sont pas perpendiculaires aux rayonnements. Les toitures des bâtiments reçoivent aussi une quantité de rayonnement importante mais leur échauffement a des effets moins directs sur le confort du piéton dans le canyon urbain.

Pour qu'ils agissent comme des IFU, les petits espaces paysagers urbains doivent limiter l'échauffement dû au rayonnement solaire. Cela passe en premier lieu par une modification du rayonnement incident par filtration, réflexion ou encore par utilisation de l'énergie solaire pour l'évaporation (Cf. Figure 14 ). Cette gestion différente de l'énergie lumineuse est permise par la mise en place de matériaux adaptés, la présence de végétal et de l'eau. La combinaison de ces trois éléments est définie comme le triptyque Matériaux / Eau / Végétation nécessaire à la mise en place d'IFU.

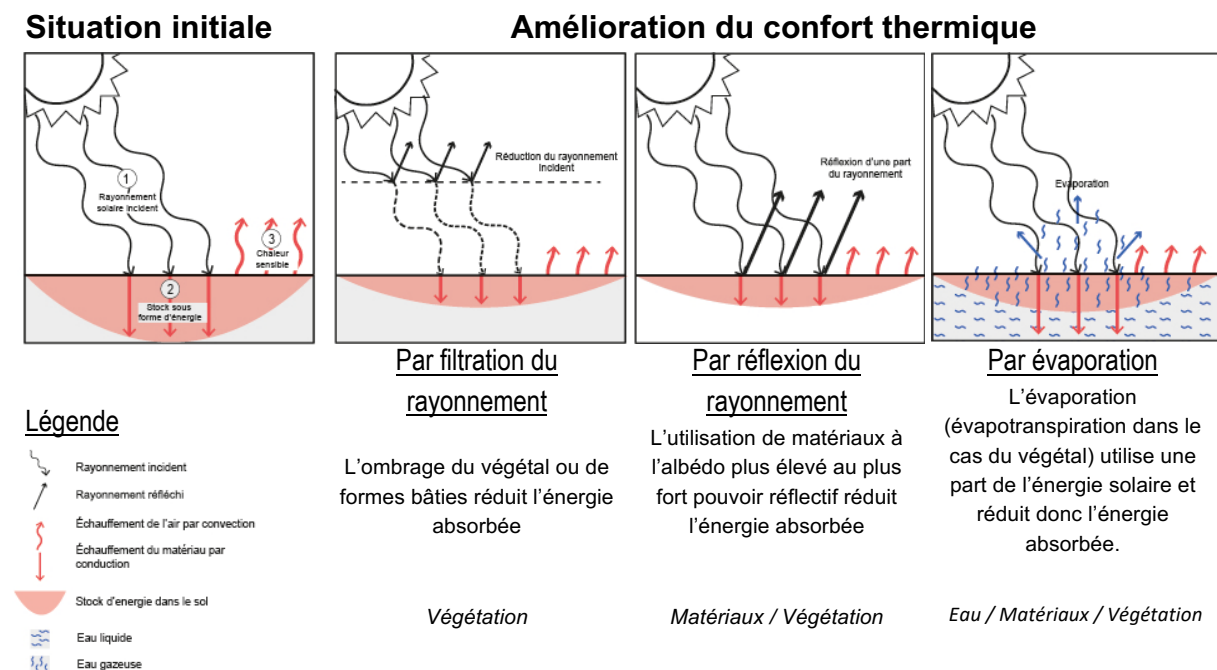


Figure 14 : Modes de réduction de la surchauffe par le triptyque Eau / Matériaux / Végétation (Source : Carron, 2020)

### 2.1 Les matériaux

Les arbres offrent le plus grand potentiel de rafraîchissement par unité de surface. Cependant, la mise en place de matériaux rafraîchissants, notamment réfléchifs offrent le plus

grand potentiel de rafraîchissement global lorsque la surface disponible est prise en compte. En effet, en ville il y a davantage de surface disponible pour mettre en œuvre cette stratégie que de surfaces végétalisables (Rosenzweig et al., 2006).

Des simulations de transfert de chaleur par les matériaux de surface ont montré que l'augmentation de l'albédo et le renforcement des flux évaporatifs donne à ces structures des capacités de rafraîchissement et de lutte contre les ICU. L'inertie a quant à elle un rôle ambivalent : les revêtements à inertie forte ont des températures de surface plus fraîches durant la journée, et plus élevées la nuit. C'est l'inverse qui est observé pour des matériaux de faible inertie. Enfin, le facteur de contrôle de la chaleur générée par un matériaux le plus pertinent est l'albédo. La variation de l'inertie du matériau entraîne en effet une variation des températures de surfaces plus faibles (Qin, Hiller, 2014).

### 2.1.1 Revêtements réfléchissants

L'augmentation de l'albédo, décrit précédemment, diminue la quantité d'énergie thermique accumulée dans le matériau. Une échelle graphique de différentes valeurs d'albédo est proposée en Annexe n°1.

Cette échelle d'albédo donne fréquemment des fourchettes de valeurs. En effet, l'albédo n'est pas fixe et peut varier dans le temps car :

- L'abrasion diminue l'albédo
- L'usure (intempéries et trafic) éclaircit les matériaux sombres et augmente leur albédo
- La salissure modifie les coloris. Les matériaux très clairs tendent vers un albédo de 0.5 (Santamouris et al., 2012)

Soulignons que l'albédo n'est pas le seul élément explicatif d'un matériau frais. En effet, dans la littérature, selon son coloris un pavé béton clair a un albédo de 0,35 à 0,6. Or l'herbe verte après la pluie n'a un albédo seulement de 0,33. Or, l'herbe est plus fraîche que les pavés béton : la réduction du flux de chaleur sensible de l'herbe (90,9 W/m<sup>2</sup>) par rapport à l'asphalte (446,4 W/m<sup>2</sup>) est de 80% contre 40% pour le béton lisse (262,4 W/m<sup>2</sup>) (Takebayashi, Moriyama, 2012), (Cf. Annexe 2).

L'utilisation de matériaux réfléchissants est stratégique pour réduire les températures d'air d'un espace. A l'échelle d'un parc athénien de 80 000 m<sup>2</sup> la rénovation des 4 500 m<sup>2</sup> de cheminement avec un pavé en béton plus clair permet de réduire les maximums de température un jour d'été jusqu'à 1,9°C. L'albédo moyen des matériaux d'origine est de 0,48 contre 0,6 après rénovation (Santamouris et al., 2012) (Cf. Annexe 3).

La recherche de création de fraîcheur par élévation d'albédo, donc par augmentation du rayonnement réfléchi est intéressante car elle peut être appliquée dans une assez large typologie d'espaces. Alors que le rafraîchissement par le végétal est largement tributaire des bonnes conditions de santé du végétal, le rafraîchissement par modification d'albédo n'est pas dépendant de conditions extérieures. Lorsqu'il est mouillé, le revêtement s'assombrit, toutefois nous pouvons supposer que la hausse d'albédo induite est compensée par diffusion de chaleur latente due à l'évaporation de l'eau.

D'un point de vue opérationnel, il est possible d'agir sur l'albédo lors d'une rénovation d'un matériau de surface existant ou dans le cas d'une totale reconstruction (Cf. Figure 15).

Pour augmenter l'albédo d'un matériau existant, il peut être envisagé diverses solutions comme l'application d'une peinture plus claire sur la surface. Il est également possible

d'ajouter une couche superficielle de béton sur des revêtements asphaltés déjà en place. Avec cette couche de béton ajoutée, d'albédo plus élevé, les températures de surface seront abaissées. Il est aussi possible de réaliser une reconstruction totale avec un matériau à albédo élevé ou en incorporant des pigments réfléchissants et/ou de coloris clairs dans l'asphalte et le béton.

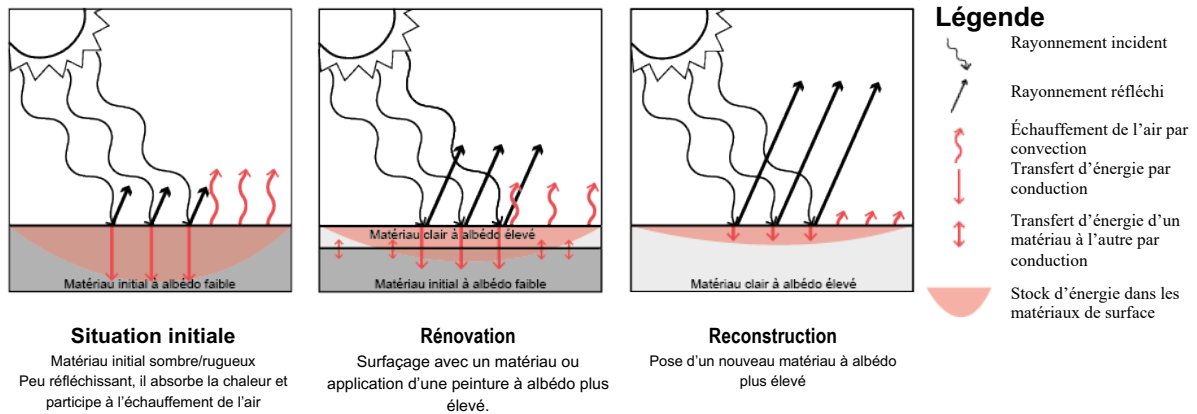


Figure 15 : Limiter la surchauffe par la rénovation ou la reconstruction de matériaux à albédo fort générateurs de chaleur. (Source : Carron, 2020)

La stratégie par élévation d'albédo, peut être couplée avec d'autres réflexions : en plus de lutter contre la surchauffe, un revêtement à albédo fort peut être pensé pour optimiser les éclairages. La lumière d'un point d'éclairage sera réfléchi plus fortement donc diffusée plus largement. Cela diminue donc la consommation d'énergie dédiée à l'éclairage (Pomerantz et al., 2000 et Taha et al., 1988 dans Qin, 2015).

Il faut néanmoins relever des cas de figure où cette stratégie n'est pas adaptée. D'une part, les espaces constamment à l'ombre ne bénéficieront pas du potentiel rafraîchissant de revêtements réfléchissants. D'autre part, les usages d'un lieu peuvent être incompatibles avec des revêtements clairs. Des revêtements aux albédos trop élevés sont inconfortables pour les usagers car éblouissants et incompatibles avec certaines pratiques car facilement salissables (circulation automobile, stationnement...)

### 2.1.2 Revêtements perméables

Les revêtements poreux sont une bonne alternative pour la gestion des eaux pluviales (Cf. 2.4.2.). Concernant la réduction de température, ceux-ci sont ambivalents : leur porosité diminue leur capacité de stockage, donc l'échauffement nocturne (Kevern et al., 2012) mais augmente leur rugosité donc diminue l'albédo (Zhang et al., 2015) (Cf. Figure 16). L'échauffement en journée et le flux de chaleur sensible qu'il dégage sont donc plus importants (Takebayashi, Moriyama, 2012).



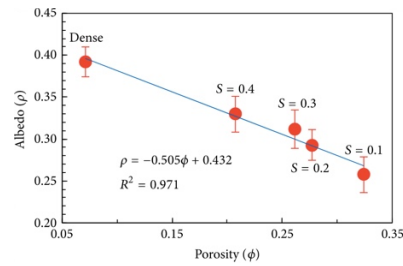


Figure 16 : Albédo de bétons drainants de différentes porosités ( Source : ZHANG et al., 2015)

Du point de vue thermique, l'utilisation de béton drainant est intéressante en journée seulement si le rafraîchissement par évaporation peut compenser l'absorption solaire additionnelle causée par l'albédo faible (Zhang et al., 2015). Or, le béton drainant est conçu pour favoriser l'infiltration de l'eau et non la retenir. Le maximum journalier du flux de chaleur sensible en août est réduit pour le béton de seulement 20 % en comparaison à l'asphalte noire. Cette valeur est de 41 % pour un béton lisse, celui-ci est donc plus frais (Takebayashi, Moriyama, 2012) en Annexe 2. C'est également le cas pour l'asphalte poreux qui en condition sèche aggrave l'ICU alors que son effet rafraichissant, lorsqu'il est trempé, est d'en moyenne 0,2 à 0,45°C pour les températures d'air et de 1,2° à 1,6°C pour les températures de surface (Li et al., 2013).

### 2.1.3 Revêtements et inertie

Pour réduire l'échauffement des revêtements, il est possible d'augmenter leurs albédos mais aussi de jouer sur leur capacité à stocker la chaleur en prenant en compte leur inertie.

Les matériaux à faible densité sont donc recommandés quand cela est compatible avec l'usage prévu. Ces matériaux seront réservés pour des espaces sans grosses sollicitations mécaniques, comme le cheminement piéton ou cyclable.

L'inertie des matériaux pose également la question de l'importance des couches sous-jacentes. Il faut tacher de ne pas surdimensionner sans raison ces couches d'assises. En effet, le revêtement de surface peut être à albédo élevé, mais avoir une couche sous-jacente qui agira comme un réservoir énergétique, limitant le rafraîchissement nocturne du matériau de surface. La capacité de la couche sous-jacente à agir comme réservoir à énergie sera d'autant plus importante que les couches d'assises sont denses et épaisses et que le matériau de surface a une forte inertie. Un revêtement avec une inertie forte conduit une plus grande part de l'énergie absorbée vers des niveaux plus profonds, sans augmenter les températures de surfaces instantanément (Qin, Hiller, 2014).

Par exemple, le granit très réfléchissant reste durablement chaud la nuit alors qu'il reste frais lors d'insolations courtes (A.P.U.R., 2017a). Toutefois, le granit reste plus performant en termes de rafraîchissement qu'une chaussée classique et des trottoirs en asphalte (Hendel et al., 2015).

La Figure 17 synthétise les propriétés qui permettent de limiter l'échauffement des matériaux. Le choix de matériaux frais, perméables, de coloris clair et aux assises non-surdimensionnées oriente vers des matériaux plus frais, générateurs d'IFU.

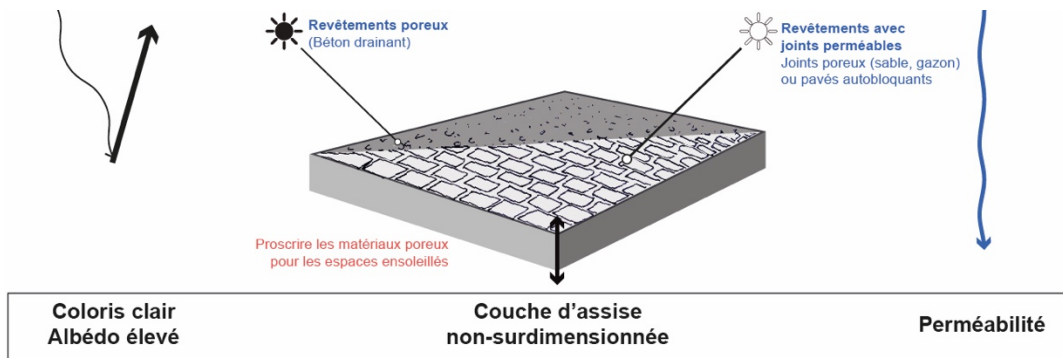


Figure 17 : Propriétés essentielles d'un matériau frais générateur d'IFU (Source : Carron, 2020)

## 2.2 Potentiel rafraîchissant de la végétation

### 2.2.1 *La végétation prend part dans le cycle de l'eau*

L'impact du végétal sur l'humidité de l'atmosphère, et plus indirectement le cycle de l'eau, ne doit pas être sous-estimé. En effet, seule 10 % de l'humidité de l'atmosphère est relâchée par la transpiration végétale. Certes, les océans permettent l'évaporation à grande échelle en raison des 70 % de la surface du globe qu'ils recouvrent. Toutefois, la plupart de l'eau évaporée dans les océans y retombe sous forme de précipitations. Ce sont seulement 10% de l'eau évaporée dans les océans qui est transportés au-dessus des continents et qui s'y déverse sous forme de précipitations (U.S.G.S, 2019).

Ainsi, la transpiration végétale représente la plus large part de l'évapotranspiration terrestre (Good et al. 2015 dans Lemordant et al., 2018). À l'échelle d'un bassin versant, les pertes d'eau par ET (Évapotranspiration) représentent généralement la partie la plus importante du bilan d'eau, et peuvent être responsables de la dissipation de 60 % de l'apport pluviométrique (Oudin, 2004). L'évaporation terrestre, dans le sens de celle au niveau des continents, passe à 80 % à travers le végétal (Jasechko et al., 2013).

### 2.2.2 *Pouvoir rafraîchissant de la végétation*

La végétation modifie le climat urbain en modifiant ses propriétés radiatives, thermiques, hydriques et aérodynamiques (de Munck, 2013). Ainsi, les processus physiques dont résultent les modifications radiatives et thermiques du climat urbain par le végétal sont :

- **L'évaporation de l'eau** retenue par le sol et la canopée des arbres. Ce phénomène est présent au niveau de toutes les surfaces naturelles de jour comme de nuit, même si l'air nocturne plus stable la limite toutefois partiellement.
- **La transpiration des plantes.** Elle concerne tous les types de végétaux (pelouse, buissons, arbustes, arbres, façades et toitures végétalisés). Elle se produit le jour et est le moteur de la photosynthèse végétale. (Cf. Figure 18)

→ *Le couplage de la transpiration et l'évaporation constitue l'évapotranspiration.*

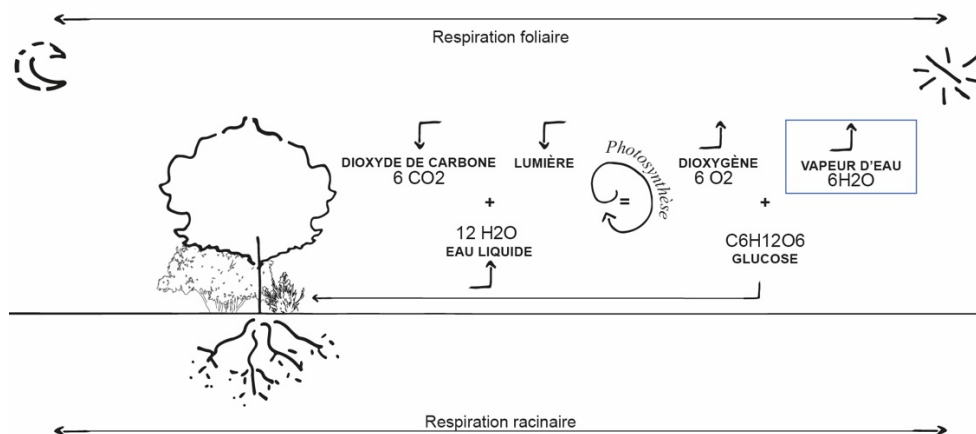


Figure 18 : Le phénomène journalier de la photosynthèse comme moteur de l'évapotranspiration (Source : Carron, 2020)

- La végétation arborée, par son interception d'une partie du rayonnement solaire incident joue un rôle supplémentaire. Cela crée des effets d'ombrages sur les surfaces artificielles des alentours qui limitent le réchauffement. Ceci lui permet d'être qualifié de forme végétale optimale en ce qui concerne le rafraîchissement.

### 2.2.3 L'Arbre, forme végétale optimale en termes de rafraîchissement

Parmi tous les types de végétation, les arbres sont considérés comme ayant la plus forte influence sur la réduction de température. Le rafraîchissement par les végétaux est lié à :

→ **L'évapotranspiration : Comme les autres types de végétation, ils interceptent la chaleur activement par évaporation et transpiration.**

**L'ET varie selon :**

- Les caractéristiques du végétal :
  - Activité photosynthétique (Cf. Figure 18). Elle est entre autres déterminée par la croissance de l'arbre.
  - Nombre de stomates : taille des feuilles, densité foliaire, densité stomatique...
  - Taille du végétal. Il s'agit de la hauteur mais aussi de la forme de la canopée : celle-ci impacte la quantité de rayonnement perçu qui est également un moteur de la photosynthèse.
- Les conditions pédoclimatiques :
  - Température : Le taux de transpiration croît quand la température augmente mais est stoppé en cas de manque d'eau et de stress hydrique ;
  - Humidité relative : L'augmentation de l'humidité fait chuter la transpiration. Il est plus facile pour l'eau de s'évaporer dans un air plus sec ;
  - Le vent et les mouvements de l'air : Un vent plus fort augmente le taux d'évapotranspiration. L'air humide est remplacé par un air plus sec autour des feuilles ;
  - L'humidité du sol et la disponibilité en eau. Le manque d'eau entraîne la fermeture des stomates ou bien encore la chute des feuilles.
- D'autres conditions extérieures :
  - Les particules de pollutions qui peuvent obstruer les stomates ;
  - L'exposition de la canopée puisque l'apport d'énergie solaire est moteur de la photosynthèse.

→ **L'Albédo** : Le végétal réfléchit une plus grande part du rayonnement que les matériaux sombres. Toutefois, il réfléchit moins que les revêtements plus clairs. (Cf. Annexe 1). Le pouvoir rafraîchissant par réflexion des arbres varie en fonction de la couleur et la densité des feuilles.

→ **Ombrage** : Le potentiel rafraîchissant des arbres est renforcé par leur capacité d'ombrage qui leur permet d'intercepter la chaleur passivement. Sans la présence de ces arbres et de leurs ombrages, les surfaces se seraient échauffées sous l'action de la plus forte quantité de radiations solaires absorbées. L'ombrage varie en fonction :

- Du port de l'arbre (Cf. Figure 19) ;
- De la densité des feuilles / de l'ombrage (LAI : rapport entre la surface totale des feuilles et la surface de sol couverte par la plante).






