



Intégration d'une évaluation quantitative des projets dans le processus de création d'aménagements paysagers en faveur du rafraîchissement urbain

Paulin Le Roux

► To cite this version:

Paulin Le Roux. Intégration d'une évaluation quantitative des projets dans le processus de création d'aménagements paysagers en faveur du rafraîchissement urbain. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. dumas-03515471

HAL Id: dumas-03515471

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03515471>

Submitted on 6 Jan 2022

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

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

Année universitaire : 2020 - 2021 Spécialité : Paysage Spécialisation (et option éventuelle) : Projet, opérationnalité et Paysage	Mémoire de fin d'études ☒ d'ingénieur d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) ☐ de master d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) ☐ de Montpellier SupAgro (étudiant arrivé en M2) ☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)
--	--

Intégration d'une évaluation quantitative des projets dans le processus de création d'aménagements paysagers en faveur du rafraîchissement urbain

Par : Paulin LE ROUX

Soutenu à Angers le 23/09/21

Devant le jury composé de :

Président : Fanny Romain

Maître de stage : Marine Lejamtel

Enseignant référent : Sophie Herpin

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

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

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation

«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»



Remerciement

Je tiens à remercier dans un premier temps l'équipe BASE Bordeaux qui m'a permis de me développer professionnellement aux côtés de spécialistes bienveillants et généreux. Merci notamment à Marine LEJAMTEL, ma maitre de stage qui m'a familiarisé avec de nombreux aspects de la conception paysagère. A plus grande échelle, merci à Agrocampus ouest d'Angers d'intégrer avec autant de valeur les stages de fin d'année. Ces derniers ont contribué sans doute possible à la formation du futur professionnel que je suis aujourd'hui. Merci à toutes les personnes ayant participé à ma formation angevine ces 5 dernières années.

Table des matières

Liste des figures.....	6
Glossaire.....	7
INTRODUCTION.....	8
I. Le défi climatique pour les villes de demain	10
A. Un réchauffement climatique qui prend de l'importance dans les villes.....	10
B. Un lien rompu entre une population urbaine grandissante et l'eau.....	11
C. Un système de gestion hydraulique hérité peu adapté aux villes modernes. .	13
D. L'arbre au service du rafraîchissement urbain.....	15
E. Une implication relative des parties prenantes d'un projet pour lutter contre le réchauffement des villes	16
II. Evaluer la capacité des aménagements paysagers urbains à lutter pour le rafraîchissement des villes.....	18
A. La gestion de l'eau au service du rafraîchissement des villes	18
1. Des concepts riches et variés.....	18
2. Le WSUD, un concept basé sur le cycle de l'eau en ville	20
3. Renforcer les liens entre l'eau, le sol, et la végétation pour rafraîchir les villes.....	20
4. Des techniques en faveur du rafraîchissement urbain.....	22
B. Une évaluation des aménagements paysagers urbains déjà possible grâce à des modèles experts fiables	25
1. La création d'indicateurs grâce à l'utilisation de modèles experts.	25
2. Les indicateurs de performance disponibles pour évaluer les aménagements	27
C. Cas concret : une évaluation en faveur du rafraîchissement urbain.....	30

III. Intérêts et limites de l'évaluation quantitative des projets	33
A. Renforcer les échanges entre parties prenantes pour favoriser la création de projets optimisés	33
B. Intérêt de l'évaluation quantitative	34
1. L'évaluation quantitative comme support de comparaisons entre les projets.....	34
2. Mise en situation : l'arboretum de la ZAC des Papèteries	35
C. Les limites de l'évaluation quantitative.....	40
1. Des indicateurs réservés au experts	40
2. Une liste d'indicateurs trop longue	42
D. Discussion et perspectives	43
 IV. CONCLUSION.....	45
 V. Bibliographie.....	46
VI. Sitographie	49

Liste des figures

Figure 1 : Corrélation entre les périodes de fortes températures et le nombre de passage au urgences (Source : Santé Publique France, 2019) – p10

Figure 2 : Evolution de la part de population urbaine dans la population nationale (Source : Statista, 2020) – p11

Figure 3 : Miroir d'eau de Bordeaux (Source : Flickr, 2009) – p12

Figure 4 : Schéma du cycle de l'eau urbain (Source : Renouf and al. (Adapté de Kenway et al (2011a) and Farooqui (2015)) – p14

Figure 5 : Plan de masse de l'arboretum de la ZAC des Papèteries (Source : BASE Bordeaux) – p17

Figure 6 : Classification des différents termes de gestion des eaux par rapport à leurs spécificités et leurs objectifs (Source : Fletcher and al., 2014) – p19

Figure 7 : Température du sol en fonction du revêtement (Source : CRCWSC, 2020) – p23

Figure 8 : Schéma du processus de création des indicateurs à partir de données (Source : Paulin Le Roux, 2021) – p25

Figure 9 : Pondération des critères d'évaluation des EMM (Source : Bouzoudja and al., 2021) – p26

Figure 10 : Résultat évaluation des EMM (Source : Bouzoudja and al., 2021) – p26

Figure 11 : Identification des indicateurs performants climatiques (Source : Bouzoudja and al., 2021) - p27

Figure 12 : Conception spatiale et couverture de surface de l'aire de jeu (Egerhazi, 2013) – p30

Figure 13 : Carte de contrainte thermique (PET) et répartition des usagers (points noirs) en fonction de l'heure et de la période (Source : Hindawi, 2013) – p31

Figure 14 : Contraintes des différentes parties prenantes à la création d'un projet (Source : Paulin Le Roux, 2021) – p33

Figure 15 : Processus de validation du projet le plus pertinent (Source : Paulin Le Roux, 2021) – p34

Figure 16 : L'évaluation quantitative permet la comparaison précise des projets pensés (Source : Paulin Le Roux, 2021) – p34

Figure 17 : Relation entre les indicateurs permettant de caractériser le confort thermique (Source : Paulin LE ROUX) – p35

Figure 18 : Schéma de principe du cycle de l'eau (Source : BASE Bordeaux) – p36

Figure 19 : Schéma de principe de la composition des îlots de fraîcheur (Source:BASE Bordeaux) - p37

Figure 20 : Plan de plantation des arbres et îlot de fraîcheur correspondant sur le site de l'arboretum (Source : BASE Bordeaux) – p38

Figure 21 : Perméabilité de la surface de l'Arboretum : Avant / Après (Source : BASE Bordeaux) – p39

Figure 22 : Des outils d'interprétation pour favoriser la compréhension de l'évaluation par toutes les parties prenantes (Source : Paulin Le Roux, 2021) – p43

Glossaire

Confort thermique urbain : Sensation de bien-être thermique dans une ambiance extérieure urbaine.

CRCWSC : La Cooperative Research Center for Water Sensitive Cities est un centre de recherche australien créé en 2012. Son objectif est de contribuer à la valorisation et la contribution de l'eau en ville. Il rassemble de nombreuses disciplines : des experts de renommée mondiale et des leaders d'opinion de l'industrie.

Dérèglement climatique : Phénomène d'augmentation ou diminution des caractéristiques climatiques océaniques et atmosphérique à un endroit donné, au cours du temps.

Evaluation qualitative : Evaluation basée sur des impressions, opinions et avis. Ce type d'évaluation rend compliqué l'analyse des résultats

Evaluation quantitative : Evaluation reposant sur des données le plus souvent numérique. Ces données permettent de tirer des conclusions précises.

Evapotranspiration maximale : quantité d'évaporation maximale créée par une plante dans une situation climatique et un stade végétatif donné.

Evapotranspiration potentielle : quantité d'évaporation créée par un gazon dans une situation de satisfaction hydrique.

Evapotranspiration réelle : quantité d'évapotranspiration créée par la plante dans une situation donnée. Sa valeur dépendra en grande partie du stock d'eau dans le sol à l'instant t.

Modèle et méthode experts : Outils permettant de faire une évaluation performante d'une situation à un moment donné.

Réchauffement climatique : Phénomène d'augmentation générale des températures moyennes. Il est un perturbateur conséquent des équilibres météorologiques et écosystémiques

Système hydrologique : Système naturel ou artificiel permettant le drainage d'un bassin versant.

Ville sensible à l'eau : Ville moderne conceptualisée par la CRCWSC. Elle offre une gamme d'avantages sociaux, écologiques et économiques, grâce à une valorisation de l'eau et de son cycle urbain.

INTRODUCTION

Jamais dans l'histoire, la pérennité de l'habitat urbain n'a été autant menacée qu'aujourd'hui, alors même que les villes n'ont jamais été aussi peuplées et nombreuses. Le changement climatique, l'imperméabilisation des sols, et l'augmentation de la population urbaine notamment font de la ville une victime évidente du dérèglement climatique. Pour remédier à ce contexte défavorable, et créer des villes résilientes et vivables, de nombreux experts ont travaillé à l'élaboration de solutions paysagères favorisant le confort thermique.

Les aménagements paysagers tendent à retrouver un rôle de régulateur du microclimat des villes. C'est surtout en renforçant le lien entre le sol, l'eau et la végétation que l'aménagement favorise le rafraîchissement. Végétaliser, désimperméabiliser et stocker l'eau sont les principales actions mises en œuvre. Dans le but de renforcer la performance climatique des projets, plusieurs concepts d'aménagement paysager des villes ont émergé à travers le monde. Le Water Sensitive Urban Drainage, par exemple, est né en Australie, dans les années 90.

Différentes méthodes ont été élaborées et mises en place par des experts du climat pour évaluer quantitativement la capacité des projets à rafraîchir les zones urbaines. Ces évaluations ont été validées et se positionnent donc comme un outil fiable pour créer des projets performants et optimisés d'un point de vue climatique. Pourtant, ces évaluations sont peu utilisées par les acteurs impliqués dans les projets.

“Évaluer, c'est créer : écoutez donc, vous qui êtes créateurs ! C'est l'évaluation qui fait des trésors et des bijoux de toutes choses évaluées” (Friedrich Nietzsche).

On fait le constat, en France et ailleurs, d'un certain nombre de projets défaillants dans leur capacité à réduire l'inconfort thermique, malgré l'énoncé de cet objectif dans leurs programmes. Se pose alors la question de la non utilisation des évaluations quantitatives pourtant supposées fiables et utiles. De ce constat découle la problématique suivante :

Comment intégrer une évaluation quantitative des projets pour contribuer à l'émergence et la création d'aménagements paysagers les plus performants possible dans la lutte pour le rafraîchissement des villes ?

De cette problématique découlent plusieurs questions sous-jacentes : Comment l'eau peut-elle soutenir le rafraîchissement urbain ? Quelles sont les méthodes utilisées pour évaluer quantitativement la performance des projets paysagers urbains en faveur du rafraîchissement des villes ? Pourquoi ces méthodes d'évaluation ne sont-elles pas utilisées par les parties prenantes de l'élaboration de projet paysager urbain ?

Pour répondre à cette problématique, un travail d'analyse bibliographique a été complété par une observation des projets d'aménagement paysagers proposés par l'agence BASE de Bordeaux.

Notre réflexion est construite en trois étapes :

- Dans un premier temps, nous préciserons les enjeux liés au cycle de l'eau en ville, dans un contexte de réchauffement climatique.
- Ensuite, nous expliquerons comment les aménagements paysagers urbains peuvent être une réponse à la problématique climatique et comment leur performance peut être évaluée quantitativement,
- Enfin, nous proposerons des outils complémentaires capables de favoriser l'interprétation des résultats des modèles d'évaluations quantitatives et de contribuer à l'émergence de projets performants.

Le présent mémoire cherche à vérifier l'intérêt d'intégrer des modèles d'évaluation quantitative dans le processus de création de projet. Nous montrerons l'apport bénéfique que pourrait représenter l'utilisation d'une évaluation quantitative pour le développement de projets et donc de villes plus adaptées au réchauffement urbain. Nous faciliterons par la suite la compréhension des modèles d'évaluations pour une meilleure interprétation des résultats obtenus.

...

I. Le défi climatique pour les villes de demain

Eau à usage alimentaire, utilitaire, ludique, source d'énergie, moyen de transport et de défense... l'eau en France a été un élément fondamental dans le processus de formation des villes et de leurs croissances. Nécessaire à la survie humaine urbaine et au développement des activités anthropiques, les conditions hydrographiques ont en grande partie conditionné les formes urbaines. Néanmoins, ces dernières décennies, l'eau dans les villes françaises est progressivement devenue une contrainte à gérer. L'augmentation des populations urbaines et l'expansion des sols imperméables notamment, ont rapidement transformé les villes en une concentration de problématiques liées à l'eau.

A. Un réchauffement climatique qui prend de l'importance dans les villes.

Le 9 Août 2021, le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) dévoile son rapport sur l'évolution climatique. Le dossier est alarmant : le dérèglement climatique s'est intensifié, accéléré et généralisé. Pour Valérie Masson-Delmotte (Court, 2019), climatologue et coprésidente du groupe GIEC, nous ne sommes qu'au début de cette hausse des températures globale. Une partie du réchauffement à venir est inéluctable. D'après les scénarios les plus pessimistes, le réchauffement atteindra +5°C d'ici 2100, soit bien au-delà de l'objectif de +2°C visé dans les accords de Paris.

L'enjeu de la résilience climatique et du confort thermique est donc particulièrement prégnant et à prendre en compte dans les villes françaises déjà touché par ce réchauffement global. Une métropole comme Toulouse, considérablement concernée par les impacts du changement climatique, et notamment l'augmentation des températures moyennes, tend à connaître des hivers plus doux et des étés de plus en plus chaud (Schepman, 2019).

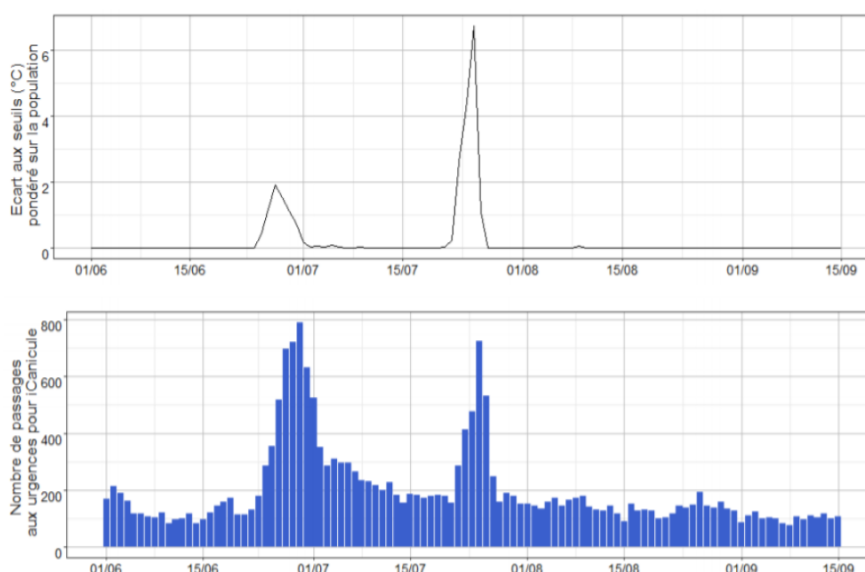


Figure 1 : Corrélation entre les périodes de fortes températures et le nombre de passage aux urgences (Source : Santé Publique France, 2019)

Durant la période estivale de 2019, deux canicules intenses ont été observées, avec des pics d'alerte entre le 24 juin et le 7 juillet puis du 21 au 27 juillet. Lors de ces deux canicules, 7 % et 35% de la population Française métropolitaine ont été placés en vigilance rouge, compte-tenu des températures exceptionnelles (Santé Publique France, 2019). Ces canicules impactent fortement le confort thermique des populations exposées (Figure 1), qu'il s'agisse des plus âgées ou des plus jeunes.

