

# Caractérisation du comportement de revêtements urbains soumis à arrosage urbain

Martin HENDEL<sup>1\*</sup>, Arnaud GRADOS<sup>2</sup>, Laurent ROYON<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univ Paris Diderot, Paris Sorbonne Cité, LIED, UMR 8236, CNRS, F-75013, Paris, France

<sup>2</sup>Univ Paris Diderot, Paris Sorbonne Cité, MSC, UMR 7057, CNRS, F-75013, Paris, France

\* (auteur correspondant : [martin.hendel@univ-paris-diderot.fr](mailto:martin.hendel@univ-paris-diderot.fr))

Mots-clés : rafraîchissement évaporatif, îlot de chaleur urbain, transferts multiphysiques, interfaces

**Résumé** – L’arrosage urbain est envisagé par de nombreuses villes, notamment Paris, pour lutter contre la formation d’îlots de chaleur urbains et pour leur adaptation aux canicules, amplifiées par le changement climatique. Cette méthode a été étudiée *in situ* sur deux sites à Paris pendant les étés 2013, 2014 et 2015. Ces essais ont permis de démontrer l’efficacité de l’arrosage pour améliorer le confort thermique et de déterminer le protocole d’arrosage optimal à partir de l’étude de ses effets thermiques à l’échelle des matériaux arrosés.

Cependant, l’efficacité de l’arrosage dépend de nombreux paramètres, dont notamment les propriétés du revêtement urbain arrosé. Or, les villes emploient généralement une large panoplie de matériaux différents, nécessitant ainsi d’adapter le protocole d’arrosage à chacun d’entre eux pour définir une stratégie d’arrosage urbain à l’échelle d’une ville. Les essais *in situ* étant longs et coûteux, il est nécessaire de développer une autre méthode pour atteindre cet objectif.

Notre étude s’inscrit dans ce cadre et propose une expérimentation de laboratoire permettant d’étudier les effets de l’arrosage sur des échantillons cylindriques de revêtements urbains. Pour cela, un dispositif expérimental a été mis au point pour reproduire une sollicitation climatique similaire à une canicule parisienne. En pratique, la sollicitation est découpée en une phase « jour » avec ensoleillement pendant 8h et une phase « nuit », sans ensoleillement, pendant 16h. La température et l’humidité de l’air sont contrôlées par une enceinte climatique et sont respectivement fixées à 35°C et 35% le jour et 25°C et 70% la nuit. Pour sa part, l’ensoleillement artificiel est assuré par une lampe halogène placée au-dessus de l’échantillon à étudier. Enfin, le dispositif permet d’imposer un protocole d’arrosage qui peut être programmé pendant les phases diurne et/ou nocturne.

Les échantillons utilisés sont de forme cylindrique avec un diamètre de 16 cm et 32 cm de hauteur. L’évolution des températures et flux thermiques est étudiée à différentes profondeurs grâce à des capteurs placés au préalable dans les échantillons.

Afin de déterminer l’arrosage optimal, un premier échantillon de chaussée parisienne a été testé. Les mesures ont ainsi pu être comparées avec celles obtenues sans arrosage sur le terrain à Paris pendant les étés 2013, 2014 et 2015. Les limites de notre approche ont ainsi pu être évaluées et discutées.

## Nomenclature

<i>BBM</i>	béton bitumineux mince	<i>EME</i>	enrobé à module élevé
<i>CLO</i>	courte longueur d’onde (0,3-3µm)	<i>GLO</i>	grande longueur d’onde (3-100 µm)
<i>MTLHR</i>	matériaux traités au liant hydraulique		

# 1. Introduction

Les matériaux ont un fort impact sur le climat urbain de par leur imperméabilité, leur forte inertie thermique et leur faible réflectivité et participent ainsi à la formation des îlots de chaleur urbains [1]. Afin de diminuer leur impact, différentes stratégies sont étudiées, notamment l'arrosage urbain qui vise à humidifier les revêtements urbains lors de canicules [2]. Etant donné l'important impact sanitaire des canicules en milieu urbain, ces recherches intéressent les gestionnaires des villes denses telles que Paris [3].