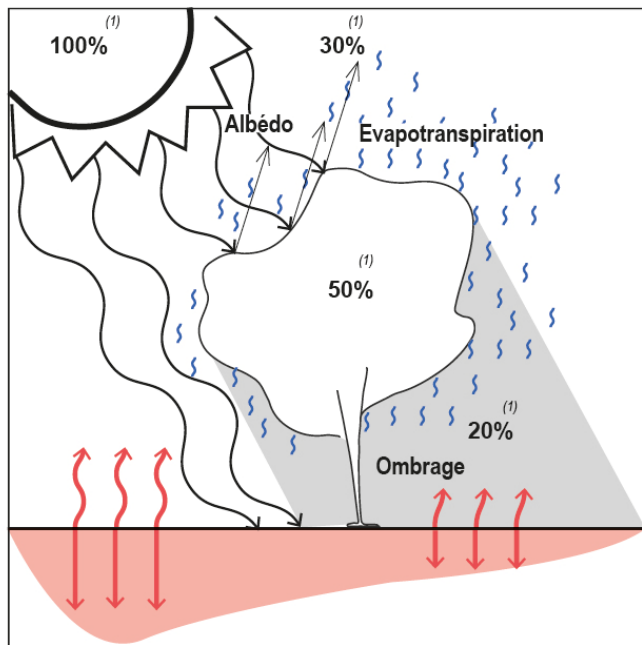
essences	platane	marronnier	érable	tilleul	sophora
hauteurs	25 à 30 m	25 à 30 m	10 à 15 m	15 à 20 m	15 à 20 m
« silhouette de la canopée (lorsque l'arbre est jeune) »					
« transparence de la canopée »	20 %	20 %	40 %	40 %	60 %

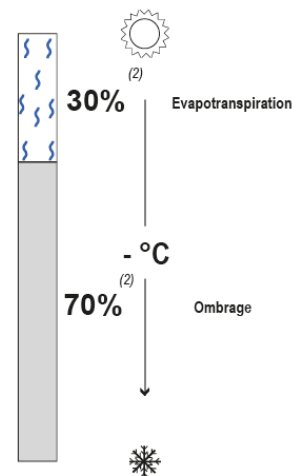
Figure 19 : Caractéristiques de trois grandes familles d'arbres d'alignement rencontrées sur les voies parisiennes. (Source : (A.P.U.R., 2014)

Le rôle de l'ombrage est prépondérant dans le rafraîchissement assuré par les arbres. La canopée laisse seulement 20 % du rayonnement solaire échauffer les surfaces. Une étude conduite en Suède montre qu'en été et pour différentes espèces d'arbres, 30 % du rayonnement solaire est converti en chaleur latente (Konarska et al., 2015). Ceci va dans le sens des données de l'APUR présentées en Figure 20. Pour chaque degré de réduction de température d'air par la canopée des arbres, 71 % est dû à l'ombrage et 29 % à l'ET (Tan et al., 2018).

## RAFRAICHISSEMENT ASSURE PAR L'ARBRE



## PART DU RAFRAICHISSEMENT PRODUIT PAR L'ARBRE DU À :



1 - (A.P.U.R., 2012) ; 2 -(Tan et al., 2018)

**Filtration du rayonnement solaire et limitation de l'accumulation de chaleur dans les matériaux**

**Part de l'ET et de l'ombrage dans le rafraîchissement**

Figure 20 : Part de l'ombrage et évapotranspiration dans le rafraîchissement assuré par les arbres (Source : Carron, 2020)

L'absence d'eau génère un stress hydrique, donc la fermeture stomatique. Dans ce cas de figure, la part du rafraîchissement dû à l'ET n'est plus assurée. Nous pouvons ainsi dire qu'un arbre privé d'eau ne fonctionne pas à plein régime de son rafraîchissement.

De nombreuses études quantifient le rafraîchissement sous l'ombre d'un arbre. Cela peut s'exprimer sous la forme de réduction de température de surface, réduction de température d'air, d'indices de confort thermique. Quelques études sont comparées graphiquement en Annexe n°4. Il s'agit d'une réduction de température assez localisée.

En conclusion, le potentiel rafraîchissant d'un arbre est fortement lié à sa maturité, sa forme, son espèce. Comme nous le verrons par la suite, il est contextuel et peut être fortement réduit par des conditions extérieures non favorables.

## 2.3 La végétalisation et le bâti

En ville, la végétation est souvent intégrée aux formes bâties. Cela peut se faire à l'échelle du bâti par l'intégration de toitures et de murs végétaux ainsi que de cours végétalisées en cœur d'îlot. La végétalisation des voies urbaines permet également localement l'abattement des températures. Si certains modes de végétalisation en interaction avec le bâti ne sont pas tant performants en termes de confort thermique dans le canyon, ils revêtent d'autres bénéfices, comme ceux de constituer des zones d'accueil pour la biodiversité ou d'avoir des capacités d'isolation du bâti.

### 2.3.1 *Toitures végétales*

Les toitures ont un impact sur les températures d'air au-dessus des bâtis mais un effet très faible au niveau de voies urbaines. L'effet rafraîchissant dans le canyon de la végétation

des toitures, est plus important quand le bâti est inférieur à 20 mètres (Ng et al., 2012). Les toitures végétalisées constituent le moyen le plus efficace de réduire la consommation d'énergie essentiellement grâce à leur pouvoir isolant de la chaleur et du froid. Une journée ensoleillée, un toit foncé peut avoir une température de surface de 80°C, contre 45°C pour une toiture blanche et 29°C, soit une température proche de celle de l'air, pour une toiture végétalisée (Fischetti, 2008 et Liu, Bass, 2008 dans Feix et al., 2017).

L'augmentation de la couverture végétale au sol a un pouvoir rafraîchissant plus efficace que les toitures végétalisées, et ce d'autant plus que le taux de végétalisation et que la proportion d'arbres sont importants. La végétalisation des toitures est une solution efficace pour lutter contre les ICU seulement quand de larges espaces urbains bénéficient de toits végétalisés (Hong Kong Architectural Services Department, 2007 dans Ng et al., 2012).

### 2.3.2 Murs végétaux

L'effet rafraîchissant des murs végétaux dans un canyon a des effets plus importants que la mise en place de toitures végétalisées (Alexandri and Jones, 2008 dans Gromke et al., 2015). La température de surfaces des murs végétaux est de 30°C contre jusqu'à 60°C pour des murs standards en fonction de la typologie de celui-ci (Kingsburry, Dunnett, 2008 dans Feix et al., 2017).

Des mesures sur le rafraîchissement des façades végétalisées dans un canyon au Pays-Bas montrent que les murs végétaux rafraîchissent seulement l'air directement adjacent au mur à hauteur de 0,5°C. A l'échelle d'un canyon de 25m de large, en raison du mélange d'air, l'effet rafraîchissant d'ajout de façades entièrement végétalisées est inférieur à 0,1°C soit quasi-nul (Gromke et al., 2015).

### 2.3.3 Cours végétalisées sources de confort thermique pour les habitations

Il a été vu dans la partie précédente que les cours végétalisées amorcent une ventilation à l'intérieur du bâti dans le cas d'appartement traversants (Cf. Figure 13). Cela s'explique par le différentiel des températures entre la cour et la rue qui est générateur d'un mouvement d'air.

En été, les arbres situés au sud ou à l'ouest des bâtiments leur apportent un ombrage. La quantité d'ombre est déterminée par la taille, la forme de l'arbre, la densité de son feuillage et la densité de plantation. Quand le bâti est bas, mal isolé ou avec une surface vitrée importante l'effet est d'autant plus marqué (Feix et al., 2017). Ce mémoire traite essentiellement de la limitation des situations estivales critiques, il faut toutefois souligner que le choix d'espèces caduques permet de limiter le masque solaire que constituent les arbres et ainsi limiter le recours au chauffage dans les bâtiments.

### 2.3.4 Voies urbaines végétalisées

La végétalisation des voies urbaines a un impact sur les températures d'air à hauteur de piéton et donc de confort thermique. L'intensité du rafraîchissement, comme nous le verrons par la suite, est contextuelle mais dépend principalement de la couverture végétale notamment arborée. Elle est aussi tributaire de l'orientation des rues. L'effet de la végétalisation des voies sur les ICU est cependant à temporer : l'effet rafraîchissant s'étend peu.

Concernant l'intensité du rafraîchissement, l'ajout d'arbres dans un canyon urbain permet un rafraîchissement jusqu'à 2°C. Aux Pays-Bas, l'ajout d'une rangée d'arbres continue dans un canyon de 350 m de long orienté Est/Ouest, soit dans le sens du vent, permet de telles réductions de température d'air à 2 m. Ces réductions atteignent 2°C, surtout sur la partie nord du canyon. Aussi, sur une très large partie du boulevard la réduction de température atteint au moins 1°C. En moyenne, les réductions de température sur le boulevard sont de 0,43°C, ce qui s'explique par l'élargissement de certaines parties du boulevard qui augmente la dispersion de l'air rafraîchi. Concernant les éléments contextuels de cette étude le canyon a une hauteur de bâti de 20 mètres et sa largeur est comprise entre 25 mètres ( $H/W = 0,8$ ) et 40 mètres ( $H/W=0,5$ ). La canopée des arbres est non discontinue et les arbres ont une hauteur de 6 mètres et une couronne de 5 mètres de large (Gromke et al., 2015).

En fonction de l'orientation des rues, l'intensité du rafraîchissement par ajout d'arbres dans le canyon est modulée. En effet, comme vu en 1.3.1, les situations d'ombrage initiales ne sont pas les mêmes, la quantité d'ombrage supplémentaire apportée par la végétalisation sera maximale dans le cas d'un canyon déjà très ensoleillé. Les mois d'été, les arbres dans des rues au ratio  $H/W$  de 0,6 apportent un ombrage supplémentaire de 20 % si la rue est orientée Est/Ouest et seulement de 7 % si la rue est orientée Nord/Sud. Pour le cas des rues orientées dans la diagonale NE-SO et NO-SE la réduction d'ombrage est à mi-chemin entre les deux précédentes valeurs. Dans la rue orientée E/O, la réduction de température d'air en été atteint 1,5°C et la réduction des températures de surfaces 5°C (Andreou, Axarli, 2012).

Ce rafraîchissement constaté par l'ajout d'arbres d'alignement dans un canyon s'entend cependant peu. L'insertion d'une rangée d'arbres perpendiculaire à l'écoulement de l'air le long d'un maillage urbain en damier de ratio  $H/W$  1,5 diminue les températures d'air jusqu'à 1°C. Cette intensité du rafraîchissement diminue avec la distance et n'est plus perceptible après 10 mètres (Dimoudi, Nikolopoulou, 2003).

Le canyon urbain est une forme simple, mais les grands principes sont en partie transposables aux formes plus complexes des petits espaces paysagers urbains entourés de bâtiments. L'observation de ces espaces et la détermination de zones critiques permettra une solution au cas par cas comme nous le verrons dans la partie suivante.

## 2.4 L'eau

### 2.4.1 *Effet rafraîchissant des points d'eau*

De même qu'il a été expliqué pour l'évapotranspiration, la présence d'eau permet l'utilisation de l'énergie des rayonnements solaires pour la vaporisation. Les espaces s'échauffent donc moins quand il y a présence d'eau.

La combinaison d'un parc urbain et d'un plan d'eau entraîne une baisse des températures pouvant aller jusqu'à 6°C (Tchang, 2016) : La présence d'un bassin dans un parc réduit les températures d'air à hauteur de 1°C, c'est l'effet qui a été mesuré à 1 mètre du sol à Bucarest pour un bassin de 4 mètres par 4 mètres dans un parc sur une portée de 30 m sous le vent (Robitu et al., 2004 dans Kleerekoper et al., 2012). Le mouvement d'eau amplifie l'intensité du rafraîchissement : Un bassin seul ayant un rafraîchissement de 1 à 2°C bénéficie d'un rafraîchissement de 4 à 5 °C à une distance de 10 m sous le vent quand les fontaines et chutes d'eau sont activées (Xue et al., 2015).

## 2.4.2 Gestion alternative des eau pluviales

En ville, l'eau ne suit plus le cycle dit naturel de l'eau, il est totalement anthropique. L'eau puisée dans les cours d'eau ou les nappes phréatiques, est dans un premier temps traitée et contrôlée avant de rentrer dans les réseaux de distribution. Dans le cas très répandu du réseau d'eau unitaire, les eaux usées sont rejointes par les eaux de ruissellement. Ces deux typologies d'eau passent ensuite par une station d'épuration avant d'être rejetés dans une rivière (Colin, 2004 dans IAU îdF, 2010).

Le mélange des eaux usées et de ruissellement est problématique : l'eau usée est certes impropre à la consommation mais elle pourrait être recueillie pour des usages domestiques et publics pour l'alimentation des chasses d'eau, par exemple. D'autre part, les surfaces imperméables largement présentes en ville accélèrent le rejet vers le cours d'eau en comparaison avec les milieux naturels. Le rafraîchissement par évapotranspiration n'est plus permis et les réseaux d'eau sont plus rapidement saturés.

La mise en place d'une gestion alternative des eaux de pluies permet de rediriger l'eau vers les sols en favorisant l'infiltration et en limitant et différant le ruissellement (Cf. Figure 21). Les avantages sont multiples : dépollution des eaux par filtration végétale ou via les revêtements poreux. Couplé avec une stratégie de cuve de collecte des eaux pluviales pour l'arrosage des végétaux, cela permet d'assurer un plus grand confort hydrique aux végétaux. Ainsi, ceux-ci peuvent fonctionner à plein régime de leur potentiel rafraîchissant (Cf. Figure 20).

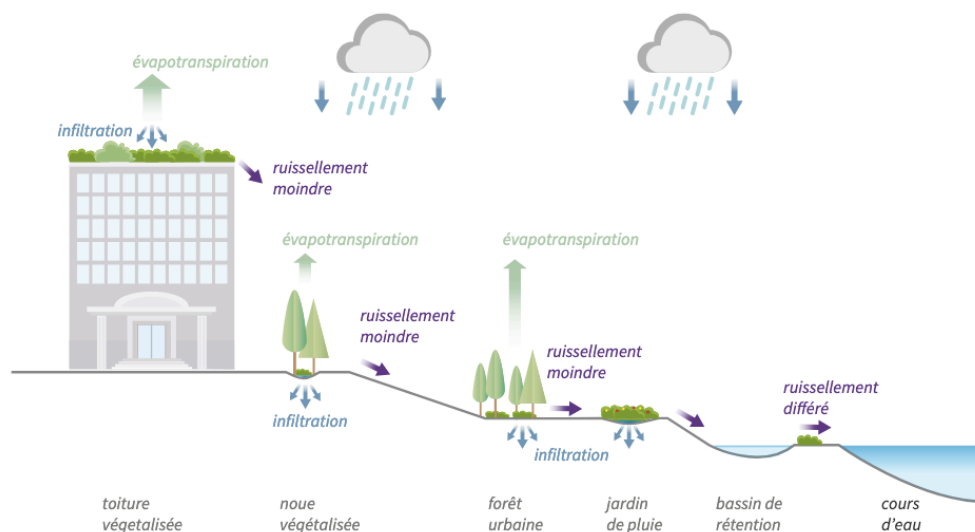


Figure 21 : L'apport des différents éléments végétalisés urbains à la gestion des eaux de ruissellement. (Source : Feix et al., 2017)

Certaines solutions à l'échelle des choix d'aménagements existent. Ils peuvent intégrer les revêtements perméables présentés précédemment. Ces solutions peuvent être :

### **Noues et fossés**

Différents types de noues et fossés existent, ils permettent de collecter les eaux de pluies soit par ruissellement ou bien via des canalisations. Les fossés se distinguent des noues par leurs profondeurs et rives plus marquées.



- Fossés : ces structures linéaires sont assez profondes et ont des rives abruptes. Les eaux pluviales sont évacuées par écoulement, par infiltration quand le sol est perméable ou via un exutoire.
- Noues : Fossés larges et peu profonds avec des rives en pente douce.

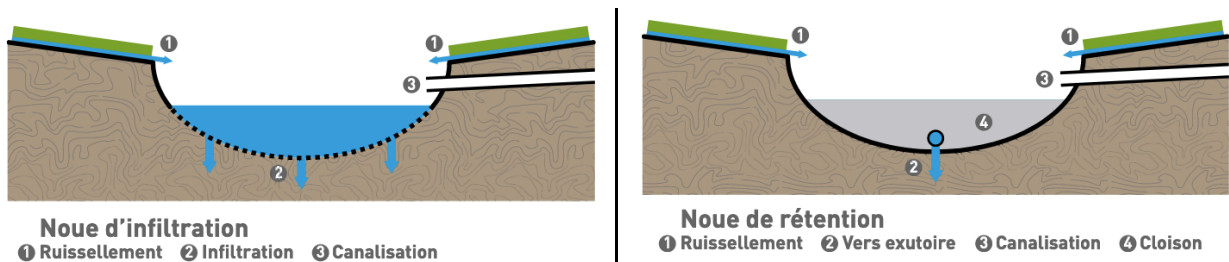


Figure 22 : Typologie de noues (Source : SYMASOL, 2016)

Les fossés et noues peuvent être plantés : leur végétalisation notamment avec un système racinaire non-traçant stabilise les berges. Il faut proscrire les peupliers, conifères et saules pleureurs. Les systèmes racinaires de ceux-ci sont superficiels, ils sont donc vulnérables aux coups de vents et leur chute peut provoquer l'arrachement d'une partie de la berge.

### Les tranchées :

Les tranchées sont des ouvrages longitudinaux de faible profondeur dont la largeur est généralement comprise entre 0,50 et 2 mètres. Elles permettent soit la rétention des eaux pluviales puis l'évacuation vers l'exécutoire, dans le cas des tranchées drainantes soit l'infiltration dans le sol dans le cas des tranchées infiltrantes. Ces deux techniques peuvent se combiner.

Elles présentent l'avantage de pouvoir être placées sous des cheminements, en bordure d'allée circulée, de bâtiments ou de voiries. Elles peuvent être mises en place quand l'espace disponible n'est pas suffisant pour les bassins de rétention.

Il faut noter qu'il n'est pas possible de planter des arbres dans les tranchées. Dans le cas d'une plantation à proximité, il faudra veiller à maintenir une distance de 2 mètres avec la tranchée.

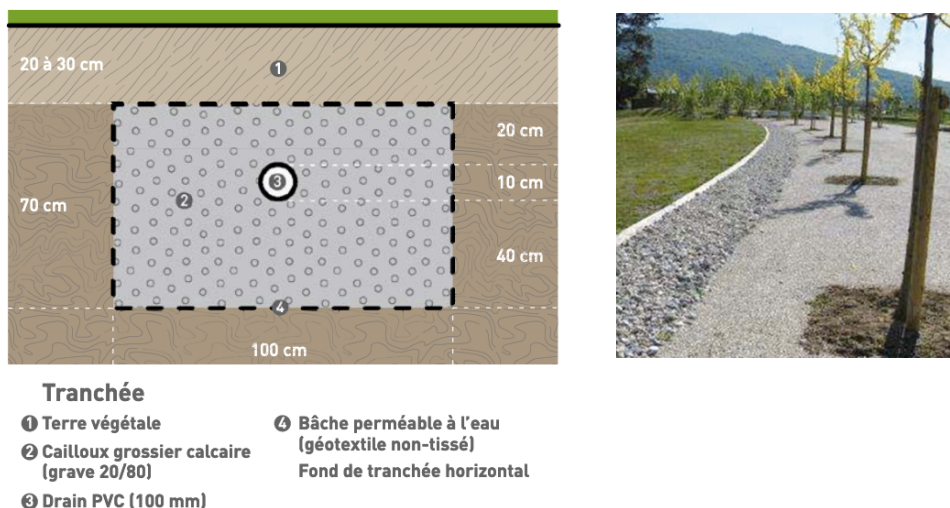


Figure 23 : Technique et exemple de tranchée (Source : SYMASOL, 2016)

### Les bassins à ciel ouvert

Ces bassins sont des ouvrages à ciel ouvert permettant le stockage, la décantation et l'infiltration des eaux pluviales. Ils peuvent être en eau en permanence, vidangés entièrement dans le cas des bassins secs, ou encore avec une infiltration.

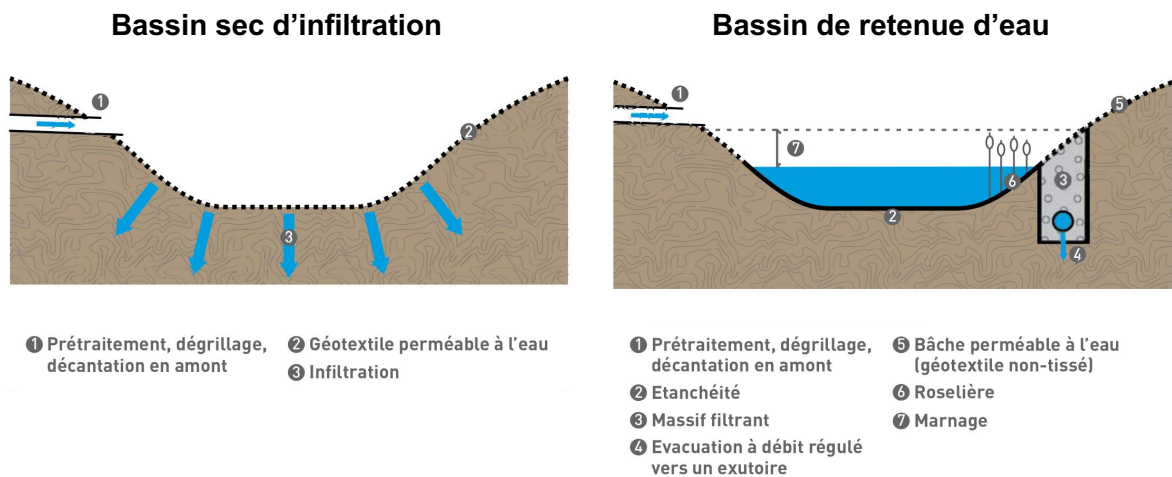


Figure 24 : Typologie de bassins à ciel ouvert ( Source : SYMASOL, 2016)

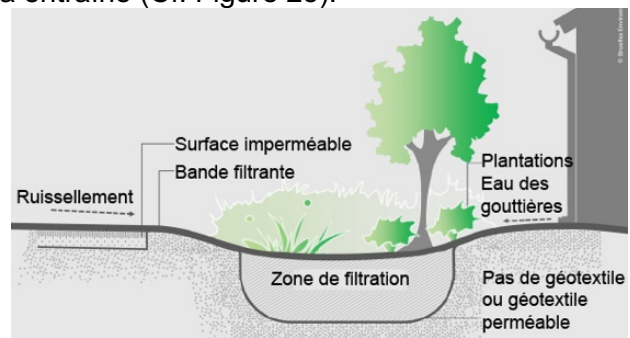
Les bassins secs d'infiltration offrent une diversité d'usages lors des périodes hors eau et peuvent également accueillir une végétation.

### Les jardins de pluie

Il s'agit d'une dépression peu profonde et végétalisée. Cela constitue un ouvrage hybride entre une bande filtrante et une noue ou un bassin sec. Ils reçoivent les eaux de ruissellement des surfaces contributives avoisinantes. Cette eau est filtrée par le complexe sol-bactéries-plantes des jardins. On peut distinguer plusieurs types de jardins filtrants en fonction des conditions pédologiques et du devenir des eau que cela entraîne (Cf. Figure 25).

