



Rafraîchissement des villes : solutions existantes et pistes de recherche

Jérémy Bernard, Musy Marjorie, Héloïse Marie

► To cite this version:

Jérémy Bernard, Musy Marjorie, Héloïse Marie. Rafraîchissement des villes : solutions existantes et pistes de recherche. Adaptation au changement climatique et projet urbain, 2020. hal-02953445

HAL Id: hal-02953445

<https://hal.science/hal-02953445>

Submitted on 30 Sep 2020

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

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

Rafraîchissement des villes : solutions existantes et pistes de recherche

Jérémy Bernard, Chercheur associé
Centre National de la Recherche Scientifique, UMR 6285, 56000 Vannes, France

Courriel : jeremy.bernard@zaclys.net

Marjorie Musy, Directrice de recherche
Cerema Ouest, 44200 Nantes, France
IRSTV, FR 2488, 44321 Nantes, France

courriel : marjorie.musy@cerema.fr

Héloïse Marie, Chef de projets
Bureau d'études TRIBU, Lyon, France

courriel : lyon@tribu-concevoirdurable.fr

Résumé

Cet article synthétise les connaissances relatives aux dispositifs d'amélioration du confort thermique extérieur en ville. Ces dispositifs de rafraîchissement sont classés selon trois types : solutions vertes pour les solutions basées sur la nature (végétation, sol et eau), grises dès lors qu'ils utilisent des infrastructures et douces pour les dispositifs basés sur une stratégie politique ou sur les usages. Ces types sont subdivisés en sous-catégories pour lesquelles nous avons réalisé un état des lieux des recherches afin d'établir un bilan des performances des solutions. Tout d'abord les périodes de la journée et l'environnement urbain qui affectent leur performance sont discutés. Ensuite les éventuels co-bénéfices ou points de vigilance relatifs à l'utilisation des dispositifs sont mis en évidence. Enfin plusieurs pistes de recherche sont proposées pour renforcer la connaissance des dispositifs de chaque sous-catégorie.

Mots-clés

état de l'art, adaptation au changement climatique, climat urbain, confort thermique, solution de rafraîchissement

Abstract

This article summarizes the knowledge regarding measures used to improve the urban thermal comfort. These measures are classified according to three types : green for nature-based measures, grey when they utilize infrastructures and soft for the measures based on policies and use. Subclasses are then created and informations about the measures belonging to each subclass are gathered. First, the time of the day and the urban environment that affect the measures performances are discussed. Then the potential co-benefits or the vigilance points relative to the measure use are highlighted. Finally, several research leads are proposed to strengthen the measure knowledge of each subclass.

Keywords

state of the art, climate change adaptation, urban climate, thermal comfort, cooling solutions

INTRODUCTION

Les zones urbaines abritent la majorité de la population mondiale (en Europe, 70 % de la population habite en ville en 2014 - (Eurostat, 2014)) et concentrent la majorité des activités humaines. Cette densité de population et d'activités a des répercussions locales sur le climat : la température des villes est souvent plus élevée que celle des espaces ruraux qui l'entourent. Ce phénomène, appelé îlot de chaleur urbain, a pour origine la forme de la ville (présence, taille et distribution des bâtiments), les matériaux de construction et les types de sols utilisés, l'énergie dépensée pour le besoin des activités humaines (Landsberg, 1981). Ainsi, la forme des rues est responsable du piégeage du rayonnement solaire la journée et du rayonnement infra-rouge tout au long du cycle diurne, qui dépendent de la proportion hauteur / largeur des rues. Elle empêche également l'évacuation de la chaleur en réduisant la vitesse du vent. Par ailleurs, les villes abritent très peu de surfaces perméables, ce qui limite le refroidissement occasionné par l'évaporation des sols ou par l'évapotranspiration des végétaux. De plus, les caractéristiques thermiques et radiatives des matériaux de construction sont souvent propices au stockage de la chaleur issue du rayonnement solaire en journée et à une restitution pendant la nuit. Enfin, l'ensemble de l'énergie utilisée dans la ville (chaleur, électricité, trafic routier, etc.) contribue à son propre réchauffement.

Cette augmentation locale de température a en été des répercussions sur la consommation d'énergie, sur la qualité de l'air et sur le confort thermique des citoyens. En effet, les périodes caniculaires de ces dernières années ont entraîné une augmentation considérable des consommations estivales d'électricité dans les pays les plus chauds (Bessec & Fouquau, 2008). Certaines réactions chimiques, comme la production d'ozone par la transformation des résidus de combustion d'hydrocarbures (Nox), se déroulent beaucoup plus rapidement. Ainsi, (Smith & Tirkpak, 1989) ont montré qu'en projetant une augmentation de 4°C de la température de l'air dans la baie de San Francisco, la concentration d'ozone dans l'atmosphère augmenterait de 20 %. Cette augmentation pourrait avoir des conséquences sur la santé humaine, notamment la sensibilité des asthmatiques aux allergènes. La santé des citoyens peut également directement être altérée par des épisodes de forte chaleur, le corps étant soumis à un stress thermique tel qu'il ne peut plus se refroidir correctement (Kilbourne, 1997).

Dans cet article, nous nous intéresserons plus particulièrement aux dispositifs permettant de limiter le stress thermique ressenti par un individu. Plusieurs solutions existent, agissant chacune sur un ou plusieurs déterminants du confort. Le confort d'un individu est régi par les échanges énergétiques du corps avec son environnement : l'air ambiant, les surfaces, le soleil, le ciel (Coccolo et al., 2016). Ainsi, une diminution de la température ou de l'humidité de l'air réduira la sensation de chaleur, tandis que l'effet du vent sera dépendante des conditions de température ou d'humidité (l'augmentation de la vitesse du vent est presque toujours synonyme de rafraîchissement sauf lorsque la température de l'air est supérieure à la température corporelle et que le taux d'humidité est de 100%). La diminution du rayonnement émis ou réfléchi par les surfaces urbaines permettra également un gain de confort thermique, de même que la réduction du rayonnement solaire reçu par un individu, directement ou suite à la réflexion des surfaces environnantes. Une sensation de rafraîchissement est aussi constatée si une personne entre en contact avec une surface froide. L'aspersion d'eau est également rafraîchissante si les conditions hygrométriques de l'air permettent son évaporation.

L'objectif de cet article est, à partir des résultats déjà mis en évidence, d'identifier les recherches qui pourraient être menées pour améliorer la connaissance sur les dispositifs permettant d'améliorer le confort thermique en ville.

MÉTHODE

Dans un premier temps, il s'agit de répertorier l'ensemble des dispositifs de rafraîchissement dont la performance a été évaluée par des travaux scientifiques. Pour cela, les bases de données de revues scientifiques (Web of Sciences, Base, etc.) ont été mobilisées : 22 articles ont été choisis, la plupart consistant déjà en une revue bibliographique de la littérature concernant un ou plusieurs dispositifs de rafraîchissement. Lorsque cela était possible, les conditions dans lesquelles le dispositif avait été évalué ont été relevées : la zone climatique, la latitude, la surface d'application (sol, façade, toiture, etc.), les méthodes et outils (matériel utilisé pour l'observation et la modélisation), la saison et les conditions météorologiques, etc.