Dans ce cadre, une expérimentation *in situ* a été réalisée à Paris lors des étés 2013, 2014 et 2015. Ces travaux ont permis de quantifier le rafraîchissement induit par cette méthode pour un seul type de revêtement, une chaussée composée d'enrobé bitumineux [4–7]. Pour autant, la Ville de Paris utilise un grand nombre de revêtements différents dans son espace public, dont par exemple l'asphalte pour les trottoirs, le stabilisé pour les pieds d'arbres ou allées de jardin ou encore de nombreux pavés différents pour les chaussées et trottoirs. Etant donné que ces revêtements présentent des caractéristiques thermiques très variées, les résultats de l'arrosage obtenus pour la chaussée étudiée ne peuvent être généralisés à l'ensemble de l'espace public parisien. Etant donné le coût élevé et le temps long des essais réalisés en milieu urbain, il n'est pas envisageable de réaliser un essai pour chaque site présentant un revêtement différent. Un protocole expérimental de laboratoire capable de reproduire les principaux phénomènes thermiques en jeu serait plus à même de répondre.

Le présent article présente une expérimentation de laboratoire capable de caractériser le comportement thermo-climatique de différents revêtements urbains arrosés. Pour cela, des échantillons de revêtements sont soumis à des cycles météorologiques contrôlés, similaires à une canicule. Les résultats obtenus en laboratoire seront comparés avec des observations du terrain, issues des campagnes d'essais des étés 2013, 2014 et 2015.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Structure étudiée : chaussée classique

L'échantillon étudié est représentatif d'une chaussée classique. Il se présente sous la forme d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre pour 32 cm de hauteur isolée par une couche de polyuréthane expansé de 5 cm d'épaisseur. L'éprouvette est fabriquée conformément aux préconisations des services techniques de la Ville de Paris. Sa structure est ainsi composée d'une première couche de 4 cm de béton bitumineux mince (BBM), d'une couche de 12 cm d'enrobé à module élevé (EME), puis d'une fondation de remblai traité au liant hydraulique (MTLHR). Sa composition globale est précisée à la Figure 1, ainsi que les profondeurs d'instrumentation sur l'échelle de gauche. Celle-ci est composée de thermocouples de type K permettant de suivre l'évolution de sa température.

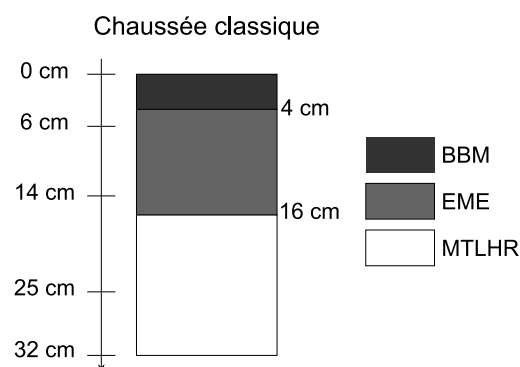


Figure 1 : Composition de la structure de chaussée étudiée

La surface de cette structure se caractérise par un albédo (i.e. réflectivité courte longueur d'onde) de 0,098 et une émissivité de 0,99 [8].

## 2.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé s'appuie sur une expérience mise au point pour caractériser le comportement thermo-climatique de revêtements urbains en conditions caniculaires [9]. Celui-ci permet grâce à une enceinte climatique et à une lampe halogène de reproduire schématiquement des conditions caniculaires parisiennes pour étudier l'évolution des températures et des échanges de chaleur au sein d'un échantillon de revêtement, équipé de thermocouples et de fluxmètres en surface, à 6 cm, 14 cm et 25 cm de profondeur.

Par rapport à l'expérience initiale, un asperseur d'eau qui délivre un volume fixe d'eau distillée à intervalles réguliers a été ajouté ainsi que l'amélioration de la qualité de l'isolation utilisée qui présentait des défauts d'étanchéité visibles dans les observations de température à 32 cm de profondeur [9-10]. Un schéma du dispositif est présenté à la Figure 2.