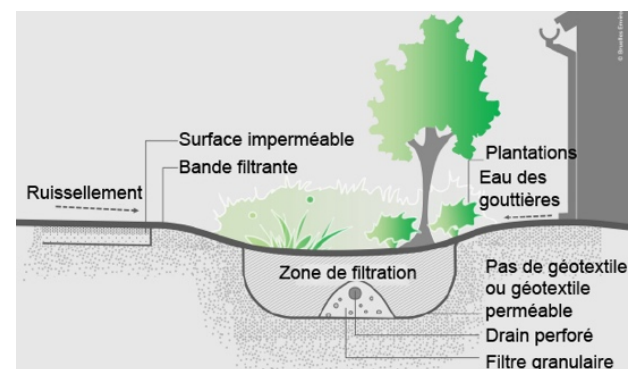
#### Jardin de pluie infiltrant :

Sols perméables permettant l'infiltration dans le sol en plus de la filtration végétale. Ne nécessite pas de pose de drain.



#### Jardin de pluie semi-infiltrant :

Sols moyennement perméables. Couplage de la stratégie d'infiltration dans le sol à un drain pour les évacuations de plus fortes pluies.



### Jardin drainant :

Sols imperméables, pollués ou à proximité de la nappe. Le drain évacue l'eau n'ayant pas été évaporée par le végétal. Le géotextile est mis en place dans le cas de sols pollués ou à proximité d'une nappe.

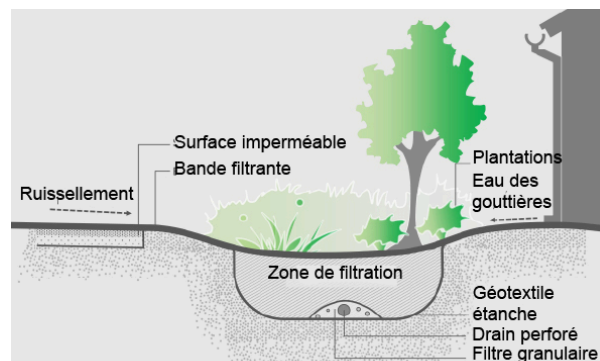


Figure 25 : Typologie des jardins de pluie ( Source : Bruxelles Environnement, 2020)

Dans l'ensemble, ces ouvrages nécessitent un entretien pour éviter le colmatage et la stagnation des eaux. L'infiltration est proscrite si la nappe phréatique est proche de la surface, excepté pour les bassins qui doivent être équipés d'un réseau séparatif strict, d'un système de dégrilleur en amont voire d'un ouvrage de prétraitement.

D'autres éléments de gestion alternative des eaux pluviales existent comme les toitures stockantes, les chaussées réservoirs, les puits d'infiltrations, etc. Il a été choisi de ne pas les présenter ici, ceux-ci ne relèvent pas forcément de l'action du paysagiste ou ne touchent pas l'espace d'étude, c'est-à-dire les petits espaces paysagers urbains.

Il est possible d'affirmer que la gestion alternative des eaux pluviales est bénéfique contre la surchauffe urbaine puisqu'elle restitue de la fraîcheur au sol et aux végétaux. Cependant, ce bénéfice est difficilement quantifiable. En revanche, il est possible de décrire les abattements permis en termes de volume de ruissellement. À l'échelle du bassin versant d'un quartier de Noisy-le-Grand en Seine-Saint-Denis, la combinaison de diverses techniques alternatives de gestion des eaux pluviales a permis une réduction de 40 à 50 % du volume de ruissellement en comparaison avec une conception classique et donc un réseau séparatif (Bressy, 2010 dans Feix et al., 2017).

## 2.5 La création d'îlot de fraîcheur

Les composants des parcs que nous avons détaillés précédemment, soit la présence de matériaux réfléchissants, de végétation et d'eau permettent de constituer des Îlots de Fraîcheur Urbains (IFU). Ceux-ci sont définis comme un périmètre urbain dont l'action rafraîchissante permet d'éviter ou de contrer directement ou indirectement les effets des îlots de chaleur (Fernandez et Deshaies, 2013 dans Fahed, 2018).

Le rafraîchissement des températures d'air par un IFU est constaté dans la littérature localement en comparaison avec les espaces adjacents mais aussi au-delà des limites de l'IFU, très généralement sous le vent, si ces espaces remplissent certaines conditions.

### 2.5.1 *Intensité du rafraîchissement des parcs*

Les études montrent que les espaces paysagers urbains des parcs permettent des réductions de température d'air. Un grand nombre de ces études est présenté en Annexe n°7. Les résultats sont très variables et difficiles à transcrire à d'autres cas de figures. Ils peuvent toutefois servir à illustrer un propos par des exemples. Parmi des données provenant d'études complémentaires à celles proposées dans la liste de l'annexe n°7, nous pouvons citer :

- L'étude des performances thermiques d'un petit parc de 0,24 ha dans un contexte urbain dense à Lisbonne montre qu'il est plus frais que ses environs, autant à l'ombre qu'au soleil. Une différence de température d'air de 6,9 °C est observée entre le parc et une zone ensoleillée dans un boulevard orienté est/ouest au sud du site étudié (Oliveira et al., 2011 dans Aram et al., 2019). Il faut noter que la situation avec laquelle les températures d'air du parc sont comparées est une situation critique en termes d'orientation du canyon, donc d'échauffement ;
- Un parc de 20 ha à Valence génère une réduction de température de 2,5°C (Gomez et al., 1998 dans Feix et al., 2017) ;
- À Berlin, la réduction de température est de 1°C dans un parc de 10 ha, 2°C dans un parc de 50 ha et 3°C dans un parc de 200ha (Von Stülpnagel, 1987 dans Feix et al., 2017).

Si une méta-analyse estime qu'en moyenne, un parc est plus frais de 0,94°C durant la journée (Bowler et al., 2010) ce chiffre est peu parlant car il ne prend pas en compte la diversité des typologies de parcs en terme de composition, taille, formes, etc. L'intensité du rafraîchissement d'un IFU est maximale lors des situations estivales critiques. Celle-ci augmente avec : la taille du parc, la couverture arborée, la faible portion de surfaces minérales (Chang et al, 2007 dans Zhang et al., 2013). Dans la logique de ce qui a été vu précédemment concernant la gestion de l'eau et la disponibilité de celle-ci pour le végétal, on peut affirmer que l'intensité du rafraîchissement est plus importante quand le verdissement est réalisé en pleine terre et que les surfaces imperméables sont minimales.

En termes de composition végétale, un massif est plus rafraîchissant lorsque celui-ci est multistraté, compact, et avec une disposition d'arbres denses et adaptée aux conditions d'ensoleillement du site :

**Végétation multistraté :** Un groupement d'arbres combiné à une couche de végétation herbacée et arbustive connaît une réduction de température plus importante que dans le cas d'arbres accompagnés seulement par une strate herbacée (Zhang et al., 2013). Un bosquet dense est donc plus frais mais les espaces laissés davantage libres offrent une plus grande diversité d'usages. Il peut être suggéré de combiner la présence de massifs rafraîchissants avec des espaces végétalisés plus libres.

**Compacité :** Une hausse du ratio entre le périmètre et l'aire d'un espace vert, soit une forme plus complexe et plus dense, soumet davantage au mélange de l'air rafraîchi des IFU avec l'air extérieur. Cela réduit l'intensité du rafraîchissement mesurée (Vaz Monteiro et al., 2019).

**Couvert arboré adapté :** Les facteurs expliquant les différences de réduction de température d'air de différents groupements d'arbres sont la densité de canopée, la surface du boisement, et la hauteur des arbres (Zhang et al., 2013). Pour illustrer ceci, nous pouvons évoquer les différences de températures entre les voies parisiennes que sont le boulevard Ney et la rue Leibniz, dans le 18ème arrondissement. Elles présentent des températures ressenties différentes car leur densité du couvert arboré, composé dans les deux cas de platanes, n'est pas la même. La température ressentie est en effet de 33-38°C pour la rue Leibniz et 50-55°C pour le boulevard Ney qui a un couvert d'arbres beaucoup moins dense (A.P.U.R., 2014).

Le projet *Lisière d'une Tierce Forêt* à Aubervilliers vise à réduire la surchauffe et adapte pour cela la densité de plantation d'arbres au site. Les essences ont été choisies selon leur adaptation au site, en fonction de leur capacité d'ET et de leur présence naturelle en Île-de-France. Les espèces sélectionnées sont l'érable champêtre, l'orme, l'érable sycomore et le chêne. La répartition et densité d'arbres sur le site ont été déterminées en connaissance d'études permettant de définir la puissance d'irradiation. Le rayonnement est inégal, la densité d'arbres l'est donc aussi : dans les zones où l'irradiation solaire est intense, les troncs d'arbres

sont espacés de seulement 2 mètres. À l'inverse, près des bâtiments qui prodiguent un ombrage une partie de la journée, les arbres ont été plantés moins proches les uns des autres et laissent la place pour d'autres activités (Derrouch, 2020) (Cf. article descriptif en Annexe n°6).

Certaines études soulignent qu'une canopée dense peut entraver la dissipation de l'air chaud la nuit et mener à des plus fortes températures nocturnes en comparaison avec des espaces ouverts (Gilner et al., 2015 et Spronken-Smith, Oke, 1999 dans Vaz Monteiro et al., 2019). Cependant, cela ne constitue pas un argument en défaveur des boisements denses puisqu'il s'agit de la forme végétale qui lutte au mieux contre la situation de surchauffe critique journalière. Certes, d'aucuns pourraient affirmer que les groupements d'arbres ne sont pas une mesure pour lutter contre les ICU car ceux-ci sont définis comme les écarts de températures nocturnes villes-campagne. Nous choisissons ici de préconiser les boisements denses pour former des massifs de fraîcheurs pour améliorer l'inconfort thermique journalier. La mesure des températures d'air sous un arbre dans un parking à Phoenix (Cf. Figure 26) montre une ampleur de rafraîchissement journalière plus importante que l'ampleur de l'échauffement nocturne. Ceci est transposable avec le cas de l'ambivalence jour/nuit dans un canyon bénéficiant d'ombrage en journée mais connaissant un piégeage radiatif nocturne : la réduction de température en journée est plus importante que l'échauffement nocturne (Giridharan et al., 2007) (Cf. partie 1.3.2).

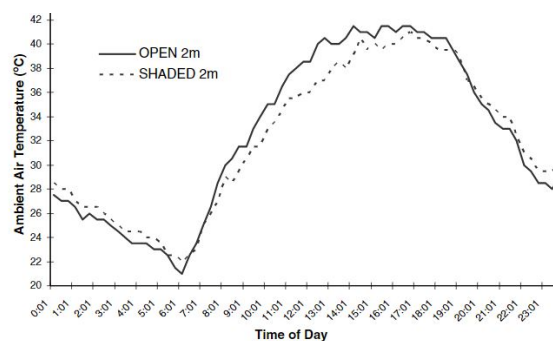


Figure 26 : Températures d'air à 2m mesurées à l'ombre d'un arbre (SHADED 2m) et au-dessus d'asphalte pour un espace ouvert ( OPEN 2m) (Source : Golden et al., 2007)

## 2.5.2 La portée rafraîchissante des parcs

Le rafraîchissement s'étend au-delà des limites de l'IFU si celui-ci dispose d'une surface adéquate. La mise en réseau de nombreux petits espaces paysagers urbains permet la réduction de l'ICU si ceux-ci ne sont pas trop écartés. Cette stratégie est toutefois complexe à mettre en place dans un tissu urbain dense déjà existant.

À partir d'une étude réalisée sur plusieurs parcs londoniens, des experts du *Forest Research* britannique recommandent la mise en place de parcs ayant une superficie supérieure à 0,5 ha/5000m<sup>2</sup> (Vaz Monteiro et al., 2019). En effet, les parcs de moins de 0,5 ha ne rafraîchissent pas leurs espaces environnants (Vaz Monteiro et al., 2016 dans Vaz et al., 2019). A titre d'exemple, cette dernière étude indique un rafraîchissement de 0,4 à 0,8°C sur une portée de 30 à 120 mètres pour les parcs de 0,8 à 3,8 ha et 0,6 à 1°C pour les parcs de 10,1 à 12 ha. D'autres stratégies de conception qui permettent de maximiser le rafraîchissement par les parcs et les arbres de cette même étude sont consultables en Annexe n°8.

Les intensités et portées de rafraîchissement (respectivement CEI : Cooling Effect Intensity et CED : Cooling Effect Distance) opérées par différents espaces verts sont maximisées quand

l'espace est très vaste (Aram et al., 2019). La Figure 27 synthétise les résultats de nombreuses études sur le rafraîchissement de parcs, ayant des géographies variées. Ces résultats permettent de montrer la variabilité des CED et CEI des espaces paysagers urbains, mais aussi d'aller dans le sens des recommandations de Vaz Monteiro et al., 2019 en termes de surfaces minimales pour assurer le rafraîchissement hors des limites de l'IFU.

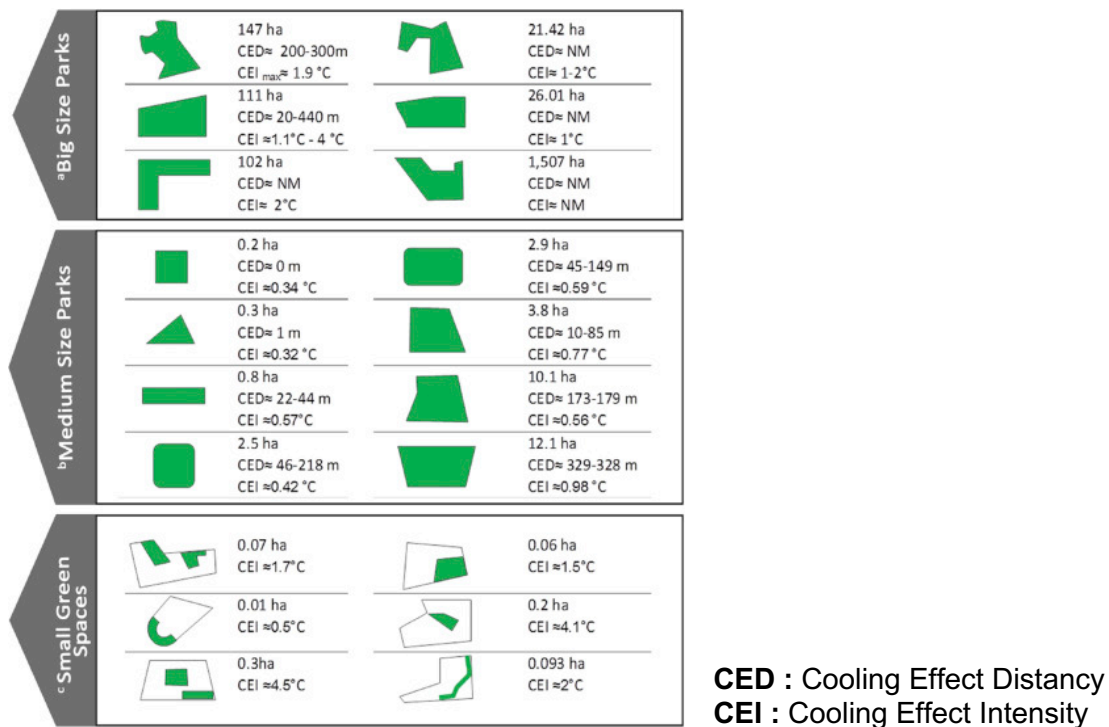


Figure 27 : Synthèse graphique des résultats de l'étude du rafraîchissement opéré par des espaces végétalisés (Source : Aram et al., 2019)

La création d'IFU bénéficiant d'une portée de rafraîchissement réduit les ICU si des parcs urbains de 3-5 ha sont insérés dans le maillage urbain à une distance de 100-150 mètres (Vaz Monteiro et al., 2019). Dans le même sens, des études numériques ont suggéré que des petits espaces verts (0,1 ha), séparés de 200 mètres ont une action rafraîchissante au moins aussi efficace que celle de grands parcs (Honjot, Takakura, 1990 dans Feix et al., 2017). À l'échelle globale, cela semble logique car les grands parcs peuvent avoir une portée rafraîchissante sur une longue portée, mais ceci seulement dans le sens du vent, comme par exemple la conséquente réduction de 1,5°C de la température d'air dans une zone construite perceptible jusqu'à 1 km sous le vent (Ca et al., 1998 dans Feix et al., 2017). Cette information souligne l'enjeu à conférer aux petits espaces paysagers urbains des fonctions d'IFU.

### 2.5.3 Un rafraîchissement très contextuel

Le rafraîchissement opéré par la végétation ainsi que l'intensité et la portée de fraîcheur d'un IFU sont très contextuels.

D'une part, le pouvoir rafraîchissant d'un arbre sera amplifié par contraste s'il est placé dans une situation critique (CF. Annexe n°4). La réduction maximale de température d'air un jour d'été à l'ombre d'un arbre seul est plus importante au-dessus de l'asphalte (3,5°C) (Golden et al., 2007) qu'au-dessus d'un espace engazonné ( 2,2°C) (Gilner et al., 2015). Ce

plus grand contraste de température, peut dissiper plus rapidement l'effet rafraîchissant de l'arbre. Ce que l'on nomme convection thermique, ou thermoconvection est l'ascendance de l'air provoquée par réchauffements différentiels. La vigueur de la convection thermique dépend essentiellement des contrastes de températures dans le sens horizontal. Ainsi, les mouvements d'air seront plus vifs dans le cas d'un arbre au-dessus d'une surface en asphalte qu'au-dessus d'une surface en gazon (Kjelgren, Montague, 1998). Lorsque les vitesses du vent sont plus faibles (<1 m/s) une rangée d'arbres améliore de manière plus conséquente le confort thermique (Manickathan et al., 2018). Cette étude mesure le potentiel rafraîchissant d'une rangée d'arbres à Dresden en Allemagne à midi un jour d'été en fonction de facteurs environnementaux (vitesse du vent, température d'air, humidité relative, rayonnement solaire) et les propriétés de l'arbre (taille des feuilles, résistance stomatique, densité foliaire).

Il est complexe de classer les espèces d'arbres les unes par rapport aux autres. Le rafraîchissement opéré peut varier en fonction des conditions climatiques mais aussi du port et du développement. Dans le cas de figure du rafraîchissement d'une rangée d'arbres entourée de gazon dans la ville de Dresden en Allemagne (Gilner et al., 2015), la classification suivante a été établie : *Tilia* > *Corylus* > *Aesculus* > *Liriodendron* > *Ginkgo* > *Ulmus*. L'étude SESAME dans le cas de la ville de Metz établit une notation par potentiel à lutter contre les ICU très différente : *Aesculus* (9 ou 7 selon l'espèce) > *Liriodendron* (8) > *Tilia* (8 ou 5 selon l'espèce) > *Ginkgo* (7) > *Ulmus*(6)> *Corylus* (5 ou 3 selon l'espèce).

Plutôt que de se fier à l'espèce, il est recommandé de se concentrer sur l'adaptation de celles-ci aux conditions locales et à son port optimisant l'ombrage. Pour information, l'étude SESAME (Services EcoSystémiques rendus par les Arbres Modulés selon l'Essence) oriente le choix d'espèces d'arbres, non seulement à visée de réduction d'ICU mais aussi selon les autres services écosystémiques fournis tel que le maintien de la biodiversité en ville et la contribution à la qualité de l'air. Il s'agit d'un système de notation intégrant plusieurs critères, dont les résultats et notations concernant la lutte contre les ICU sont présentés en Annexe n°5 (C.E.R.E.M.A Est, 2019).

Les conditions urbaines sont en général peu bénéficiaires à la pleine santé de l'arbre (Cf. Figure 28). Un arbre en moins bonne santé bénéficie d'un plus faible pouvoir rafraîchissant. Selon l'intensité de densité urbaine ces effets dégradants peuvent être plus ou moins marqués. De nombreuses variables rentrent également en compte comme l'intensité et la direction des vents.

De la même manière, les intensités et portées de rafraîchissement des IFU sont non seulement fonction de leur composition mais aussi de leurs environs physiques bâtis et de leurs conditions climatiques.

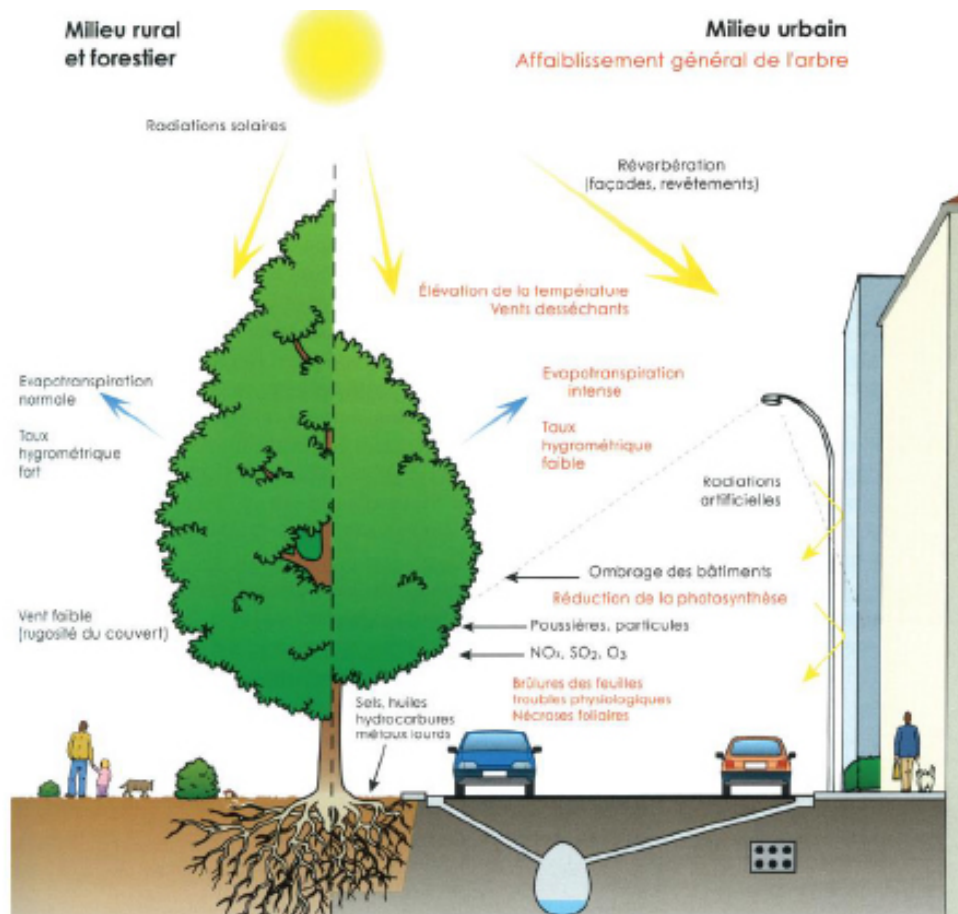


Figure 28 : Affaiblissement de l'arbre en ville (Source : Gillig et al., 2008)

En conclusion, nous souhaitons souligner que le surcoût occasionné par des mesures d'aménagements telles que celles présentées dans cette partie est limité. Connaissant les enjeux de réduction de la surchauffe des petits espaces paysagers urbains, ce léger surcoût est d'autant plus justifié. L'aménagement d'une place urbaine à Lyon, en mettant en place de solutions visant la formation d'IFU n'a engendré un surcoût que de 10 % (C.E.R.E.M.A, 2020). Ce surcoût intègre une phase d'expérimentation des solutions techniques, la mise en place d'un dallage clair, l'emploi d'une solution d'intégration des eaux pluviales, l'implantation de 93 arbres. Le prix engendré est comparé avec ceux d'un aménagement traditionnel ne tenant pas en compte l'adaptation au changement climatique, à l'instar de la place avant réaménagement. La mise en place de matériaux drainants et de végétaux génère certes un surcoût mais celui-ci est compensé : la gestion alternative des eaux pluviales évite les frais dus à l'implantation d'un réseau séparatif d'eaux pluviales.