Selon (Isoard & Winograd, 2013), les dispositifs d'adaptation au changement climatique peuvent être classés selon trois types de solutions : les solutions vertes, grises et douces. Les solutions vertes sont celles basées sur les services écosystémiques de la nature (l'eau, la végétation). Les solutions grises regroupent l'ensemble des solutions basées sur de

l'infrastructure (arrosage de surfaces, matériaux réfléchissants, etc.). Les solutions douces sont basées sur la stratégie politique et les usages (habillement, horaire de travail, documents de planification de l'urbanisme, etc.). Les dispositifs répertoriés dans cette étude sont triés selon cette classification et éventuellement selon plusieurs sous-catégories.

Une synthèse des principales conclusions sur les effets climatiques des dispositifs, les co-bénéfices, les points de vigilance et les pistes de recherches associés à chaque sous-catégorie a ensuite été réalisée.

RÉSULTATS

TOUTES LES SOLUTIONS

De nombreux dispositifs permettent le rafraîchissement des zones urbaines et tous ont pratiquement fait leurs preuves (Santamouris et al., 2017). Il reste cependant complexe d'identifier ceux qui sont les plus adaptés à une situation donnée car les résultats de recherche sont rarement obtenus dans des mêmes conditions. Par ailleurs, il n'existe pas d'indicateur standard de performance. L'effet de rafraîchissement mesuré peut être exprimé à partir d'une température d'air ou d'indicateurs de confort (eux-même construits à partir de plusieurs variables météorologiques). Il peut être moyenné (ou non) au sein d'un volume plus ou moins grand selon la zone étudiée et pendant une période qui peut être différente entre chaque étude (de 12h à 14h, de trois à quatre heures après le coucher du soleil, etc.). Les conditions d'évaluation ne sont également pas fixées alors que leurs modifications impactent grandement les résultats : les conditions d'humidité affectent directement la performance d'un dispositif basé sur l'évaporation, l'environnement dans lequel a lieu le test modifie le potentiel d'un dispositif (par exemple la surface de toit disponible pour mettre de la végétation) et également ses performances (la modification de l'albédo des façades n'aura aucun impact si les rues sont étroites et bordées de bâtiments très hauts). Enfin, le matériel de mesure et les outils de simulation peuvent introduire un biais dans les résultats lorsqu'ils sont comparés d'une étude à l'autre. C'est en effet le cas pour les capteurs de température qui sont souvent disposés dans des abris censés les protéger du rayonnement. La performance des abris peut différer d'un type à l'autre, pouvant engendrer des différences notables de température dans des mêmes conditions de mesure (Bernard et al., 2019; Lacombe et al., 2011). De même, les modèles utilisés pour la simulation n'ont pas tous la même résolution, ni les mêmes bases physiques et ils n'utilisent pas non plus les mêmes paramétrisations. Ils peuvent donc donner des résultats différents alors qu'ils simulent un même environnement dans des mêmes conditions (Grimmond et al., 2009).

Malgré toutes ces limites, nous avons tenté de représenter l'ordre de grandeur du refroidissement moyen de l'air engendré par l'utilisation de chaque type de dispositif en regard de sa maturité (figure 1). Cette figure est basée sur la méta-analyse réalisée par (Santamouris et al., 2017) et la maturité est définie comme le nombre de cas documentés dans cette étude. Il ressort que certains dispositifs (comme la végétation haute ou les toitures végétalisées) sont plus étudiés que d'autres (fontaines ou matériaux à rétention d'eau), ce qui peut expliquer la plus forte variabilité de leurs performances.

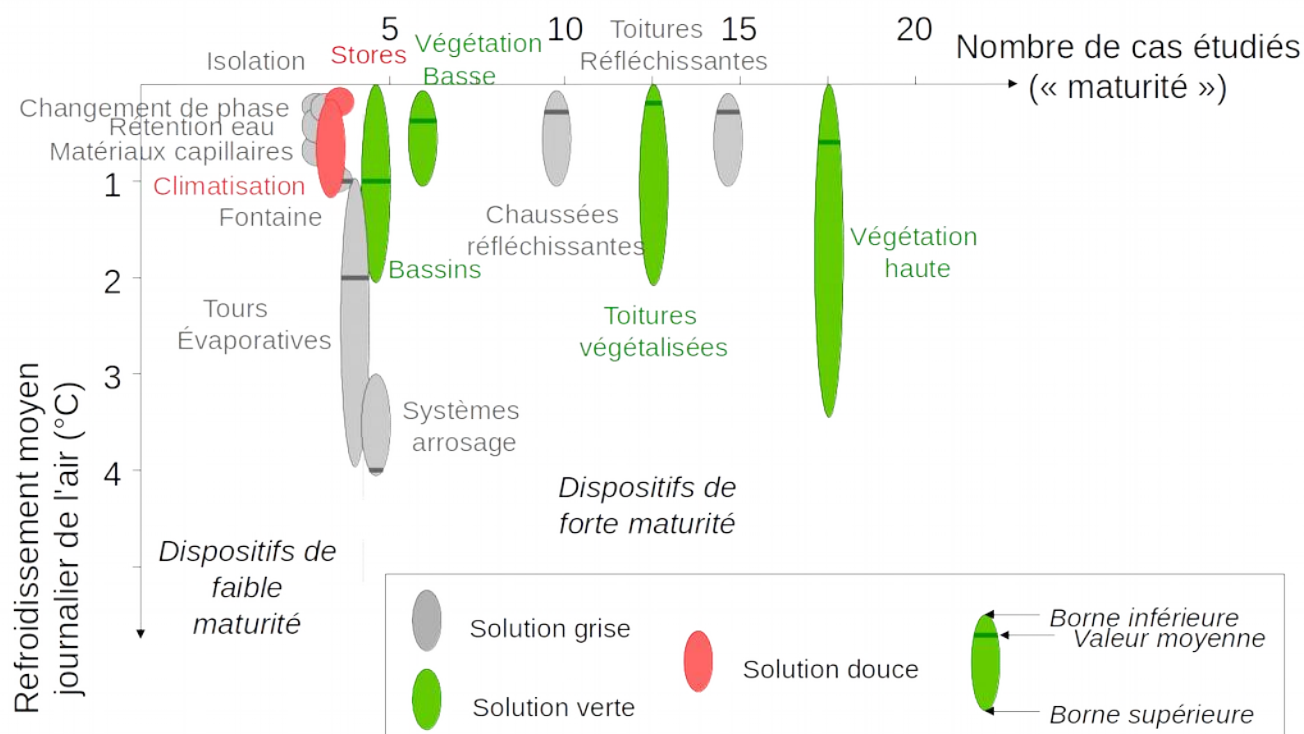


Figure 1 : Ordre de grandeur du refroidissement moyen journalier de l'air occasionné par un dispositif en regard de sa maturité. Figure établie à partir de la méta-analyse (Santamouris et al., 2017)) (source : (ADEME, 2017))

Tirer des conclusions de la figure 1 est complexe puisque tous les résultats sont moyennés sous un indicateur de température moyenne, qui comme expliqué au paragraphe précédent, n'est pas un indicateur complet pour représenter le confort. Par exemple, utiliser seulement la température d'air ne permet pas de rendre compte de l'effet d'inconfort qui peut être engendré par les dispositifs basés sur la modification de l'albédo qui peuvent renvoyer le rayonnement sur les individus à certaines périodes de la journée. De même, l'extrémité des hypothèses posées par les chercheurs pour évaluer un dispositif (par exemple la quantité d'eau utilisée pour asperger les sols dans le cas des dispositifs d'arrosage) doit être relevée. Ainsi, pour dépasser ces limites, les sections qui suivent permettent de mieux appréhender les conditions dans lesquelles chaque dispositif donne ses meilleures performances et permet de décrire plus précisément les situations dans lesquelles il est préférable de ne pas l'utiliser.