Santé Publique France (2019) a dénombré 1 462 décès en excès (+9,2 %) sur les périodes de pic d'alerte. D'après leur étude, même si les plus de 75 ans sont plus touchés, l'analyse montre que les 15-44 ans et 65-74 ans le sont également. Au cours de ces périodes de vagues de haute température, 49 % des passages aux urgences et 65 % des consultations SOS médecin ont été demandés pour maladies liées à la chaleur (Syncope, Hyperthermie, déshydratation...).

La végétation, elle aussi, n'échappe pas à cette menace : les arbres à la vie déjà réduite en zone urbaine par rapport à ceux plantés en zone rurale subissent de plus en plus la hausse des températures globale. Sans un accès suffisant à l'eau, des projets censés augmenter la qualité de vie des citoyens tels que le projet Canopée à Lyon ne pourront avoir le succès escompté.

Pour les zones urbaines, dont la population est en constante augmentation, il est donc impératif d'anticiper ce réchauffement climatique qui pourra aller jusqu'à +6° à Toulouse à l'été 2100 par rapport aux températures de la dernière décennie, selon le scénario le plus pessimiste du GIEC.

B. Un lien rompu entre une population urbaine grandissante et l'eau

La ville est devenue au fil des derniers siècles et des dernières décennies l'espace d'habitation et de vie principal de l'homme (figure 2). En 2020, 80.44% de la population nationale vit en zone urbaine (Statista, 2020)^[1], soit 53,7 millions d'habitants, selon l'étude de Statista.

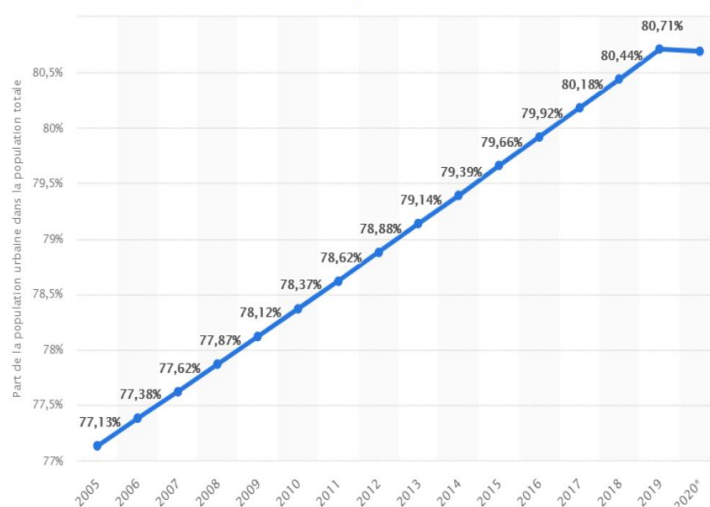


Figure 2 : Evolution de la part de population urbaine dans la population nationale (Source : Statista)

Cette augmentation de la taille des populations demande une augmentation de la taille des habitats, c'est-à-dire un développement des villes, une expansion urbaine. En 2010, déjà, la surface des zones urbaines représentaient 21,8 % du territoire soit 19% de plus qu'en 2000 (Fabrégat, 2010)^[2]. L'urbanisation du territoire français s'exerce à un rythme grandissant.

Dans ce rythme effréné, l'eau possède une place particulière. Elle a toujours été un élément décisif dans la naissance des villes. C'est initialement un axe de transport pour le commerce, une source d'énergie, une ressource économique (Cosson, 1998). L'eau, aux premières heures de la ville, est un élément qui rassemble. Il y a une importance sociétale de l'eau en zone urbaine.

Néanmoins, les rapports entre elles ainsi que la perception de l'eau par les citoyens ont évolué. Une première grande vague d'urbanisation au début du 19ème siècle en France marque une distanciation entre l'eau et les citoyens. L'eau autrefois perçue comme élément sacré, fédérateur, identitaire... est, à l'époque de l'hygiénisme reconnue comme n'ayant plus aucune valeur fonctionnelle. L'urbanisation intense referme les espaces ouverts et supprime les points d'eau. Le système de gestion est converti en tout tuyau et est enterré. Le rapport entre le citoyen et l'eau n'existe plus. L'eau finit même par être perçue comme vecteur de maladie, d'insectes nuisibles ou de mauvaises odeurs.

Aujourd'hui, le besoin de recréer un lien entre les villes françaises, les citoyens et l'eau est de nouveau au premier plan : des villes telles que Bordeaux, Angers, Lyon, Paris lancent des opérations pour recréer ce lien perdu. Peu à peu, l'eau reprend de l'importance dans les villes. Le mobilier hydraulique urbain, présent autrefois, retrouve une place considérable dans le fonctionnement et la dynamique des villes. Elle offre un nouvel accès de fraîcheur aux citoyens. Buses d'aspersions à Milan, miroir d'eau à Bordeaux (Figure 3), fontaine à Paris, brumisateurs à Pau, jets d'eau à Lyon : les grandes métropoles ont fait de "l'eau qui rafraîchit" (Le Parisien, 2021)^[3], un élément incontournable dans leurs développements.



Figure 3: Miroir d'eau de Bordeaux (Source : Flickr, 2009)

Se pose alors la question du financement de l'apport d'eau. Le prix de l'eau étant de plus en plus élevé (INSEE, 2021)^[4] un plan cohérent est nécessaire afin d'offrir un volume d'eau suffisant à chaque arbre tout en limitant le coût global. Le plan réchauffement climatique de Paris a travaillé sur le sujet. Parmi les solutions apportées : la séparation de gestion des eaux potables domestiques et de l'eau d'arrosage dédiées aux espaces végétalisés (Ville de Paris, 2018). Cette séparation de gestion se présente comme une opportunité certaine pour les paysagistes concepteurs et l'aménagement paysager urbain.

C. Un système de gestion hydraulique hérité peu adapté aux villes modernes.

La gestion et l'approvisionnement des eaux a toujours été une difficulté forte à surmonter pour les villes françaises. Le système de gestion que l'on connaît aujourd'hui est un long processus d'évolution lié à plusieurs époques. Initialement, la gestion s'est construite autour d'une compréhension fine de la topographie, de la géographie, du climat, de l'hydrologie du site mais à rapidement dû se réinventer pour gérer de plus grands volumes d'eau.

Jusqu'au XVII^e siècle, les eaux sont recyclées par des systèmes naturels. Le concept d'eau usée n'existe pas encore et sa gestion technique n'est pas encore mise en place.

C'est après cette période et jusqu'au XIX^e siècle via le vœu de contrôle, que la gestion de l'eau en ville prend de l'importance. C'est l'âge d'or de l'aménagement hydraulique. L'ingénieur hydraulique devient un acteur majeur dans l'aménagement territorial urbain.

Au XX^e siècle, la gestion des eaux se complique. En effet, une première vague d'urbanisation impose aux villes de plus grands volumes d'eau à gérer. Cette vague d'urbanisation amène avec elle des problématiques sanitaires et des risques d'inondation. Le mouvement hygiéniste émerge à cette époque et définit les principes fondateurs du réseau d'assainissement moderne.

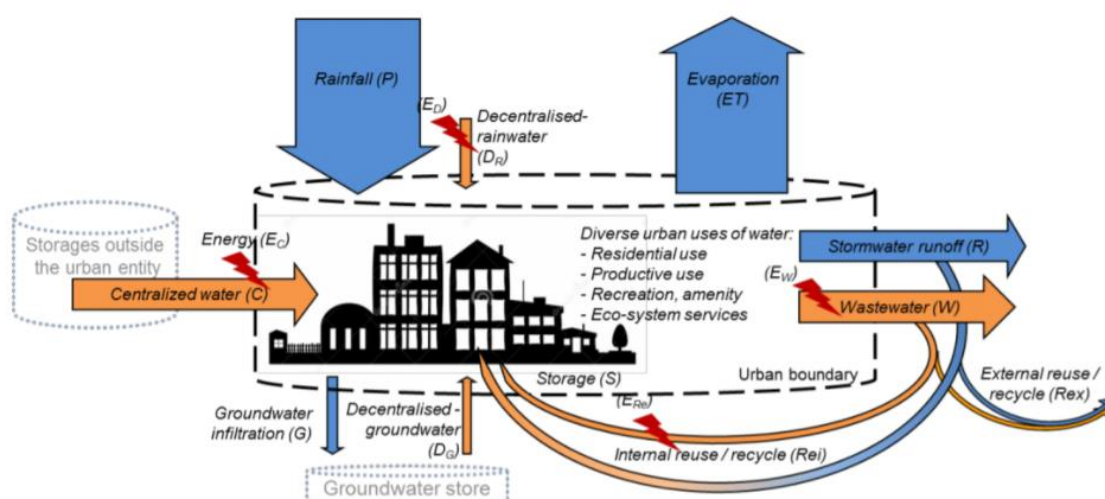
L'objectif du réseau est de contrer ces nouvelles problématiques en évacuant les eaux usées le plus loin et le plus vite possible tout en ayant une alimentation des villes en eaux propres. Dans ce sens, les routes sont imperméabilisées et les eaux sont gérées en sous-sol. Les cours d'eau eux, sont busés, canalisés ou enterrés pour évacuer plus rapidement les eaux. Jusqu'à cette période unitaire (les eaux usées et pluviales sont gérées dans le même système), c'est en 1970 et l'arrivée du réseau séparatif que l'eau pluviale est isolée et traitée séparément. Après ruissellement sur les surfaces imperméables, celle-ci est directement évacuée dans les milieux naturels.

Aujourd'hui, ce système hydrologique hérité de la relation historique entre la ville et l'eau pose problème. Trois grandes menaces découlent de ce système :

- une imperméabilisation des sols qui accentue le réchauffement des villes. D'après les données publiées par l'Agence européenne pour l'environnement dans le cadre de Corine land cover (CLC), la superficie totale des zones urbanisées a augmenté de 9% dans l'UE entre 1990 et 2006, soit de 15 000 km² ([Commission Européenne, 2012](#)). L'augmentation significative de cette surface s'explique par le besoin de récolter les eaux de pluie pour traitement puis évacuation. Or ces surfaces minérales absorbent et stockent la chaleur pendant la journée ; elle est réémise la nuit, ce qui pose de nouvelles problématiques.
- un ruissellement et une concentration des pollutions urbaines. L'eau pluviale ruisselle sur des surfaces qui sont pour la plupart imperméables, vulnérables à la corrosion et chargées de dépôts polluants ([Sénat, 2021](#))^[6]. Ces particules de diverses origines se retrouvent en fin de parcours très concentré à l'exutoire.
- une consommation excessive. Les zones urbaines sont celles qui rejettent le plus d'eau du fait de leur imperméabilité. En cas de forte pluie, les réseaux peuvent rapidement être mis en surcharge et provoquer des inondations. Étant donné les prévisions qui annoncent des épisodes de précipitations extrêmes plus fréquents, la gestion actuelle des eaux pluviales risque de rendre nos métropoles toujours plus vulnérables aux menaces de surcharges et d'inondations.

Le système de gestion des eaux urbaines doit donc se réinventer. Dans ce contexte, la notion de cycle de l'eau urbain prend de l'importance. Il facilite, d'après la CRCWSC (la coopération référence dans la gestion de l'eau en Australie), "le mouvement et l'utilisation naturels et anthropomorphiques de l'eau dans une ville, comprenant les précipitations, les flux d'eaux pluviales, l'évapotranspiration, le mouvement des eaux souterraines, l'approvisionnement en eau et son utilisation, la collecte, le stockage, le traitement, le recyclage et l'élimination des eaux usées." (CRCWSC, 2021) comme le montre la figure 4.

La notion de cycle de l'eau urbain implique la perception d'une ville comme un espace limité, dans lequel interviennent des imports et exports en eau. Une des capacités fondamentales de cette perception est de percevoir la différence entre la somme des volumes d'eau exportés et la somme des volumes d'eau importés plus le changement de volume stocké. Le cycle de l'eau en zone urbaine s'assure que l'eau occupe une place importante dans les processus de conception urbaine. La transition vers des villes sensibles à l'eau implique la bonne intégration de ce cycle grâce à diverses disciplines de l'ingénierie et des sciences de l'environnement liées à la fourniture de service d'eau.



Urban water Mass Balance:

$$\begin{aligned} \text{Sum of inflow} &= \text{Sum of outflows} + \text{change in storage} \\ C + D + P &= W + R + R_{ex} + G + ET + \Delta S \end{aligned}$$

Figure 4 : Schéma du cycle de l'eau urbain (Source : Renouf and al. (Adapté de Kenway et al (2011a) and Farooqui (2015))

D. L'arbre au service du rafraîchissement urbain

Pour pallier aux contraintes d'imperméabilisation et d'urbanisation, l'aménagement paysager s'est vite imposé comme étant la meilleure solution d'adaptation climatique. Le rafraîchissement urbain est une notion qui s'est complètement développée dans le quotidien des paysagistes concepteurs. Les décideurs urbains ont identifié l'arbre comme la solution pour offrir des avantages de refroidissement, à la fois localement et régionalement.

En effet, les arbres ont la capacité de rafraîchir les citadins lors des périodes de grosse chaleur, de protéger les bâtiments des rayons solaires et de réduire l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.

La présence d'arbre en ville s'est imposée comme la solution au rafraîchissement urbain notamment grâce à deux facteurs principaux. Premièrement, le rafraîchissement urbain est permis grâce à l'ombre créée par l'arbre. En effet, la canopée des arbres génère de l'ombre, limitant ainsi l'accumulation de chaleur dans le sol. L'ombrage est donc un élément important pour le rafraîchissement urbain, en particulier en été lorsque les arbres à feuillages caduques sont en feuilles. A cette période de l'année, l'ombrage créée par les arbres et notamment leurs feuilles permet de réduire jusqu'à 90 % la quantité de rayonnement atteignant le niveau du sol.

Outre l'ombrage, les chercheurs ont identifié la transpiration comme étant le deuxième élément capable de rafraîchir l'espace dans lesquelles les arbres sont plantés. La disponibilité en eau est donc un facteur important dans le potentiel d'un arbre à rafraîchir une zone. Sans eau, il ne peut y avoir d'évapotranspiration et donc de rafraîchissement urbain.

L'ombrage et la transpiration agissent différemment sur le refroidissement local et régional ([Rahman, 2016](#)). Au niveau local, le rafraîchissement des citadins et le rafraîchissement des bâtiments sont nettement influencés par l'ombrage créée par les arbres. En période de grosse chaleur, le confort thermique des usagers d'un espace est favorisé sous la canopée des arbres. Les feuilles des arbres limitent la transmission du rayonnement solaire. Au niveau des bâtiments, l'ombre permet de réduire la quantité de rayonnement chauffant les murs extérieurs et les toits et pénétrant leurs fenêtres.

L'efficacité de l'ombrage et de l'évapotranspiration à agir en faveur du rafraîchissement urbain est maximum au milieu de la journée, lorsque la lumière du soleil est la plus forte. Bien que la transpiration participe à l'amélioration du confort thermique des usagers, son effet sur le refroidissement de l'air ambiant est en fait plus faible que celui lié à l'ombrage. Selon l'étude de [Mballo and al. \(2021\)](#) près de 75% du rafraîchissement urbain est permis grâce à l'ombrage.

L'implantation d'arbres et la création d'ombre est devenu une nécessité pour lutter contre le réchauffement climatique. Le paysagiste concepteur grâce à son travail d'aménagement de l'espace urbain se positionne comme un des acteurs principaux de la lutte pour le développement de villes fraîches et vivables.