Il s'agit donc de communiquer au mieux auprès des maîtrises d'ouvrages pour favoriser les mesures permettant la mise en place d'IFU dans les petits espaces paysagers urbains. Ces aménagements sont des questions riches d'enjeux et dont le surcoût reste, nous l'avons vu, modeste.



### 3 LE TRANSFERT DE CONNAISSANCES DU PAYSAGISTE AU MAÎTRE D'OUVRAGE

#### 3.1 À mesure que se dégrade la situation climatique, l'intégration des stratégies de réduction de la surchauffe urbaine émerge

Alors que les processus de surchauffe et d'îlot de chaleur sont étudiés et documentés depuis très longtemps, ce n'est que récemment que la lutte contre les ICU est un point important dans les documents d'urbanisme, dans les recommandations d'aménagements et qu'elle est mise en application. En effet, la première observation documentée sur le contraste entre la « chaleur artificielle » d'une ville, Londres, et la campagne environnante remonte à 200 ans par un pionnier des études du climat urbain, Howard en 1818. Par la suite, le terme d'ICU a été défini par un climatologue britannique, Manley, à la fin des années 1950.

Face à l'aggravation des conditions climatiques, le phénomène d'ICU s'est amplifié. Progressivement, la lutte contre le réchauffement climatique a été intégrée aux documents d'urbanisme et mobilise les maîtrises d'ouvrages et les paysagistes.

##### 3.1.1 *Urbanisme*

Le code de l'urbanisme précise que les actions des collectivités publiques en matière d'urbanisme visent à atteindre l'objectif de : « 7°: *La lutte contre le changement climatique et l'adaptation à ce changement, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'économie des ressources fossiles, la maîtrise de l'énergie et la production énergétique à partir de sources renouvelables* » (article L101-2 du Code de l'Urbanisme).

Les collectivités ayant fait entrer la question du confort climatique d'été et de l'ICU dans leurs PLUi ont intégré des mesures relevant de la végétalisation des espaces ou de la conception bioclimatiques des bâtiments. À titre d'exemple, à Agen, les Orientations d'Aménagement et de Programmation (OAP) aménagement comportent des orientations sur l'ombrage des espaces publics.

Le référentiel PLUi et Énergies-Climat cité dans Club PLUi, 2016 liste des possibilités de formulations de la lutte contre les ICU dans un PLUi. Elles peuvent concerner les mesures et articles d'urbanisme suivants :

- Le contrôle des emprises et formes bâties, donc la possibilité de recommander des implantations de bâtiments afin de favoriser les circulations d'air nocturne (R.151-39) ;
- Les matériaux des bâtiments, donc la possibilité de proscrire des revêtements de façades, sols ou toitures très foncés (R.151-41) ;
- L'obligation en matière de réalisation d'espaces libres et de plantations, donc la possibilité d'établir un ratio de référence de X arbres pour X places de stationnement créés ou X mètres carrés de pleine terre (R.151-43) ;
- La « limitation de l'imperméabilisation des sols, pour assurer la maîtrise du débit et de l'écoulement des eaux pluviales et de ruissellement, et prévoir le cas échéant des installations de collecte, de stockage voire de traitement des eaux pluviales et de ruissellement » donc la possibilité d'imposer la gestion alternative des eaux pluviales ainsi que des portions minimales de surfaces non imperméabilisées (R.151-49).

### 3.1.2 Les maîtrises d'ouvrages

Les maîtres d'ouvrages peuvent être de diverses natures et cela oriente leurs approches et intérêts sur la question de réduction de la surchauffe. Ils peuvent être des commanditaires publics (région, département, ville, établissement public d'aménagement), d'économie mixte (bailleurs sociaux) ou encore privés (promotion immobilière).

Cette variabilité de profils de maîtrise d'ouvrage nécessite une adaptation. Selon leur profil, les maîtrises d'ouvrages n'ont pas les mêmes objectifs. Certains seront gestionnaires de l'espace conçu et donc plus enclins aux investissements qui auront des retombées financières par la suite. D'autres au contraire sont davantage dirigés vers une rentabilité financière plus court-termiste. Les arguments à avancer devront être modulés en conséquence. Dans tous les cas, ils sont soumis aux orientations et obligations des documents d'urbanisme.

Selon la typologie de maîtrise d'ouvrage, les interlocuteurs seront plus ou moins sensibilisés et informés à propos de modes de réduction de la surchauffe urbaine par le paysage. Il faudra donc sensibiliser, informer, convaincre les maîtrises d'ouvrage de l'efficacité des mesures que nous avons présenté précédemment.

### 3.1.3 Le paysagiste

L'analyse des pratiques de conception des paysagistes à travers l'analyse de huit cas d'étude de quartiers écologiques menée en France et au Royaume-Uni en début des années 2010 révèle que les paysagistes étaient alors particulièrement mobilisés sur les caractéristiques écologiques reliées aux spécificités du site : la gestion durable de l'eau, la prise en compte de la biodiversité et les matériaux locaux. Les aspects plus globaux comme celui du réchauffement climatiques étaient moins présents (Leger-Smith, 2014).

Depuis ce constat, la situation a évolué. C'est-à-dire que cette décennie a amorcé le virage de l'intégration de la limitation de la surchauffe par les espaces urbains paysagers. Nombre de documents sur la thématique des ICU destinés aux collectivités territoriales ont été produits. Nous pouvons notamment évoquer les cahiers de l'Atelier Parisien d'Urbanisme (A.P.U.R), les documents de diagnostic de l'ADEME et du CEREMA mais aussi le développement d'outils destinés évaluer par un score la capacité d'aménagements existants et projetés à renforcer les ICU (Outil Score ICU développé par le BET E6 consulting).

Les attentes dirigées vers le paysagiste en termes d'expertise contre la surchauffe se sont renforcées. Un large spectre de documents et d'outils de diagnostic et d'identification des zones critiques existe, mais les études de cas sur les petits projets paysagers urbains réfléchis pour limiter la surchauffe sont restreints. Il y a donc un décalage qui s'est créé entre les connaissances de moyens opérationnels à petite échelle et les attentes. Par exemple, l'utilisation de matériaux à albédo élevé est recommandée et paradoxalement, cette information est difficile à trouver lors du choix de matérialité : la valeur d'albédo n'est pas présentée par les fournisseurs parmi les éléments descriptifs des matériaux et pour obtenir une idée, non-exhaustive, des valeurs de différents revêtements rencontrés en conception paysagère, il a fallu réaliser une compilation d'études et rapports (Cf. Annexe n°1 montrant une frise de valeur d'albédo).

De manière plus large, le transfert de savoir des études scientifiques vers les aménageurs n'est pas forcément aisé : La plupart des études sur les ICU vient d'études scientifiques qui sont par nature plus théoriques que pratiques. Les résultats d'études sont relativement larges et prennent souvent un ou deux aspects spécifiques des problématiques de l'ICU. Ainsi, cela nécessite un temps de collecte et d'intégration des données pour pouvoir les transformer en

concepts pratiques. Les aménageurs n'ont pas le même langage que les scientifiques. Pour que l'information leur parvienne de manière claire, il est préférable qu'elles soient présentées sous forme de principes d'aménagement, de vue d'ensemble des principes de bases ainsi que des exemples de bonnes pratiques. L'utilisation de multiples formes d'expression (visualisation, données chiffrées et textes explicatifs) augmente la compréhension entre les scientifiques et aménageurs (Kleerekoper et al., 2012).

## 3.2 La force d'un argumentaire paysager favorisant les IFU

### 3.2.1 Synthèse des concepts essentiels

Les concepts essentiels des éléments constitutifs des IFU doivent être synthétisés de manière claire. Nous avons souligné dans ce mémoire l'identification des propriétés d'un matériau frais (Cf. Figure 17) et le mécanisme de rafraîchissement par les arbres (Cf. Figure 20) pouvant possiblement servir d'argument pour la mise en place de gestion différenciée des eaux pluviales puisqu'elle permet à l'arbre de tourner à plein régime de ses capacités rafraîchissantes. Le rafraîchissement opéré par la présence d'eau, et notamment en mouvement reste à schématiser pour synthétiser le concept de rafraîchissement par le triptyque matériaux / eau / végétation.

L'utilisation de logos peut être judicieuse pour catégoriser les mesures multiples qui permettent la mise en place d'IFU. Le collectif parisien d'architectes et programmistes *Fieldwork*, ayant notamment conçu le projet *Lisière d'une Tierce Forêt* (cf. Annexe n°6) évoqué en partie sur la répartition spatiale du végétal, met en place ce type de logos pour la communication de leurs projets.

La Figure 29 ci-contre présente ainsi de haut vers le bas des logos décrivant :

- L'action sur l'accumulation : soit le taux de matière ou d'énergie absorbée
- L'absorption : rétention d'une substance par une autre
- L'infiltration : Pénétration d'une surface liquide à travers les interstices d'un corps solide
- L'écoulement : Mouvement d'un fluide
- La Filtration : Faire passer à travers un dispositif arrêtant certaines longueurs d'ondes
- L'Irradiation : Exposition à un flux de rayonnement

L'idée de représenter graphiquement les catégories d'actions environnementales et climatiques est intéressante. Hors contexte, la compréhension de certains logos est quelque peu abrupte, comme par exemple celui concernant l'absorption.



Figure 29 : Présentation en ligne du projet Lisière d'une Tierce Forêt par Fieldwork. (Source : <http://www.fieldwork.archi>)

Il est possible d'élaborer des logos partant de la réflexion sur la réduction de la surchauffe par la limitation de l'énergie accumulée (Cf. Figure 14 en introduction de la partie 2). Ceux-ci peuvent permettre d'identifier les leviers d'action de création d'IFU des mesures d'aménagements proposés. Ils peuvent être combinés entre eux et venir en accompagnement d'une notice paysagère (Cf. Figure 30).

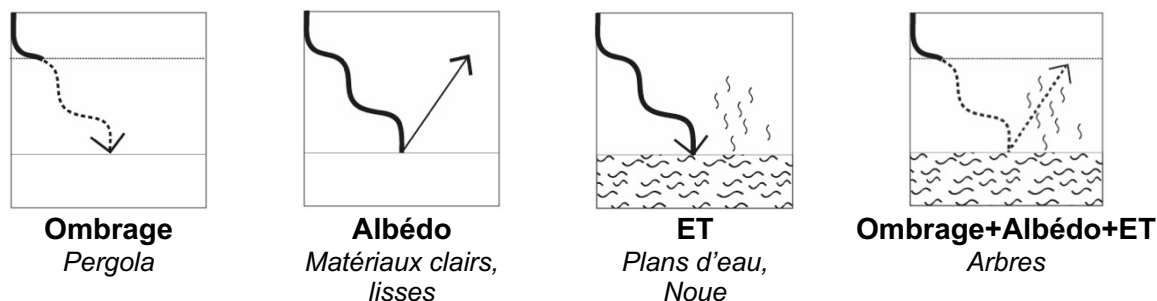


Figure 30 : Logo des modes de réduction de la chaleur accumulée par diminution du rayonnement et applications (Source : Carron, 2020)

Enfin, le travail de classification des matériaux et revêtements rencontrés dans les projets paysagers selon leur fraîcheur est présenté en Annexe n°1 et 2. Il est à compléter afin de pouvoir bénéficier d'outils supplémentaires pour renforcer son discours et orienter la matérialité du projet vers une meilleure régulation de la surchauffe.

### 3.2.2 Données et exemples appropriés

La communication de faits exacts et précis permet de légitimer le propos du paysagiste. Les concepts de base du pouvoir rafraîchissant du triptyque matériaux/eau/végétation sont facilement appropriables. Face à la complexité de synthèse des effets rafraîchissants, il est normal de ne pas être capable de quantifier l'effet rafraîchissant du projet dessiné. Il vaut mieux citer des abattements de température générés dans des situations similaires à celle du projet en mentionnant ce contexte de l'étude dans son argumentaire. Dépasser un niveau d'information basique et hors contexte permet de gagner en crédibilité. Par exemple une infographie grand public (Cf. Figure 31) fait référence à des abaissements de température de l'ordre de 4 à 8°C sous l'ombre d'un platane sans plus d'informations. Les comparaisons avec d'autres échelles de réductions de températures sous un arbre présentées en partie précédente et en Annexe n°4 permet de supposer qu'il s'agit de réduction de température de surface. Cette information peut être acceptable dans le cadre d'une sensibilisation/vulgarisation mais définitivement pas provenant d'un professionnel de l'aménagement.

La présentation des résultats d'études trop éloignées du contexte géographique et climatique n'est pas judicieuse : en cas de manque de données appropriées pour nourrir son argumentaire, il est préférable de souligner la présence dans le projet d'éléments factuels, comme par exemple l'augmentation des surfaces perméables, végétalisées et ombragées.

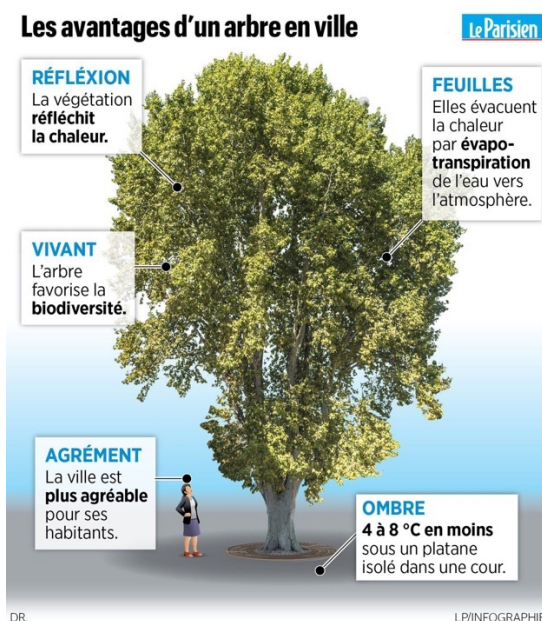


Figure 31 : Infographie vulgarisant les avantages d'un arbre en ville (Source : leparisien.fr)

Certaines données ne doivent pas être présentées car elles rendent moins intelligible le discours :

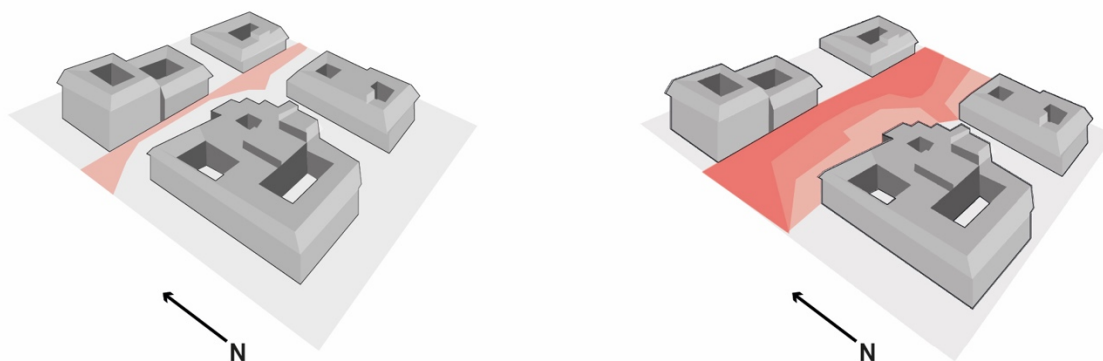
- Concernant les unités présentées liées au rafraîchissement, il est préférable de se tenir à des réductions de température d'air à hauteur de piéton, plus parlantes pour les maîtrises d'ouvrages. Les réductions de température de surface, de degré d'indice de confort thermique (Cf. partie 1.2.3) ou encore de flux de chaleur sensible risqueraient d'alourdir l'argumentaire.
- Les effets ambivalents ne doivent pas forcément être détaillés. Il s'agit par exemple de la dualité entre hausse de température par diminution d'inertie, de la diminution de la capacité de stockage d'énergie thermique accompagnée d'une diminution d'albédo quand la porosité d'un matériau augmente mais aussi du phénomène de piégeage radiatif sous la canopée ou dans les canyons qui bloque la dissipation des chaleurs nocturnes. Il est suggéré de privilégier les orientations du projet dans le sens de la limitation des surchauffes en journées. La réduction de température journalière est souvent plus marquée que l'échauffement nocturne et elle impacte davantage les activités humaines.
- Les modifications de température par modification du vent sont difficiles à interpréter et à mettre en place à l'échelle d'un petit espace paysager urbain. Énoncer que dans certaines situations un groupement d'arbres peut bloquer l'arrivée d'air sur un espace et ainsi l'échauffer est anecdotique par rapport au bénéfique, le plus souvent bien documenté, d'une densification végétale.

### 3.2.2 Adaptation au site

L'adaptation au site permet d'assurer un meilleur rafraîchissement. Elle indique aussi aux maîtrises d'ouvrages que la stratégie développée sur le projet pour limiter la surchauffe dépasse les mesures génériques prêtes à l'emploi.

L'identification des zones critiques car recevant une forte irradiation solaire permet d'implanter le végétal, matériaux et autres composants du projet de manière optimale. Plusieurs niveaux de diagnostic d'irradiation solaire sont possibles et doivent être complétés par la prise en compte des caractéristiques pédoclimatiques du site.

Dans le cas d'un îlot bâti à la géométrie simple dans lequel vient s'insérer le projet paysager, le diagnostic des zones critiques est assez évident. Il est possible de s'appuyer sur les données du Tableau 2 présentant les variations des taux de surfaces ombragées dans un canyon en mai-août selon les orientations et ratios. Bien évidemment, il est aussi possible de mobiliser son bon sens : les zones les plus critiques se trouvent dans les espaces ou les ouvertures du bâti dégagent un espace libre d'orientation Est/Ouest. Cette situation critique est d'autant plus exacerbée que les bâtiments sont petits et distants. Leur ombre projetée est donc minimale et donc les espaces sont susceptibles d'être exposés sur un temps plus long. Les ouvertures d'axes Nord/Sud bénéficient tour à tour de l'ombre portée du bâti du côté Est puis de l'Ouest au cours de la journée (Cf. Figure 32).



**Maillage urbain ménageant un petit espace ouvert**

**Maillage urbain ménageant un espace ouvert plus large**

Figure 32 : Identification des zones critiques d'irradiation solaire dans un îlot à la géométrie simple (Source : Carron, 2020)

Dans le cas d'espaces entourés par un bâti ayant une géométrie plus irrégulière, il est possible de modéliser les bâtiments de l'îlot et leur ombrage, par exemple grâce au logiciel SketchUp et de repérer les zones ensoleillées au solstice à chaque moment de la journée (Cf. Figure 33). La détermination des zones exposées le plus longtemps et le plus fortement au soleil permet non seulement de prédire les zones s'échauffant en journée mais aussi de savoir quelles zones vont accumuler le plus d'énergie et donc la restituer la nuit. Il sera ainsi possible de concentrer les efforts, particulièrement via la végétalisation, sur ces espaces et pouvoir mener une réflexion intégrant d'autres aspects, notamment d'usages, au niveau des espaces moins critiques.

Ce diagnostic d'irradiation solaire estival permet de pouvoir déployer une stratégie végétale adaptée aux conditions d'ensoleillement. Un milieu approprié pour le végétal est gageur de sa bonne santé, donc de l'optimisation de ses capacités de rafraîchissement.

Enfin, la connaissance du site se traduit aussi par la prise en compte des conditions pédologiques. Les modalités de mise en place de la gestion alternatives des eaux pluviales varient selon la perméabilité du sol qui permet ou non l'infiltration (Cf. partie 2.4.2).