SOLUTIONS VERTES

Dispositifs basés sur l'utilisation de la végétation

Les dispositifs basés sur le végétal sont multiples et présentent des rafraîchissements qui varient dans le temps. Les arbres sont par exemple générateurs d'ombrage et procurent donc un confort accru en journée (Akbari, Pomerantz, & Taha, 2001; Ali-Toudert & Mayer, 2007; de Abreu-Harbach, Labaki, & Matzarakis, 2015) tandis que des surfaces enherbées ouvertes sont des espaces générateurs de fraîcheur pendant la nuit (Doick, Peace, & Hutchings, 2014), d'autant plus que les sols sont secs (Spronken-Smith & Oke, 1999). La végétation en toiture présente des performances qui diminuent lorsque la hauteur des bâtiments croît (Malys, 2012; Musy et al., 2014). Elle est particulièrement adaptée à des climats tempérés peu ensoleillés (Santamouris, 2014). Les résultats du projet VegDUD (Malys, 2012; Musy et al., 2014) ont également montré que les façades végétalisées permettaient d'améliorer le confort en journée en diminuant la température moyenne radiante émise par les surfaces verticales.

Co-bénéfices

L'utilisation de végétation est entre autres associée à la réduction du bruit en ville (lorsque la végétation est en façade (Guillaume, Gauvreau, & L'Hermite, 2015), à une meilleure gestion des eaux pluviales (Berndtsson, 2010; Guevara-Escobar et al., 2007), une séquestration de carbone amplifiée (Musy et al., 2014). et à une amélioration de la biodiversité (Alvey, 2006; Brenneisen, 2003). Du point de vue de la qualité de l'air, les bilans sont difficiles à réaliser (Musy et al., 2014). Une grande partie de ces co-bénéfices ont été étudiés dans les deux projets ANR Trame Verte (Clergeau & Blanc, 2013)) et VegDUD (Musy, 2014; Musy et al., 2014).

Pistes de recherche

Les dispositifs de végétation sont probablement (avec les dispositifs réfléchissants) les plus étudiés. Cependant, quelques challenges sont encore à relever, dont trois sont détaillés ci-dessous :

- ⌘ Une meilleure caractérisation des impacts de différents types d'arbres : les impacts de végétal sont très souvent étudiés via la simulation. Or, dans la plupart des logiciels, on différencie seulement quelques espèces d'arbres (voire souvent pas de distinction), alors que chaque espèce a des spécificités en termes de morphologie et de densité de feuillage, engendrant des performances de confort qui diffèrent (Grimmond et al., 2009). Des projets tels que ceux menés par (Bueno-Bartholomei & Labaki, s. d.; Landes et al., 2014) devraient permettre de mieux connaître ces caractéristiques (et leur évolution temporelle) pour de nombreuses espèces. Il sera ensuite nécessaire d'intégrer ces connaissances dans les modèles de simulation microclimatique.
- ⌘ Lien disponibilité en eau - efficacité du rafraîchissement : la prise en compte de la teneur en eau des sols ou toitures végétalisées est loin d'être généralisée à tous les logiciels de simulation du microclimat urbain (Grimmond et al., 2009). L'intégration de ces flux permet pourtant de connaître le potentiel de rafraîchissement par évapotranspiration de la végétation, et également d'évaluer l'effusivité thermique d'un sol, un des facteurs expliquant la présence de températures diurnes élevées lorsque les sols sont secs (Desplat et al., 2012, 2009), et également de températures nocturnes élevées lorsque les sols sont gorgés d'eau (Spronken-Smith & Oke, 1999). De même, si certains modèles de toitures végétales prennent bien en compte la disponibilité en eau (De Munck, Lemonsu, & Masson, 2012; Djedjig et al., 2012), le lien efficacité de rafraîchissement / disponibilité en eau a peu été investigué.
- ⌘ L'efficacité des espaces verts en fonction de la forme urbaine environnante : les espaces verts sont des dispositifs qui combinent entre autres végétation basse et végétation haute, permettant ainsi de créer des espaces de confort diurne et nocturne (Chang & Li, 2014; Spronken-Smith & Oke, 1999). Ceux-ci contribuent également au rafraîchissement des quartiers situés à proximité du parc, souvent dans un rayon estimé grossièrement comme équivalent à la largeur du parc (Ca, Asaeda, & Abu, 1998; Cao et al., 2010; Shashua-Bar & Hoffman, 2000). Le positionnement optimal d'un espace vert au sein d'un quartier dépend des vents dominants et également de la morphologie du quartier à refroidir (rues plus ou moins ouvertes sur le parc). (Doick et al., 2014) ont ainsi mis en évidence le besoin de mieux connaître les variables à l'origine de la diffusion plus ou moins importante de la fraîcheur en périphérie des parcs. Des premiers résultats ont été obtenus par (Bernard et al., 2018), montrant notamment que le nombre de rues débouchant sur le parc semble être un paramètre déterminant la bonne diffusion de la fraîcheur. De plus amples analyses doivent cependant être menées pour confirmer ces résultats.

Dispositifs basés sur l'utilisation de bassins ou de rivières

Selon leur taille, les étendues d'eau stagnantes peuvent avoir un impact positif ou négatif sur l'ICU. Si l'effet est globalement positif pour des surfaces d'eau importantes, certaines surfaces d'eau immobile de faible taille stockent de la chaleur et deviennent suffisamment chaudes pour réchauffer l'air pendant la nuit au lieu de contribuer à son rafraîchissement (Revaud et al., 2015; Robitu et al., 2003; Steeneveld et al., 2011). Les rivières semblent refroidir l'air toute la journée bien que peu d'études aient été mises en œuvre pour le démontrer (Hathway & Sharples, 2012). En effet, le réseau hydrographique, pourtant majeur est rarement intégré dans les outils de simulation du microclimat urbain (Grimmond et al., 2009).

Certains aménagements urbains tels que les noues facilitent l'infiltration des pluies dans le sol et le maintiennent donc humide, ce qui favorise l'évaporation et donc le rafraîchissement. Cependant, comme montré dans le projet vegDUD,

les noues sont conçues pour leur capacité à infiltrer les eaux de pluie, et ont donc une moindre capacité à évaporer au regard d'autres systèmes comme les toitures végétales (Musy et al., 2014).

