

Rafrâichissement de revêtements urbains par arrosage

Sophie PARISON^{1,2,3*}, Martin HENDEL³, Arnaud GRADOS⁴, Kristine JURSKI⁴, Laurent ROYON³

¹Mairie de Paris, Service Technique de l'Eau et de l'Assainissement, F-75014, Paris, France

²Mairie de Paris, Laboratoire d'Essai des Matériaux, F-75014, Paris, France

³Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, LIED, UMR 8236, CNRS, F-75013, Paris, France

⁴Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, MSC, UMR 7057, CNRS, F-75013, Paris, France

*(auteur correspondant : sophie.parison@paris.fr)

Résumé - Les revêtements des villes, de par leur forte propension à absorber la chaleur et leur forte inertie thermique, contribuent largement à la formation d'îlots de chaleur urbains. Dans l'optique de limiter leur impact néfaste sur le confort thermique du piéton, nous proposons une expérimentation permettant l'étude du comportement thermo-climatique de revêtements de voirie ainsi que la quantification du potentiel rafraîchissant de l'arrosage de leur surface en conditions de canicule. Par ce procédé, des effets rafraîchissants maximaux de 9°C ont été observés pour les différents revêtements. L'emploi de peinture thermo-chromique appliquée sur un trottoir asphalté montre une diminution maximale de la température de surface de 5°C. Enfin, entre le matériau le plus chaud non arrosé et le matériau le plus frais arrosé, une différence maximale de 16,5°C est constatée en surface. Ces réductions de la température de surface se traduisent par des impacts climatiques qui sont quantifiés et discutés.

Nomenclature

<i>BBM</i>	béton bitumineux mince	<i>MTLHR</i>	matériaux traités au liant
<i>EME</i>	enrobé à module élevé	hydraulique	
		<i>IR</i>	infrarouge

1. Introduction

Les revêtements des villes, de par leur forte propension à absorber la chaleur et leur forte inertie thermique, contribuent largement à la formation d'îlots de chaleur urbains [1], [2], qui peuvent engendrer de graves conséquences sanitaires lors de vagues de chaleur [3].

Afin d'atténuer l'impact des matériaux urbains, la Ville de Paris s'intéresse à l'emploi de différentes stratégies de rafraîchissement, comme l'arrosage des sols en périodes de canicule [4] ou la modification de leurs propriétés thermiques, méthode qui constitue un levier intéressant de lutte passive contre le phénomène d'îlots de chaleur.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre étude qui s'intéresse au comportement de la structure globale de revêtements typiquement employés sur les voiries parisiennes. Les travaux existants sur le sujet se sont focalisés uniquement sur les couches de surface, sans tenir compte de la superposition de couches de différents matériaux [5], [6].

Des travaux préalables ont permis de développer une expérimentation qui permettait d'étudier le comportement thermo-climatique d'échantillons de voirie en conditions de canicule [7], [8], [9]. On propose à présent d'utiliser le même dispositif avec un système d'arrosage pour étudier l'impact du dépôt d'un film d'eau sur ces mêmes revêtements.

2. Matériels et méthodes

2.1. Echantillons de revêtements étudiés

Cinq échantillons de revêtements couramment employés à Paris, représentés à la Figure 1, ainsi que l'emploi de peinture thermo-chromique sur trottoir asphalté, ont été testés. La chaussée classique et le trottoir asphalté sont des revêtements minéraux noirs, le stabilisé et le trottoir granit sont des revêtements minéraux clairs tandis que le gazon est le seul revêtement végétal. La peinture thermo-chromique utilisée, développée sur demande par la société MCI technologie, présente une température de transition à 29°C. De vert sombre pour $T < 29^\circ\text{C}$, elle devient réfléchissante au-delà de ce seuil. Celle-ci permet ainsi de bénéficier des apports solaires en hiver et en intersaison tout en limitant l'échauffement atmosphérique en été par un albédo plus élevé.