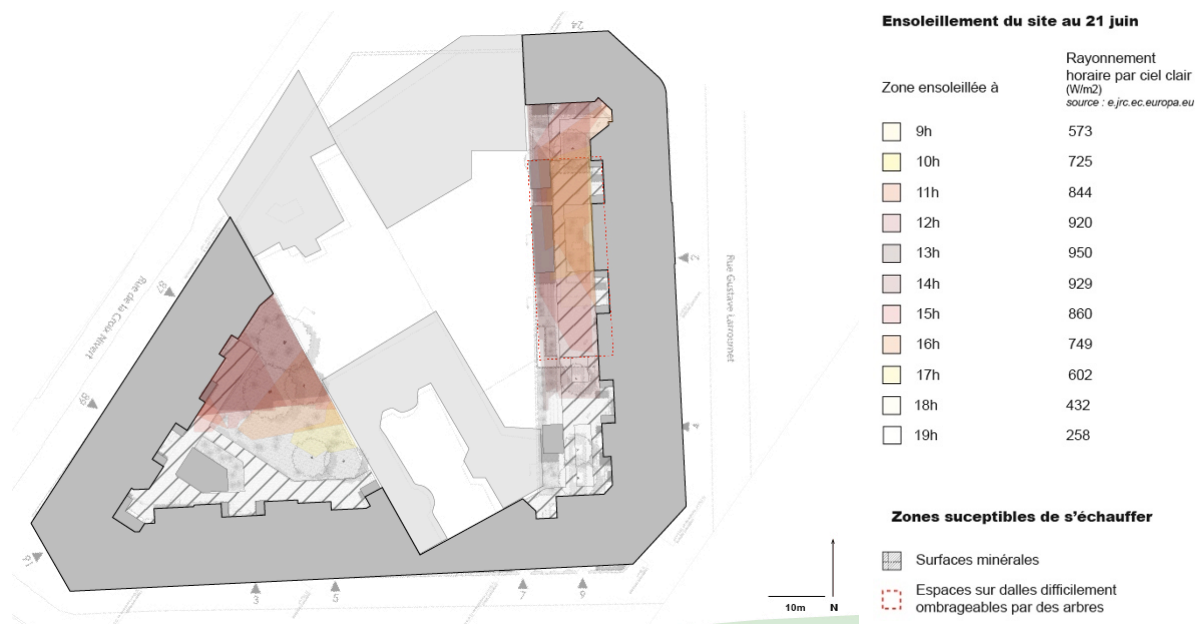


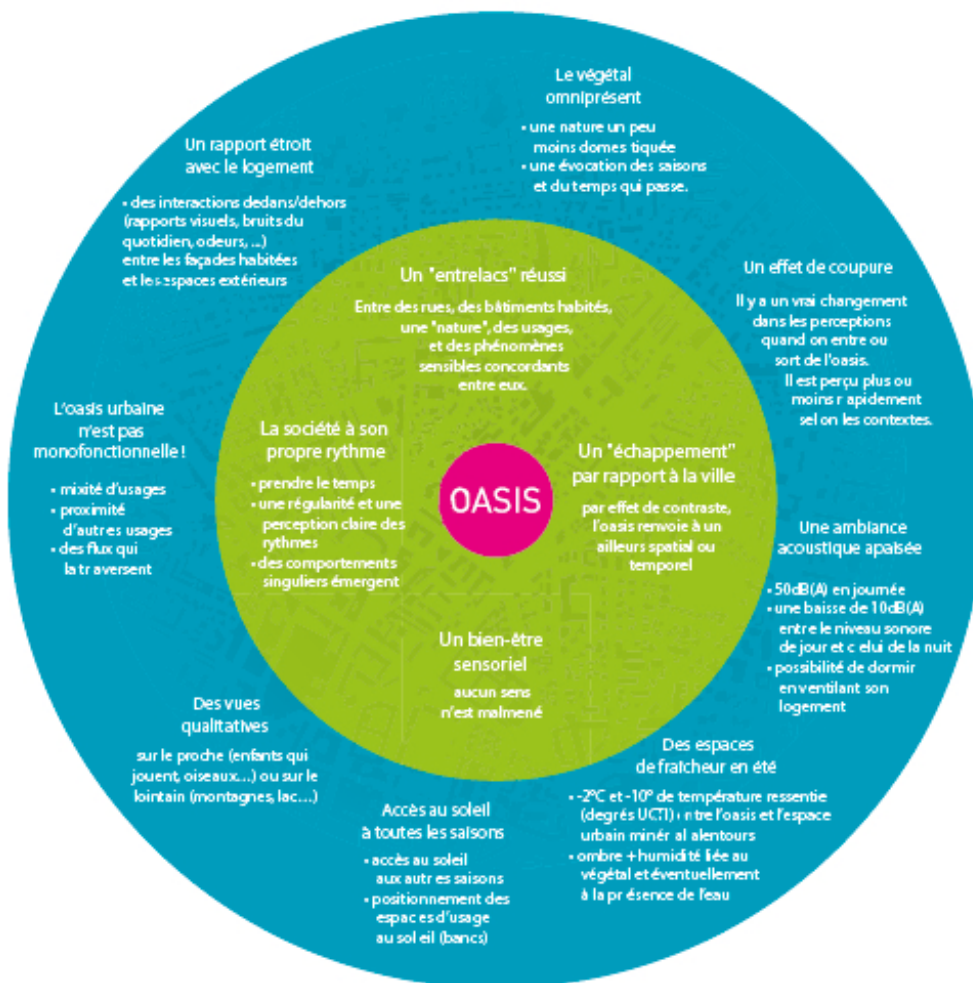
Figure 33 : Zones ensoleillées d'un cœur d'îlot à chaque heure au 21 juin (Source : Carron, 2020)

### 3.3 Couplage judicieux de l'argumentaire en faveur des IFU avec d'autres problématiques d'aménagement

Un des co-fondateurs du collectif Paysage de l'Après Pétrole soutient que « *le projet de paysage urbain doit rester propre à chaque ville, à chaque communauté, à chaque culture et non pas résulter de l'application « mathématique » des résultats de calculs qui contribueraient à uniformiser tous les paysages urbains du monde* » (Giorgis, 2019). Les espaces paysagers urbains ne peuvent être seulement vus comme des espaces végétalisables contribuant au système de refroidissement d'une ville et ainsi réduisant le paysagiste au rôle de technicien responsable du thermostat de ces espaces. La concentration des populations par les villes diversifie les usages, les pratiques et les besoins auxquels ces espaces doivent répondre. La force du discours du paysagiste réside en sa capacité à faire coexister les moyens favorisant la formation d'IFU avec les problématiques transversales du projet.

#### 3.3.1 *L'oasis thermique constitue une parenthèse urbaine*

Une réflexion sur les matériaux, la présence d'eau et de végétale dans les espaces paysagers urbains au-delà de permettre une intensité et portée de rafraîchissement accrue, permet la constitution de véritables oasis urbaines. Ces oasis urbaines marquent une respiration dans le maillage urbain. Celles-ci peuvent être définies de la sorte : « *Au cœur de la ville parfois trop animée, bruyante et minérale, l'OASIS URBAINE est comme une parenthèse, un lieu propice à la détente et au bien-être. Dans cet environnement extérieur au contact des façades habitées, la forte présence du végétal, la clarté de l'écoute et la fraîcheur produisent ensemble une perception cohérente, elle-même propice à l'apaisement des comportements. Si les oasis "complètes" sont rares, la ville offre de nombreuses oasis partielles* » (A.D.E.M.E., 2018).



#### L'identification de l'oasis

■ **La perception de l'oasis urbaine** : terminologie issue du croisement des observations du groupement et des "dires" des usagers et habitants > le langage doit faire se rencontrer les terminologies habitantes et expertes, parler de l'expérience du citoyen.

■ **La description de l'oasis urbaine** : descripteurs à destination des professionnels de l'aménagement et de la ville.

Figure 34 : Identification d'un oasis urbain (Source : A.D.E.M.E., 2018)

### 3.3.2 Possibles adéquations avec les ambiances, les usages, les capacités d'accueil de la biodiversité

Les petits espaces paysagers sont non seulement des espaces vécus mais aussi porteurs d'une forme de nature en ville. À ce titre, il est approprié de souligner le possible croisement entre ambiances paysagères, usages et accueil de la biodiversité que permettent les mesures génératrices de fraîcheur.

La densité végétale qui permet de protéger les plantes des irradiations solaires et d'assurer un espace rafraîchi modifie les ambiances paysagères. Ces boisements, par leur forme et positionnement peuvent générer des mises à distance, des obstructions et percées visuelles. Elles peuvent entraîner des variations de rythme dans le motif paysager, créent des effets de surprise, ou bien rythmer une perspective.

Nous l'avons vu, des combinaisons d'usages sont possibles avec les ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales. Les tranchées d'infiltrations peuvent être situées sous des cheminements, les bassins d'infiltrations peuvent accueillir des usages quand ils ne sont pas



en eau. Plutôt qu'une contrainte pour tendre vers des espaces plus frais, ils constituent également un moyen de développer l'expression paysagère.

Les enjeux d'accueil de la biodiversité sont compatibles avec des mesures luttant contre la surchauffe. Une végétation multistrate est susceptible d'accueillir une diversité d'espèces plus importante. Par exemple concernant les lieux des nichées : certains oiseaux nichent au sol, d'autre dans des arbustes ou encore dans le houppier ou le tronc des arbres. La gestion alternative des eaux pluviales induit la présence d'espaces en eau de manière temporaire ou permanente. Cette création de zones humides s'accompagne d'un milieu spécifique qui peut être planté avec des plantes hygrophiles ou encore accueillir par la suite des espèces spontanées végétales et animales inféodées à ce milieu et à son niveau d'humidité.

### 3.3.3 Mise en avant des plus-values financières

Dans le cas d'un interlocuteur avec une visée financière court-termiste, il sera mal aisé de défendre le surcoût d'aménagement à hauteur de 10 % présenté en 2.5.3 (C.E.R.E.M.A, 2020). Dans le cas d'un interlocuteur sensible aux diminutions de coût des usages futurs, il est possible d'argumenter qu'une conception limitant la surchauffe peut apporter une réduction de l'usage climatisation et donc de la consommation d'énergie. On dispose à cet effet d'études très convaincantes, comme ci-après.

Lorsqu'elles sont situées sous des haies brise-vent, les maisons consomment 25% moins d'énergie que lorsqu'elles sont exposées en plein vent (Sud du Dakota, États-Unis) (Akbari et al., 1992 dans Feix et al., 2017)

La simulation d'une plantation de 4 arbres par bâtiment dans 3 villes des États-Unis (Baton Rouge (LA), Sacramento (CA) et Salt Lake City (UT) et des effets cumulés de l'ombrage et de l'évapotranspiration, permet d'affirmer que cette plantation réduit les factures énergétiques des habitations, bureaux et magasins (1,5 à 12,8 M\$ par an et par ville). Les effets négatifs des arbres (sur le chauffage en hiver) sont compensés par les effets positifs (sur la climatisation en été) (Konopacki et al., 2000 dans Feix et al., 2017)

Les aspects de la limitation de la surchauffe de l'espace du projet relèvent de compétences multiples. Les groupements des projets constituent également des lieux de ressources des compétences qu'il faut tâcher de mettre à profit. En effet, « *Les champs d'intervention pour limiter les pollutions urbaines de la civilisation du pétrole sont très vastes et en appellent, pour y porter réponse, à des disciplines qui, il y a peu, n'avaient pas leur place dans les projets de paysages urbains. Ce contexte appelle à la mobilisation de nombreuses compétences et disciplines nouvelles dans des approches transversales, le paysage étant par essence une réalité qui croise des disciplines diverses avec les approches sensibles et les représentations culturelles qui habitent chacun.* »(Giorgis, 2019)

## CONCLUSION

Le paysagiste peut être parfois amené à sensibiliser les maîtrises d'ouvrages sur la modification du dessin permettant le rafraîchissement des projets. Les petits espaces paysagers urbains (cœurs d'îlot, parcs, placettes) ne doivent pas être sous-estimés : ces espaces, malgré leur surface réduite, constituent des haltes, des zones de répit thermique dans un milieu urbain qui s'échauffe. Le bénéfice n'est pas que local, les parcs urbains supérieurs à 0,5 ha offrent un rafraîchissement au-delà de leurs limites. Il faut malheureusement rappeler que face à l'ampleur des modifications climatiques, de l'extension des villes et d'un maillage urbain peu modifiable, les solutions par le paysage aux questions de surchauffe urbaine ne peuvent pas à elle seules suffire.

Les maîtrises d'ouvrages, bien que sensibilisées, pourraient remettre en cause le bien-fondé des mesures rafraîchissantes proposées. *Est-ce que notre aménagement aura vraiment un impact sur le confort thermique ? Les possibles surcoûts d'une conception visant un rafraîchissement sont-ils justifiés ?* Le paysagiste pourra dialoguer grâce à des grands principes de fonctionnement synthétisés, des données rigoureuses scientifiquement et des exemples contextualisés. Enfin, les solutions d'aménagements proposées seront adaptées au site, notamment à ses conditions d'ensoleillement. Les compétences transversales du paysagiste ne peuvent être niées. Sa force sera de proposer des espaces IFU répondant à une diversité d'enjeux et d'usages. En effet, le paysagiste ne doit pas être réduit au rôle de technicien responsable du thermostat de ces espaces.

À la suite de la présente réflexion, nous constatons que les évaluations théoriques du rafraîchissement des matériaux sont à imaginer. Un vrai référentiel de valeurs d'albédo des revêtements de conception paysagère est à développer sur la base de ce qui a été proposé en Annexe n°1 pour rendre opérationnelles les diverses préconisations d'aménagement de la documentation existante. L'ambivalence des effets nocturnes et journaliers des variations de la porosité mais aussi l'inertie rend complexe l'évaluation des performances rafraîchissantes. Il n'existe pas de normes sur les performances thermiques de matériaux utilisés en extérieur car cela serait largement soumis aux conditions climatiques variables du site. Cependant, il manque une vraie connaissance des performances de ces matériaux.

Les résultats concrets à l'échelle des petits projets paysagers sont à venir, notamment avec les bénéfices thermiques du projet « Lisière d'une Tierce Forêt ». La conversion de ce parking en espace où la densité arborée est modulée selon l'intensité d'irradiation solaire intègre la collecte des eaux. Une réserve utile stocke l'eau collectée par infiltration grâce à la présence d'un béton drainant et permet l'alimentation des arbres en eau, ceux-ci la rediffusent par la suite dans l'air. Une station météo a été intégrée au site, il est certain que les résultats permettront d'évaluer l'efficacité des mesures du triptyque matériaux / eau / végétation dans la formation d'IFU et nourriront par l'exemple l'argumentaire vers les maîtrises d'ouvrages.

## BIBLIOGRAPHIE

**A.D.E.M.E.**, 2018. Ménager des oasis urbaines en site urbain : quelles méthodes et quels outils ? Principaux résultats du projet de recherche « Oasis Urbaines » [en ligne]. janvier 2018. S.l. : s.n. [Consulté le 1 novembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://partage.ademe.fr/public/cf6211>.

**ALI-TOUDERT, F.** et **MAYER, H.**, 2006. Effects of street design on outdoor thermal comfort. In : . janvier 2006. p. 11.

**ANDREOU, E.** et **AXARLI, K.**, 2012. Investigation of urban canyon microclimate in traditional and contemporary environment. Experimental investigation and parametric analysis. In : Renewable Energy. juillet 2012. Vol. 43, p. 354-363. DOI 10.1016/j.renene.2011.11.038.

**A.P.U.R.**, 2012. Les îlots de chaleur urbains à Paris Cahier # 1 [en ligne]. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ilots-chaleur-urbains-paris-cahier-1>.

**A.P.U.R.**, 2014. Les îlots de chaleur urbains à Paris Cahier#2 : simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements [en ligne]. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : [https://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilots\\_chaleur\\_urbains\\_paris\\_cahier2.pdf](https://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilots_chaleur_urbains_paris_cahier2.pdf).

**A.P.U.R.**, 2017a. Les îlots de chaleur urbains à Paris – Cahier#4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris [en ligne]. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : [https://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilots\\_chaleur\\_urbains\\_paris\\_revêtements\\_sol\\_paris.pdf](https://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilots_chaleur_urbains_paris_revêtements_sol_paris.pdf).

**A.P.U.R.**, 2017b. Les îlots de chaleur urbains du cœur de l'agglomération parisienne - Cahier#3: Brises thermiques [en ligne]. S.l. : s.n.

[Consulté le 27 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : [https://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilots\\_chaleur\\_urbains\\_brisés\\_thermiques.pdf](https://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilots_chaleur_urbains_brisés_thermiques.pdf).

**ARAM, F.**, **HIGUERAS GARCÍA, E.**, **SOLGI, E.** et **MANSOURNIA, S.**, 2019. Urban green space cooling effect in cities. In : Heliyon. avril 2019. Vol. 5, n° 4, p. e01339. DOI 10.1016/j.heliyon.2019.e01339.

**ATHAMENA, K.**, 2013. Modélisation et simulation des microclimats urbains: Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers [en ligne]. S.l. : École Centrale de Nantes. [Consulté le 26 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : [https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/811583/filename/These\\_Khaled\\_Athamena.pdf](https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/811583/filename/These_Khaled_Athamena.pdf).

**BOETERS, R.**, **DONKERS, S.**, **LEE, D.**, **LIEM, V.**, **MONTAZERI, S.**, **VAN OOSTVEEN, J.** et **PIETRZYK, P.**, 2012. The effect of 3D geometry complexity on simulating radiative, conductive and convective fluxes in an urban canyon. S.l. : s.n. Geomatic Synthesis Project.

**BOWLER, D.E.**, **BUYUNG-ALI, L.**, **KNIGHT, T.M.** et **PULLIN, A.S.**, 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. In : Landscape and Urban Planning. septembre 2010. Vol. 97, n° 3, p. 147-155. DOI 10.1016/j.landurbplan.2010.05.006.

**CASTAGNÈDE, B.** et **DANIEL, P.**, 2018. Chapitre 1-Introduction générale. In : Thermique de l'ingénieur avec applications - exercices et problèmes corrigés, rappels de cours [en ligne]. Ellipses marketing. S.l. : s.n. Formations & Techniques. [Consulté le 21 octobre 2020]. ISBN 2-340-02702-0. Disponible à l'adresse :

[https://www.editions-ellipses.fr/index.php?controller=attachmen t&id\\_attachment=32520](https://www.editions-ellipses.fr/index.php?controller=attachmen t&id_attachment=32520).

**C.E.R.E.M.A**, 2020. Adapter l'espace public aux enjeux climatiques : à quel coût et pour quels bénéfices ? Le réaménagement de la place de Francfort à Lyon. In : . 13 octobre 2020. p. 8.

**C.E.R.E.M.A EST**, 2019. SESAME : Services écosystémiques rendus par les arbres, modulés selon l'essence. S.l.

**C.E.R.E.M.A et GRAND LYON**, 2017. Confort thermique en milieu urbain Quelques outils disponibles pour l'aide à la décision [en ligne]. 14 février 2017. S.l. : s.n. [Consulté le 12 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : [https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/09/carnets\\_fevrier2016\\_vf\\_cle7a1f49.pdf](https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/09/carnets_fevrier2016_vf_cle7a1f49.pdf).

**CLUB PLUI**, 2016. Retour d'expériences de collectivités sur l'intégration de la question du changement climatique dans leur PLUi [en ligne]. mai 2016. S.l. : s.n. [Consulté le 1 novembre 2020]. Disponible à l'adresse : [http://www.club-plui.logement.gouv.fr/IMG/pdf/PLUi\\_et\\_Cli mat\\_Retour\\_d\\_experiences\\_VDEF\\_cle71821c.pdf](http://www.club-plui.logement.gouv.fr/IMG/pdf/PLUi_et_Cli mat_Retour_d_experiences_VDEF_cle71821c.pdf).

**DE MUNCK, C.**, 2013. Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville [en ligne]. Océan, Atmosphère et surfaces continentales. S.l. : Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse). [Consulté le 19 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : [https://oatao.univ-toulouse.fr/11215/1/demunck\\_partie\\_1\\_sur\\_2.pdf](https://oatao.univ-toulouse.fr/11215/1/demunck_partie_1_sur_2.pdf).

**DE MUNCK, C., PIGEON, G., MASSON, V., MEUNIER, F., BOUSQUET, P., TRÉMÉAC, B., MERCHAT, M., POEUF, P. et MARCHADIER, C.**, 2013. How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? In : International Journal of Climatology.

janvier 2013. Vol. 33, n° 1, p. 210-227. DOI 10.1002/joc.3415.

**DERROUCH, P.**, 2020. À Aubervilliers, un parking transformé en Tierce Forêt. In : Traits Urbains. avril 2020. n° 110, p. 72-73.

**DIMOUDI, A. et NIKOLOPOULOU, M.**, 2003. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. In : Energy and Buildings. janvier 2003. Vol. 35, n° 1, p. 69-76. DOI 10.1016/S0378-7788(02)00081-6.

**DOBOS, A.**, 2015. Albedo. In : Encyclopedia of Soil Science. décembre 2015. p. 4. DOI 10.1201/NOE0849338304.ch15.

**DRÉNOU, C.**, 2018. Arbres : Un botaniste au musée. S.l. : Fages éditions. ISBN 2-84975-538-9.

**EUROMÉDITERANNÉE**, 2010. Veille documentaire - Fiches « Qualité Environnementale ». Favoriser les formes urbaines et les espaces publics agréables à vivre. Les phénomènes d'îlot de chaleur en milieu urbain dense [en ligne]. 22 janvier 2010. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : [http://www.enviroboite.net/spip/IMG/pdf/1001\\_îlots\\_chaleur\\_milieu\\_urbain\\_CSDAzur\\_Domene\\_Invivo\\_V1.pdf?537/22a051471c50b0ba523a604ce70e126a0fe43416](http://www.enviroboite.net/spip/IMG/pdf/1001_îlots_chaleur_milieu_urbain_CSDAzur_Domene_Invivo_V1.pdf?537/22a051471c50b0ba523a604ce70e126a0fe43416).

**FAHED, J.**, 2018. Étude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des îlots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen [en ligne]. S.l. : Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02003346/document>.

**FEIX, I., MARQUET, S. et THIBIER, E.**, 2017. Aménager avec la nature en ville [en ligne]. ADEME éditions. S.l. : s.n. ISBN 979 1 02970 868 8. Disponible à l'adresse : <https://www.ademe.fr/sites/default/files/ass>

ets/documents/amenager-avec-la-nature-en-ville-8873.pdf.

**GIGUÈRE, M.**, 2010. Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains revue de littérature [en ligne]. Québec : Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut national de santé publique Québec. [Consulté le 31 octobre 2020]. ISBN 978-2-550-56805-6. Disponible à l'adresse : <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2007095>.

**GILNER, S., VOGT, J., THARANG, A., DETTMANN, S. et ROLOFF, A.**, 2015. Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. In : *Landscape and Urban Planning*. novembre 2015. Vol. 143, p. 33–42. DOI 10.1016/j.landurbplan.2015.06.005.

**GIORGIS, S.**, 2019. Les nouveaux paysages urbains d'un espace public résilient en temps de changement climatique. In : *Signé PAP* [en ligne]. mai 2019. n° 30. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.paysages-apres-petrole.org/wp-content/uploads/2019/06/ARTICLE-30-Collectif-PAP-SG.pdf>.

**GIRIDHARAN, R., LAU, S.S.Y., GANESAN, S. et GIVONI, B.**, 2007. Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. In : *Building and Environment*. octobre 2007. Vol. 42, n° 10, p. 3669-3684. DOI 10.1016/j.buildenv.2006.09.011.

**GOLDEN, J.S., CARLSON, J., KALOUSH, K.E. et PHELAN, P.**, 2007. A comparative study of the thermal and radiative impacts of photovoltaic canopies on pavement surface temperatures. In : *Solar Energy*. juillet 2007. Vol. 81, n° 7, p. 872-883. DOI 10.1016/j.solener.2006.11.007.