Pistes de recherche

L'effet de rafraîchissement des rivières, ruisseaux, darses et canaux, de même que celui des parcs, semble intéressant mais très peu étudié alors que de nombreux projets urbains s'engagent à rouvrir des ruisseaux qui avaient été canalisés sous terre (voir projet Bottière Chénaie et ruisseau des Gohards à Nantes) ou à créer des darses (Lyon Confluence). En plus de la caractérisation plus fine des performances des cours d'eau, deux questions peuvent être posées :

- ⌘ Quel est l'impact de l'aménagement des berges et de la forme urbaine bordant ces cours d'eau ? En effet, la taille et la distribution des bâtiments et arbres ainsi que les matériaux de construction utilisés en bordure de rivières peuvent affecter directement la diffusion de la fraîcheur dans les espaces et rues les plus proches.
- ⌘ Comment intégrer ces éléments dans des outils de simulation du microclimat urbain ? Les cours d'eau sont des systèmes assez complexes et peu connus thermiquement, leur modélisation climatique est encore peu abordée.

SOLUTIONS GRISES

Les solutions grises regroupent les dispositifs basés sur des systèmes d'ingénierie utilisant l'eau, sur les matériaux, la forme urbaine ou la régulation des consommations d'énergie. Concernant les dispositifs basés sur l'évaporation de l'eau, ils sont tous efficaces mais leur impact en terme d'amélioration du confort est difficile à quantifier. Tous modifient les conditions atmosphériques de l'air (température et humidité) mais certains projettent également de l'eau sous forme liquide sur les personnes, modifiant directement la sensation thermique. Par ailleurs, la performance de chaque dispositif est très fortement dépendante des conditions météorologiques ambiantes (humidité de l'air, température, vitesse du vent, etc.).

Dispositifs techniques basés sur l'humidification des chaussées

Cette méthode consiste à asperger les chaussées d'eau en périodes de forte chaleur (Hendel, 2015; Morille, Musy, & Malys, 2016; Musy et al., 2017). Selon (Coutts, Beringer, & Tapper, 2007; Desplat et al., 2012; Hendel, 2015; Tanaka, Okazaki, & Horikoshi, 2004), l'utilisation de 2,2 à 3 mm d'eau / jour pour arroser une surface urbaine de 2 550 ha (quantité équivalente 25 à 35 L/jour/personne si rapportée à la densité de population de la commune de Paris) permettrait de réduire la température nocturne jusqu'à 1°C et de quelques dixièmes de degrés pour la température moyenne journalière. Cependant, l'intensité du refroidissement est fortement dépendante de la morphologie du quartier, des types de sols du quartier et de la quantité de surfaces d'arrosage disponibles.

Pistes de recherche

La comparaison des systèmes : plusieurs systèmes d'arrosage peuvent être utilisés (camions d'arrosage, asperseurs, etc.). Chacun a des contraintes de mise en œuvre propres au quartier à arroser (quartier neuf, rénovation, type d'usage, etc.), représente des consommations de matériel, d'énergie et des moyens humains particuliers. Avant de mettre en œuvre de telles solutions, il est nécessaire d'avoir une vision plus large sur l'intérêt de ces systèmes avec par exemple une approche en coût global.

L'efficacité de l'arrosage en fonction de la forme urbaine, des matériaux et de la dynamique d'arrosage : la performance de l'arrosage selon la dynamique d'arrosage (choix des moments en fonction des effets attendus), la morphologie urbaine, les matériaux utilisés, et l'orientation des rues mériteraient d'être investigués plus en détail pour identifier les quartiers où ces mesures pourraient être prioritairement mises en œuvre.

Brumisateurs, fontaines, tours de refroidissement

Bien que l'utilisation de fontaines soit courante dans l'architecture urbaine, la performance de refroidissement de ces types de dispositifs est peu étudiée dans la littérature. Le refroidissement moyen journalier engendré par ce type de dispositif (entre 2 et 7°C) semble cependant être supérieur à celui propre à l'humidification des chaussées. Certains paramètres d'ajustement peuvent influencer grandement sur les performances du dispositif. C'est par exemple le cas de la taille

des gouttes générées par les brumisateurs : certaines tailles n'engendrent aucun rafraîchissement tandis que d'autres diminuent la température de plusieurs degrés Celsius (Yamada et al., 2008).

Pistes de recherches

(Santamouris et al., 2017) ont mis en évidence le manque de campagnes de mesures réalisées pour valider les performances des brumisateurs et des tours de refroidissement. De plus, selon eux, peu de logiciels ou algorithmes fiables permettent de simuler le rafraîchissement occasionné par ces dispositifs (Santamouris et al., 2017). (Chatzidimitriou et al., 2013) ont expérimenté une version 4 du logiciel Envi-MET dans lequel il est possible d'ajouter de tels éléments, mais cette version n'est encore pas accessible.

Dispositifs utilisant la modification de l'albédo des matériaux

De nombreuses études montrent l'effet de rafraîchissement diurne et nocturne généré par l'augmentation de l'albédo des matériaux en ville (Aida, 1982; Alexandri & Jones, 2006; Bretz & Akbari, 1997; Doya, Bozonnet, & Allard, 2010; Groleau & Mestayer, 2013; Kondo et al., 2001; Prado & Ferreira, 2005; Taha et al., 1988; Touchaei, Akbari, & Tessum, 2016). L'intensité du rafraîchissement (souvent de l'ordre du degré Celsius) est très fortement dépendante du type de la surface modifiée (sol, façade, toit), de l'orientation des rues et de leur morphologie. (Fahmy & Sharples, 2009) ont par exemple montré que pour une rue dont le rapport d'aspect (hauteur/largeur) serait supérieur à 1,5, l'effet d'augmentation de l'albédo est négligeable. Ils ont également montré que pour un même rapport d'aspect, la quantité d'énergie solaire absorbée par un quartier diffère selon l'orientation des rues, ce qui impacte directement le confort thermique extérieur : quel que soit la valeur du rapport d'aspect, une rue orientée nord-sud permet de minimiser le nombre d'heures d'inconfort thermique par rapport à une rue orientée est-ouest. Dans des régions où l'ensoleillement est important, la modification de l'albédo des toitures est plus intéressante que leur végétalisation (Santamouris, 2014; Santamouris et al., 2017). La plupart de ces résultats sont issus de simulations. Des observations ont été réalisées sur des surfaces de petite taille mais très peu l'ont été dans le cadre de l'évaluation d'un projet réel (Santamouris, 2014; Santamouris et al., 2017). Certains matériaux ont une valeur d'albédo qui est dépendante de la température et de l'intensité du rayonnement solaire. Ils sont actuellement en phase de test mais ont montré des performances encourageantes (Karlessi et al., 2011).

Point de vigilance

Plusieurs études ont relevé un risque lié à l'utilisation de ces surfaces dans des climats tempérés, il s'agit d'une potentielle augmentation des consommations d'énergie des bâtiments en période hivernale (Santamouris, Synnefa, & Karlessi, 2011). En été, l'utilisation de matériaux réfléchissants peut nuire au confort thermique, le rayonnement solaire (direct et réfléchi) reçu par les individus pouvant être très important à certaines périodes de la journée. De même, l'intensité du rayonnement lumineux réfléchi par certaines surfaces peut rendre inconfortable voire dangereux les déplacements (problèmes d'aveuglement).