E. Une implication relative des parties prenantes d'un projet pour lutter contre le réchauffement des villes

La valorisation écologique par l'aménagement est une mission du paysagiste concepteur de plus en plus mis en avant. L'agence de conception BASE a su prendre part à cette mission en créant des projets implantant de nombreux arbres et en intégrant le cycle de l'eau. Le projet d'aménagement de l'arboretum dans la ZAC des Papèteries en est un exemple. Ce projet d'aménagement de ZAC innovant et responsable se localise au Nord de la commune de Nanterre, sur une emprise d'environ 19 Ha.

Le projet de la ZAC des Papèteries est un projet privé d'intérêt public. L'Objectif premier de l'aménagement de la ZAC est de concilier l'équilibre économique d'une entité privée, avec les objectifs et enjeux sociaux, environnementaux, architecturaux et économiques d'un territoire. Pour cela, le projet a répondu à 6 objectifs principaux :

- redynamiser le secteur des Papèteries ;
- abriter des emplois pérennes à Nanterre ;
- rationaliser les flux de marchandises sur le territoire ;
- valoriser le patrimoine bâti et naturel existant ;
- inscrire le projet dans une démarche d'exemplaire de développement durable ;
- et offrir un confort thermique aux habitants du quartier.

BASE a donc eu un rôle majeur dans la validation de plusieurs de ces objectifs à travers la conception de l'arboretum (Figure 5). Il lui a fallu créer et développer un projet paysager durable à forte ambition environnementale, cohérent avec l'existant et son territoire. Pour répondre à ces demandes, l'agence BASE a fait le choix de développer un aménagement dans lequel l'eau a une place importante.

Pour cela, elle a utilisé des techniques réputées très efficaces telles que l'irrigation passive, la désimperméabilisation ou l'implantation d'arbre à forte capacité d'évapotranspiration. Ces techniques seront analysées dans la suite du document. Le choix des techniques s'est fait par rapport aux expériences d'aménagement de l'agence alors qu'aujourd'hui, des outils d'évaluation quantitative des aménagements projetés existent. Ces outils/méthodes performants d'évaluation améliorent et optimisent les services rendus et donc le projet finalement retenu.

Dans un contexte climatique et urbain particulier dans lequel l'aménagement se doit d'être le plus pertinent, performant et pragmatique possible, s'est donc posée la question de la non-utilisation de ces outils/méthodes.



Figure 5 : Plan de masse de l'arboretum de la ZAC des Papèteries (Source : BASE Bordeaux)

■ ■ ■

II. Evaluer la capacité des aménagements paysagers urbains à lutter pour le rafraîchissement des villes.

Alors que les aménagements paysagers urbains prennent de l'importance ces dernières années pour gérer les eaux pluviales en ville, leurs performances réelles sur le terrain doivent gagner en évaluation et en compréhension (Geberemariam, 2016). Pour K.Flanagan and al. (2019), l'évaluation de ce type d'aménagements doit être réalisé afin de :

- vérifier qu'ils remplissent leurs fonctions prévues,
- mieux comprendre l'influence des différents facteurs sur la performance et,
- fournir une base pour améliorer les conceptions/ programmes/ planifications.

A. La gestion de l'eau au service du rafraîchissement des villes

1. Des concepts riches et variés

Au cours de ces dernières années, les aménagements paysagers visant à gérer l'eau pluviale en ville ont pris de l'importance. Dans ce domaine, de nouvelles approches holistiques ont vu le jour, donnant naissance à une diversité de concepts : La définition de gestion de l'eau urbaine s'est développée dans plusieurs régions du monde et s'est diversifiée. Les Etats Unis et la Canada ont adopté le Low Impact Development (Department of Environmental Resources,1999), le Royaume Uni a créé le Sustainable Urban Drainage System (SUDS) (CIRIA, 2000), l'Australie a développé le Water Sensitive Urban Design (Whelans and al., 1994; Wong,2007)...

Dans cette partie, nous examinons les différences, selon les régions, de chacun de ces termes majeurs, associés à l'utilisation des eaux pluviales :

- LID (Low Impact Development) : "L'expression LID désigne les systèmes et les pratiques qui utilisent ou imitent les processus naturels qui entraînent l'infiltration, l'évapotranspiration ou l'utilisation des eaux pluviales afin de protéger la qualité de l'eau et l'habitat aquatique associé." (EPA, 2021)^[6].
- SUDS (Sustainable Urban Drainage System) : Selon le CIRIA, "les techniques SUDS cherchent à capturer, utiliser, retarder ou absorber l'eau de pluie. En plus de fournir un drainage de haute qualité, les SUDS peuvent également améliorer la qualité de vie dans les espaces urbains en les rendant plus vivants, visuellement attrayants, durables et résistants au changement en améliorant la qualité de l'air urbain, en régulant la température des bâtiments, en réduisant le bruit et en offrant des possibilités de loisirs et d'éducation." (CIRIA, 2007)^[5].
- WSUD (Water Sensitive Urban Design) : "L'intégration de la planification urbaine avec la gestion, la protection et la conservation du cycle de l'eau urbaine, qui garantit que la

gestion de l'eau urbaine soit sensible aux processus hydrologiques et écologiques naturels" (National Water Commission, 2004)^[7],

Les différences entre ces trois définitions sont infimes. Ces systèmes de drainage urbain ont en commun 2 grands principes:

- “ l'atténuation des modifications de l'hydrologie et l'évolution vers un régime d'écoulement autant que possible vers les niveaux naturels ou les objectifs environnementaux locaux,
- l'amélioration de la qualité de l'eau et une réduction des polluants.” (Fletcher and al., 2014)

Il existe cependant d'après la figure 6 une subtilité entre ces notions au niveau du spectre d'action et de leur spécificité.

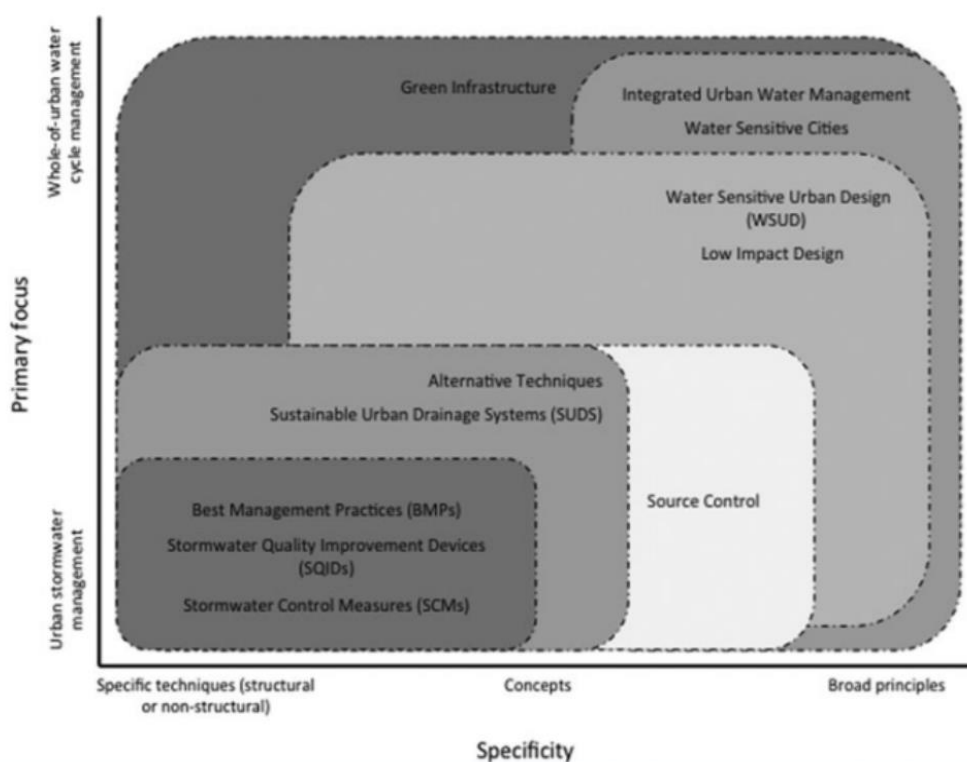


Figure 6 : Classification des différents termes de gestion des eaux par rapport à leurs spécificités et leurs objectifs (Source : Fletcher and al.)

Cette classification montre que la notion de SUDS est moins globale que les notions de WSUD et LID. Le SUDS est principalement une description de techniques et de pratiques alors que les deux suivantes présentent des concepts ou principes généraux. C'est le lien qui rattache le Water sensitive urban design aux Water sensitive cities qui différencie le WSUD et le LID. En effet la définition de WSUD s'élargit à la prise en compte de la gestion intégrée du cycle urbain de l'eau avec la planification et la conception urbaines. Le contexte australien, dans lequel les menaces de sécheresse et de hausse des températures sont particulièrement présentes, a poussé le WSUD à orienter une grande partie de ces travaux sur le rafraîchissement des villes.

2. Le WSUD, un concept basé sur le cycle de l'eau en ville

Selon le CRCWSC les aménagements intégrant et valorisant le cycle de l'eau cherchent à créer des villes sensibles à l'eau, c'est-à-dire des villes durables, résilientes, productives et vivables. L'objectif défini par le CRCWSC est de "développer une entité urbaine qui :

- sert de captage potentiel pour l'approvisionnement en eau ;
- fournit des services écosystémiques et un environnement naturel sain, offrant ainsi une gamme d'avantages sociaux, écologiques et économiques ;
- et produit des communautés sensibles à l'eau où les citoyens ont les connaissances et le désir de faire des choix judicieux en matière d'eau, sont activement engagés dans le processus décisionnel et adoptent des comportements positifs" (CRCWSC, 2013).

La gestion des eaux pluviales urbaine est devenue un sujet majeur de la création des villes sensibles à l'eau. Valoriser les précipitations in-situ, plutôt que de les évacuer hors de la ville le plus rapidement possible, représente l'opportunité de bénéficier d'une ressource en eau, indispensable à la ville moderne, tout en protégeant les cours d'eau de la pollution et les écosystèmes (PMSEIC, 2007). La collecte supplémentaire d'eaux pluviales se positionne comme une richesse pour soutenir la création d'environnements urbains plus viables et résilients dans lesquels la notion de confort thermique humain est optimisée (CRCWSC; 2013). Ce dernier dépend de 4 facteurs environnementaux :

- température de l'air,
- humidité de l'air,
- vitesse du vent et
- la température radiante moyenne.

Les aménagements paysagers urbains doivent donc orienter ces facteurs pour maximiser le confort thermique.

3. Renforcer les liens entre l'eau, le sol, et la végétation pour rafraîchir les villes

En climatologie, le confort thermique en ville dépend de l'équilibre énergétique urbain. Cet équilibre énergétique est l'égalité entre le flux d'énergie absorbée par la ville par rapport au flux d'énergie rejetée. Son bilan est exprimé ci-dessous.

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A (\text{Wm}^{-2})$$

Q^* est le rayonnement net ($Q^* = \text{longueur d'onde courte incidente} - \text{longueur d'onde courte sortante} + \text{grande longueur d'onde incidente} - \text{grande longueur d'onde sortante}$) et; Q_F est le flux de chaleur anthropique; Q_H et Q_E sont les flux turbulents de chaleur sensible et latente; ΔQ_S est le stockage de chaleur; et ΔQ_A est le flux net de chaleur horizontal par advection.

Le flux turbulent de chaleur sensible qui intervient dans ce bilan, est ce qui peut relier le confort thermique au bilan énergétique urbain. En effet, ce flux correspond à la l'énergie libérée sous forme de chaleur par la surface urbaine. Un flux turbulent de chaleur sensible important implique une haute température de l'air. Dans l'objectif de confort thermique, il est

impératif de contrôler ce flux. L'évapotranspiration permet également de lier le bilan énergétique et le bilan hydrique. L'évapotranspiration permet donc de faire le lien entre les microclimats urbains et la disponibilité en eau.

a) L'évapotranspiration

L'évapotranspiration, elle aussi, est une donnée importante dans le bilan énergétique. Elle correspond au flux turbulent de chaleur latente. Dans l'équilibre énergétique urbain, elle est le flux qui concurrence le flux turbulent de chaleur sensible. En effet, une augmentation de la valeur du flux turbulent de chaleur latente permettra, par équilibre de diminuer le flux de chaleur sensible.

Le rapport entre le flux de chaleur sensible Q_H et de chaleur latente Q_E a permis de créer un nombre adimensionnel appelé nombre de Bowen.

$$\beta = \frac{Q_H}{Q_E}$$

Ce rapport permet de caractériser le comportement thermique d'une parcelle, en lien avec la disponibilité en eau. Lorsque le nombre de Bowen est supérieur à 1, $Q_H > Q_E$, la disponibilité en eau est limitée. La chaleur est donc transportée dans l'air par convection sous forme de chaleur sensible (Athamena, 2013) créant ainsi un climat chaud. Mais si le rapport entre ces 2 valeurs est inférieur à 1, la chaleur transportée vers l'air est majoritairement sous forme latente et l'eau est abondante. Dans ce cas, le transfert de chaleur ne contribue pas forcément au réchauffement de l'air, mais il augmente le niveau d'humidité (Robitu, 2005). L'évapotranspiration possède donc une capacité d'atténuation des hausses des températures en ville.

b) Disponibilité en eau

Des études ont démontré que, à mesure que la couverture végétale augmentait, l'évapotranspiration augmentait elle aussi. La couverture végétale est, grâce à ce pouvoir d'évapotranspiration, souvent citée pour atténuer le réchauffement des villes.

Cependant, il semble que cette généralisation soit plus complexe que cela. La disponibilité en eau est un facteur clé dans le pouvoir de rafraîchissement par la végétation des villes (Oke, 1988). En 2007, Coutts and al. ont étudié 3 sites à Melbourne, en Australie, en période sèche, dans lesquels le taux d'évapotranspiration était relativement faible compte tenu du recouvrement végétal élevé. L'étude a montré ce déficit d'évapotranspiration était due à la faible qualité d'eau disponible.

D'après Oke et McCaughey (1983), une présence suffisante d'eau peut augmenter le taux d'évapotranspiration jusqu'à 40%. En effet, l'évapotranspiration végétale est gérée par la fermeture et l'ouverture des stomates. En conditions favorables, ce processus est réglé par la concentration de lumière bleue (Musy, 2009). Néanmoins, en cas de stress hydrique, un nouveau processus se met en place. Une carence en eau, un trop fort rayonnement ou une température trop haute génère la synthèse d'acide abscissique, pour déclencher la fermeture des stomates. Dans ce cas, la plante stoppe son processus de transpiration, l'évapotranspiration n'a plus lieu. Le stress hydrique compromet donc la capacité du végétal à

agir tel un mécanisme de refroidissement des villes. Dans le cas d'un stress hydrique trop long, la fermeture des stomates peut affecter la photosynthèse, et donc le développement de la plante et notamment sa capacité d'ombrage.

Dans les zones urbaines où les végétaux sont d'autant plus confrontés à la sécheresse et aux rayonnements élevés (Oke and al., 1989), la question de l'apport et conservation d'eau est primordiale pour limiter la menace du stress hydrique et conserver des végétaux sains (Clergeau, 2020).

c) **Choix des végétaux**

Dans ce contexte particulier, dans lequel les villes sont exposées aux sécheresses et hautes températures, le choix des essences végétales semble primordial pour disposer d'une entité végétale saine et adaptée, capable de refroidir la ville. L'évapotranspiration est limitée en cas de stress hydrique. Il est donc important de le limiter en choisissant des espèces résistantes et résilientes aux menaces de l'environnement dans lequel elles sont plantées.