**GRAND LYON -COMMUNAUTÉ URBAINE**, 2010. Lutte contre les îlots de chaleur urbains - Référentiel conception et

gestion des espaces publics [en ligne]. 2010. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : [https://www.grandlyon.com/fileadmin/user\\_upload/media/pdf/voirie/referentiel-espaces-publics/20091201\\_gl\\_referentiel\\_espaces\\_publics\\_thematique\\_lutte\\_contre\\_ilots\\_chaleur\\_urbains.pdf](https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/voirie/referentiel-espaces-publics/20091201_gl_referentiel_espaces_publics_thematique_lutte_contre_ilots_chaleur_urbains.pdf).

**GROMKE, C., BLOCKEN, B., JANSSEN, W., MEREMA, B., VAN HOOFF, T. et TIMMERMANS, H.**, 2015. CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. In : *Building and Environment*. janvier 2015. Vol. 83, p. 11-26. DOI 10.1016/j.buildenv.2014.04.022.

**HENDEL, M., GRADOS, A., COLOMBERT, M., DIAB, Y. et ROYON, L.**, 2015. Quel est le meilleur revêtement pour limiter la formation des îlots de chaleur urbains ? In : . mai 2015. p. 9.

**HIRSCH, Y.**, 2017. Caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain et recherche d'une solution paysagère pour le site de la résidence Damrémont à Paris. In : . 2017. p. 91.

**IAU ÎDF**, 2010. Les îlots de chaleur urbains. Répertoire de fiches connaissance [en ligne]. S.l. : s.n. ISBN 978.2.7371.1762.6. Disponible à l'adresse : [https://www.iau-idf.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude\\_774/Les\\_ilots\\_de\\_chaleur\\_urbains\\_REPERTOIRE.pdf](https://www.iau-idf.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude_774/Les_ilots_de_chaleur_urbains_REPERTOIRE.pdf).

**ICARE/ALTO INGÉNIERIE POUR LE COMPTE DE L'ADEME**, 2012. Guide de recommandation pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain à destination des collectivités territoriales [en ligne]. octobre 2012. S.l. : s.n. [Consulté le 3 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/dossiers/786-guide-lutte-icu.pdf>.

**JASECHKO, S., SHARP, Z.D., GIBSON, J.J., BIRKS, S.J., YI, Y. et FAWCETT, P.J.**, 2013. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. In : *Nature*. 18 avril 2013. Vol. 496, n° 7445, p. 347-350. DOI 10.1038/nature11983.

**KEVERN, J.T., HASELBACH, L. et SCHAEFER, V.R.**, 2012. Hot Weather Comparative Heat Balances in Pervious Concrete and Impervious Concrete Pavement Systems. In : . janvier 2012. p. 10.

**KJELGREN, R. et MONTAGUE, T.**, 1998. Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. In : *Atmospheric Environment*. janvier 1998. Vol. 32, n° 1, p. 35-41. DOI 10.1016/S1352-2310(97)00177-5.

**KLEEREKOPER, L., VAN ESCH, M. et SALCEDO, T.B.**, 2012. How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. In : *Resources, Conservation and Recycling*. juillet 2012. Vol. 64, p. 30-38. DOI 10.1016/j.resconrec.2011.06.004.

**KONARSKA, Janina, LINDBERG, F. et KONARSKA, J.**, 2015. Transpiration of urban trees and its impact on daytime and nocturnal cooling in Gothenburg, Sweden. juillet 2015. p. 7.

**LAMBERS, H., CHAPIN, F.S. et PONS, T.L.**, 2008. *Plant Physiological Ecology* [en ligne]. New York, NY : Springer New York. [Consulté le 24 octobre 2020]. ISBN 978-0-387-78340-6. Disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-78341-3>.

**LEGER-SMITH, F.-A.**, 2014. Évolution des pratiques des paysagistes face aux enjeux écologiques de la conception urbaine [en ligne]. S.l. : Université d'Angers. [Consulté le 27 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01023261/document>.

**LEHOUCQ, R.**, 2018. Le rayonnement thermique et les longueurs d'onde. In : *Futura Science* [en ligne]. 20 décembre 2018. [Consulté le 19 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.futura-sciences.com/sante/dossiers/biologie-vision-viennent-superpouvoirs-superman-1566/page/2/>.

**LEMORDANT, L., GENTINE, P., SWANN, A.S., COOK, B.I. et SCHEFF, J.**, 2018. Critical impact of vegetation physiology on the continental hydrologic cycle in response to increasing CO<sub>2</sub>. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 17 avril 2018. Vol. 115, n° 16, p. 4093-4098. DOI 10.1073/pnas.1720712115.

**LI, H., HARVEY, J. et JONES, D.**, 2013. Cooling Effect of Permeable Asphalt Pavement under Dry and Wet Conditions. In : *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. janvier 2013. Vol. 2372, n° 1, p. 97-107. DOI 10.3141/2372-11.

**MANICKATHAN, L., DEFRAEYE, T., ALLEGRINI, J., DEROME, D. et CARMELIET, J.**, 2018. Parametric study of the influence of environmental factors and tree properties on the transpirative cooling effect of trees. In : *Agricultural and Forest Meteorology*. janvier 2018. Vol. 248, p. 259-274. DOI 10.1016/j.agrformet.2017.10.014.

**MARIE, H., LAPRAY, K. et MUSY, M.**, 2017. *Diagnostic de la surchauffe urbaine. Méthodes et applications territoriales* [en ligne]. ADEME éditions. S.l. : s.n. [Consulté le 20 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/diagnostic\\_de\\_la\\_surchauffe\\_urbaine-ademe\\_ils\\_l\\_ont\\_fait\\_recueil\\_bd\\_010307.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/diagnostic_de_la_surchauffe_urbaine-ademe_ils_l_ont_fait_recueil_bd_010307.pdf).

**MCDONALD, R., KROEGER, T., BOUCHER, T., WANG, L. et SALEM, R.**, 2016. *Planting Healthy Air : A global analysis of the role of urban tree in addressing particulate matter pollution and*

extreme heat [en ligne]. S.I. : The Nature Conservancy. Disponible à l'adresse : [https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/20160825\\_PHA\\_Report\\_Final.pdf](https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/20160825_PHA_Report_Final.pdf).

**NAPOLI, M., MASSETTI, L., BRANDANI, G., PETRALLI, M. et ORLANDINI, S.,** 2016. Modeling Tree Shade Effect on Urban Ground Surface Temperature. In : *Journal of Environmental Quality*. janvier 2016. Vol. 45, n° 1, p. 146-156. DOI 10.2134/jeq2015.02.0097.

**NG, E., CHEN, L., WANG, Y. et YUAN, C.,** 2012. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. In : *Building and Environment*. janvier 2012. Vol. 47, p. 256-271. DOI 10.1016/j.buildenv.2011.07.014.

**LOUDIN, L.,** 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. In : . 2004. p. 496.

**PETRALLI, M., MASSETTI, L. et ORLANDINI, S.,** 2009. Air temperature distribution in an urban park : differences between open-field and below a canopy. In : . 2009. p. 5.

**PETRALLI, M., MASSETTI, L., PEARLMUTTER, D., BRANDANI, G., MESSERI, A. et ORLANDINI, S.,** 2020. UTCI field measurements in an urban park in Florence (Italy). In : *Miscellanea Geographica* [en ligne]. 11 août 2020. Vol. 0, n° 0. [Consulté le 31 octobre 2020]. DOI 10.2478/mgrsd-2020-0017. Disponible à l'adresse : <https://content.sciendo.com/view/journals/mgrsd/ahead-of-print/article-10.2478-mgrsd-2020-0017/article-10.2478-mgrsd-2020-0017.xml>.

**PINSON, L.,** 2016. Analyse et représentation des épisodes de caniculaires en zones urbaines denses: de la durée à la conception d'un indice de dangerosité [en ligne]. Laboratoire LISIS de l'institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de

l'Aménagement et des Réseaux : Université Paris-Est. [Consulté le 19 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01540378/file/TH2016PESC1061.pdf>.

**QIN, Y.,** 2015. A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. décembre 2015. Vol. 52, p. 445-459. DOI 10.1016/j.rser.2015.07.177.

**QIN, Y. et HILLER, J.E.,** 2014. Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. In : *Energy and Buildings*. décembre 2014. Vol. 85, p. 389-399. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.09.076.

**RENAUD, V., INNES, J.L., DOBBERTIN, M. et REBETEZ, M.,** 2011. Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland for different types of forests over 10 years (1998–2007). In : *Theoretical and Applied Climatology*. août 2011. Vol. 105, n° 1-2, p. 119-127. DOI 10.1007/s00704-010-0361-0.

**RINGENBACK, N.,** 2004. Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg [en ligne]. Strasbourg : Université Louis Pasteur. [Consulté le 4 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : [https://publication-theses.unistra.fr/public/theses\\_doctorat/2004/RINGENBACH\\_Nicolas\\_2004.pdf](https://publication-theses.unistra.fr/public/theses_doctorat/2004/RINGENBACH_Nicolas_2004.pdf).

**ROSENZWEIG, C., SOLECKI, W., PARSHALL, L., GAFFIN, S., LYNN, B., GOLDBERG, R., COX, J., HODGES, S. et COLLEGE, H.,** 2006. Mitigating New York City's Heat Island with urban forestry, living roofs and light surfaces. In : . 2006. p. 5.

**SANTAMOURIS, M., GAITANI, N., SPANOU, A., SALIARI, M., GIANNOPOULOU, K., VASILAKOPOULOU, K. et KARDOMATEAS, T., 2012.** Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the Flisvos project. In : Building and Environment. juillet. juillet 2012. Vol. 53, p. 128–136. DOI 10.1016/j.buildenv.2012.01.022.

**SHEPHERD, J.M., 2005.** A Review of Current Investigations of Urban-Induced Rainfall and Recommendations for the Future. In : Earth Interactions. 1 juillet 2005. Vol. 9, n° 12, p. 1-27. DOI 10.1175/EI156.1.

**SOBSTYL, J.M., EMIG, T., QOMI, M.J.A., ULM, F.-F. et PELLENQ, R.J.-M., 2018.** Role of City Texture in Urban Heat Islands at Nighttime. In : Physical Review Letters. 2018. Vol. 120, n° 10, p. 108701. DOI 10.1103/PhysRevLett.120.108701.

**SYMASOL, 2016.** Gestion des eaux pluviales Guide pour la mise en œuvre de techniques alternatives [en ligne]. S.l. : s.n. ISBN 978-2-9558003-1-7. Disponible à l'adresse : [http://www.gesteau.fr/sites/default/files/brochure-symasol\\_isbn\\_web.pdf](http://www.gesteau.fr/sites/default/files/brochure-symasol_isbn_web.pdf).

**TAHA, H., AKBARI, H. et ROSENFELD, A., 1989.** LBL 24593 : Vegetation Canopy Micro-Climate: A Field-Project in Davis, California [en ligne]. Berkeley, California. Lawrence Berkeley Laboratory Report. [Consulté le 16 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <https://escholarship.org/content/qt7td0c626/qt7td0c626.pdf>.

**TAKEBAYASHI, H. et MORIYAMA, M., 2012.** Study on Surface Heat Budget of Various Pavements for Urban Heat Island Mitigation. In : Advances in Materials Science and Engineering. 2012. p. 1–11. DOI 10.1155/2012/523051.

**TAN, P.Y., WONG, N.H., TAN, C.L., JUSUF, S.K., CHANG, M.F. et CHIAM, Z.Q., 2018.** A method to partition the

relative effects of evaporative cooling and shading on air temperature within vegetation canopy. In : Journal of Urban Ecology [en ligne]. 1 janvier 2018. Vol. 4, n° 1. [Consulté le 3 novembre 2020]. DOI 10.1093/jue/juy012. Disponible à l'adresse : <https://academic.oup.com/jue/article/doi/10.1093/jue/juy012/5051919>.

**TCHANG, N., 2016.** L'expérience d'un BET sur les EcoQuartiers. Effets d'îlot de chaleur urbain. In : CVC. mars 2016. n° 891, p. 25-27.

**VAZ MONTEIRO, M., HANDLEY, P., MORISON, J.I.L. et DOICK, K.J., 2019.** The role of urban trees and greenspaces in reducing urban air temperatures [en ligne]. S.l. [Consulté le 1 août 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.forestresearch.gov.uk/documents/7125/FCRN037.pdf>.

**WALTHER, E. et GOESTCHEL, Q., 2018.** Indicateur de confort PET : Une revue critique. In : AREP L'hypercube [en ligne]. juillet 2018. Disponible à l'adresse : [https://lhypercube.arep.fr/wp-content/uploads/2018/07/Poster\\_ConfortPET\\_EXE.pdf](https://lhypercube.arep.fr/wp-content/uploads/2018/07/Poster_ConfortPET_EXE.pdf).

**XUE, F., LI, X., MA, J. et ZHANG, Z., 2015.** Modeling the influence of fountain on urban microclimate. In : Building Simulation. juin 2015. Vol. 8, n° 3, p. 285-295. DOI 10.1007/s12273-014-0210-7.

**YAGHOUBIAN, N., KLEISSL, J. et KRAYENHOFF, E.S., 2010.** Modeling the Thermal Effects of Artificial Turf on the Urban Environment. In : Journal of Applied Meteorology and Climatology. 1 mars 2010. Vol. 49, n° 3, p. 332-345. DOI 10.1175/2009JAMC2198.1.

**ZHANG, R., JIANG, G. et L.I.A.N.G. et J., 2015.** The Albedo of Pervious Cement Concrete Linearly Decreases with Porosity. In : : Advances in Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 2015, p. 1–5. DOI 10.1155/2015/746592.



**ZHANG, Z., LV, Y. et PAN, H., 2013.** Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks. In : Urban Forestry & Urban Greening. janvier 2013. Vol. 12, n° 3, p. 323-329. DOI 10.1016/j.ufug.2013.03.010.

**ZIPPER, S.C., SCHATZ, J., SINGH, A., KUCHARIK, C.J., TOWNSEND, P.A. et LOHEIDE, S.P., 2016.** Urban heat island impacts on plant phenology: intra-urban variability and response to land cover. In : Environmental Research Letters. 1 mai 2016. Vol. 11, n° 5, p. 054023. DOI 10.1088/1748-9326/11/5/054023.

## SITOGRAPHIE

### (1)- LA BANQUE MONDIALE, 2020.

Population urbaine (% du total). In : [en ligne]. 14 avril 2020. [Consulté le 24 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=FR>.

### (2)- KANDEL, R. et PLANTON, S., 2013.

Qu'est-ce que le bilan radiatif de la Terre ? In : Le climat en question [en ligne]. 8 août 2013. [Consulté le 19 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/fonctionnement-climat/bilan-radiatif-terre-par-robert-kandel-serge-planton>.

### (3) - ASSOCIATION OCÉAN POLAIRE,

2018. Le bilan énergétique solaire. In : *Jean Louis Etienne Explorateur - Association Océan Polaire* [en ligne]. 2018. [Consulté le 17 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.oceanpolaire.org/encyclopedie-polaire/encyclopedie-polaire-b4/>.

### (4) - TROTEC, 2020. Thermohygromètre

BC25 Mesure climatique, « indice de chaleur » et « température ressentie ». In : [en ligne]. 2020. [Consulté le 25 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://fr.trotec.com/produits-et-services/appareils-de-mesure/climat/appareils-de-mesures-climatiques/thermohygrometre-bc25/>.

### (5) - LE POINT.FR, 2019. Écrasé par la

chaleur, le Qatar climatise même ses rues. In : Le point.fr [en ligne]. 20 octobre 2019. [Consulté le 19 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : [https://www.lepoint.fr/monde/ecrase-par-la-chaleur-le-qatar-climatise-meme-ses-rues-20-10-2019-2342344\\_24.php#](https://www.lepoint.fr/monde/ecrase-par-la-chaleur-le-qatar-climatise-meme-ses-rues-20-10-2019-2342344_24.php#).

### (6) - U.S.G.S, 2019. Le cycle de l'eau -

The water cycle, French. In : U.S. Geographical Survey [en ligne]. 2019.

[Consulté le 20 septembre 2020].

Disponible à l'adresse :

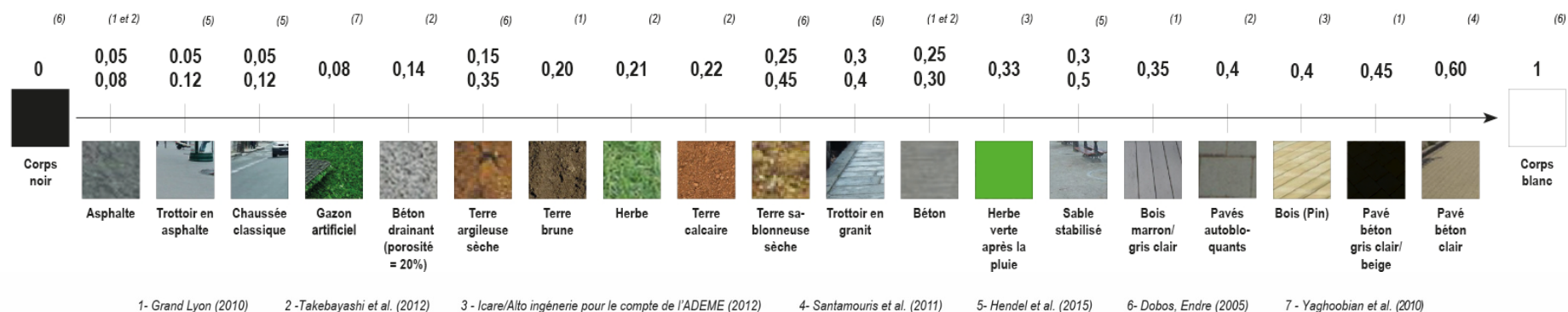
[https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/le-cycle-de-l-eau-water-cycle-french?qt-science\\_center\\_objects=0#](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/le-cycle-de-l-eau-water-cycle-french?qt-science_center_objects=0#).

### (7) - BRUXELLES ENVIRONNEMENT,

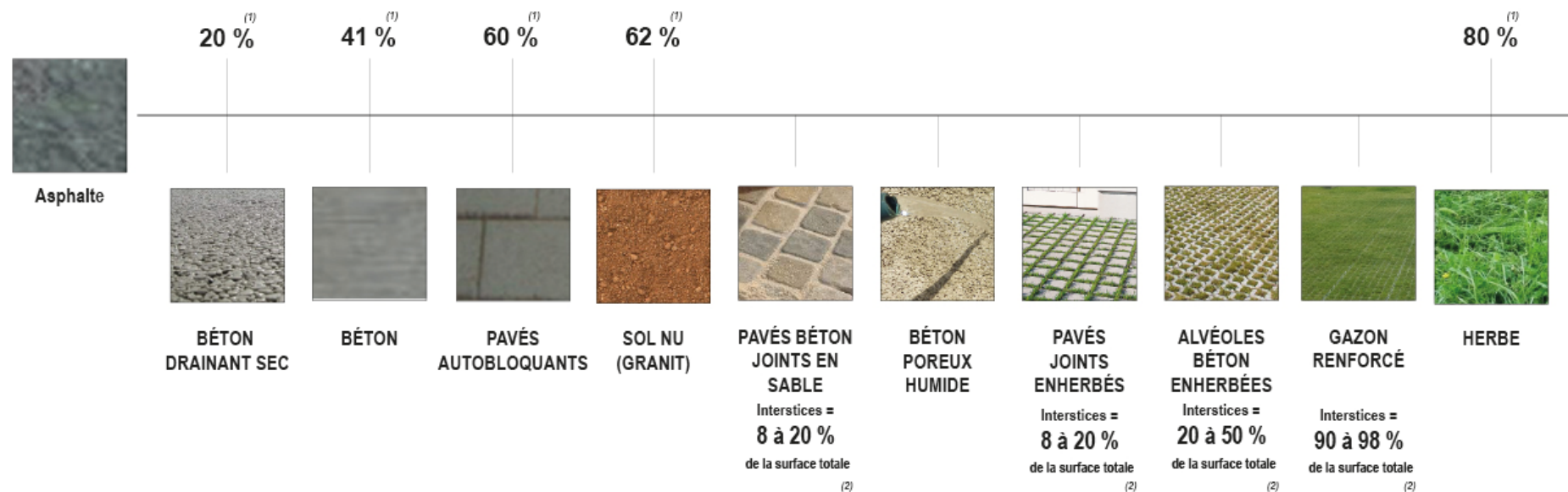
2020. Dispositif Jardins de Pluie. In : Guide bâtiment durable brussels [en ligne]. 2020. [Consulté le 29 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/jardin-de-pluie.html?IDC=10708>.

## ANNEXES

**Annexe n°1 : Frise de valeur d'albédo de différents matériaux d'aménagements urbains ou paysagers** (Source : Carron, 2020 d'après 1(Grand Lyon -Communauté urbaine, 2010) ; 2 (Takebayashi, Moriyama, 2012) ; 3 (ICARE/ALTO ingénierie pour le compte de l'ADEME, 2012); 4(Santamouris et al., 2012) ; 5(Hendel et al., 2015) ; 6(Dobos, 2015) ; 7(Yaghoobian et al., 2010)



**Annexe n°2 : Frise classant les matériaux du plus chaud (asphalte) au plus frais (herbe)** (Source : Carron, 2020 d'après 1-(Takebayashi, Moriyama, 2012) et 2-(Mullaney, Lucke, 2014 dans Qin, 2015)

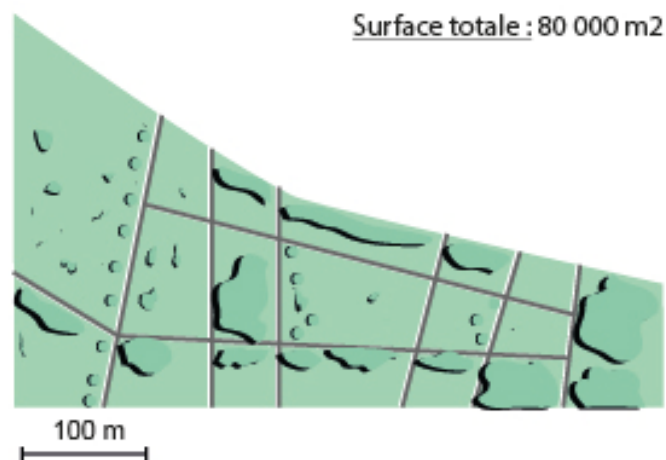


1-(Takebayashi, Moriyama, 2012) mesure la réduction du flux de chaleur sensible de matériaux en comparaison avec une surface en asphalte ( $W/m^2$ ). Ainsi, cette étude mesure le flux de chaleur sensible maximum pour différents revêtements en août : Asphalte ( $446,4 W/m^2$ ), Béton drainant sec ( $358,1 W/m^2$ ), Béton lisse ( $262,4 W/m^2$ ), Pavé autobloquants ( $163,9 W/m^2$ ), Sol nu ( $169,9 W/m^2$ ), Herbe ( $90,9 W/m^2$ ).