Piste de recherche

La mise en place d'expérimentations et d'observations en vraie grandeur : Alors que des industriels commencent à élaborer et caractériser différents matériaux réfléchissants (peintures, bétons, pavés...), des quartiers tests pourraient être instrumentés pour vérifier l'impact de l'utilisation de matériaux réfléchissants sur la température et le confort, notamment avec des matériaux réfléchissants dans le spectre de l'infra-rouge (pour éviter les problèmes d'aveuglement). Ceci permettrait de réaliser des mesures avant et après les modifications d'albédo (Santamouris, 2013). Une classification des quartiers (selon leur morphologie, l'orientation principale des rues, les principaux usages) pourrait être réalisée pour identifier les quartiers dans lesquels les mesures d'augmentation d'albédo seraient à privilégier.

Dispositifs utilisant les matériaux à changement de phase

Des dispositifs basés sur le MCP (Matériaux à Changement de Phase) ont surtout été testés pour amortir les besoins de chaleur et de froid dans les bâtiments (Santamouris, 2013). Quelques études ont cependant montré que l'utilisation de tels matériaux encapsulés dans les parois permettaient de réduire notablement la température des surfaces à certaines périodes de la journée (Karlessi et al., 2011).

Piste de recherche

En 2011, (Santamouris et al., 2011) mettaient en avant la nécessité de réaliser des recherches approfondies sur l'utilisation de nanoparticules à changement de phase qui pourraient être intégrées à des matériaux de construction. Selon la période pendant laquelle le rafraîchissement est espéré, il pourrait être intéressant de développer des matériaux ayant une température de changement de phase adaptée.

Dispositifs utilisant les matériaux à rétention d'eau

De même que les MCP, ces dispositifs n'en sont pour l'instant qu'aux phases de test en laboratoire ou *in situ*. Certaines expériences ont cependant montré des résultats encourageants avec des diminutions de température d'air à une hauteur de 1,5 m de l'ordre du degré Celsius à certaines périodes de la journée. Cependant, selon (Santamouris, 2013), les matériaux à rétention d'eau sont des dispositifs de rafraîchissement qui, s'ils s'avèrent performants, devront être mis en œuvre dans des régions où la disponibilité en eau est suffisante afin d'éviter des conflits d'usage de l'eau.

Pistes de recherche

Peu d'études ont montré des performances de rafraîchissement encourageantes. Même si plusieurs projets ont mis en œuvre de tels matériaux à l'échelle d'une rue ou de surfaces tests de quelques mètres carrés, peu ont réellement donné lieu à une instrumentation intéressante (Santamouris, 2013). Dans un second temps et si ces dispositifs donnent satisfaction, il pourra être envisagé de les intégrer dans des logiciels de simulation.

Dispositifs utilisant d'autres modifications de matériaux

L'utilisation de chaussées solaires a récemment été testée à Athènes et a montré de bonnes performances de refroidissement (Efthymiou et al., 2016; Santamouris, 2013). Il semble cependant plus raisonnable d'utiliser cette technologie en toiture, où les contraintes sont moindres que dans la canopée urbaine. (Golden et al., 2007) ont par exemple proposé de les positionner en toitures d'abris placés au-dessus de parkings.

La technique d'isolation (par l'intérieur ou par l'extérieur) est une source potentielle de modification du confort extérieur (comme intérieur) mais a été peu investiguée jusqu'à maintenant (Gros, 2013). En effet, elle modifie la dynamique de la température de surface extérieure et donc la température d'air extérieure. Ainsi, le rayonnement de grande longueur d'onde des façades est modifié, ce qui a un impact sur le confort des personnes à proximité.

Co-bénéfices

L'utilisation de toitures équipées de panneaux photovoltaïques au-dessus de parkings permet de réduire le rayonnement atteignant les véhicules et les surfaces (ce qui contribue à une légère diminution de la température de l'air) tout en assurant la production d'énergie électrique. Par rapport à des arbres, leur emprise au sol est limitée et leur consommation d'eau en fonctionnement est nulle. Enfin, les arbres peuvent être soumis à des conditions importantes de stress (Kjellgren & Montague, 1998) dans ce type de contexte.

Pistes de recherche

L'utilisation de panneaux solaires en toiture au-dessus de parkings, qui présente un potentiel intéressant, a pour l'instant été peu investiguée. Des expériences *in situ* pourraient être réalisées en instrumentant un site avant et après la mise en place des panneaux.

L'impact de dispositifs de rafraîchissement selon le type d'isolation d'un bâtiment est également à observer plus en détail.

Dispositifs basés sur l'optimisation de la forme urbaine

En zones climatiques arides, les bâtiments hauts permettent de limiter la durée pendant laquelle le corps est soumis aux plus fortes sollicitations de stress thermique (Erell et al., 2014). Ces durées sont également plus faibles lorsque l'orientation des rues est majoritairement nord-sud. (Fahmy & Sharples, 2009) montrent que sous ce type de climat,

structurer la ville en blocs constitués de cours intérieures est préférable à des structures type « rue canyon » ou « grands ensembles ». Les indicateurs permettant de tirer ces conclusions sont cependant calculés en un site et à une période spécifiques. Ils sont donc limités. De plus, si une forme urbaine est préférable à une autre en utilisant des caractéristiques de matériaux et de sols particuliers, l'inverse peut aussi être observé si les caractéristiques sont modifiées. Par exemple, la mise en œuvre de végétation arborée peut contribuer à améliorer les conditions de confort dans une rue ouverte vers le ciel (création d'ombrage) mais diminuer le confort dans une rue faiblement ouverte (diminution de la vitesse du vent).

Piste de recherche

Identifier les dispositifs et les combinaisons de dispositifs les plus adaptés à des formes urbaines particulières : Des méthodes, telles que la modélisation paramétrique permettent de trouver la forme urbaine idéale pour optimiser le rayonnement solaire reçu par un quartier sous différentes latitudes (Delmas et al., 2016) mais pour le moment, il n'existe pas de couplage de ces approches avec des logiciels de micro-climatologie urbaine.

Dispositifs entraînant la diminution des consommations d'énergie des bâtiments

Des résultats intéressants ont été obtenus par (Hirano & Yoshida, 2016; Kikegawa et al., 2006), qui par simulation montrent l'intérêt de diminuer les charges de climatisation en mettant en place des réseaux de froid ou en augmentant les températures de consigne. En effet, les charges anthropiques liées aux pompes à chaleur, rejetées dans l'atmosphère urbain ont un impact non négligeable sur les températures d'air (Bozonnet, 2005; De Munck et al., 2012).

Pistes de recherche

Il serait intéressant de vérifier ces résultats expérimentalement en instrumentant par exemple un quartier avant et après raccordement à un réseau de froid ou avant et après rénovation.

SOLUTIONS DOUCES

Solutions de planification urbaine pour lutter contre l'ICU à l'échelle de la ville

Contrairement aux solutions vertes et grises, les solutions douces telles que définies par l'UE sont rarement documentées dans la littérature scientifique. Ces solutions sont en effet propres aux éléments de planification urbaine (stratégie de développement), au développement d'instruments économiques incitatifs, de mécanismes d'assurances, à la recherche et au partage de connaissances sur le sujet du rafraîchissement urbain, etc.