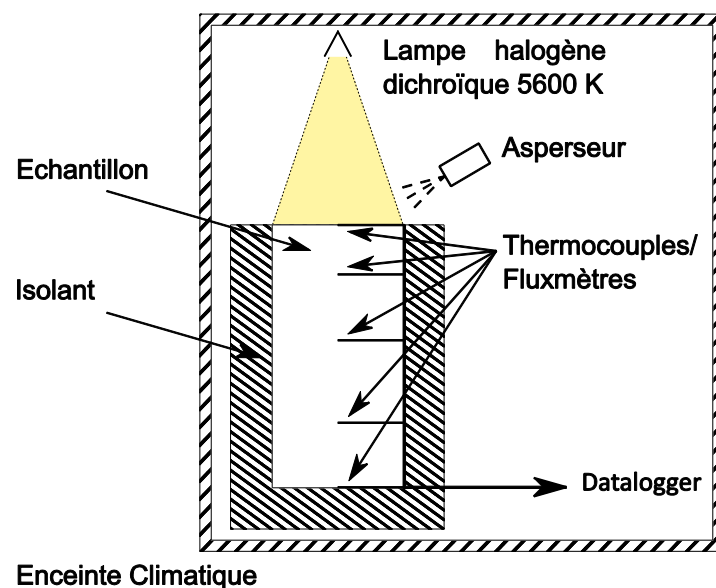


Figure 2 : Schéma du dispositif expérimental

La lampe et l'asperseur sont pilotés par un ordinateur également chargé de l'enregistrement des mesures toutes les 30 secondes, tandis que l'enceinte est réglée manuellement en température et en humidité relative.

## 2.3. Protocole expérimental

Une fois placé dans l'enceinte climatique, l'échantillon est soumis à une sollicitation climatique d'une durée de 24h. La sollicitation est découpée en une période diurne de 8h, avec une température de l'air de 35°C, 35% d'humidité avec arrosage de 0,076 mm d'eau toutes les 10 minutes, et une période nocturne de 16h à 25°C, 70% d'humidité. Avant le début d'un essai, l'échantillon est entreposé pendant au moins 24h dans l'enceinte réglée en mode nuit. Pour déterminer les effets de l'arrosage, un essai identique est également effectué sans arrosage.

L'ensoleillement artificiel est assuré par 7 ampoules halogènes dichroïques de température de couleur 5 600 K. Bien que ne reproduisant pas parfaitement le spectre solaire, ce dispositif est adapté pour des matériaux à réponse radiative uniforme entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$ . En revanche, ce

dispositif ne permettrait pas de reproduire fidèlement le comportement de revêtements réfléchissants dans le proche infrarouge comme il en existe pour les toitures [11].

Le Tableau 1 résume les caractéristiques du cycle climatique et la Figure 3 illustre la fiabilité réelle de l'enceinte mesurée par un thermo-hygromètre placé dans l'enceinte.

	Jour	Nuit
Durée	8h	16h
Température de l'air	35°C	25°C
Humidité relative	35%	70%
Rayonnement CLO (0,3-3 $\mu\text{m}$ )	1 170 W/m <sup>2</sup>	0
Rayonnement GLO (3-100 $\mu\text{m}$ )	210 W/m <sup>2</sup>	400 W/m <sup>2</sup>
Quantité arrosée	0,45 mm/h	
Fréquence d'arrosage	10 minutes	-