La plante locale peut être une solution adaptée de par sa génétique et son épigénétique. La sélection naturelle a permis à l'essence de conserver les atouts génétiques permettant de résister aux menaces présentes dans un environnement. L'épigénétique elle, permet à la plante de répondre plus vite et de manière plus adaptée à une menace grâce à une "mémoire génétique". Ces deux notions sont incontournables lors du choix des végétaux plantés, pour disposer d'individus sains et au bon fonctionnement physiologique : elles permettront de limiter la différence entre la valeur de l'évapotranspiration maximale et réelle.

Chaque espèce végétale possède une évapotranspiration différente. Dans l'optique de rafraîchissement des villes, il est donc important de choisir des espèces à forte capacité d'évapotranspiration ou d'ombrage. Il existe très peu de documentation sur la comparaison de transpiration des espèces végétales non agricoles. Seulement quelques espèces d'arbres sont différenciées, alors que chacune d'entre elles possède des spécificités morphologiques (notamment taille et densité de feuillage), et physiologique, menant à une capacité de transpiration qui diffèrent (Grimmond et al., 2009). Le projet WUCOLS (Water Use Classification Of Landscape Species) a tout de même fourni une évaluation des besoins en eau d'irrigation pour plus de 3 500 plantes. Cette évaluation est basée sur l'observation et la vaste expérience de terrain de trente-six horticulteurs paysagistes en Californie. Dans le cadre du projet SESAME, CEREMA et la ville de Metz (L.Chretien and al., 2019) ont tout de même tenté de créer un tableau évaluant plusieurs espèces dans leur capacité à réguler le climat.

Cette évaluation s'est faite par rapport à : la densité et la forme de l'arbre, la persistance, la rugosité, et la forme des feuilles, ainsi que le type d'arbre (Résineux ou feuillus). Un projet de comparaison d'espèces intégrant l'évapotranspiration serait intéressant à développer. Il devrait permettre de mieux connaître la capacité de nombreuses espèces.

4. Des techniques en faveur du rafraîchissement urbain

La compréhension de cette relation forte entre le sol, l'eau et la végétation a permis de créer et mettre en place des techniques favorisant l'intégration du cycle et le rafraîchissement des villes. Trois d'entre elles sont décrites ici.

a) L'irrigation passive

L'irrigation et la mise à disposition d'eau pour les végétaux est un des principes clés dans le rafraîchissement des villes et donc la favorisation du confort thermique urbain. En effet, elle améliore la santé de la végétation et augmente les niveaux d'humidité du sol. Sans cette humidité dans le sol, une surface de gazon aura la même capacité de rafraîchissement qu'une surface imperméable (Figure 7)

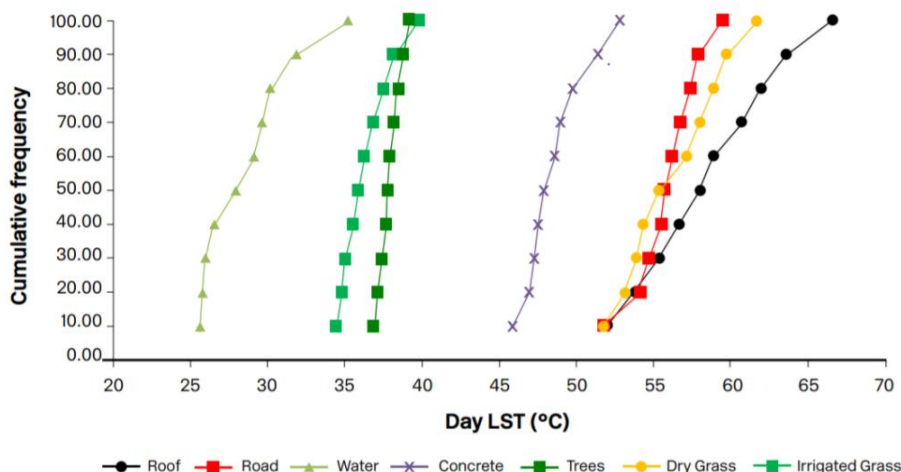


Figure 7 : Température du sol en fonction du revêtement (Source : CRCWSC, 2020)

Aujourd'hui, le concept d'irrigation passive se développe en Australie pour favoriser cette qualité végétale. Elle est l'irrigation des paysages sans utilisation d'énergie. Cela implique l'utilisation de la gravité pour diriger les eaux de ruissellement des surfaces adjacentes vers la végétation (E2DesignLab, 2018). Ce concept innovant est particulièrement utilisé car il valide les principaux atouts de l'irrigation :

- Fournir un environnement sain à l'humidité adéquate (n'étant ni trop humide ni trop sec) ;
- Favoriser le rafraîchissement urbain local ;

Il ajoute à cela plusieurs avantages :

- Limiter la surcharge des réseaux d'eaux pluviales
- Réduire la dépendance sur l'approvisionnement en eau potable et en énergie
- Soutenir les paysages avec une eau alternative pour améliorer la santé, et la résilience du paysage
- Protéger les environnements récepteurs (ruisseau, estuaires, océans) en assurant la rétention à la source.

b) Plantation d'arbre à forte capacité d'évapotranspiration et d'ombrage

L'arbre est aussi un outil important pour la formation du confort thermique. La capacité des plantes à supporter le rafraîchissement est d'autant plus marquée quand :

- la quantité de végétation est élevée ;
- la végétation est plantée en pleine terre, et que ;
- la proportion d'arbres est élevée.

En créant des zones ombragées et par évapotranspiration, les espaces plantés captent et reflètent l'énergie solaire, empêchent l'accumulation de chaleur dans le sol et donc climatisent naturellement l'air. L.Chrétien and al. (2019) ont tenté de mettre en place un cadre d'évaluation de la performance des arbres à supporter le rafraîchissement des villes grâce à l'ombrage. Ce cadre d'évaluation est basé sur la morphologie de l'arbre. Même s'ils ne prennent pas en compte la valeur de l'évaporation, ce cadre d'évaluation est intéressant. En effet, il prend en compte notamment sa capacité d'ombrage et d'absorption énergétique solaire.

D'après L.Chrétien and al. (2019), les essences aux plus grosses capacités de rafraîchissement sont les suivantes :

- Abies concolor; 9/10
- Acer pseudoplatanus; 9/10
- Aesculus hypocastanum; 9/10
- Magnolia grandiflora; 9/10
- Platanus; 10/10

Attention néanmoins à ne faire son choix végétal que par rapport à ce cadre. Comme argumenté dans la partie II.A.3.c, la compatibilité génétique et épigénétique du végétal avec son environnement est au moins aussi importante que la capacité de celui-ci à limiter l'accumulation d'énergie solaire dans le sol.

c) La désimperméabilisation

La désimperméabilisation des sols est devenue une problématique de premier ordre en ville. Dans une période actuelle où l'espace urbain est de plus en plus sollicité, les revêtements perméables offrent une combinaison des bénéfices des ouvrages de gestion des eaux pluviales et des bénéfices des supports de voiries (cyclable, piéton, routier...).

Les revêtements perméables tels que les pavés enherbés, les surfaces plantées ou les surfaces en mulch ont la capacité de capter et gérer l'eau pluviale directement à la source. Il y a aussi possibilité de stockage puis redistribution progressive vers la nappe, les végétaux ou les exutoires dédiés. Cette redistribution progressive permet de réduire considérablement la menace d'inondations et favorise l'apport en eau des végétaux et l'évapotranspiration directe du sol. Les revêtements perméables sont un outil fondamental pour intégrer davantage le cycle naturel de l'eau dans un aménagement.

Aussi, l'adaptabilité des revêtements perméables est un atout indéniable. La diversité de ses matériaux, de ses origines et de ses propriétés (nature, couleur, perméabilité), permet au paysagiste concepteur de l'adapter à l'environnement, aux différents usages et aux capacités d'entretien. Les besoins du site, ses atouts, ses capacités ainsi que ses enjeux sont donc des éléments à connaître pour un revêtement perméable cohérent et performant.

B. Une évaluation des aménagements paysagers urbains déjà possible grâce à des modèles experts fiables

Pour un développement cohérent et adapté de la gestion des eaux pluviales en faveur du rafraîchissement des villes, la performance des aménagements paysagers inspirés du concept de WSUD doit être évaluée par différents indicateurs. Ces indicateurs sont créés à partir de données par des modèles et méthodes expertes (EMM). Ces EMM, à travers la transformation de données en indicateurs performants, offrent une valeur scientifique aux aménagements et aux projets. Aujourd'hui, nombreux sont les indicateurs permettant d'évaluer l'aménagement paysager.

1. La création d'indicateurs grâce à l'utilisation de modèles experts.

Les modèles et méthodes d'évaluation permettent de créer des indicateurs à partir de données relevées, (telles que des données climatiques locales, des informations sur le type de végétation présente, etc.). Ces données sont issues de mesures faites sur le site ou de simulations par logiciels. L'évaluation quantitative est permise grâce à la capacité des EMM à transformer des données en indicateurs (Figure 8).

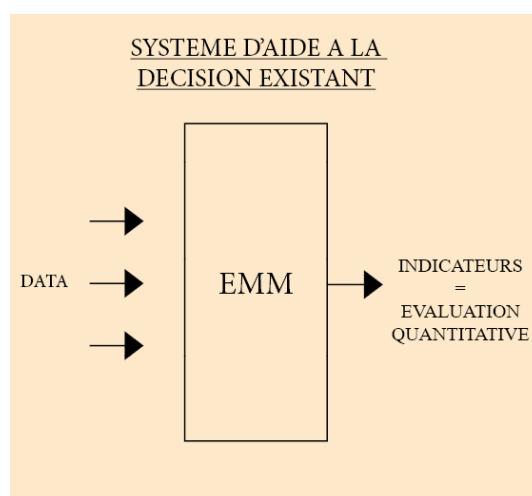


Figure 8 : Schéma du processus de création des indicateurs à partir de données (Source : Paulin Le Roux, 2021)

Dans le cadre du projet H2020 Nature 4 Cities, Bouzouidja and al. (2021) ont présenté et évalué plusieurs EMM capables de mesurer ou calculer différents indicateurs climatiques pour des solutions fondées sur la nature (SFN ou NBS en anglais). Cette évaluation des EMM repose sur six critères:

- le paramétrage,
- la documentation,
- la fiabilité de la méthode,
- le temps de modélisation,
- la possibilité d'échange, et
- la facilité d'application (Bouzouidja and al. 2021).

Chaque critère s'est vu attribuer un coefficient en fonction de son importance comme montré dans la figure 9.

Criteria	Sub-criteria	Weighting factors
Parametrization	The parameterization of the model enables the exact representation of different NBS groups and spatial scenarios	3
	The required input data are suitable (obtainable, not too complex) for parameterizing the expert model	2
Background documentation	The structure (architecture) of the model or the method and the workflow of the calculations are well-documented and available	3
Reliability of the model/method	Validation studies (that is, comparison with accurate field measurements) exist and the model have got positive feedback from users	3
Modelling time (preparations and model running)	The model or method build up requires short time which enables the usage of the model in expert modelling	2
	The running time is not too long which enables the usage of the model in expert modelling	1
User friendliness	The model or method can be used easily and correctly by experts (outside of the N4C expert team as well)	1
Application	The model is freely available	2
	The model or the method is frequently used for scientific purposes (by international users)	3

Figure 9 : Pondération des critères d'évaluation des EMM (Source : Bouzoudja and al., 2021)

L'étude a pu évaluer les principales méthodes permettant la création des indicateurs climatiques. Les résultats sont donnés dans la figure 10:

UCs	EMMs	Score	Scale Parcel	Neighbourhood	City
Climate change adaptation challenge	FLUENT-ANSYS	67.0	X	X	
	ENVI-met	80.0		X	
	TEB-model	75.0		X	X*
	RayMan model	83.0	X	X	
	SOLENE-Microclimat	65.0		X	
	SOLWEIG-model	84.0	X	X	

Figure 10 : Résultat évaluation des EMM (Source : Bouzoudja and al., 2021)

Plus la note de l'EMM est élevée et plus elle est performante d'après l'évaluation de Bouzoudja and al. (2021). L'étude met notamment en avant le modèle de SOLWEIG qui permet de créer l'indicateur MRT. Avec un score de 84%, il est le plus performant dans l'évaluation quantitative d'un projet à l'échelle d'un aménagement ou d'un quartier, selon les auteurs de l'étude.

Quatre méthodes possèdent un score supérieur ou égal à 75%. L'étude montre la haute performance de ces modèles pour donner des indicateurs performants capables d'évaluer l'efficacité des aménagements à lutter contre le réchauffement des villes. Grâce à ces 4 méthodes, la création de 7 indicateurs est possible (AT, TLS, TCS, PET, MRT, PMV, UTCI). Néanmoins ces indicateurs ne peuvent être calculés à toutes les échelles. Celles-ci

sont importantes à prendre en compte par l'utilisateur. Elles permettent d'avoir des résultats cohérents et de pouvoir interpréter correctement la valeur des indicateurs et donc la valeur des projets.

A noter qu'il existe aussi une méthode d'évaluation d'un site par caractéristiques expérimentales. Grâce aux mesures des variables microclimatiques, la méthode permettra de faire un diagnostic de l'existant ou du projet déjà réalisé. Néanmoins, contrairement aux méthodes évaluées par l'étude de Bouzouidja and al., cette méthode ne peut être utilisée en phase de conception : elle est incapable de comparer plusieurs scénarios.

2. Les indicateurs de performance disponibles pour évaluer les aménagements

Les EMM ont permis de créer un grand nombre d'indicateurs. Ces derniers constituent une longue liste de preuves scientifiques appuyant une multitude de concepts. Seulement certains d'entre eux constituent un atout pour l'évaluation des aménagements en faveur du rafraîchissement urbain.

a) Les indicateurs de performance pour évaluer la régulation du climat urbain

En 2020, le projet N4C (Nature4cities, H2020, 2016-2020) a analysé les différents indicateurs créés par les EMM. Ceux-ci ont pu être identifiés et triés par rapport à 11 défis urbains. Parmi ces onze défis figure le défi d'adaptation au changement climatique. N4C nous donne 7 indicateurs de performances pour le défi de rafraîchissement des villes (Figure 11). Ces indicateurs sont ceux créés par les EMM étudiés ci-dessus. On peut y retrouver :

UCs	Urban Performance Indicators	
Climate adaptation	AT - Air temperature	PET - Physiologically equivalent temperature
	TLS - Thermal load score	MRT - Mean radiant temperature
	TCS - Thermal comfort score (outdoor)	PMV - Predicted mean vote
		UTCI - Universal thermal climate index

Figure 11 : Identification des indicateurs performants climatiques (Source : Bouzouidja and al., 2021)

- AT est la température de l'air mesurée dans un abri ombragé et ventilé. Cette valeur peut également être calculée à l'aide de modèles microclimatiques ou climatiques. C'est un indicateur facile à calculer et est dominant dans l'évaluation de la performance des aménagements à lutter contre le rafraîchissement des villes. Il peut être calculé à toutes les échelles (de l'aménagement jusqu'à la ville).