À une échelle plus macroscopique, il est indispensable de penser la ville de façon globale : le rafraîchissement créé dans un quartier pourra se répercuter dans les quartiers périphériques selon les vents dominants et également selon la communication des quartiers entre eux. La présence d'éléments géographiques majeurs tels que les montagnes (Sachsen et al., 2013) ou les océans (Svensson, Eliasson, & Holmer, 2002) sont également des sources de fraîcheurs et de ventilation non négligeables. À Stuttgart, un zonage de la ville a été réalisé afin de préserver des espaces de création de fraîcheur mais également en vue de développer des couloirs de ventilation (Kazmierczak & Carter, 2010). Aucune publication scientifique ne fait état ni des éléments du diagnostic réalisé au préalable, ni des résultats de la mise en œuvre de cette politique publique. Très peu de travaux de recherche traitent de méthodes de diagnostic propres à l'élaboration de stratégies urbaines dans l'optique de mieux ventiler la ville. (Kazmierczak & Carter, 2010) présentent une méthode de quantification de l'apport de fraîcheur transportée par « ventilation naturelle » à travers plusieurs vallées dans la ville de Göteborg mais ils ne décrivent pas l'influence des formes urbaines comme obstacles à la ventilation. Au contraire, (Haeger-Eugensson & Holmer, 1999; Wong et al., 2010) proposent une méthode pour calculer la vitesse et le parcours du vent en tout point de la ville mais en considérant seulement les bâtiments et dans des conditions de « ventilation forcée ». Seuls (Ng et al., 2012) proposent d'estimer (entre autres) la vitesse du vent pour toutes conditions (ventilation naturelle et forcée) à partir d'une méthode qui s'appuie sur une classification géographique fine des éléments impactant le climat local (volume bâti, altimétrie, présence et nature de la végétation, proximité du bord de mer, de vallées, etc.). Cependant, cette méthode n'a pour l'instant pas été appliquée ni vérifiée à d'autres villes que Hong-Kong.

Pistes de recherches

Peu d'études montrent clairement le potentiel de « repenser une ville ventilée » dans le but de diminuer le phénomène d'ICU. Il serait donc intéressant de transposer aux villes françaises la méthode développée par (Ng et al., 2012) (ou de s'en inspirer) afin de définir une stratégie de ventilation permettant de réduire l'ICU (notamment en période caniculaire). Dans un second temps, il sera nécessaire d'inscrire dans les éléments juridiques locaux (tels que les PLU) des principes de lutte contre l'ICU à l'échelle d'une zone urbaine. L'exemple de la ville de Stuttgart, qui apparaît comme le cas de référence européen, pourra être utilisé.

CONCLUSIONS

Dans ses états de l'art des dispositifs de rafraîchissement, Santamouris fait apparaître que tous les dispositifs présentent un potentiel de rafraîchissement (Santamouris, 2013, 2014, Santamouris et al., 2017, 2011). Des études françaises ont également été réalisées permettant de comparer les effets à différentes échelles de l'eau, de l'albédo et de la végétation (Desplat et al., 2009; Musy et al., 2014). Cependant, chacun de ces dispositifs montre une intensité de rafraîchissement qui varie spatialement et temporellement. Par exemple ; spatialement, un arbre apporte du confort principalement dans l'espace d'ombrage qu'il va créer ; temporellement, la température de l'air diurne dans un parc sera plus faible si celui-ci est composé d'arbres que s'il en est dénué et au contraire, la température nocturne sera probablement plus élevée (Spronken-Smith & Oke, 1999). Ces variations spatiales et temporelles rendent complexe la comparaison des performances entre dispositifs de rafraîchissement par l'utilisation d'un indicateur universel. Certains dispositifs seront donc plus appropriés à un usage particulier de l'espace public (par exemple l'utilisation d'arbres dans des espaces pour flâner tels que les parcs ou les places). C'est dans le cadre d'un même usage que la comparaison de deux solutions prend le plus de sens. Les résultats de comparaisons sont cependant dans la plupart des cas difficilement généralisables à n'importe quelle situation urbaine sous la simple contrainte d'être appliquée à un même usage. En effet, la performance d'un dispositif dépend de la morphologie urbaine, des caractéristiques des matériaux et des types de sols rencontrés dans le quartier où il est appliqué. En premier lieu, les surfaces disponibles pour appliquer un dispositif ne seront pas les mêmes selon le type de quartier, par exemple résidentiel ou rue canyon de centre-ville. Ensuite, certains dispositifs sont inefficaces dans certaines dispositions. Par exemple, l'utilisation du végétal en toiture est peu pertinente sur des bâtiments hauts (Malys, 2012; Malys, Musy, & Inard, 2016). La combinaison de dispositifs tels que les matériaux réfléchissants en façade et les arbres peut s'avérer optimale dans certains contextes (rues assez ouvertes vers le ciel) mais nuire aux performances de rafraîchissement dans l'autre cas (rues étroites où la végétation haute pourrait avoir comme seul effet de ralentir le vent) (Musy et al., 2017). Le climat est également un facteur impactant les performances des dispositifs : ceux basés sur l'évaporation ou l'évapotranspiration seront plus efficaces sous un climat sec tandis que les matériaux réfléchissants seront au maximum de leur efficacité sous des climats ensoleillés, etc. (Alexandri & Jones, 2006).

Par ailleurs, la comparaison rigoureuse des dispositifs à partir d'études différentes reste difficile car les outils de simulation utilisés ne sont pas comparables. Chacun a ses spécificités, tant en termes de méthodes de calcul employées, d'échelles considérées, de représentation des phénomènes physiques et des dispositifs de rafraîchissement (Bozonnet et al., 2013; Grimmond et al., 2009). La comparaison de la performance en termes de refroidissement de deux types de dispositifs, simulée à partir de deux outils différents sera donc peu fiable, même si les simulations sont réalisées avec la même scène urbaine en entrée et les résultats exprimés avec les mêmes indicateurs de performance.

La prise en compte des co-bénéfices et points de vigilance est également indispensable. Selon le contexte climatique, un dispositif sera peu adapté. C'est par exemple le cas des dispositifs qui utilisent l'eau comme vecteur de refroidissement dans des régions arides (ou l'eau est peu disponible) ou encore des dispositifs réfléchissants dans les zones climatiques à hiver froid, qui entraîneront une augmentation des besoins de chaleur en hiver.

Les dispositifs ou combinaisons de dispositifs présentent des performances différentes selon le type de quartier dans lequel ils sont mis en œuvre. Les principaux paramètres influents sont la taille et de la distribution des bâtiments ainsi que leur usage et les matériaux de construction utilisés, la fraction et le type de végétation présente dans le quartier et de la zone géographique dans laquelle il est situé. Un travail d'identification des mesures à privilégier pour chaque type de tissu urbain, en utilisant par exemple les classifications telles que les *local climate zones*, selon la zone climatique serait nécessaire. Les performances de chaque combinaison de dispositifs pourraient ainsi être évaluées pour chaque type de LCZ à partir de modèles (on privilégiera ceux qui ont fait l'objet de validation et qui intègrent déjà la plupart des dispositifs de rafraîchissement décrits dans cette étude - Solene-microclimat, TEB, Envi-met). Un outil d'aide à la décision conçu à partir

de ces résultats pourrait être réalisé, auquel pourront s'ajouter les résultats d'un éventuel état des lieux détaillé de l'ensemble des co-bénéfices et points de vigilance associés à chaque dispositif.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME. (2017). Rafrâichissement des villes : de quelles connaissances avons-nous besoin ? In *Actes de la journée scientifique et technique du 27 juin 2017 à Lyon*.