Annexe n°3: Impact du renouvellement des revêtements des cheminements du parc Flisvos à Athènes avec un matériau plus clair sur les pics estivaux de température d'air (Source : Carron, 2020 d'après Santamouris et al., 2012)

Rafraîchissement à l'échelle du parc de la modification d'albédo des 4500 m<sup>2</sup> de revêtements des cheminements soit 6% de la surface du parc

CARACTÉRISTIQUES DU PARC

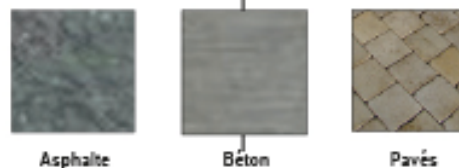


Végétation éparse :  
Étendues de pelouse

Buissons  
Arbres isolés ou en bosquets

REVÊTEMENTS INITIAUX

Albédo moyen = 0,48

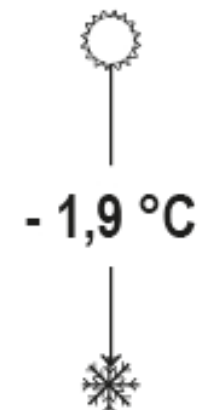


REVÊTEMENTS DE RÉNOVATION

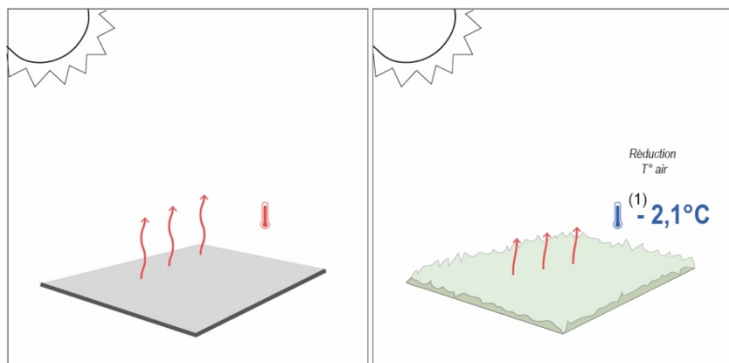
Albédo = 0,6



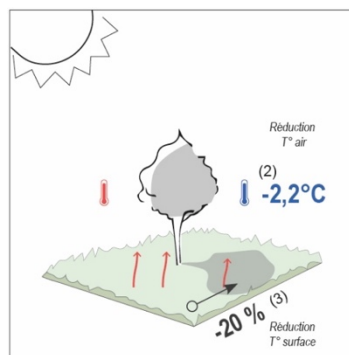
RAFRAICHISSEMENT OBTENU



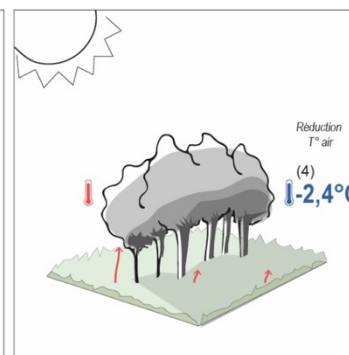
**Annexe n°4 : Réduction de température opérée par un un arbre isolé ou un groupement d'arbres pour un contexte minéral ou engazonné** (Source : Carron, 2020 d'après 1-(Petralli et al., 2020); 2- (Gillner et al., 2015) ; 3-(Napoli et al., 2016) ; 4 -(Petralli et al., 2009); 5-(Golden et al., 2007) ; 6- (Petralli et al., 2020) 7-) - (Taha et al., 1989) ; 8 -(Renaud et al., 2011) )



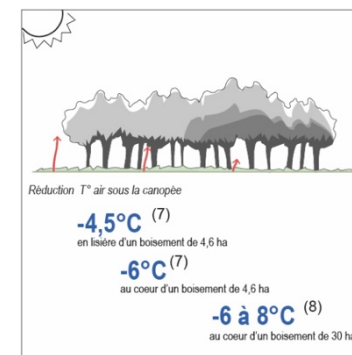
Réduction de T° air au-dessus d'une surface enherbée par rapport à l'asphalte



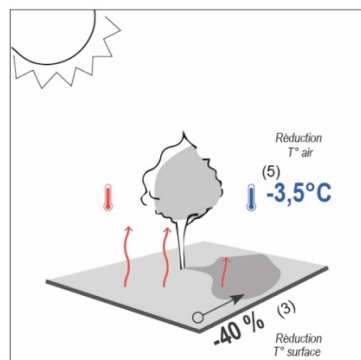
Réduction de T° air et de surface à l'ombre d'un arbre au-dessus de gazon



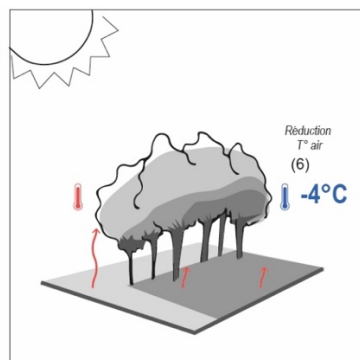
Réduction de T° air à l'ombre d'un groupe d'arbres au-dessus de gazon



Réduction de T° sous la canopée de larges boisements



Réduction de T° et surface à l'ombre d'un arbre au-dessus d'asphalte  
Réduction de T° air et de surface à l'ombre d'un arbre au-dessus d'asphalte



Réduction de T° air à l'ombre d'un groupe d'arbres au-dessus d'asphalte  
Réduction de T° air à l'ombre d'un groupe d'arbres au-dessus d'asphalte

**(1) - (Petralli et al., 2020)** Différence maximale de température d'air à 1,7m au-dessus d'asphalte gris clair (albédo =0,18) et de surface engazonnée (albédo =0,25) exposés au soleil. La différence journalière moyenne est de 1,1°C.

*(Juillet 2014, Parc Cascine, Florence, Italie)*

**(2) - (Gillner et al., 2015)** Cette étude compare la réduction de température d'air sous la canopée d'arbres situés sur du gazon avec celle d'une surface de gazon exposée au soleil. Selon les espèces d'arbres, la réduction de température journalière moyenne s'échelonne de 0,77 à 2,22. Ce classement est établi au regard de la réduction de température Tilia > Corylus > Aesculus > Liriodendron > Ginkgo > Ulmus

*(Juin-Septembre 2013, Dresden, Allemagne)*

**(3) - (Napoli et al., 2016)** Cette étude a mesuré les températures de surface de l'asphalte et du gazon à l'ombre de canopée ou exposés au soleil. Il est trouvé que la réduction des températures de surface est plus conséquente dans le cas de l'asphalte. La réduction de température est presque de 40% dans le cas d'asphalte à l'ombre et de 20% dans le cas du gazon à l'ombre en comparaison respectivement à l'asphalte et le gazon exposés au soleil.

*(Juin-Août 2014, Parc Cascine, Florence, Italie)*

**(4) - (Petralli et al., 2009)** La différence maximale de température d'air au-dessus d'une pelouse exposée au soleil et un groupement d'arbres est de 2,4°C.

*(Août 2008, Parc Cascine, Florence, Italie)*

**(5) - (Golden et al., 2007)** Le maximum de réduction de température d'air ambiant à 2m sous l'ombrage de la canopée d'un arbre seul en comparaison avec les températures d'air 2m au-dessus du parking en asphalte environnant est de 3,5°C.

*(Juin 2004, Phoenix, USA)*

**(6) - (Petralli et al., 2020)** La différence maximale de température d'air à 1,7m au-dessus d'asphalte gris clair (albédo =0,18) exposé au soleil et à l'ombre de rangées d'arbres est de 4°C. La différence journalière moyenne est de 1,5°C.

*(Juillet 2014, Parc Cascine, Florence, Italie).*

**(7) - (Taha et al., 1989)** Cette étude s'intéresse au rafraîchissement opéré par un verger mature. Celui-ci a été irrigué 5 jours avant le début des mesures. Les dimensions de ce verger sont de 307 par 150 mètres avec une couverture de canopée de 30%. Les arbres sont de taille moyenne : 5 mètres avec une tige qui remonte à 2 mètres. La réduction de température à 1,5m au-dessus du sol est de 4,5°C à 5 mètres des limites au vent. Plus profondément dans le verger, celle-ci atteint 6°C.

*(Octobre, Davis, Etats-Unis)*

**(8) - (Renaud et al., 2011)** Cette étude sur 10 ans de 14 forêts en Suisse relève les écarts entre la température à l'intérieur de la forêt sous la canopée et celle dans un espace ouvert à proximité. Les surfaces moyennes et médianes de ces forêts sont de 33 ha, la dispersion des données est donc faible. (Base de la tour Eiffel : 1,5 ha, Champs de Mars : 20 ha). La sélection de ces forêts s'est faite en veillant que la surface minimale soit de 2ha et que la forme des forêts soit rectangulaire.

Les plus grands écarts de température mesurés en été vont de 6 à 8°C, dans le cas de forêts de hêtre. Les forêts de pins tendent à avoir une température plus élevée : 1°C de moyenne en été. Les réductions de température moyenne dans les forêts caduques vont de 1 à 2°C et jusqu'à 1°C en hiver et pour la moyenne annuelle. Ces résultats sont influencés par l'orientation, la surface, la hauteur d'arbres de ces forêts.

*(1998-2007, Plusieurs forêts >2 ha, Suisse)*

## Annexe n°5 – Extrait du rapport S.E.S.A.M.E, Services écosystémiques rendus par les arbres, modulés selon l'essence (Source : C.E.R.E.M.A Est, 2019

### 2.2 - Régulation du climat local

Les notes attribuées pour la capacité des espèces sélectionnées à réguler le climat sont représentées dans le tableau 29. Le tableau 28 illustre pour deux exemples, l'érable sycomore et le pin sylvestre, le rapport entre les indicateurs d'état de l'espèce et les notes de services rendus.

Indicateurs d'état des différentes espèces	Érable sycomore	Pin sylvestre
Densité	3 (très dense)	2 (moyennement dense)
Forme de l'arbre	3 (étalé)	2 (conique)
Persistance des feuilles	1 (caduc)	3 (persistant)
Rugosité des feuilles	1 (glabre)	1 (glabre)
Forme des feuilles	3 (lobées)	1 (aiguille)
Résineux ou feuillu	3 (feuillu)	1 (résineux)
<b>Régulation du climat</b>		
<b>Note climat local</b>	<b>9</b>	<b>4</b>

Tableau 28 : Notes attribuées (sur 10) pour la capacité de l'érable sycomore et du pin sylvestre à réguler le climat local (par l'effet d'ombrage et l'évapotranspiration)

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Régulation du climat local (note sur 10)
Abelia	<i>Abelia floribunda</i>	1
Sapin du colorado	<i>Abies concolor</i>	9
Sapin d'Espagne	<i>Abies pinsapo</i>	6
Érable champêtre	<i>Acer campestre</i>	2
Érable de Montpellier	<i>Acer monspessulanum</i>	2
Érable plane	<i>Acer platanoides</i>	8
Érable sycomore	<i>Acer pseudoplatanus</i>	9
Érable hybride	<i>Acer rubrum fremantii</i>	5
Marronnier d'Inde	<i>Aesculus hypocastanum</i>	9
Marronnier rouge	<i>Aesculus x carnea</i>	7
Aulne glutineux	<i>Alnus glutinosa</i>	3
Aulne blanc	<i>Alnus incana</i>	3
Amélanchier	<i>Amelanchier ovalis</i>	1
Épine vinette	<i>Berberis vulgaris</i>	1
Bouleau verreaqueux	<i>Betula pendula</i>	1
Callicarpe, arbre aux bonbons	<i>Callicarpa</i> (genre)	3
Charme commun	<i>Carpinus betulus</i>	8



Nom vernaculaire	Nom scientifique	Régulation du climat local (note sur 10)
Catalpa	<i>Catalpa bignonioides</i>	6
Cèdre de l'Atlas	<i>Cedrus atlantica</i>	5
Cèdre du Liban	<i>Cedrus libani</i>	6
Micocoulier de Provence	<i>Celtis australis</i>	8
Micocoulier occidental	<i>Celtis occidentalis</i>	5
Arbre de Judée	<i>Cercis siliquastrum</i>	4
Cornouiller des pagodes	<i>Cornus controversa</i>	6
Cornouiller mâle	<i>Cornus mas</i>	2
Cornouiller sanguin	<i>Cornus sanguinea</i>	0
Noisetier	<i>Corylus avellana</i>	3
Noisetier de Byzance	<i>Corylus colurna</i>	5
Cotoneaster à feuilles de saule	<i>Cotoneaster salicifolius</i>	0
Aubépine épineuse & Aubépine monogyne	<i>Crataegus laevigata</i> & <i>Crataegus monogyna</i>	1
Fusain d'Europe	<i>Euonymus europaeus</i>	1
Frêne à fleurs	<i>Fraxinus ornus</i>	4
Ginkgo	<i>Ginkgo biloba</i>	7
Févier d'Amérique	<i>Gleditsia triacanthos</i>	3
Lierre grimpant	<i>Hedera helix</i>	#N/A
Houx	<i>Ilex aquifolium</i>	6
Genévrier commun	<i>Juniperus communis</i>	3
Savonnier	<i>Koelreuteria paniculata</i>	7
Mélèze d'Europe	<i>Larix decidua</i>	0
Lavande	<i>Lavandula angustifolia</i>	1
Troène commun	<i>Ligustrum vulgare</i>	1
Copalme d'Amérique	<i>Liquidambar styraciflua</i>	6
Tulipier de Virginie	<i>Liriodendron tulipifera</i>	8
Magnolia à grandes fleurs	<i>Magnolia grandiflora</i>	9
Charme houblon	<i>Ostrya carpinifolia</i>	4
Vigne vierge	<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	#N/A
Paulownia tomenteux ou impérial	<i>Paulownia tomentosa</i>	7
Seringa, Jasmin des poètes	<i>Philadelphus coronarius</i>	3
Photinia	<i>Photinia serratifolia</i>	7
Pin sylvestre	<i>Pinus sylvestris</i>	4
Poirier de Chine	<i>Pirus calleryana</i>	3
Platane	<i>Platanus x acerifolia</i> , <i>x hybrida</i> , <i>x hispanica</i>	10
Peuplier blanc	<i>Populus alba</i>	4
Tremble	<i>Populus tremula</i>	3
Merisier	<i>Prunus avium</i>	6
Cerisier à grappes	<i>Prunus padus</i>	4
Cerisier de Sargent et à fleurs	<i>Prunus sargentii-subhirtella</i>	6
Prunelier	<i>Prunus spinosa</i>	1
Buisson ardent	<i>Pyracantha coccinea</i>	0
Chêne blanc	<i>Quercus alba</i>	5
Chêne chevelu de bourgogne	<i>Quercus cerris</i>	7
Chêne de Hongrie	<i>Quercus frainetto</i>	8
Chêne vert	<i>Quercus ilex</i>	6
Chêne du Caucase	<i>Quercus macranthera</i>	7
Chêne sessile	<i>Quercus petraea</i>	8

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Régulation du climat local (note sur 10)
Chêne pédonculé	<i>Quercus robur</i>	8
Chêne rouge d'Amérique	<i>Quercus rubra</i>	9
Chêne de Turner	<i>Quercus x turneri pseudotur- neri</i>	4
Saule blanc	<i>Salix alba</i>	5
Saule pourpre	<i>Salix purpurea</i>	3
Saule des vanniers	<i>Salix viminalis</i>	5
Sureau noir	<i>Sambucus nigra</i>	4
Sophora du Japon	<i>Sophora japonica</i>	9
Alisier blanc	<i>Sorbus aria</i>	4
Sorbier des oiseleurs	<i>Sorbus aucuparia</i> , y compris <i>S. aucuparia fastigiata</i>	5
autres sorbiers ( Alisier de Suède : <i>sorbus intermedia</i> , yc cultivar Brouwers , <i>Sorbus x thuringiaca</i> )	<i>Sorbus intermedia</i> , <i>Sorbus intermedia Brouwers</i> , <i>Sorbus x thuringiaca</i>	5
Alisier torminal	<i>Sorbus torminalis</i>	4
Lilas commun	<i>Syringa vulgaris</i>	1
If	<i>Taxus baccata</i>	4
Tilleul à petites feuilles	<i>Tilia cordata</i>	5
Tilleul à grandes feuilles	<i>Tilia platyphyllos</i>	8
orme résistant à la graphiose	<i>Ulmus x resista Lutèce</i>	6
Viorne lantane	<i>Viburnum lantana</i>	2
Viorne obier	<i>Viburnum opulus</i>	2

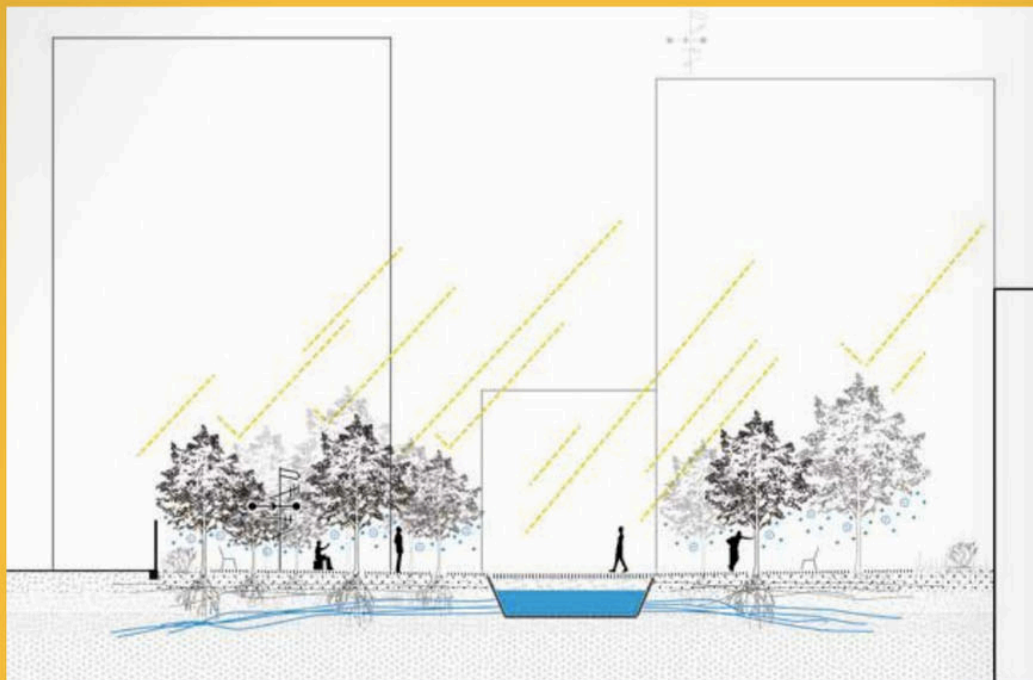
Tableau 29 : Notes attribuées (sur 10) pour la capacité de l'ensemble des espèces étudiées, à réguler le climat local



Photo Nadia Aubry, Cerema

## À AUBERVILLIERS, UN PARKING TRANSFORMÉ EN TIERCE FORÊT

L'agence Fieldwork Architecture achève l'aménagement d'un îlot de fraîcheur en constituant un écosystème forestier sur un parking, à Aubervilliers (Seine-Saint-Denis).



Pendant la période estivale, le dispositif fonctionne comme un îlot de fraîcheur en ville. L'eau de pluie stockée dans la réserve utile alimente les arbres et la canopée rafraîchit le climat. © Fieldwork architecture

En 2016, l'association Alteralia, qui gère un foyer de jeunes travailleurs à Aubervilliers (Seine-Saint-Denis), prend contact avec l'agence Fieldwork Architecture. Le motif ? La requalification du parking, devant la résidence, en un espace plus accueillant. Andrej Bernik, de Fieldwork Architecture, explique l'origine de la démarche : « *l'espace extérieur ne correspondait pas aux besoins des usagers, et l'association n'avait pas réellement défini la nature du projet qu'elle souhaitait mettre en place* ». Les architectes, dans le souci de développer un aménagement avec un impact positif sur le climat de la ville, proposent de transformer ce parking en un espace public de 1 200 m<sup>2</sup> pourvu d'une couverture forestière, qui œuvre au rafraîchissement urbain.

Ce projet, « *lisière d'une tierce forêt* », est lauréat, en 2017, de l'appel à expérimentations « *adaptation au changement*

*climatique* », porté par la Mairie de Paris et Paris&CO. La notoriété ainsi acquise leur permet de nouer des partenariats avec de nombreuses institutions. Entre autres, la collaboration avec météo-France permet de « *mesurer l'impact réel, d'évaluer l'efficacité du dispositif* » sur le climat local. Une station météo a en effet été installée sur le site. La comparaison des mesures prises avant et après la réalisation de l'aménagement permettront d'évaluer son efficacité, en tant qu'îlot de fraîcheur.

### Evapotranspiration

Les travaux débutent au printemps 2018, en partenariat avec des ingénieurs forestiers, avec la plantation des 70 arbres. La volonté est de « *respecter l'écosystème forestier, de réconcilier la ville et la nature sans travailler*

*dans une opposition* », précise Andrej Bernik, qui explique que la formation de cette couverture forestière avait pour objectif de réduire l'effet de l'îlot de chaleur urbain. Les espèces d'arbres ont donc été sélectionnées en fonction de leur capacité d'évapotranspiration, tout en respectant la condition d'être naturellement présentes en région Ile-de-France. Quatre essences ont finalement été plantées – ainsi que des arbustes – : de l'érable champêtre, de l'orme, de l'érable sycomore et du chêne. Afin de rester dans une démarche durable, le sol est fertilisé avec un compost formé des déchets verts de Plaine Commune, pour ne pas avoir à faire venir de la terre.

Des études ont permis de définir la puissance de l'irradiation sur différentes zones du site et ont mis en avant les inégalités de rayonnement reçus. La densité d'arbres plantés a donc été déterminée en réponse à ces résultats et la répartition n'est pas homogène sur le site. Dans les zones où l'irradiation est intense, les troncs des arbres sont distants de deux mètres. En revanche, près des bâtiments, qui prodiguent de l'ombre une partie de la journée, les arbres ont été plantés moins proches les uns des autres, et laissent la place au développement d'autres types d'activités. A travers la constitution d'un écosystème forestier, cet espace a vocation à constituer un lieu de refuge pour la population en cas de canicule.