- TLS est la Charge thermique sortant du corps. Il représente l'évolution de la différence entre la température de l'air entrant et de la température de l'air sortant d'une zone située à 1,8 m de hauteur (hauteur d'homme). Elle est un indicateur performant et demande peu de données. Elle est calculable à l'échelle du quartier et de l'aménagement.
- Le TCS est le Score de Confort Thermique d'une zone. Il est construit selon la répartition de fréquence de confort thermique et de stress thermique évoluant sur la zone à un moment (ou un intervalle) prédéfini. Cet indicateur n'est pas facile à calculer car il dépend de plusieurs autres données telles que le PET. Même s'il peut être calculé à toutes les échelles, le TCS n'est pas l'indicateur le plus efficace dans l'évaluation des WSUD.
- PET est la Température Équivalente Physiologique. Il sert à exprimer l'effet physiologique combiné de l'environnement thermique (décrite par la température de l'air, la pression de vapeur, la vitesse du vent, la température radiante moyenne). Du fait des nombreuses données à réunir pour le calculer et du modèle physiologique associé, le PET n'est pas un indicateur facile à utiliser. Il peut néanmoins être calculé à toutes les échelles.
- MRT est la température radiante moyenne. Elle est un indice utilisé pour quantifier l'effet thermique des flux de rayonnement atteignant le corps humain. Même s'il peut être proche de la température de l'air en intérieur, la valeur de la MRT peut être beaucoup plus élevée que la température de l'air en extérieur (AT). C'est un indice performant dans l'évaluation du confort thermique, mais n'est pas facile à mettre en place. Son calcul se fait à toutes les échelles.
- PMV est la prédiction du vote moyen de perception thermique. Il est l'indicateur de confort thermique le plus utilisé malgré les nombreuses données nécessaires. Il est une prévision du confort thermique moyen pour un groupe de personnes. Il dépend de sept principaux facteurs physiques dont quatre facteurs environnementaux (température et humidité de l'air, température radiante moyenne et vitesse de l'air) et trois facteurs personnels (le métabolisme, les vêtements et l'activité). Il peut être calculé uniquement à l'échelle du quartier et de l'aménagement.
- UTCI est l'Indice universel du climat thermique. Il est un indicateur de mesure des conditions climatiques permettant le confort thermique du corps humain. Tout comme le PET, du fait des nombreuses données à réunir pour le calculer et du modèle physiologique associé, l'UTCI n'est pas un indicateur facile à utiliser. Il peut être calculé à toutes les échelles.

b) Les indicateurs de performance des sous processus favorables au rafraîchissement des villes

L'analyse de la performance des aménagements sensibles à l'eau par rapport au microclimat urbain est compliquée, même avec des indicateurs performants car :

- le confort thermique est un aspect complexe, dépendant de nombreux facteurs climatiques,
- la morphologie urbaine influence de manière importante sa valeur, et
- les effets positifs de l'aménagement sensible à l'eau dépendent aussi de nombreux sous-processus (Bouzouidja and al. 2021).

Parmi ces sous-processus, nous retrouvons :

- la disponibilité en eau et qualité du sol,
- la qualité de la végétation,
- la qualité de l'eau utilisée.

Dans le cadre du projet Nature 4 Cities, Bouzouidja and al. (2021) ont pu sélectionner plusieurs indicateurs pour évaluer ces 3 sous-processus.

(1) Qualité de la Végétation

- UGSP est la proportion d'espace vert urbain. Elle représente le taux d'espaces verts par rapport à la surface totale. Elle implique une plus grande capacité de l'entité végétale à lutter contre les microclimats urbains. C'est un indicateur facile à mesurer, à l'échelle du quartier et de la ville.
- EPTvar est la variation de l'évapotranspiration. Elle calcule la différence d'évapotranspiration cumulée pendant une période déterminée entre une situation sans WSUD et, dans un même contexte, une situation similaire mais avec WSUD. C'est un indicateur performant pour l'évaluation de la qualité du végétal et de sa capacité d'évapotranspiration. De plus, il est facile à mettre en place. Il peut être mesuré à l'échelle de la ville et du quartier.

(2) Qualité de l'eau

- WQ est la qualité de l'eau. Elle dépend des paramètres physico-chimiques et de la concentration de l'eau en micropolluants (organiques et inorganiques). C'est un indicateur performant dans l'évaluation de la capacité de l'eau à supporter la végétation dans le rafraîchissement des villes. Son évaluation est facile à mettre en place mais ne peut être calculée qu'à l'échelle de l'aménagement.
- SWS est le stockage de l'eau dans les sols. Cet indicateur permettant d'évaluer la ressource en eau, est très performant et facile à calculer. Il est intéressant pour évaluer la capacité d'un espace à fournir une quantité cohérente d'eau aux sols et aux végétaux.

(3) Qualité du sol

- SWR est la capacité du sol à retenir l'eau et à la fournir aux plantes. Elle se calcule en mm d'eau / cm de sol. Une bonne valeur de SWR favorise une qualité végétale et une évapotranspiration importante. C'est un indicateur très performant facile à mettre en place mais uniquement calculable à l'échelle de l'aménagement.

- SBA est l'activité biologique du sol. Elle représente le taux de décomposition de 2 matières organiques, par des microorganismes. Une valeur élevée de SBA indique un sol vivant en bonne santé, favorable au bon développement végétal. C'est un indicateur très performant mais compliqué à mesurer. Son calcul n'est possible qu'à l'échelle de l'aménagement.
- SMP est la macroporosité du sol. Elle correspond à l'aération du sol. Une bonne valeur de SMP implique des conditions de sol permettant la respiration des racines, une activité microbienne, et une capacité d'infiltration de l'eau. Elle est un indicateur performant facile à mesurer à l'échelle de l'aménagement.

Ces indicateurs performants des sous-critères seront des éléments incontournables pour le paysagiste concepteur pour optimiser la capacité de rafraîchissement des projets créés. La liste des indicateurs performants "secondaires" constitue un rappel des nombreux facteurs à prendre en compte pour créer un aménagement sensible à l'eau efficace. Elle fait office de rappel aux concepteurs ou aux décideurs, des aspects de l'aménagement qu'ils n'auraient peut-être pas pris en compte. Même s'il semble compliqué de valoriser chaque indicateur de cette liste, celle-ci aura vocation à aboutir à la création du WSUD le plus performant possible.

C. Cas concret : une évaluation en faveur du rafraîchissement urbain

L'évaluation quantitative d'un espace prochainement aménagé permet de visualiser plus facilement ses atouts, ses faiblesses, ses opportunités, et ses menaces. Elle est permise grâce à la création d'indicateurs à partir de données par les EMM.

Dans une étude, [Egerhazi \(2013\)](#) a tenté d'examiner les conditions thermiques d'une aire de jeu (Figure 12) située à Szeged, en Hongrie en utilisant le modèle ENVI-met. Il représente un modèle climatique capable de simuler les interactions entre la surface, l'atmosphère et la végétation avec une précision temporelle et spatiale relativement forte. L'objectif est de favoriser un développement urbain durable et respectueux du climat.

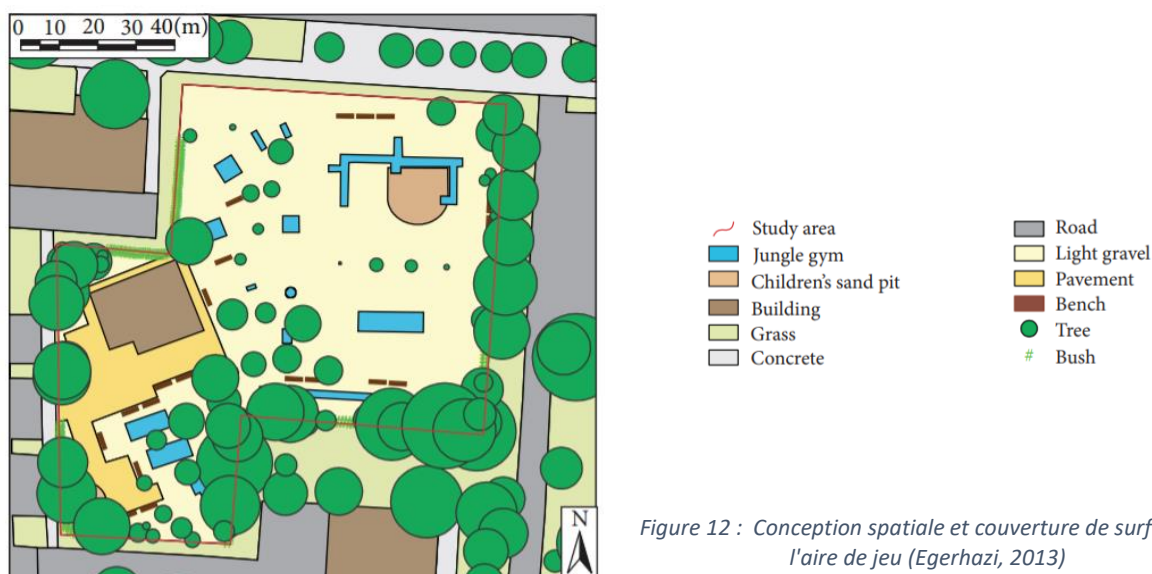


Figure 12 : Conception spatiale et couverture de surface de l'aire de jeu (Egerhazi, 2013)

Pour cela, la simulation a rassemblé plusieurs données : les paramètres météorologiques ainsi que les éléments morphologiques de la zone (bâtiments, végétation, occupation du sol, etc.). Les données météorologiques initiales utilisées par le modèle sont la température de l'air, l'humidité relative (mesure faite tous deux à 12 h), la vitesse du vent (mesure faite toutes les 10 minutes de 9 h à 18 h), la direction du vent la plus fréquente sur la période 9h-18h, et l'humidité spécifique (mesures de sondage à 0 UTC). Ces paramètres météorologiques ont été fournis par une station du service météorologique hongrois située à 6 km du terrain de jeu

Le modèle ENVI-Met a permis de créer, à partir des données récoltées, l'indicateur « température physiologiquement équivalente » (PET).

Les résultats issus du modèle permettent de créer les cartes suivantes :

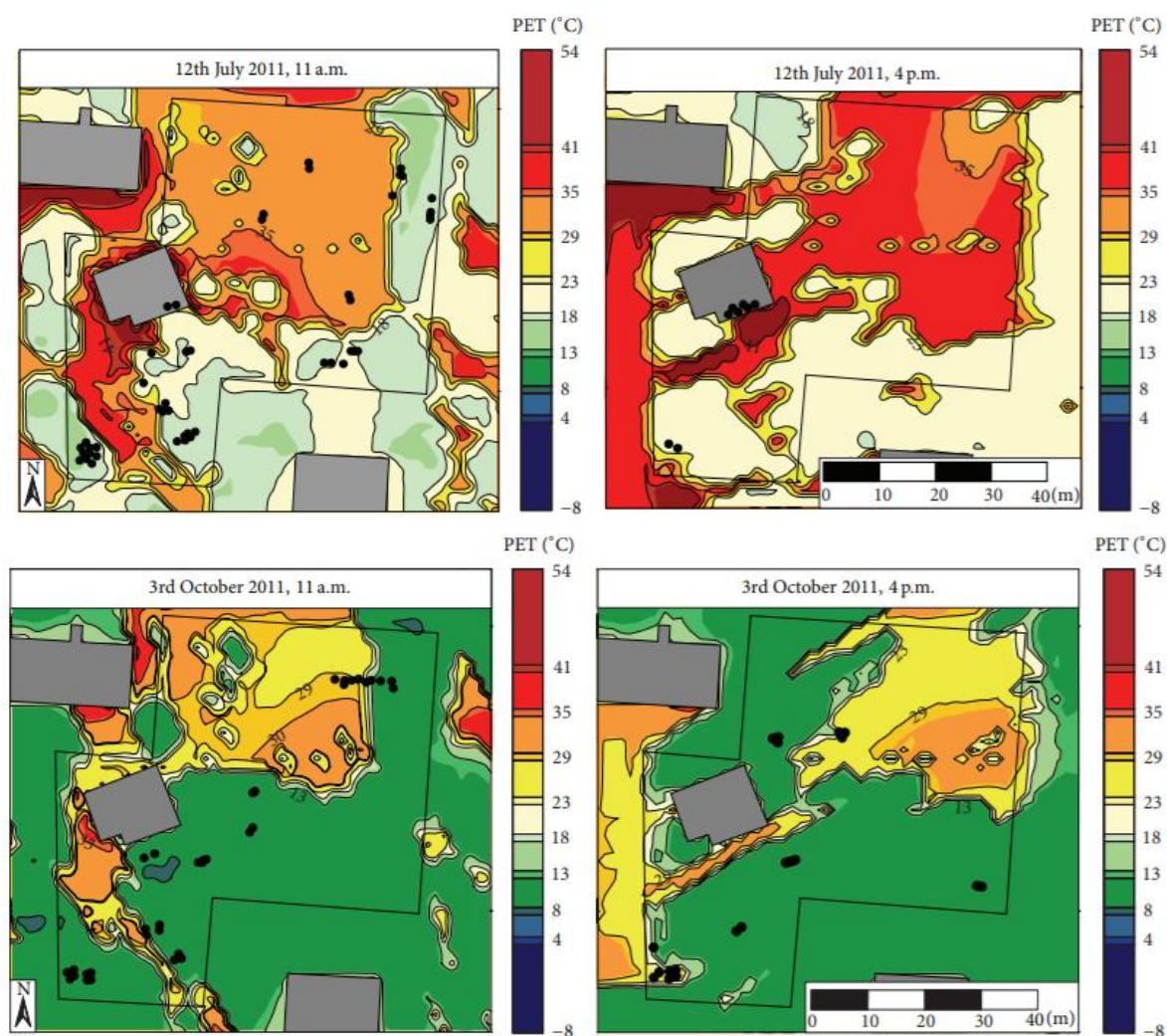


Figure 13 : Carte de contrainte thermique (PET) et répartition des usagers (points noirs) en fonction de l'heure et de la période (Source : Egerhazi, 2013)

Selon l'analyse des résultats (Figure 13), il existe plusieurs différences microclimatiques remarquables entre les deux périodes examinées (le 12 juillet 2011 et le 3 octobre, à 11h et 16h). Le modèle met en avant des zones d'inconfort thermique au centre et au nord de la zone ainsi qu'autour de la salle de spectacle en été. Les zones arborées et

ombragées du sud procurent un microclimat confortable même dans l'après-midi d'été. Cependant, en automne, ces mêmes endroits produisent des conditions trop fraîches.

La différence de confort thermique observée dépend notamment de l'élévation du soleil et de l'ombrage causées par la végétation et les bâtiments environnants.

L'évaluation va permettre de visualiser plus facilement l'emplacement préférentiel du terrain de jeu pour favoriser le confort thermique des usagers. L'interprétation des résultats du modèle permet aussi de choisir le type d'équipement pour le terrain de jeu. L'évaluation quantitative a permis de développer la conclusion suivante : afin de favoriser le confort thermique des visiteurs, il serait souhaitable de maintenir le terrain de jeu sur une zone chaude en été et chaude modérée en automne et de construire des structures d'ombrage artificielles et temporaires au-dessus des jeux les plus fréquentés.

...

III. Intérêts et limites de l'évaluation quantitative des projets

Théoriquement, l'existence des EMM et indicateurs sont des atouts considérables pour l'évaluation et l'optimisation des projets et de leurs capacités à rafraîchir les villes. Pourtant, l'évaluation quantitative n'est pas utilisée. Dans la pratique, son utilisation doit donc posséder quelques limites.

A. Renforcer les échanges entre parties prenantes pour favoriser la création de projets optimisés

Les projets d'aménagement urbain intègrent généralement des acteurs nombreux et hétérogènes : des élus territoriaux (maîtrise d'ouvrage), des professionnels de la conception paysagère (maîtrise d'œuvre), des professionnels de la réalisation d'aménagements (entreprises) et des citoyens (usagers). L'échange entre ces différentes parties prenantes est essentiel pour développer un projet optimisé (Yeomans, 1993). En effet, comme le montre la figure 14, chaque partie prenante est soumise à des contraintes différentes (budget, délais, usage, esthétique, contraintes techniques, etc.)