Aida, M. (1982). Urban albedo as a function of the urban structure—A model experiment. *Boundary-layer meteorology*, 23(4), 405-413.

Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295-310. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)

Alexandri, E., & Jones, P. (2006). Ponds, GreenRoofs, pergolas and high albedo materials; which cooling technique for urban spaces. In *proceedings of the 23rd Conference of Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland*. Citeseer.

Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2007). Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar energy*, 81(6), 742-754.

Alvey, A. A. (2006). Promoting and preserving biodiversity in the urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 5(4), 195-201.

Bernard, J., Kéravec, P., Morille, B., Bocher, E., Musy, M., & Calmet, I. (2019). Outdoor Air Temperature Measurement: A Semi-Empirical Model to Characterize Shelter Performance. *Climate*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/cli7020026>

Bernard, J., Rodler, A., Morille, B., & Zhang, X. (2018). How to Design a Park and Its Surrounding Urban Morphology to Optimize the Spreading of Cool Air? *Climate*, 6(1), 10.

Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological engineering*, 36(4), 351-360.

Bessec, M., & Fouquau, J. (2008). The non-linear link between electricity consumption and temperature in Europe: a threshold panel approach. *Energy Economics*, 30(5), 2705-2721.

Bozonnet, E. (2005). *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments-Cas de la rue canyon* (PhD Thesis). Université de la Rochelle.

Bozonnet, E., Musy, M., Calmet, I., & Rodriguez, F. (2013). Modeling methods to assess urban fluxes and heat island mitigation measures from street to city scale. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(1), 62-77.

Brenneisen, S. (2003). The benefits of biodiversity from green roofs: key design consequences. Greening Rooftops for Sustainable Communities. A. Loder and J. Sprout. *Chicago, Green Roofs for Healthy Cities*.

Bretz, S. E., & Akbari, H. (1997). Long-term performance of high-albedo roof coatings. *Energy and Buildings*, 25(2), 159-167. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01005-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01005-5)

Bueno-Bartholomei, C., & Labaki, L. (s. d.). Environmental parameters and thermal comfort provided by different tree species. In *Design with the environment*. Toulouse.

Ca, V. T., Asaeda, T., & Abu, E. M. (1998). Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park. *Energy and buildings*, 29(1), 83-92.

Cao, X., Onishi, A., Chen, J., & Imura, H. (2010). Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landscape and urban planning*, 96(4), 224-231.

Chang, C.-R., & Li, M.-H. (2014). Effects of urban parks on the local urban thermal environment. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(4), 672-681.

Chatzidimitriou, A., Liveris, P., Bruse, M., & Topli, L. (2013). Urban redevelopment and microclimate improvement: a design project in Thessaloniki, Greece. *Proceedings of PLEA 2013: Sustainable Architecture for a Renewable Future*.

Clergeau, P., & Blanc, N. (2013). *Trames vertes urbaines. De la recherche scientifique au projet urbain*. Éditions du Moniteur.

Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J.-L., & Pearlmutter, D. (2016). Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate*, 18, 33-57.

Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2007). Characteristics influencing the variability of urban CO₂ fluxes in Melbourne, Australia. *Atmospheric Environment*, 41(1), 51-62.

de Abreu-Harbach, L. V., Labaki, L. C., & Matzarakis, A. (2015). Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planning*, 138, 99-109.

De Munck, C., Lemonsu, A., & Masson, V. (2012). Green roofs for cities : modelling with TEB-Veg and validation at building scale. Présenté à 8th International Conference on Urban Climate, Dublin.

Delmas, A., Lobaccaro, G., Donn, M., Musy, M., & Garde, F. (2016). Solar potential in extreme climate conditions: comparative analysis of two district case studies in Norway and Reunion Island. In *Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*.

Desplat, J., Kounkou-Arnaud, R., Lemonsu, A., Masson, V., & Salagnac, J. (2012). Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne. *Rapport final du projet. Octobre 2012*.

Desplat, J., Lauffenburger, M., Salagnac, J., Kounkou-Arnaud, R., Lemonsu, A., Colombert, M., & Masson, V. (2009). Projet EPICEA - Étude pluridisciplinaire des impacts du changement climatique à l'échelle de l'agglomération parisienne.

Djedjig, R., Ouldboukhithine, S.-E., Belarbi, R., & Bozonnet, E. (2012). Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(6), 752-761.

Doick, K. J., Peace, A., & Hutchings, T. R. (2014). The role of one large greenspace in mitigating London's nocturnal urban heat island. *Science of the total environment*, 493, 662-671.

Doya, M., Bozonnet, E., & Allard, F. (2010). Benefits of cool facades in dense urban environment. In *PALENC 2010, Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment* (p. Session-23).

Efthymiou, C., Santamouris, M., Kolokotsa, D., & Koras, A. (2016). Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation. *Solar Energy*, 130, 148-160.

Erell, E., Pearlmutter, D., Boneh, D., & Kutiel, P. B. (2014). Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *ICUC8: The 8th International Conference on Urban Climate and the 10th Symposium on the Urban Environment*, 10, 367-386. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.005>

Eurostat. (2014). *Eurostat regional yearbook 2014: Focus on european cities*. European Commission.

Fahmy, M., & Sharples, S. (2009). On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt. *Building and Environment*, 44(9), 1907-1916. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.010>

Golden, J. S., Carlson, J., Kaloush, K. E., & Phelan, P. (2007). A comparative study of the thermal and radiative impacts of photovoltaic canopies on pavement surface temperatures. *Solar Energy*, 81(7), 872-883. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.11.007>

Grimmond, C. S. B., Best, M., Barlow, J., Arnfield, A. J., Baik, J.-J., Baklanov, A., Belcher, S., et al. (2009). Urban Surface Energy Balance Models: Model Characteristics and Methodology for a Comparison Study. In A. Baklanov, G. Sue, M. Alexander, & M. Athanassiadou (Éd.), *Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas* (p. 97-123). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00298-4_11

Groleau, D., & Mestayer, P. G. (2013). Urban Morphology Influence on Urban Albedo: A Revisit with the Solene Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 147(2), 301-327. <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9786-6>

Gros, A. (2013). *Model the building energy demand at district scale* (Theses). Université de La Rochelle. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01066106>

Guevara-Escobar, A., González-Sosa, E., Véliz-Chávez, C., Ventura-Ramos, E., & Ramos-Salinas, M. (2007). Rainfall interception and distribution patterns of gross precipitation around an isolated Ficus benjamina tree in an urban area. *Journal of Hydrology*, 333(2), 532-541. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.017>

Guillaume, G., Gauvreau, B., & L'Hermite, P. (2015). Numerical study of the impact of vegetation coverings on sound levels and time decays in a canyon street model. *Science of The Total Environment*, 502, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.111>

Haeger-Eugensson, M., & Holmer, B. (1999). Advection caused by the urban heat island circulation as a regulating factor on the nocturnal urban heat island. *International Journal of Climatology*, 19(9), 975-988. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199907\)19:9<975::AID-JOC399>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199907)19:9<975::AID-JOC399>3.0.CO;2-J)

Hathway, E. A., & Sharples, S. (2012). The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Building and Environment*, 58, 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.013>

Hendel, M. (2015). *Pavement-Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation* (Theses). Université Paris Diderot Paris 7. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01258289>

Hirano, Y., & Yoshida, Y. (2016). Assessing the effects of CO2 reduction strategies on heat islands in urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 26, 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.018>

Isoard, S., & Winograd, M. (2013). *Adaptation in Europe - Addressing risks and opportunities from climate change in the context of socio-economic developments* (No. 3/2013). European Environment Agency.