Tableau 1 : Découpage et paramètres de la sollicitation climatique avec arrosage

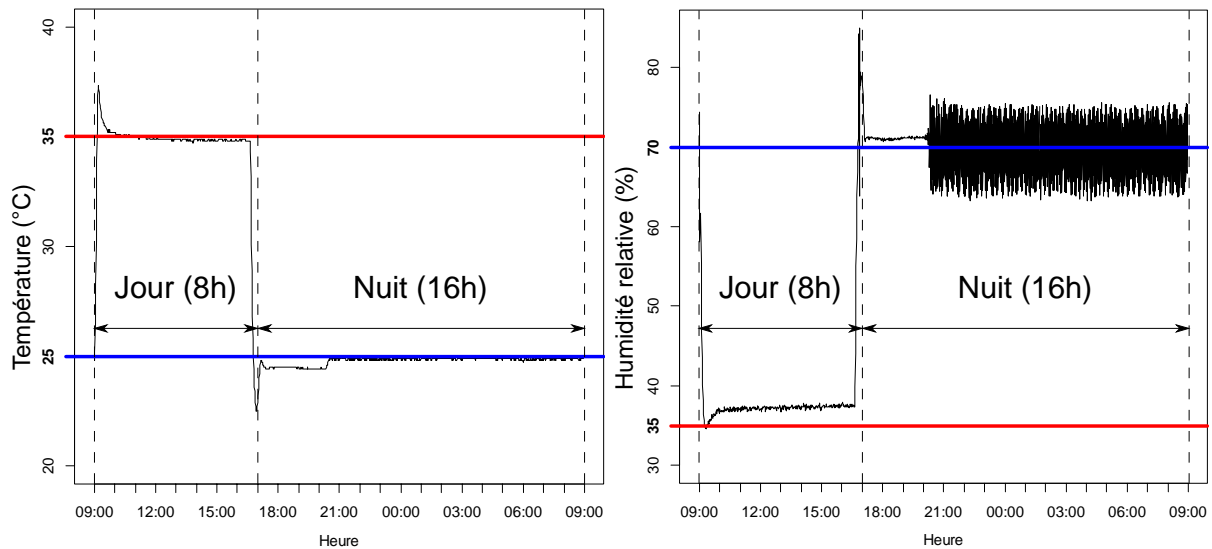


Figure 3 : Profil de la température (gauche) et de l'humidité relative (droite) dans l'enceinte climatique. Les droites rouge et bleue indiquent les consignes jour et nuit, respectivement.

#### 2.4. Indicateur de l'échauffement atmosphérique provoqué par les structures étudiées

Afin de quantifier l'impact de l'arrosage sur l'échauffement atmosphérique provoqué par les revêtements urbains, nous reprenons l'indicateur construit au préalable [9]. Celui-ci est construit par analogie avec le « degré-jour » utilisée dans le domaine du bâtiment pour quantifier un besoin de chauffage ou de rafraîchissement. Pour rappel, 1°C.h correspond à une heure pendant laquelle la surface de revêtement est un degré plus chaude que l'air ambiant. Supposant que le coefficient de convection est le même pour tout revêtement, cet indicateur est homogène à une énergie transférée à l'air par unité de surface de revêtement.

### 3. Résultats et discussion

Nous présentons les températures de surface dans un premier temps, suivi d'une analyse de l'impact de l'arrosage sur l'échauffement atmosphérique dû au revêtement.

### 3.1. Température de surface

La Figure 4 illustre l'évolution de la température de surface de l'échantillon avec (en bleu) et sans arrosage (en rouge).

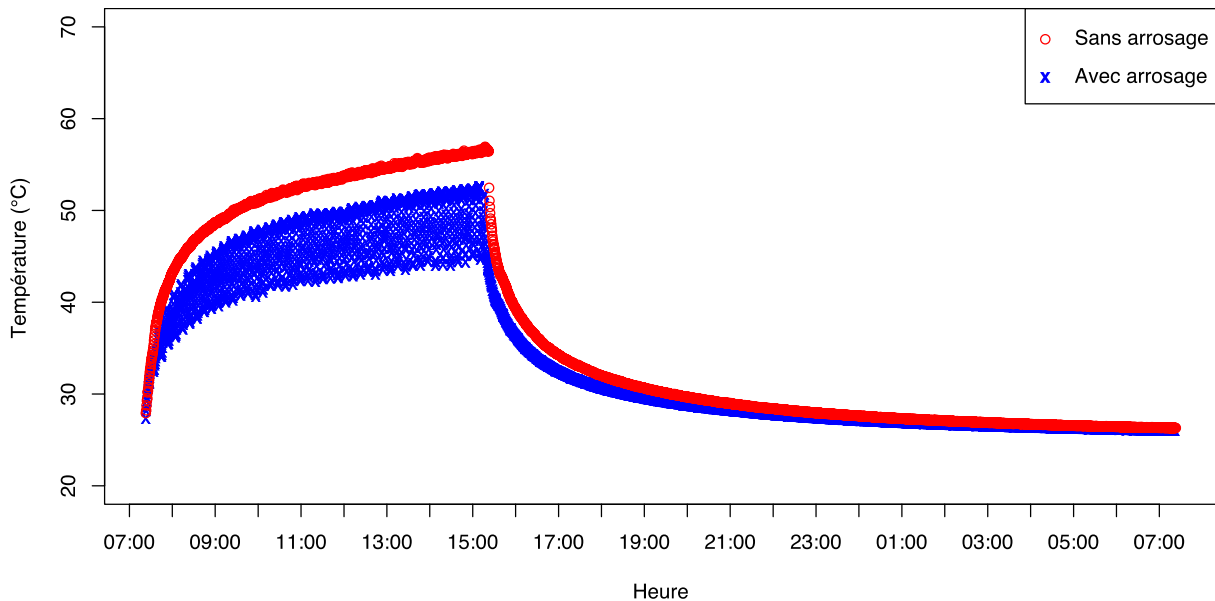


Figure 4 : Température de surface avec (bleu) et sans (rouge) arrosage

En comparant les deux profils de température, l'impact de l'arrosage est clairement identifiable avec un écart de température atteignant les  $4,7^{\circ}\text{C}$  en fin de période diurne. La nuit, on remarque une légère réduction de température par rapport à l'essai sans arrosage.