Cet aménagement propose aussi un système de gestion des ressources en eau innovant. La volonté de départ est de récupérer les eaux surabondantes lors des courtes périodes de pluie, pour la redistribuer pendant les périodes sèches. Cela permet en premier lieu d'offrir une solution complémentaire à celles préexistantes en matière de gestion des risques d'inondation. Dans un autre temps, les quantités d'eau accumulées pendant les périodes pluvieuses servent à l'irrigation des arbres durant les périodes sèches. Ainsi, une économie des ressources en eau de la collectivité est réalisée, tout en conservant l'intérêt de l'aménagement – à savoir proposer un îlot de fraîcheur en milieu urbain –, puisque l'évapotranspiration suppose un apport en eau pour les arbres.

### **Béton poreux**

Le sol est constitué d'un béton poreux – donc perméable – et n'est pas connecté aux réseaux d'assainissement de la ville. L'utilisation de ce revêtement spécifique permet, en plus de faciliter l'infiltration des eaux, de diminuer l'accumulation de chaleur dans le sol. Les règles de sécurité imposent la présence d'un accès pompier au bâtiment. Pour Andrej Bernik, il était important « *de profiter de cette contrainte, en créant une chaussée réservoir* » sous l'allée. C'est au sein de cette cuve, remplie de pierres pour soutenir la voie, que les eaux de pluies sont stockées. Dans un souci de durabilité et de respect de l'environnement, le choix de matériaux non polluants a été privilégié, et le réservoir a été imperméabilisé

avec de l'argile. Les drains permettant d'alimenter les arbres en eau ont été réalisés en terre cuite.

Ce programme, qui doit ouvrir pour cet été 2020, est aussi un espace public, rappelle l'architecte de Fieldwork. Et de préciser que ce projet met en avant la volonté de « *créer la possibilité d'appropriation par les riverains* ». A titre d'exemple, des ateliers de construction du mobilier urbain seront organisés avec les utilisateurs. La notion de flexibilité de cet espace est aussi au cœur de la réflexion sur la conception de l'aménagement, avec une volonté d'adaptation aux besoins de chacun, ainsi qu'aux différentes temporalités.

Cette solution pourrait être reproduite, en France ou à l'étranger. L'agence, qui a acquis une expertise, a déjà été sollicitée par des partenaires potentiels. Selon Andrej Bernik, le contexte qui a fait émerger le projet correspond à « *une situation banale, dont la problématique est commune et se répète à différents niveaux et sur différents territoires* ». Il estime que la possibilité de déploiement de l'aménagement à différentes échelles renferme un grand potentiel. De même, dans un contexte de montée en puissance de l'enjeu de durabilité dans la conception de villes vivables, la conception d'un lieu hybride, qui favorise le développement de la nature en ville tout en assumant son côté urbain est susceptible d'intéresser, au-delà des frontières d'Aubervilliers.

Antoine Torre

Le projet sera finalisé et l'espace sera ouvert aux riverains à partir du printemps 2020. © Fieldwork architecture



## Annexe n°7 – Compilation de résultats d'études de mesures et de modélisations de l'intensité et la portée de rafraîchissement de parcs et végétation urbaine (Source : McDonald et al., 2016)

### Cooling intensity

Table 24 lists some results for studies<sup>66, 67, 69-71, 73, 75-77, 79-83, 120-129</sup> that examined relatively large urban parks. The cooling intensity varies from close to zero to 6.7° C (12.1° F), depending on the site, the time of day, and the distance at which the measurement was taken from the park. For the purposes of our analysis, we were interested in measurements of cooling intensity within or very close to the park, before the effect began to decay with distance. These measurements close to the parks are generally higher. See Kroeger et al. (in review) for a more detailed analysis of this set of studies on parks. Since the focus of this report is on street trees, we do not use the information in Table 24 in our global modeling.

**Table 24.** Empirical and modeling studies of the summer ambient air temperature cooling effect of forested or mixed-cover parks and urban forests.

Study	Park size	Land Cover	Location	Temperature reduction	Measurement specification
Taha et al. (1991)	4.9 ha	small trees (H=5 m), 25% canopy cover; narrow belt of tall (20m) dense evergreen trees (90% cover)	Davis, CA	4.5° C	Reduction in peak temp (16:00) compared to upwind, adjacent, open, dry field; clear sky; October (location D minus A, fig. 2)
	4.91	(including avg 10,-wide evergreen tree along southern edge of orchard)		5.5° C	Reduction in peak temp (17:00) compared to upwind, adjacent, open, dry field; October
				1.5° C	Reduction in peak temp (16:00-18:00) compared to upwind, adjacent, open, dry field; October
Ca et al. (1998)	60 ha	Mix of woods, grass and some sealed surface	Tama (Tokyo Met Area), Japan	2.2° C	Reduction in sunny August afternoon air temp above grass field inside park, compared to air temp above sealed areas surrounding
				1.5° C	Reduction in sunny August noon air temp in commercial district 1 km downwind
Sugawara et al. (2016)	20 ha (0.2 sq km)	90% deciduous forest, 14 m mean canopy height	Tokyo, Japan	3° C	Difference between summer (Aug-Sep) peak daytime (2 p.m.) temp in park and surroundings (school gardens within 1.5 km from park)
Dimoudi and Nikolopoulou (2003)	0.01 ha, Street H/W ratio=1.5	Typical Mediterranean vegetation (e.g., olive and citrus trees)	Athens, Greece	2° C	Temp difference at downwind edge of park facing building, if park replaces building of same dimensions
				4° C	Temp difference at downwind edge of park in street parallel to park, if park replaces building of same dimensions
	0.03 ha, Street H-W ratio=1.5			3° C	Temp difference at downwind edge of park facing building, if park replaces building of same dimensions
				6° C	Temp difference at downwind edge of park in street parallel to park, if park replaces building of same dimensions
Jaganmohan et al. 2016	Urban forests (n=25), median size 2.2 ha	96.5% mean tree/shrub cover	Leipzig, Germany	0.3° C	Mean of the maximum daytime (9 a.m. to 5 p.m.) temp difference in summer (June-Aug) on clear sunny days in residential areas, at 1 PWD from forests, compared to forest boundary
				0.8° C	Mean of the maximum daytime (9 a.m. to 5 p.m.) temp differences in summer (Jun-Aug) on clear sunny days, between forest boundary and anywhere in residential areas within 1 PWD from forests
	Urban parks (n=37)	74% mean tree/shrub cover		0.1° C	Mean of the maximum daytime (9 a.m. to 5 p.m.) temp difference in summer (Jun-Aug) on clear sunny days in residential areas, at 1 PWD from parks compared to park boundary
				0.5° C	Mean of the maximum daytime (9 a.m. to 5 p.m.) temp differences in summer (Jun-Aug) on clear sunny days, between park boundary and anywhere in residential areas within 1 PWD from parks

Study	Park size	Land Cover	Location	Temperature reduction	Measurement specification
Chen and Wong (2006)	36 ha	Mix of densely forested, sparsely forested and open sites	Singapore	3° C	Mean difference between average temp of densely forested park sites (# 3 and 4) and nearby residential sites at 15:00 on clear summer (Jan-Feb) day
				2° C	Mean difference between average temp of all park monitoring sites and nearby residential sites at 15:00 on clear summer (Jan-Feb) day
	12 ha	Mix of densely forested, sparsely forested and open sites	Singapore	4° C	Mean difference between average temp in densely forested park site (#1) and nearby residential sites at 15:00 on clear summer June day
				2° C	Mean difference between average temp of all park monitoring sites and nearby residential sites at 15:00 on clear summer June day
Ketterer and Matzarakis (2014)	n/a	Treed area: 19% tree cover; 34% impervious; 28% built; asphalt area: 3% tree cover, 47% impervious; 17% built	Stuttgart, Germany	1.2° C	Mean temp difference between asphalt and treed area in early-mid afternoon (14:00 to 17:00) on clear summer (late June) day
Legese Feyisa et al. (2014)	21 urban forest parks (0.85-22.3 ha)	>60% tree canopy cover	Addis Ababa, Ethiopia	3.9° C	Average (11:00 to 16:00 hours) temp difference between park and surroundings (from park boundary to 420-meter distance contour) in summer (October, end of rainy season)
				6.7° C	Maximum (11:00 to 16:00 hours) temp difference between park and surroundings (from park boundary to 420-meter distance contour) in summer (October, end of rainy season)
				0.02° C	Mean increase in park cooling intensity per 1% increase in tree canopy cover, 11:00 to 16:00 hours, compared to surroundings (from park boundary to 420-meter distance contour) in summer (October, end of rainy season)
Skelhorn et al. (2014)			Manchester, UK	0.15° C	Mean area-wide temp reduction at neighborhood level, 13:00 to 16:00 hours, summer (July), from adding 5% mature trees
Ng et al. 2012	0.01 ha		Hong Kong, China	1° C	Mean temperature reduction in pocket park compared to surrounding built-up area at 1 PWD, 15:00 to 16:00 hrs, May (summer)
Cohen et al. (2012) (same site as Potchter et al. 2006)	3 urban parks, 0.4-3.6 ha, 65-85% mature tree cover		Tel Aviv, Israel	2° C	Mean temp difference between treed parks and non-treed urban areas summer (June-July) w/ generally clear skies and moderate wind
	2.8 ha, 85% mature tree cover		Tel Aviv, Israel	3.8° C	Maximum temp difference between treed park and non-treed urban areas summer (June-July) w/ generally clear skies and moderate wind
Spronken-Smith and Oke (1998)	1.4 ha Forested park (Botanical Garden)		Sacramento, CA	1.2° C	Maximum summer daytime (August) temperature difference compared to non-park area
	400 ha dense conifer rainforest (Stanley Park forest)		Vancouver, BC	4.0° C	Maximum summer daytime (August) temperature difference compared to non-park area (temps of which were measured mostly on roads)
Hamada and Ohta (2010)	147 ha	40% cemetery; 36% forest, 4% grass, 4% ponds, 5% fields, 10% badlands	Nagoya, Japan	2.5° C	Maximum temperature difference at 3 p.m. between forested site in park vs urban area, August 2006 (see p. 21)

## Annexe 7– suite 3/4/

Study	Park size	Land Cover	Location	Temperature reduction	Measurement specification
Chang et al. (2007)	<3 ha	≥80% tree and shrub cover (Fig 5a)	Taipei, Taiwan	2° C	Reduction in air temp between open (unshaded) area in park and surroundings >1 width of the park away from park, on sunny, non-windy (<2.1 m/s wind speed) summer (Aug-Sep) days, 11:00 to 15:00 hrs
	>3 ha	≤25% paved area (Fig 5c)		1.8° C	Reduction in air temp between open (unshaded) area in park and surroundings >1 width of the park away from park, on sunny, non-windy (<2.1 m/s wind speed) summer (Aug-Sep) days, 11:00 to 15:00 hrs
Chang and Li (2014)	<0.5 ha	n/d	Taipei, Taiwan	n/d	Reduction in air temp outside of park vs reference point just >1 park width away from park, on sunny, non-windy (<2.1 m/s wind speed) summer (Aug-Sep) days, 11:00 to 15:00 hrs
	<0.5 ha (mean: 0.23 ha)	n/d		0.75	Reduction in air temp at park boundary vs reference point just >1 park width away from park, on sunny, non-windy (<2.1 m/s wind speed) summer (Aug-Sep) days, at noon (11:00 to 15:00)(right upper panel in Fig 2)
	>0.5 ha	Average cool-island park (composed of trees, shrubs, open, and paved areas)		0.3° C	Reduction in air temp outside of park vs reference point just >1 park width away from park, on sunny, non-windy (<2.1 m/s wind speed) summer (Aug-Sep) days, 11:00 to 15:00 hrs
	n/d	>75% tree and shrub cover		0.8° C	Reduction in air temp outside of park vs reference point just >1 park width away from park, on sunny, non-windy (<2.1 m/s wind speed) summer (Aug-Sep) days, 11:00 to 15:00 hrs
Barradas 1991	9.9 ha	mix of vegetation and pavement	Mexico City, Mexico	3.1° C	Difference between mean peak afternoon temperatures in parks and in surroundings, May-Nov (Fig 3 A and B)
	1.9 ha		Mexico City, Mexico	0.9° C	Difference between mean peak afternoon temperatures in parks and in surroundings, May-Nov (Fig 3 A and B)
Jonsson (2004)	n/a	Lush vegetation including trees	Gaborone, Botswana	1° C	difference in avg daily max (14:00) temperatures on clear, calm spring days, between lushly vegetated site and site with only a few sparse trees (both non-irrigated)
Jauregui (1991)	525 ha	Mix of dense forest, grass and paved and built-up areas.	Mexico City, Mexico	2 to 3° C	Difference in mean maximum temperatures (14:00) between park boundary and nearby built-up areas
Lee et al. (2009)	24.2 ha	Tombs, mature forest ( <i>Pinus densiflora</i> and <i>Quercus</i> spp) and grassy areas	Seoul, South Korea	3° C	avg 15:30 July-Aug air temp difference between park and nearby reference site
Shashua-Bar and Hoffmann (2000)	11 small green areas, 0.05-1.1 ha (avg. 0.4 ha)	Dense tree cover (avg partially shaded area=61%)	Tel Aviv, Israel	2.8° C	Mean difference in summer maximum daily (15:00) air temperatures between 11 green areas and nearby treeless reference points at 50 to 100 meters distance, on clear, calm days
				1.77° C	Avg cooling effect at 20 meters
				1° C	Avg cooling effect at 40 meters
				0.67° C	Avg cooling effect at 60 meters
				0.3° C	Avg cooling effect at 80 meters

## Annexe 7– suite 4/4

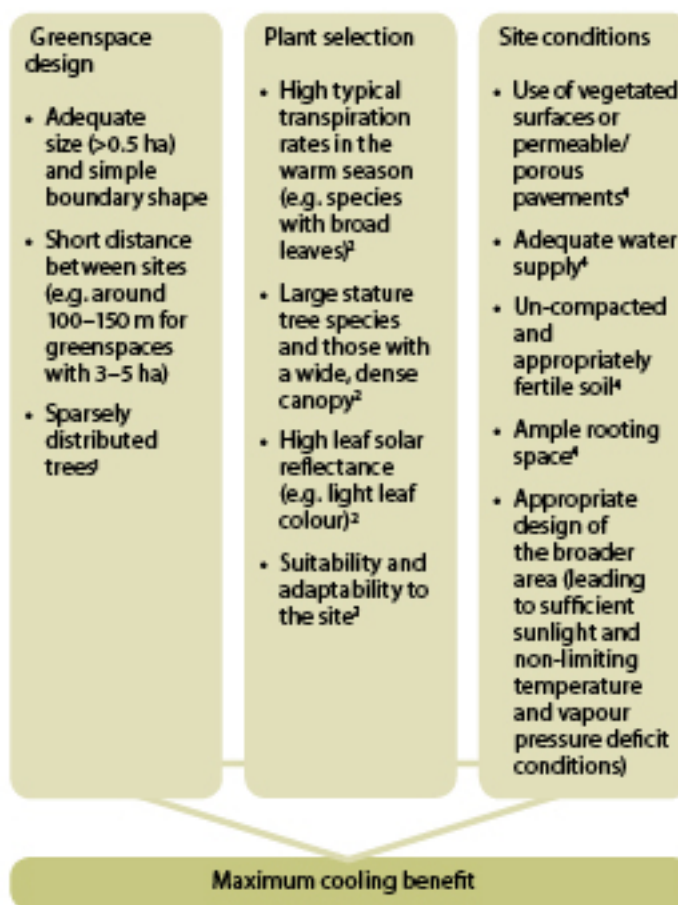
Study	Park size	Land Cover	Location	Temperature reduction	Measurement specification
Saito et al. (1990)	0.24 ha	Urban park covered with broadleaf trees	Kumamoto City, Japan	1 to 2° C	Avg. temp reduction within approx. 20-meter distance from greenspace boundary
				3° C	Max daytime temperature difference
Streiling and Matzarakis (2003)	0.03 ha; Small cluster of trees in 0.17 ha urban park enclosed by three high-traffic roads and including grassy and bare/paved areas		Freiburg, Germany	0.8° C	Mean air temp difference (1 to 3 p.m., 2 mid-late September days) under small cluster of tree canopies compared to nearby open sealed surfaces (measurement points MP2, MP4, and MP5)
	0.01 ha; Individual tree in 0.17 ha urban park enclosed by three high-traffic roads and including grassy and bare/paved areas		Freiburg, Germany	0.7° C	Mean air temp difference (1 to 3 p.m., 2 mid-late September days) under a single tree canopy compared to nearby open sealed surfaces (measurement points MP2, MP4, and MP5)
Shashua-Bar et al. (2011)	Individual tree (7-meter-wide wide canopy) (from Fig. 1)	Tree vs concrete	University campus, Negev Desert, Israel	1.7° C	2 p.m. temp reduction of trees vs. light grey concrete surface w/out trees, mean, July-Aug (summer)
	Individual tree (7-meter-wide canopy) (from Fig. 1)	Trees vs grass cover	University campus, Negev Desert, Israel	1.3° C	2 p.m. temp production of trees vs. grass cover, mean, summer (July-Aug)
Taleghani et al. (2014)	Heavily treed park		Portland, OR	5.8° C	Maximum temperature difference between heavily treed park and nearby parking lot
			Portland, OR	1.6° C	Temperature difference between treed and bare courtyard

**Table 24.** Empirical and modeling studies of the summer ambient air temperature cooling effect of forested or mixed-cover parks and urban forests.



Annexe n°8 : Stratégies de conception qui permettent de maximiser le rafraîchissement par les parcs et les arbres (Source : Vaz et al., 2019)

Figure 4. Current knowledge of design strategies that can lead to maximum greenspace and tree cooling.




1. Only guideline information is available.  
2. See also Factors affecting the cooling effectiveness of urban trees (page 5).  
3. Species-specific: In terms of trees, it is important to pick 'the right tree for the right place'. Species selection tools are available online at [www.righttrees4cc.org.uk](http://www.righttrees4cc.org.uk), [www.myerscough.ac.uk/media/4052/hirons-and-sjoman-2018-tdag-tree-species-selection-1-1.pdf](http://www.myerscough.ac.uk/media/4052/hirons-and-sjoman-2018-tdag-tree-species-selection-1-1.pdf), [www.citree.de/?language=en](http://www.citree.de/?language=en), [www.selectree.calpoly.edu](http://www.selectree.calpoly.edu) and [www.species.itreetools.org](http://www.species.itreetools.org).  
4. See also Achieving effective cooling from urban vegetation (page 7).

## POSTFACE



Figure 35 : *Time bomb*, 2016. Collage par YoungUnknowns. A partir de deux photographies du 20ème siècle : Promotion du quartier résidentiel "Sikornik", Gliwice, Pologne (photo par S. Ciesielska) et document du Royal Mail Publicity (photo par Robert Shackleton).



 agriculture • alimentation • environnement	Diplôme : <b>Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</b> Spécialité : Paysage Spécialisation / option : Paysage : Opérationnalités et Projet Enseignant référent : Adeline Bulot
Auteur(s) : <b>Mélanie CARRON dit l'AVOCAT</b> Date de naissance* : 28/09/1996	Organisme d'accueil : Atelier Altern – Agence parisienne Adresse : 98 rue Cartier Bresson 93500 Pantin
Nb pages : 55      Annexe(s) : 8	Maître de stage : Sylvain MORIN
Année de soutenance : 2020	
<b>Titre français : Comment assurer le transfert de connaissances du paysagiste vers les maîtrises d'ouvrages pour orienter le projet d'aménagement paysager vers une meilleure capacité de lutte contre le phénomène de surchauffe urbaine ?</b>	
Titre anglais : How to ensure the knowledge transfert from the landscape designer to the project managers to shape the project with a view to better meet it objectives in term of urban overheating reduction ?	
<p>Résumé (1600 caractères maximum) : La part de la population urbaine mondiale selon les Nations Unies est grandissante. En l'état actuel, ce sont 55 % de la population qui vit en ville à l'échelle mondiale et 80 % en France. L'espace urbain des prochaines décennies concentre les défis d'une population de plus en plus citadine, qui doit pouvoir bénéficier d'un espace viable dans un milieu urbain qui par ses propriétés amplifie les hausses de températures du réchauffement climatique. Pour préserver les espaces naturels, la densification des villes est essentielle. Celle-ci doit être faite de manière intelligente, notamment pour viser un confort thermique adapté à la vie d'une telle proportion de population urbaine. La densification passe par le renouvellement urbain intégrant un maillage d'îlots de fraîcheurs dont peuvent faire partie les petits espaces paysagers urbains (cours d'immeubles, cœur d'îlot, placette, etc.). Il s'agira de comprendre l'échelle globale du réchauffement des villes et de présenter l'utilisation du triptyque matériaux/eau/végétation par le paysagiste concepteur pour viser la mise en place d'Îlots de Fraîcheurs. Quand il est possible, des données chiffrées notamment concernant l'abattement de températures engendré seront données en exemple. En s'appuyant sur ces données, ce mémoire discutera du transfert de connaissances du paysagiste aux maîtrises d'ouvrage pour que le projet lutte contre le phénomène de surchauffe urbaine.</p>	
<p>Abstract (1600 caractères maximum) : The proportion of the world's urban population according to the United Nations is constantly growing. Currently, 55 % of the population lives in cities worldwide and 80 % in France. The urban space of the coming decades raises issues of an increasingly urban population, which must be able to benefit from a viable space in an urban environment amplifying the more critical temperatures due to global warming. The densification of cities is essential to preserve natural spaces. This must be done in an intelligent manner, in particular to achieve thermal comfort adapted to such a large proportion of the urban population. Densification involves an urban renewal integrating a network Urban Fresh Islands, which may include small urban landscaped areas (courtyards, city block green core, squares, etc.). The aim of this thesis is to understand the global scale of urban warming and to present the materials/water/vegetation triptych used by the landscape designer in order to aim at the implementation of Urban Fresh Islands. When possible, data concerning the temperature reduction generated, will be given as examples. Based on these latter both axis, this paper will discuss the modalities of knowledge transfer from the landscape designer to the contracting authorities so that the project can fight against the phenomenon of urban overheating.</p>	
Mots-clés : Paysage, Îlot de Chaleur Urbain, transfert de connaissance	
Key Words: Landcape, Urban Heat Island, knowledge transfert	

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