- Karlessi, T., Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, D., Didaskalopoulos, P., & Apostolakis, K. (2011). Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat island and cool buildings. *Building and Environment*, 46(3), 570-576. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.003>
- Kazmierczak, & Carter. (2010). *Stuttgart : Combating heat island and poor air quality with green aeration corridors*. European Environment Agency.
- Kikegawa, Y., Genchi, Y., Kondo, H., & Hanaki, K. (2006). Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning. *Applied Energy*, 83(6), 649-668. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.06.001>
- Kilbourne, E. (1997). Heat waves and hot environments. *The public health consequences of disasters*, 245-269.
- Kjelgren, R., & Montague, T. (1998). Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Conference on the Benefits of the Urban Forest*, 32(1), 35-41. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00177-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00177-5)
- Kondo, A., Ueno, M., Kaga, A., & Yamaguchi, K. (2001). The influence of urban canopy configuration on urban albedo. *Boundary-Layer Meteorology*, 100(2), 225-242. <https://doi.org/10.1023/A:1019243326464>
- Lacombe, M., Bousri, D., Leroy, M., & Mezred, M. (2011). *WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments, Ghardaia, Algeria, November 2008-October 2009* (Instruments and observing methods report). World Meteorological Organization.
- Landes, T., Hayot, C., Najjar, G., Kastendeuch, P., Saudreau, M., Colin, J., Luhahe, R., et al. (2014). Modélisation 3D d'arbre pour comprendre le climat urbain. Un projet multidisciplinaire ambitieux. *Revue XYZ*, 141(4ème trimestre), 61-68.
- Landsberg, H. (1981). *The Urban Climate* (1st Edition, Vol. 28). International Geophysics.
- Malys, L. (2012). *Evaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments* (PhD Thesis). Consulté à l'adresse <http://www.theses.fr/2012ECDN0052>
- Malys, L., Musy, M., & Inard, C. (2016). Direct and Indirect Impacts of Vegetation on Building Comfort: A Comparative Study of Lawns, Green Walls and Green Roofs. *Energies*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/en9010032>
- Morille, B., Musy, M., & Malys, L. (2016). Preliminary study of the impact of urban greenery types on energy consumption of building at a district scale: Academic study on a canyon street in Nantes (France) weather conditions. *Energy and Buildings*, 114, 275-282.
- Musy, M. (2014). *La ville verte - Les rôles du végétal en ville*. Versailles: QUAE.
- Musy, M., Bozonnet, E., Briottet, X., Gutleben, C., Lagouarde, J.-P., Launeau, P., Lemonsu, A., et al. (2014). *Rapport final Projet ANR- 09-VILL-0007VegDUDProgramme Villes Durables 2009* (Research Report). IRSTV FR CNRS 2488. Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01188804>
- Musy, M., Maillard, P., Azam, M.-H., Bailly, J.-B., Barel, E., Bozonnet, E., Calmet, I., et al. (2017). *EVA (Eau, Végétation, Albédo) Quantitative assessment of the impacts from three urban cooling solutions on microclimate, buildings' energy demand and thermal comfort - Application to Lyon Part-Dieu district* (Research Report). ADEME ; IRSTV FR CNRS 2488. Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01590630>
- Ng, E., Yau, R., Wong, K., Ren, C., & Katschner, L. (2012). *Final Report of Hong Kong Urban Climatic Map and Standards for Wind Environment- Feasibility Study*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5165.0000>
- Prado, R. T. A., & Ferreira, F. L. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37(4), 295-300. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.03.009>
- Revaud, C.-E., Bernard, J., Touili, K., Salomon, A., Gantois, M., Musy, M., & Inard, C. (2015). Thermoregulatory effect of green spaces and wetlands in Paris. In *ICUC9 -9 th International Conference on Urban Climate jointly with 12 th Symposium on the Urban Environment*. Toulouse, France. Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01221384>
- Robitu, M., Musy, M., Groleau, D., & Inard, C. (2003). Thermal radiative modelling of water pond and its influences on microclimate.
- Sachsen, T., Ketzler, G., Knörchen, A., & Schneider, C. (2013). Past and future evolution of nighttime urban cooling by suburban cold air drainage in Aachen. *Erde*, 144, 274-289. <https://doi.org/10.12854/erde-144-19>
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682-703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>

- Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R., Prasad, et al. (2017). Passive and active cooling for the outdoor built environment-Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 154, 14-33.
- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Progress in Solar Energy* 2, 85(12), 3085-3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*, 31(3), 221-235. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00018-3)
- Smith, J., & Tirpak, D. (1989). *The potential effects of global climate change on the United States: Draft: Report to Congress*. United States Environmental Protection Agency, Office of Policy, Planning and Evaluation.
- Spronken-Smith, R. A., & Oke, T. R. (1999). Scale Modelling of Nocturnal Cooling in Urban Parks. *Boundary-Layer Meteorology*, 93(2), 287-312. <https://doi.org/10.1023/A:1002001408973>
- Steeneveld, G. J., Koopmans, S., Heusinkveld, B. G., van Hove, L. W. A., & Holtslag, A. A. M. (2011). Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D20). <https://doi.org/10.1029/2011JD015988>
- Svensson, Eliasson, & Holmer. (2002). A GIS based empirical model to simulate air temperature variations in the Göteborg urban area during the night. *Climate Research*, 22(3), 215-226.
- Taha, H., Akbari, H., Rosenfeld, A., & Huang, J. (1988). Residential cooling loads and the urban heat island—the effects of albedo. *Building and Environment*, 23(4), 271-283. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(88\)90033-9](https://doi.org/10.1016/0360-1323(88)90033-9)
- Tanaka, I., Okazaki, M., & Horikoshi, T. (2004). Evaporative cooling effect of the pavement covered with reused Sanshu roofing tiles. In *World building Congress, Building for the future*. Toronto.
- Touchaei, A. G., Akbari, H., & Tessum, C. W. (2016). Effect of increasing urban albedo on meteorology and air quality of Montreal (Canada) - Episodic simulation of heat wave in 2005. *Atmospheric Environment*, 132, 188-206. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.033>
- Wong, M. S., Nichol, J. E., To, P. H., & Wang, J. (2010). A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis. *Building and Environment*, 45(8), 1880-1889. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.019>
- Yamada, H., Yoon, G., Okumiya, M., & Okuyama, H. (2008). Study of cooling system with water mist sprayers: Fundamental examination of particle size distribution and cooling effects. *Building Simulation*, 1, 214-222. <https://doi.org/10.1007/s12273-008-8115-y>