Pendant la journée, des variations de température sont observées pour l'essai avec arrosage. Il s'agit de pics de températures qui correspondent aux déclenchements des cycles d'arrosage toutes les dix minutes. Des pics similaires avaient déjà été observés pendant les essais in situ [6]. Ils sont indicatifs du séchage du support entre deux arrosages. Les arrosages provoquent donc de brusques chutes de la température de surface de plusieurs degrés, atteignant jusqu'à  $5,9^{\circ}\text{C}$  lors de l'essai illustré à la Figure 4.

Bien que l'arrosage soit sous-dimensionné, le rafraîchissement obtenu en journée est satisfaisant au regard de celui observé sur le terrain pendant les campagnes d'arrosage menées à Paris pendant l'été 2013 [6]. En effet, juste après les cycles d'arrosage, l'échantillon arrosé est jusqu'à  $10^{\circ}\text{C}$  plus frais qu'en l'absence d'arrosage, du même ordre que les  $13^{\circ}\text{C}$  observés sur le terrain [6].

Nous pouvons en conclure que l'expérimentation de laboratoire mise en œuvre ici reproduit bien au moins une partie des phénomènes que l'on souhaite étudier malgré des conditions très différentes de la réalité. Un arrosage un peu plus abondant devrait permettre de mieux reproduire les observations du terrain.

On se propose à présent de quantifier l'impact de l'arrosage sur l'échauffement atmosphérique provoqué par le revêtement.

### 3.2. Echauffement atmosphérique

On s'intéresse à présent à l'impact de l'arrosage sur la contribution à l'échauffement atmosphérique du revêtement de chaussée étudié. La Figure 5 illustre cette contribution avec et sans arrosage en utilisant l'indicateur défini au paragraphe 2.4.

L'impact de l'arrosage est clair et permet de réduire les échanges convectifs quotidiens de 31%, principalement grâce à son impact sur l'échauffement diurne qui est réduit de 39%. L'impact sur l'échauffement nocturne se traduit par une réduction de 17%. Globalement, ces résultats sont en accord avec les observations du terrain.

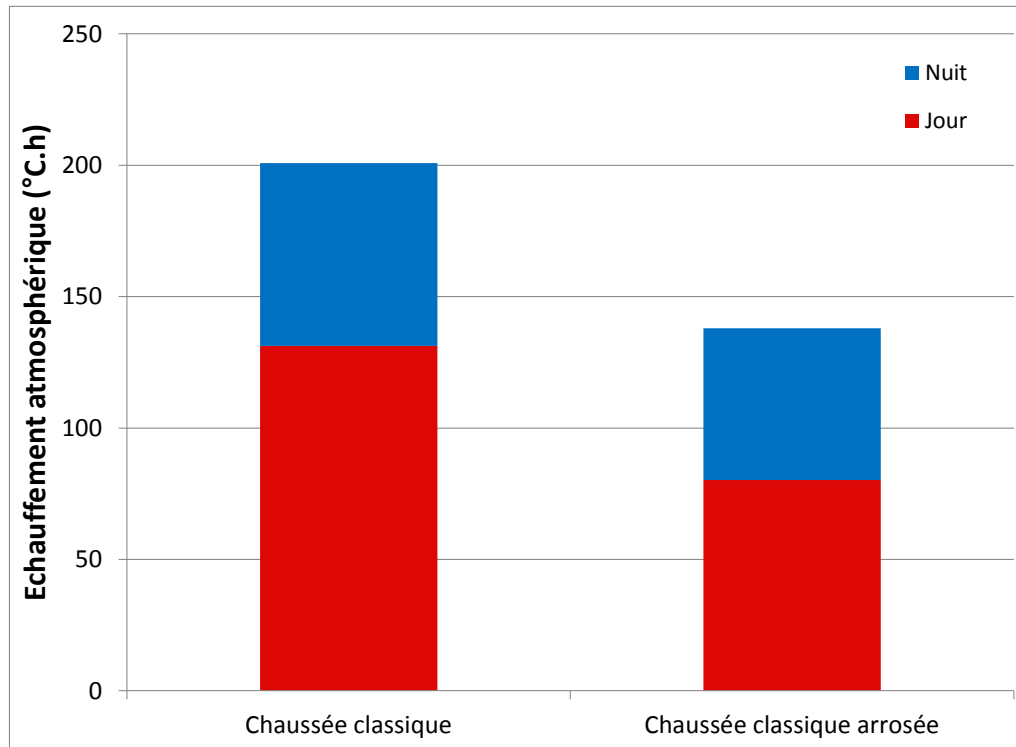


Figure 5 : Contribution à l'échauffement atmosphérique par le revêtement avec (droite) et sans (gauche) arrosage