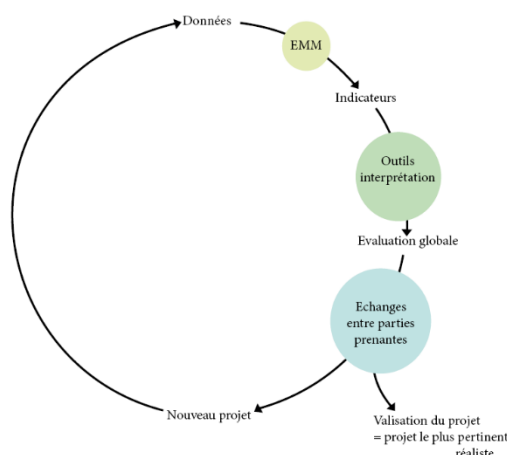
MOA (Maîtrise d'ouvrage)	MOE (Maîtrise d'œuvre)	ENTREPRISES	USAGERS
<u>Mission :</u> • Il commande le projet et le finance • Il définit le programme, le calendrier et le budget • Il réceptionne le projet	<u>Mission :</u> • Il conçoit le projet et le chiffre • Il définit le cahier des charges auquel l'entreprise chargée de la réalisation devra se conformer • Il fait le lien entre la maîtrise d'ouvrage et les entreprises	<u>Mission :</u> • création, aménagement, entretien de parcs et jardins, de terrains de sport, despaces publics... • installation de systèmes d'arrosage, d'éclairage, de clôtures...	<u>Mission :</u> • Ils élisent les décideurs publics • Ils créent une demande
<u>Contrainte :</u> • Demande d'usage	<u>Contrainte :</u> • Budgétaire • Temporelle • Esthétique	<u>Contrainte :</u> • De réalisation • Temporelle • Budgétaire	<u>Contrainte :</u> • Dependance aux usages

Figure 14 : Contraintes des différentes parties prenantes à la création d'un projet (Source : Paulin Le Roux, 2021)

La création d'un projet est donc contrainte par plusieurs exigences. L'échange entre les différents acteurs du projet permettra de généraliser la prise en compte de ces contraintes. Sans cette généralisation, les contraintes seront perçues individuellement et la qualité du projet risque d'en pâtir.

C'est la compréhension mutuelle entre les différentes parties prenantes qui permet d'optimiser la capacité du projet en faveur du rafraîchissement urbain, tout en prenant en compte l'ensemble des contraintes. C'est ce que montre la figure 15.

Figure 15 : Processus de validation du projet le plus pertinent (Source : Paulin Le Roux, 2021)



Une évaluation des projets devrait permettre l'exploration et la comparaison des différents scénarios et alternatives par chaque partie pour aboutir au meilleur projet possible.

B. Intérêt de l'évaluation quantitative

1. L'évaluation quantitative comme support de comparaisons entre les projets.

Aujourd'hui, les projets ne sont pas évalués sur leur capacité à favoriser le rafraîchissement des villes. Cette absence d'évaluation ne permet pas une comparaison précise entre la situation initiale et le projet envisagé ou entre les différentes hypothèses d'un projet. L'évaluation est qualitative, tendancielle, et ne supporte donc pas suffisamment les échanges entre les parties prenantes. La Figure 16 montre cette capacité de l'évaluation quantitative à favoriser la comparaison entre différents projets et donc les échanges entre les différents acteurs.

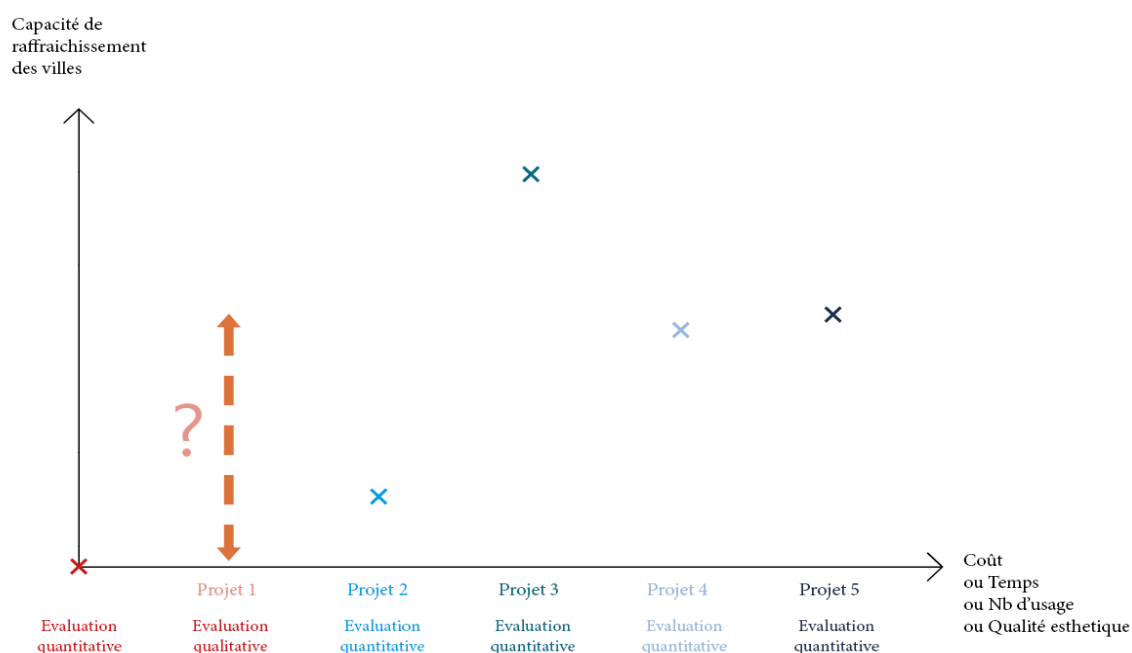


Figure 16 : L'évaluation quantitative permet la comparaison précise des projets pensés (Source : Paulin Le Roux, 2021)

L'évaluation quantitative va permettre à chaque acteur de visualiser beaucoup plus facilement et avec beaucoup plus de précision la capacité des projets à rafraîchir les villes. Cette meilleure évaluation des projets par l'ensemble des parties prenantes devrait permettre des échanges plus fructueux où chacun contribue à l'émergence d'un projet efficace en termes de confort thermique et compatible avec l'ensemble des contraintes. On peut même imaginer que l'évaluation des projets conduisent à discuter des contraintes imposées par les différents acteurs, afin de parvenir à un projet acceptable par tous : Par exemple, en se basant sur l'évaluation des différentes hypothèses envisagées, la MOA pourra peut-être augmenter le budget prévu initialement, les usagers accepteront peut-être de délaissier un usage demandé lors de la création du programme, la MOE consentira peut-être à moins mettre en avant la valeur esthétique d'un projet...

2. Mise en situation : l'arboretum de la ZAC des Papèteries

La partie II de l'étude nous a permis de montrer que la capacité d'un projet à agir en faveur du rafraîchissement urbain est influencée par plusieurs sous processus. L'évaluation quantitative de ces sous processus permet de créer les indicateurs tels que l'UGSP, l'ETPvar, la WQ ou la SBA. Ils permettent l'évaluation précise de la capacité du projet et favorise donc les échanges entre les parties prenantes. A noter que les indicateurs de ces sous processus s'influencent aussi entre eux comme le montre la figure 17. Dans son travail d'aménagement de l'Arboretum (projet décrit dans la partie I.E), BASE à su influencer de façon quantitative le valeur de ces indicateurs. En temps que paysagiste concepteur, les indicateurs sont des atouts pour valoriser les techniques d'aménagement utilisées.

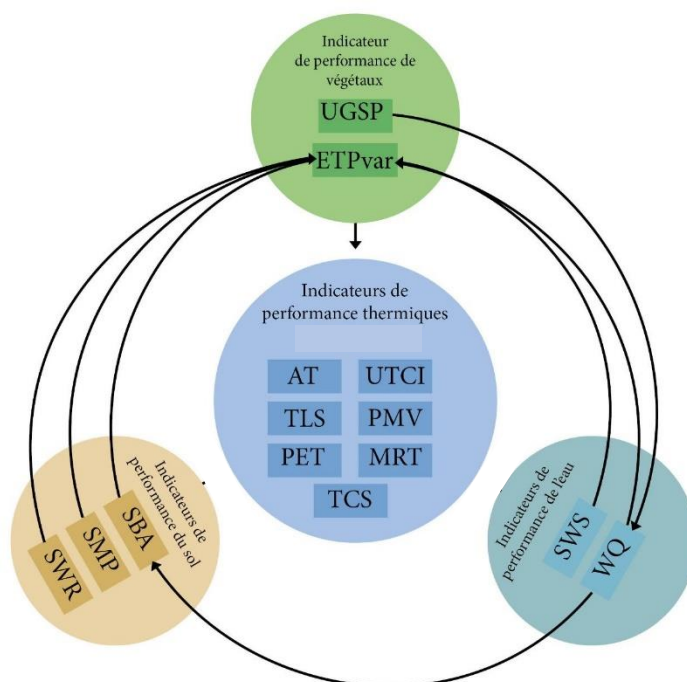


Figure 17 : Relation entre les indicateurs permettant de caractériser le confort thermique (Source : Paulin LE ROUX)

a) Intégration du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau prend une place importante dans le développement du projet d'aménagement paysager. L'eau de pluie des bâtiments est récupérée par des canalisations enterrées qui se déversent ensuite dans la roselière. Si celle-ci arrive à sa limite de stockage, des ouvrages de surverse permettent de diriger l'eau vers le bassin de réserve qui lui-même, lorsqu'il arrive à sa zone de stockage maximum, déverse les eaux dans la noue qui s'infiltrent ensuite dans le sol. Le ruissellement des eaux de pluies sur les espaces minéraux et végétaux s'infiltre directement dans les espaces végétalisés (Figure 18).

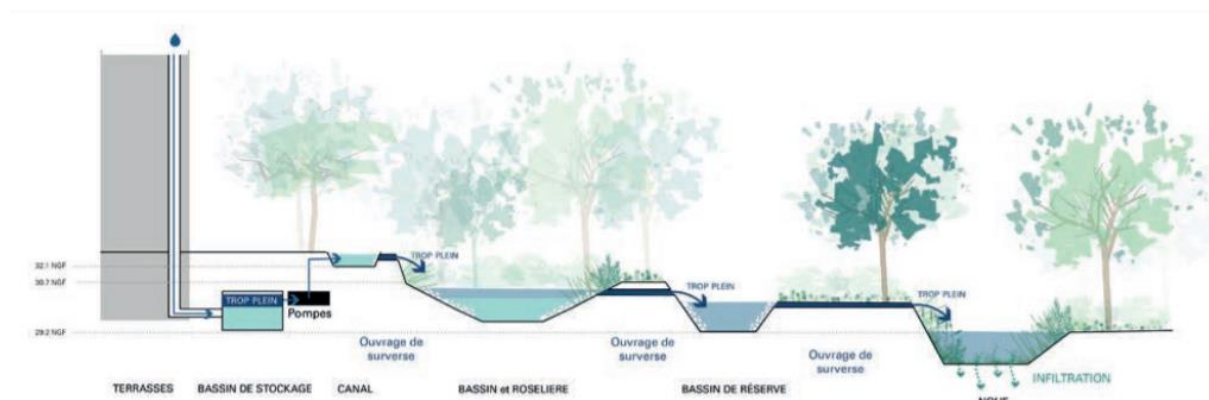


Figure 18 : Schéma de principe du cycle de l'eau (Source : BASE Bordeaux)

Grâce à une canalisation de refoulement et à une pompe, les eaux recueillies dans la roselière sont réinjectées en amont du canal assurant ainsi un apport en eau permanent. Lorsque le bassin de stockage atteint son niveau maximum, les eaux de pluies sont aussi redirigées vers le canal. L'infiltration des eaux dans les espaces végétalisés permet d'alimenter la nappe phréatique du site. Une éolienne solaire sert à récupérer ses eaux et à alimenter l'arrosage pour le potager. Si la réserve de stockage de l'éolienne arrive à son niveau maximum, le surplus est alors déversé dans la roselière grâce à une canalisation souterraine. Le site présente 3 systèmes différents pour l'arrosage des espaces végétalisés :

- la prairie arborée au centre par asperseurs, puis ;
- un système gouttes à gouttes pour l'allée de l'Arboretum ainsi que les patios et le parvis arboré et enfin ;
- des bouches d'arrosages réparties sur les autres espaces.

Ces techniques différenciées permettent de répondre aux besoins en eau hétérogène des espaces plantés : raisonnés (15 à 20 arrosages annuels), limités (5 à 10 arrosages annuels) et ponctuels (si sécheresse, 5 arrosages annuels).

La technique d'intégration du cycle de l'eau dans le projet semble efficace d'après la partie II de notre étude. En effet, cette méthode utilisée par BASE permet d'influencer la valeur du volume d'eau stocké dans le sol (SWS), un indicateur de performance de l'eau décrit dans la partie II.A.2. Comme vu sur la figure 17, une valeur appropriée du SWS favorisera l'ETPvar, la SBA, et la SWR. La valeur améliorée de l'ETP var influencera la valeur de plusieurs indicateurs thermiques performants dans l'évaluation du rafraîchissement des villes.

b) Surface plantée

Le choix de la palette végétale, de la densité et de l'implantation et du nombre d'arbres ont été un principe fort dans le travail de rafraîchissement de l'espace. Sur l'espace aménagé, 1272 arbres ont été plantés et plus de 100 000m² de surface plantée sur dalle ont été créés. En créant des zones ombragées et par évapotranspiration, ces îlots climatisent naturellement l'air. Le choix de favoriser la présence de l'arbre plutôt que la strate basse permet d'augmenter la quantité d'ombre et favorise donc un meilleur confort thermique (Figure 19). Ici, c'est tout le parc de l'Arboretum qui constitue un îlot de fraîcheur (Figure 20).



Figure 19 : Schéma de principe de la composition des îlots de fraîcheur (Source : BASE Bordeaux)

Cependant, de par leur densité de plantation, certains espaces ont une aire d'influence thermique plus importante. C'est le cas du parvis des Papèteries, de l'Allée de l'Arboretum ou encore de l'île de la Roselière. D'après l'évaluation de L.Chretien and al. (2019), la capacité des arbres choisis par BASE à rafraîchir la zone d'aménagement est hétérogène. Des essences telles que *sophora japonica* (évalué à 9/10 par L.Chretien and al., 2019), *Magnolia kobus* (évalué à 9/10 par L.Chretien and al., 2019), ou *Celtis australis* (évalué à 8/10 par L.Chretien and al., 2019) sont des atouts forts pour réguler le climat local de l'espace aménagé. Néanmoins, beaucoup d'autres individus présents sur le site ont un pouvoir de rafraîchissement local très faible si l'on prend en compte le cadre d'évaluation de L.Chretien and al. (2019). Les *Gleditsia triacanthos*, les *Pinus* sont évalués à 3/10, les *Acer monspessulanum* obtiennent la note de 2/10.