## 4. Conclusion

Une expérimentation en laboratoire d'arrosage d'un revêtement urbain de chaussée soumis à des conditions caniculaires a été effectuée. Les premiers résultats sont en bon accord avec les observations *in situ* réalisées pendant des essais menés à Paris en 2013, validant au moins partiellement le protocole expérimental présenté ici. Nous avons ensuite quantifié l'impact de l'arrosage sur l'échauffement atmosphérique provoqué par le revêtement de chaussée classique.

D'autres aspects, notamment la bonne reproduction des flux de chaleur et de la capacité de rétention et d'évaporation de l'expérience seront également validés par la suite. L'expérience va aussi pouvoir être poursuivie avec d'autres revêtements afin de quantifier l'impact et l'intérêt de leur arrosage. Ces résultats permettront de guider les choix stratégiques des gestionnaires urbains cherchant à concevoir une stratégie d'arrosage urbain pour Paris ou d'autres villes.

## Références

- [1] M. Santamouris, A. Synnefa, and T. Karlessi, “Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 12, pp. 3085–3102, 2011.
- [2] M. Hendel, M. Colombert, Y. Diab, and L. Royon, “Effets thermiques de l’arrosage de l’espace public comme moyen d’adaptation au changement climatique,” in *Congrès Français de Thermique 2014 : Approches Multi-échelles*, 2014.
- [3] J.-M. Robine, S. L. K. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J.-P. Michel, and F. R. Herrmann, “Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003.,” *C. R. Biol.*, vol. 331, no. 2, pp. 171–178, Feb. 2008.
- [4] M. Hendel, M. Colombert, Y. Diab, and L. Royon, “An analysis of pavement heat flux to optimize the water efficiency of a pavement-watering method,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 78, pp. 658–669, Mar. 2015.
- [5] M. Hendel and L. Royon, “The effect of pavement-watering on subsurface pavement temperatures,” *Urban Clim.*, vol. 14, pp. 650–654, Dec. 2015.
- [6] M. Hendel, M. Colombert, Y. Diab, and L. Royon, “Improving a pavement-watering method on the basis of pavement surface temperature measurements,” *Urban Clim.*, vol. 10, no. December, pp. 189–200, Dec. 2014.
- [7] M. Hendel, P. Gutierrez, M. Colombert, Y. Diab, and L. Royon, “Measuring the Effects of UHI Mitigation in the Field: Application to the Case of Pavement-Watering in Paris,” *Urban Clim.*, no. Accepted, 2016.
- [8] M. Hendel, A. Grados, M. Colombert, Y. Diab, and L. Royon, “Comparaison des matériaux de l’espace public parisien : caractérisation de la contribution aux îlots de chaleur urbains,” in *XIIIe Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes*, 2015
- [9] M. Hendel, A. Grados, M. Colombert, Y. Diab, and L. Royon, “Quel est le meilleur revêtement pour limiter la formation des îlots de chaleur urbains ?,” in *Congrès Français de Thermique 2015 : La Thermique de l’Habitat et de la Ville*, 2015.
- [10] M. Hendel, A. Grados, M. Colombert, Y. Diab, and L. Royon, “Characterization of the behavior of watered urban materials,” in *ICUC9 & 12th Symposium on Urban Environment*, 2015.
- [11] R. Levinson, H. Akbari, and J. C. Reilly, “Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 7, pp. 2591–2605, Jul. 2007.

## Remerciements

Cette étude a été financée par l’Atelier Parisien d’Urbanisme (APUR) et par le Service Technique de l’Eau et de l’Assainissement (STEA) de la Ville de Paris. Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude au Laboratoire d’Essai des Matériaux de la Ville de Paris (LEM VP) pour la mise à disposition de son matériel et de son expertise en rapport avec les revêtements parisiens.