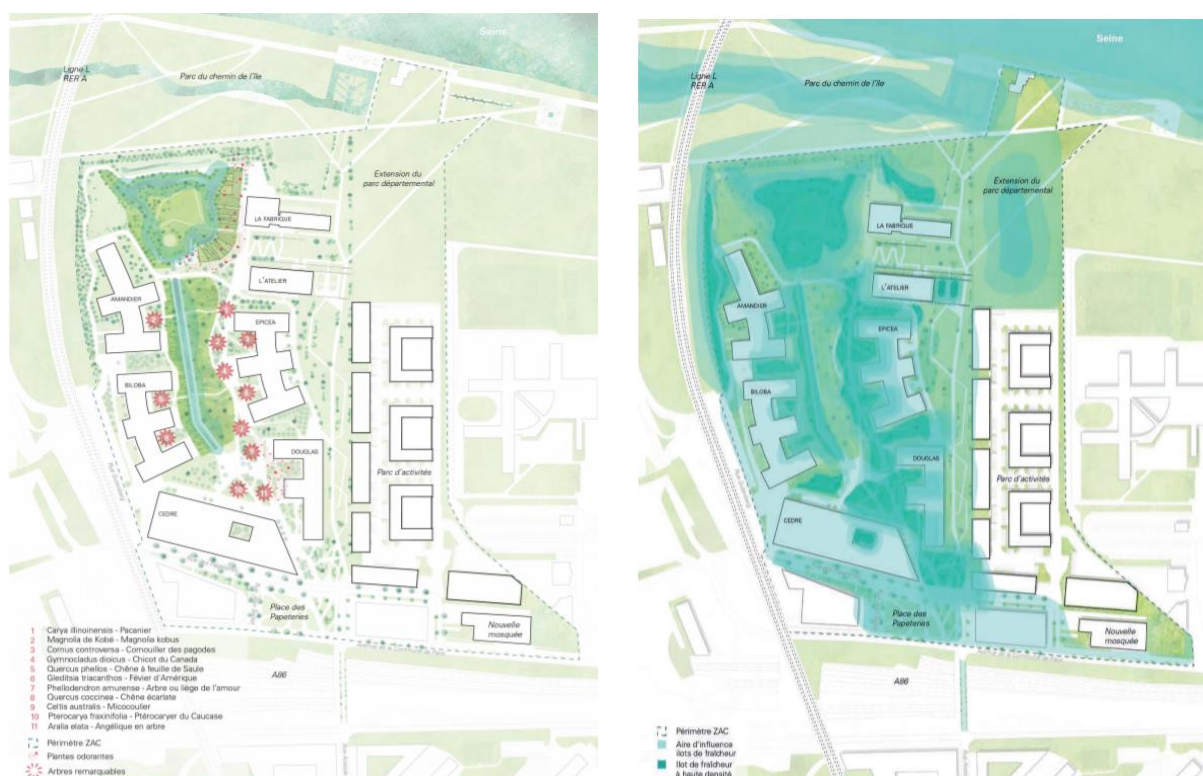


Figure 20 : Plan de plantation des arbres et ilots de fraîcheur correspondant sur le site de l'arboretum (Source : BASE Bordeaux)

La partie II de notre étude met en avant l'efficacité du choix de plantation de BASE. Leurs implantations influencent des indicateurs tels que le UGSP, la SBA ou l'ETPvar. La figure 17 montre que L'ETPvar et l'UGSP permettent d'améliorer la valeur de plusieurs indicateurs thermiques performants dans l'évaluation du rafraîchissement des villes. La végétation est plus particulièrement l'arbre est un outil indispensable au concepteur paysagiste pour soutenir le rafraîchissement des villes.

c) la désimperméabilisation

Le site de la Papeterie est un espace qui a été influencé par les grandes dynamiques historique du Grand Paris. Il a joué un rôle important dans l'activité industrielle de la zone, avant de devenir un révélateur de la désindustrialisation de la région. Le site de la Papeterie porte encore aujourd'hui les marques de ses dynamiques d'antan. Au niveau de l'Arboretum, avant-projet, seulement 29% de la surface totale était perméable. Aujourd'hui, après projet, le taux de surface perméable est passé à 57% (Figure 21) dont :

- 9294m² de surface minérale perméable :
 - en pavés enherbés, revêtement béton dans lequel un orifice permet d'inclure une partie perméable (généralement terre végétale). Solution très perméable et donc efficace pour créer une voirie, une voie cyclable ou piéton perméable. Le prix est cependant élevé.

- en revêtement meuble minéral, revêtement composé de granulats minéraux. Sa perméabilité dépend de la taille de ses granulats mais est généralement une solution efficace. Il possède un très bon rapport qualité prix
- 21428m² de plantation sur dalle
- 79238m² de plantation pleine terre.



Figure 21 : Perméabilité de la surface de l'Arboretum : Avant / Après (Source : BASE Bordeaux)

La désimperméabilisation du sol est une technique influente pour plusieurs indicateurs performants présents sur la figure 17. En effet, elle permet de valoriser les valeurs de la WQ, la SWS ou la SBA. Cette méthode utilisée par BASE permet donc par répercussion d'influencer la valeur de l'indicateurs ETPvar qui a capacité lui d'améliorer la valeur des indicateurs thermiques performants dans l'évaluation du rafraîchissement des villes. La désimperméabilisation utilisée par BASE est donc, d'après notre étude une technique efficace pour lutter contre le réchauffement urbain.

L'étude faite ici a permis de montrer la capacité de l'aménagement fait par BASE à favoriser le rafraîchissement urbain. L'aménagement a été pensé pour améliorer les conditions thermiques de l'espace et les mécanismes et techniques mises en jeu sont cohérents. Néanmoins, l'évaluation reste qualitative, tendancielle et abstraite : il manque une évaluation quantitative pour évaluer plus précisément les progrès entre l'avant et l'après projet. De plus, cette évaluation aurait permis de potentiellement valoriser quelques points du projet : l'évaluation précise de l'ETPvar par exemple, aurait sans doute mené à un choix d'essence d'arbre différent.

C. Les limites de l'évaluation quantitative

La partie II du présent mémoire met en évidence l'existence de modèles créateurs d'indicateurs permettant l'évaluation des aménagements paysagers en faveur du rafraîchissement urbain.

En l'état, le système d'aide à la décision proposé présente deux limites majeures :

- Les EMMs ne sont pas facile à mettre en œuvre pour une personne non experte. La difficulté de compréhension des indicateurs produits par les EMM par un public « non expert » renforce cette peine de mise en oeuvre.
- La liste d'indicateurs composant l'évaluation peut être relativement longue, ce qui rend difficile l'évaluation globale

1. Des indicateurs réservés aux experts

Le système d'évaluation quantitative repose, on l'a vu, sur des indicateurs issus des EMM. Le principal problème de ce système est que la compréhension et l'interprétation de ces indicateurs peut être compliquée : ils sont réservés à des spécialistes experts en climat. L'un des travaux qui va devoir être fait consiste à vulgariser, rendre compréhensibles et exploitables les indicateurs utilisés par tous les acteurs du projet. Le tableau ci-dessous permet une meilleure compréhension de ces indicateurs.

Indicateur	Unité de mesure	Définition vulgarisée	Valeur recherchée pour un bon confort thermique	Dépendance aux facteurs environnementaux
AT (température de l'air)	°C ou en °K	Elle est la mesure la plus compréhensible pour les non spécialistes. Elle est la mesure indiquée par un thermomètre à 1.5m du sol dans un abri ombragé et ventilé. Cependant cet indicateur est insuffisant pour prédire le confort thermique d'une personne	Même si le confort thermique varie en fonction des individus observés, il semble optimum pour une température d'environ 20°C (en France).	[-]
TLS (Charge thermique sortant du corps)	°C ou en °K	Il représente la différence de température entre l'air inspiré et l'air expiré par un Homme.	Plus celle-ci est élevée (ou basse), plus le corps aura tendance à le refroidir (ou réchauffer) lors du passage dans le	Elle dépend de la température et de l'humidité de l'air, ainsi que la vitesse du vent.

			système respiratoire. Donc plus la valeur du TLS est proche de 0 et plus il y a confort thermique.	
TCS (Score de Confort Thermique)	Point	Il est déterminé grâce à l'étude de la fréquence de période de confort thermique par rapport à la fréquence de période de stress thermique dans une zone à un moment prédéfini.	Plus le score final est élevé et plus la zone possède un bon confort thermique.	Sa valeur dépend de l'humidité, du rayonnement, de la vitesse du vent et de la température de l'air.
Le PET (température équivalente physiologique)	°C ou °K	Il sert à comparer les réactions physiologiques d'un individu dans une situation donnée (décrite par la température de l'air, la pression de vapeur, la vitesse du vent, la température radiante moyenne), par rapport aux réactions physiologiques qu'il aurait eu dans l'environnement de référence (environnement au bon confort thermique).	Plus sa valeur est proche de l'intervalle [18 - 23°C] et plus il y a un bon confort thermique.	Il dépend de la température, de la vitesse du vent, de l'humidité et du rayonnement.
MRT (température radiante moyenne)	°C ou °K	Il quantifie l'effet thermique du rayonnement notamment solaire atteignant un environnement. C'est en grande partie l'ombre des arbres ou autre qui va pouvoir favoriser une bonne valeur de cet indicateur en période estivale.	En période de haute température, une différence proche de 0 entre T_{mrt} et T_a favorise le confort thermique.	[-]
PMV (prédiction du vote moyen)	[-]	Il est l'indicateur de confort thermique le plus utilisé. Il classe le confort thermique moyen dans une des 7 classes de perception de la	Le classement dans la catégorie "neutre" indique un bon confort thermique.	Il dépend des quatre facteurs environnementaux : température et humidité de l'air, température radiante

		température (très froid, froid, légèrement froid, neutre, légèrement chaud, chaud ou très chaud).		moyenne et vitesse du vent.
UTCI (Indice universel du climat thermique)	°C ou °K	Il détermine le stress thermique ressenti par l'homme. L'indice est ensuite classé pour évaluer son niveau de stress thermique. Par exemple un UTCI>32°C se classe dans la catégorie "fort stress de chaleur"	Le classement dans la catégorie "pas de stress" indique un bon confort thermique.	Il dépend des quatre facteurs environnementaux : température et humidité de l'air, température radiante moyenne et vitesse du vent.

2. Une liste d'indicateurs trop longue

On note que les indicateurs climatiques sont nombreux et que pour certains, les différences sont minimes. Le fait d'avoir de nombreux indicateurs peut jouer en défaveur de l'interprétation car les nombreuses données peuvent perdre l'utilisateur de l'évaluation. Il pourrait donc être intéressant de valoriser des indicateurs par rapport à d'autres.

L'analyse des indicateurs climatiques m'a permis de les classer en fonction des ressemblances. En effet, les indicateurs climatiques performants TCS; PET; PMV et UTCI dépendent des mêmes facteurs environnementaux (températures et humidité de l'air, vitesse du vent, et température radiante moyenne). Leurs valeurs sont donc corrélées. La présence de ces 4 indicateurs alourdit par conséquent l'évaluation sans apport considérable d'information.

Certains indicateurs ne permettent pas de caractériser le confort thermique d'une personne. C'est le cas de AT. En effet, il ne prend en compte que très peu de données. Sa présence dans la liste peu donc être discutée.

Les indicateurs importants à mettre en avant lors de l'interprétation de l'évaluation quantitative, sont donc :

- la température radiante moyenne (MRT);
- la charge thermique sortant du corps (TLS)
- et la prédiction du vote moyen (PMV) ou l'Indice Universel du Climat Thermique (UTCI). Ils ont été préférés aux 2 autres indicateurs qui lui sont similaires car ils sont, aujourd'hui, les plus utilisés.

Il serait utile de pouvoir développer, en complément de cette évaluation basée sur des indicateurs, un/des outils permettant une meilleure interprétation de la liste d'indicateurs par un public « non expert ». Cette étape supplémentaire permettrait une meilleure compréhension entre les acteurs, favorisant ainsi l'émergence de projets performants, pertinents et optimums (Figure 22).

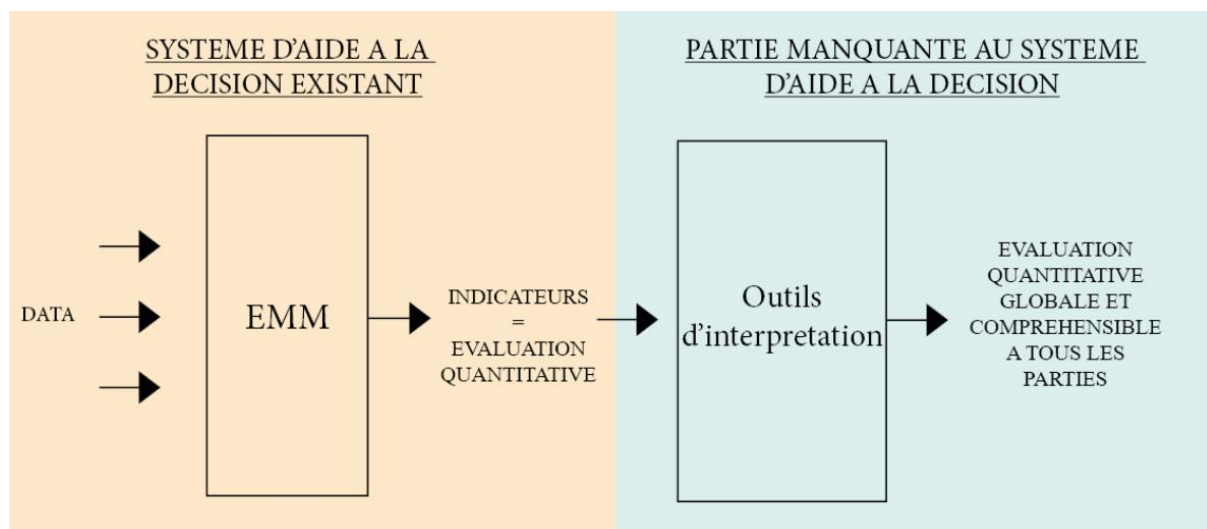


Figure 22 : Des outils d'interprétation pour favoriser la compréhension de l'évaluation par toutes les parties prenantes
(Source : Paulin Le Roux, 2021)

D. Discussion et perspectives

Les résultats de l'étude ont permis de vulgariser et mettre en avant des indicateurs de rafraîchissement des villes aujourd'hui réservés aux experts du climat. Le document a permis de favoriser l'utilisation des évaluations.

Néanmoins, il est important d'appréhender les réponses et les résultats donnés dans le présent mémoire comme un début de réflexion. La réponse à la question posée en début de mémoire est partielle notamment due au fait que les EMM n'ont été approuvés que très récemment. Le présent mémoire joue, pour le moment, le rôle de déclencheur d'action auprès des MOA, MOE, entreprises, et usagers. Ce déclenchement est pour autant important : le contexte climatique urbain est de plus en plus menaçant et la notion de confort thermique prend de plus en plus d'importance en ville. Il est essentiel que chaque partie prenante du projet se rende compte de l'importance de son rôle et de son pouvoir de faire évoluer son habitat, vers la ville moderne, sensible à l'eau, résiliente, pragmatique, confortable.

Pour une compréhension de l'évaluation encore plus poussée, le mémoire demande un prolongement d'étude. Pour l'instant, les résultats permettent de comprendre plus facilement ce que dévoile les indicateurs. Il serait intéressant de créer un cadre d'évaluation globale capable de créer une unique note à partir des indicateurs et d'une pondération. Cette évaluation permettrait de comprendre encore plus facilement les capacités d'un projet à rafraîchir l'espace urbain. Aussi, le positionnement des parties prenantes face à ces

évaluations est encore mal connu. Une étude ou enquête auprès des parties prenantes des projets constituerait une étude complémentaire et intéressante pour ajuster les outils d'interprétation des évaluations.

Il est important de garder en tête que ces documents favorisent la création d'outils utilisables par toutes les parties prenantes. Sans leur avis sur la question, le développement des évaluations sera difficilement cohérent.

Les indicateurs performants issus de l'évaluation quantitative des sous-processus n'ont pas été étudiés dans la dernière partie du rapport. En effet, leurs définitions semblent être assez claires. L'étude plus poussée de ces indicateurs n'aurait pas apporté grand-chose. Néanmoins, ils seront utiles lors de l'amélioration du projet évalué si besoin est. Dans ce sens, une étude des liens entre les indicateurs des sous-processus et les indicateurs climatiques serait profitable. Celle-ci faciliterait la recherche des éléments du projet qui peuvent être valorisés dans l'objectif de rafraîchissement des villes.

...

IV. CONCLUSION

Le changement climatique, l'augmentation de la population urbaine et la mauvaise gestion des eaux menacent fortement la pérennité des villes, habitat principal de l'espèce humaine. Pour lutter contre la menace climatique, plusieurs types d'aménagement se sont développés. Parmi eux, les aménagements inspirés du concept de WSUD. Grâce à une valorisation de l'eau, de la végétation du sol, et de leurs interconnexions, le WSUD favorise la lutte contre le réchauffement des villes. Pour optimiser la performance climatique de ces aménagements, des modèles d'évaluation ont été créés. La production d'indicateurs permet une évaluation quantitative des projets.

Le présent mémoire avait pour ambition d'identifier l'intérêt et les limites de l'évaluation quantitative des projets d'aménagement urbains. L'étude a pu montrer l'utilité d'intégrer ces évaluations au processus de création des projets, afin de développer des villes capables de s'adapter au réchauffement climatique. Pour aller plus loin, l'évaluation quantitative doit

- se généraliser à l'ensemble des projets d'aménagement urbains
- être compréhensible par toutes les parties prenantes des projets, afin de favoriser des échanges constructifs, source de projets réussis. Le mémoire démontre que la compréhension des indicateurs issus des modèles experts est réservée aux professionnels experts du climat. Une vulgarisation de la définition de ces indicateurs est nécessaire pour que l'évaluation quantitative des projets puisse contribuer à de meilleurs échanges entre les différentes parties prenantes des projets

La réponse à la problématique de départ présente plusieurs limites.

L'étude se limite à la capacité des aménagements paysagers à limiter l'inconfort thermique en période de forte chaleur. Alors que le rafraîchissement climatique permis par l'aménagement paysager peut-être un atout en période estivale il peut rapidement devenir une faiblesse en période plus fraîche ou pluvieuse. Le document ne prend pas cela en compte. Le contexte global de la ville aménagée doit être inclus pour favoriser le confort thermique quelle que soit la période de l'année.

Le présent mémoire offre toutefois un début de réflexion intéressant pour la lutte contre le réchauffement urbain. Cette problématique est importante à prendre en compte car sa montée en puissance est importante et son influence sur la qualité de vie du citoyen est conséquente. Néanmoins, le réchauffement urbain ne représente qu'une partie de la menace qu'est le dérèglement climatique. Réduire les enjeux de l'aménagement urbain à la dimension climatique serait une erreur. La question de la capacité des villes françaises à lutter contre la montée de la mer et contre les inondations, à améliorer la qualité de l'eau, à préserver la biodiversité sont aussi des sujets de discussion à développer dans la croissance des zones urbaines. Dans ce sens un équivalent de cette étude pourrait être nécessaire. L'intégration des évaluations quantitatives est une solution

V. Bibliographie

- ATHAMENA, Khaled, 2005. *Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas de éco-quartiers*. In : . pp. 318.
- BOUZOUIDJA, BOUZOUIDJA, Ryad, CANNAVO, Patrice, BODÉANAN, Philippe, GULYÁS, Ágnes, KISS, Márton, KOVÁCS, Attila, BÉCHET, Béatrice, CHANCIBAULT, Katia, CHANTOISEAU, Etienne, BOURNET, Pierre-Emmanuel, BOUZIDI, Rania, GUÉNON, René, LEBEAU, Thierry, MUSY, Marjorie et RODRIGUEZ, Fabrice,, 2021. How to evaluate nature-based solutions performance for microclimate, water and soil management issues – Available tools and methods from Nature4Cities European project results. In : Ecological Indicators [en ligne]. 1 juin 2021. Vol. 125, pp. 107556. [Consulté le 15 Juin 2021]. DOI 10.1016/j.ecolind.2021.107556. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X21002211>
- CHRETIEN, Luc, and al, 2019. SESAME. In : Service écosystémiques rendus par les arbres, modulés selon l'essence. [en ligne],[Consulté le 15 Juillet 2021] Disponible à l'adresse : https://metz.fr/fichiers/2019/12/02/SESAME_Etude_complete.pdf
- CIRIA, 2000. *Sustainable urban drainage systems - design manual for Scotland and Northern Ireland*. Dundee, Scotland: CIRIA Report No. C521.
- CIRIA., 2007. *The SUDS manual*. Dundee, Scotland: CIRIA Report No. C697.
- CLERGEAU, Philippe, 2020. *Urbanisme et biodiversité: vers un paysage vivant structurant le projet urbain*. Rennes : Éditions Apogée. ISBN 978-2-84398-642-0. HT241 .U735 2020
- Commission Européenne, 2012. *Lignes directrices concernant les meilleures pratiques pour limiter, atténuer ou compenser l'imperméabilisation des sols*. Bruxelles, 2012. 73p
- COSSON, Arnaud, 1998. *L'eau dans la ville et ses relations avec les citoyens*. [en ligne] Montpellier : ENGREF. Travail de Synthèse bibliographique. [consulté le 15 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/34/174861/174861_doc.pdf
- COURT, Marielle, 2019. Entretien avec Valérie Masson-Delmotte. *Réchauffement : la terre en 2050*, Juin-Aout.2019, Hors-série Le Figaro, p6, ISSN en cours
- COUTTS, Andrew, BERINGER, Jason et TAPPER, Nigel, 2007. Impact of Increasing Urban Density on Local Climate: Spatial and Temporal Variations in the Surface Energy Balance in Melbourne, Australia. In : *Journal of Applied*

Meteorology and Climatology. 1 avril 2007. Vol. 46, pp. 477-493. DOI 10.1175/jam2462.1.

- CRCWSC., 2020. CRCWSC Strategic Plan 2016/17 - 2020/21 - CRC for Water sensitive cities. In : [en ligne]. [Consulté le 13 Avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://watersensitivecities.org.au/content/crcwsc-strategic-plan-201617-202021/>.
- CRCWSC., 2013. blueprint2013 - CRC for Water sensitive cities : [en ligne]. [Consulté le 13 Avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://watersensitivecities.org.au/content/blueprint2013/>.
- E2Designlab, 2018. *Passive irrigation*, 38p
- Égerházi, L. A., Kovács, A., & Unger, J. (2013). Application of Microclimate Modelling and Onsite Survey in Planning Practice Related to an Urban Micro-Environment. *Advances in Meteorology*, 2013, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2013/251586>
- EUROPEAN COMMISSION. DIRECTORATE GENERAL FOR THE ENVIRONMENT., 2012. *Lignes directrices concernant les meilleures pratiques pour limiter, atténuer ou compenser l'imperméabilisation des sols*. [en ligne]. LU : Publications Office. [Consulté le 3 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://data.europa.eu/doi/10.2779/79012>. Department of Environmental Resources, 1999. *Low-impact development: an integrated design approach*. Maryland. 1999. 168p
- FLANAGAN, Kelsey, and al., 2019. Un guide méthodologique pour l'évaluation des performances des ouvrages de maîtrise à la source des eaux pluviales. In : *Novatech 2019* [en ligne]. Lyon, France : s.n. juillet 2019. pp. 5p. [Consulté le 15 Mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02266367>.
- FLETCHER, and al., 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. In : *Urban Water Journal* [en ligne]. 3 octobre 2015. Vol. 12, n° 7, pp. 525-542. [Consulté le 23 Juillet 2021]. DOI 10.1080/1573062X.2014.916314. Disponible à l'adresse : <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1573062X.2014.916314>.
- GEBEREMARIAM, Thewodros. *Post Construction Green Infrastructure Performance Monitoring Parameters and Their Functional Components*. 2016. 2p.
- Mballo, S., Herpin, S., Manteau, M., Demotes-Mainard, S., & Bournet, P. E. (2021). Impact of wellwatered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment. *Urban Climate*, 37, 100844. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100844>
- MUSY, André, HIGY, Christophe et REYNARD, Emmanuel, 2014. *Hydrologie 1: une science de la nature : une gestion sociétale*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes. ISBN 978-2-88915-026-7.

- Nature4Cities, 2016. Nature4cities, *H2020* [en ligne]. 2016, pp. 755p. [Consulté le 10 Juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.nature4cities.eu/>
- OKE, T. R. et MCCAUGHEY, J. H., 1983. Suburban-rural energy balance comparisons for Vancouver, B.C.: An extreme case? In : *Boundary-Layer Meteorology* [en ligne]. 1 août 1983. Vol. 26, n° 4, pp. 337-354. [Consulté le 2 Mai 2021]. DOI 10.1007/BF00119532. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/BF00119532>.
- OKE, T., CROWTHER, J., MCNAUGHTON, K., MONTEITH, J. et GARDINER, Barry, 1989. The Micrometeorology of the Urban Forest [and Discussion]. In : *Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences*. 31 août 1989. Vol. 324, pp. 335-349. DOI 10.1098/rstb.1989.0051.
- OKE, T. R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. In : *Energy and Buildings* [en ligne]. 22 mars 1988. Vol. 11, n° 1, pp. 103-113. [Consulté le 28 Mai 2021]. DOI 10.1016/0378-7788(88)90026-6. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778888900266>.
- PMSEIC, 2007. *Water for Our Cities: building resilience in a climate of uncertainty*. June 2007. 34p
- Rahman, M. A., & Ennos, A. R. (n.d.). What we know and don't know about the cooling benefits of urban trees. 2016, 30.
- ROBITU, Mirela, 2005. *Étude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs* [en ligne]. These de doctorat. S.I. : Nantes. [Consulté le 1 Juin 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.theses.fr/2005NANT2035>.
- Santé Publique France, 2019. *Canicule et Santé*. BSP, Été 2019. 9p
- SCHEPMAN, Thibaut. +2.5°C : à quoi ressemblera la France en 2050 ?, Juin-Aout.2019, Hors-série Le Figaro, 0421C83022, p6
- Ville de Paris, 2018. *Plan climat de Paris : vers une ville neutre en carbone, 100% énergies renouvelables, résiliente, juste et inclusive*. [en ligne]. 2018. pp. 100p [Consulté le 18 Aout 2021] Disponible à l'adresse : <https://cdn.paris.fr/paris/2020/11/23/99f03e85e9f0d542fad72566520c578c.pdf>
- WHELANS, C, 1994. *Planning & management guidelines for water sensitive urban (residential) design: consultants report prepared for the Department of Planning and Urban Development, the Water Authority of Western Australia and the Environmental Protection Authority*. Mount Hawthorn, W.A.; Perth, W.A. : Whelans ; [Distributed by] State Planning Commission. ISBN 978-0-646-15468-8.
- YEOMANS, P. A., 2008. *Water for every farm: Yeomans Keyline plan: sustainable agriculture creates living soil to adsorb salt and CO2*. 2008 edition. Australia Fair Southport, Queensland : Keyline Designs. ISBN 978-1-4382-2578-4.

VI. Sitographie

[1] Statista. *Part de la population urbaine dans la population totale en France de 2005 à 2019* [en ligne]. Disponible sur : « <https://fr.statista.com/statistiques/473802/part-population-urbaine-france/> » (consulté le 12 Aout 2021).

[2] FABREGAT, Sophie. *La France plus urbaine que jamais* [en ligne]. Disponible sur : « <https://www.actu-environnement.com/ae/news/urbanisation-france-etalemt-urbain-13327.php4> » (consulté le 13 Aout 2021).

[3] Le Parisien. *Rafraîchir la ville : un indispensable en 2021* [en ligne]. Disponible sur : « <https://www.leparisien.fr/environnement/initiatives-environnement/rafraichir-la-ville-un-indispensable-en-2050-02-06-2021-SOJ63J5Q3JH2ZN4B23GQATKTMl.php> » (consulté le 13 Aout 2021).

[4] INSEE. *Prix moyen mensuel de vente au détail en métropole* [en ligne]. Disponible sur : « <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/001634676#Graphique> » (consulté le 1 Aout 2021).

[5] Sénat. *La qualité de l'eau et assainissement en France* (rapport) [en ligne]. Disponible sur : « <https://www.senat.fr/rap/l02-215-1/l02-215-12.html#fnref6> » (consulté le 14 Juillet 2021)

[6] EPA. *Urban Runoff : Low Impact Development* [en ligne]. Disponible sur : « epa.gov/nps/urban-runoff-low-impact-development » (consulté le 20 juillet 2021)

[7] New WaterWays. *What is Water Sensitive Urban Design* [en ligne]. Disponible sur : « <https://www.newwaterways.org.au/about-us/water-sensitive-urban-design/> » (consulté le 20 juillet 2021)

	Diplôme : Ingénieur du paysage Spécialité : Projet, Opérationnalité et Paysage Spécialisation / option : Enseignant référent : Sophie Herpin	
Auteur(s) : Paulin Le Roux Date de naissance* : 22 Janvier 1997		Organisme d'accueil : BASE Bordeaux Adresse : 76 rue Mandron, 33000 Bordeaux
Nb pages : 51	Annexe(s) : 0	Maître de stage : Marine Lejantel
Année de soutenance : 2021		
Titre français : Intégration d'une évaluation quantitative des projets dans le processus de création d'aménagement paysagers en faveur du rafraîchissement urbain Titre anglais : Integrating quantitative project evaluation into the process of creating landscaping for urban cooling		
Résumé (1600 caractères maximum) : Dans le contexte de réchauffement climatique, l'aménagement paysager des villes est de plus en plus considéré comme un levier essentiel pour l'adaptation de la population urbaine. La problématique grandissante de confort thermique pousse les parties prenantes du processus de création de projet à optimiser la capacité de rafraîchissement des aménagements. C'est surtout en renforçant le lien entre le sol, l'eau et la végétation que l'aménagement favorise le rafraîchissement. Récemment, des modèles et méthodes experts ont été créés et validés pour évaluer quantitativement la performance climatique des projets paysagers. Cette évaluation quantitative offre une opportunité pour créer des aménagements performants. Pourtant, elle n'intervient que très peu dans le processus de conception. L'étude révèle en effet que l'utilisation de cette évaluation n'est pas adaptée aux différents acteurs impliqués. En l'état, l'évaluation quantitative n'est réservée qu'à des experts climatiques. Un outil complémentaire d'interprétation semble nécessaire pour favoriser la compréhension et l'interprétation des résultats des modèles experts. La finalité de cet outil complémentaire est double : (i) vulgariser les indicateurs et, (ii) créer une liste d'indicateurs plus condensée. Au final, l'outil d'interprétation permettra une meilleure compréhension du projet envisagé, favorisera l'échange entre les parties prenantes du processus de création de projet et permettra donc de créer des aménagements optimaux, plus performants vis à vis de l'objectif de rafraîchissement des villes françaises.		
Abstract (1600 caractères maximum) : In the context of global warming, urban landscaping is increasingly considered as an essential tool for the adaptation of the urban population. The growing problem of thermal comfort is pushing the stakeholders of the project to optimise the cooling capacity of the modern cities. It is mainly by reinforcing the link between soil, water and vegetation that the design promotes cooling. Recently, expert models and methods have been created and validated to quantitatively assess the climatic performance of landscape projects. This quantitative assessment offers an opportunity to create efficient landscapes. However, it is only minimally involved in the design process. The study reveals that the use of this assessment is not adapted to the different actors involved. As it stands, quantitative evaluation is only useable by climate experts. A complementary interpretation tool seems necessary to facilitate the understanding and interpretation of the results of the expert models. The purpose of this complementary tool is twofold: (i) to popularise the indicators and (ii) to create a more condensed list of indicators. In the end, the interpretation tool will allow a better understanding of the envisaged project, will favour the exchange between the stakeholders of the project creation process and will thus allow the creation of optimal designs, more efficient with respect to the objective of cooling French cities.		
Mots-clés : Urbanisation, rafraîchissement urbain, outils d'évaluation, indicateurs, gestion de l'eau Key Words: Urbanization, urban cooling, assessment tools, indicators, water management		

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