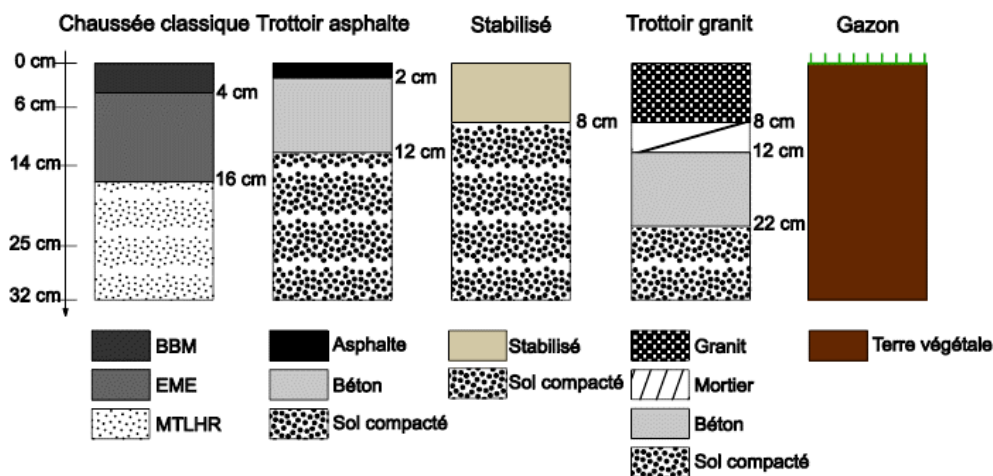


Figure 1 : Structure et composition des revêtements étudiés

Le Tableau 1 présente les valeurs d'albédo et d'émissivité de chacune de ces structures. L'émissivité est obtenue par caméra IR avec un corps de référence, tandis que les albédos sont obtenus selon la méthode de Hendel et al. [8]. Ces derniers sont calculés à partir de la répartition spectrale réelle de la lampe halogène (cf. Tableau 2).

	<i>Chaussée classique</i>	<i>Trottoir asphalté</i>	<i>Stabilisé</i>	<i>Trottoir granit</i>	<i>Gazon</i>	<i>Peinture réfléchissante</i>
Albédo	0.098	0.155	0.369	0.313	0.25	0.238
Emissivité	0.99	0.93	0.91	0.99	0.98	0.97

Tableau 1 : Valeurs d'albédos et d'émissivités des échantillons

2.2. Protocole expérimental

Les échantillons, de forme cylindrique (16 cm de diamètre pour 32 cm de hauteur), sont entourés d'une couche isolante de 5 cm composée de mousse polyuréthane expansée et placés dans une enceinte climatique reproduisant des conditions similaires à celles observées pendant une canicule parisienne. Des capteurs de flux et température (Captec) sont insérés aux différentes interfaces des couches successives de matériaux. Les essais sont réalisés sur 48h, avec un premier cycle de 24h sans arrosage, puis, un second cycle de 24h avec arrosage. Chaque cycle est constitué de deux phases consécutives : une phase diurne de 8h, avec ensoleillement artificiel assuré par une lampe halogène, et une phase nocturne de 16h, sans ensoleillement. La température et l'humidité de l'air sont fixées respectivement à 35°C et

35% le jour et à 25°C et 70% la nuit. Le protocole d'arrosage est entièrement programmable. Enfin, l'évolution des températures est observée à différentes profondeurs grâce à des capteurs intégrés aux échantillons. Le Tableau 2 résume les caractéristiques du cycle climatique.

Phase	<i>Diurne</i>	<i>Nocturne</i>
Durée	8h	16h
Température de l'air	35°C	25°C
Humidité relative	35%	70%
Rayonnement solaire (0,3-3 μm)	1 250 W/m ²	0 W/m ²
Rayonnement IR (3-100 μm)	190 W/m ²	430 W/m ²

Tableau 2 : Conditions climatiques de consigne pour phases diurne et nocturne

2.3. Indicateur de l'échauffement atmosphérique engendré par les revêtements étudiés

Lorsque que les revêtements employés en milieu urbain sont plus chauds que l'air ambiant, ils sont susceptibles d'aggraver les effets des canicules en augmentant la température atmosphérique. Afin de quantifier la propension des structures à contribuer à l'échauffement atmosphérique en phases diurne et nocturne, l'indicateur de « degré-heure » développé dans la première phase d'étude est employé [7], par analogie avec le domaine du bâtiment et l'unité « degré-jour ». Ainsi construit, on comptabilise 1°C.h lorsque la surface de notre échantillon est plus chaude de 1°C que la température de l'air de l'enceinte pendant une heure. Ayant supposé que le coefficient de convection est identique pour toutes les structures, cet indicateur est proportionnel à une énergie transférée à l'air par unité de surface de revêtement.

3. Résultats

3.1. Température de surface

3.1.1. Sans arrosage

La Figure 2 présente l'évolution de la température de surface des échantillons durant un cycle jour-nuit complet de 24h.

Le comportement thermo-climatique des revêtements subissant un cycle sans arrosage a été quantifié et discuté lors de la Phase 1 de l'étude [7]. Par rapport à cette première phase, le comportement du trottoir thermosensible ainsi que du gazon non humide a pu être étudié.

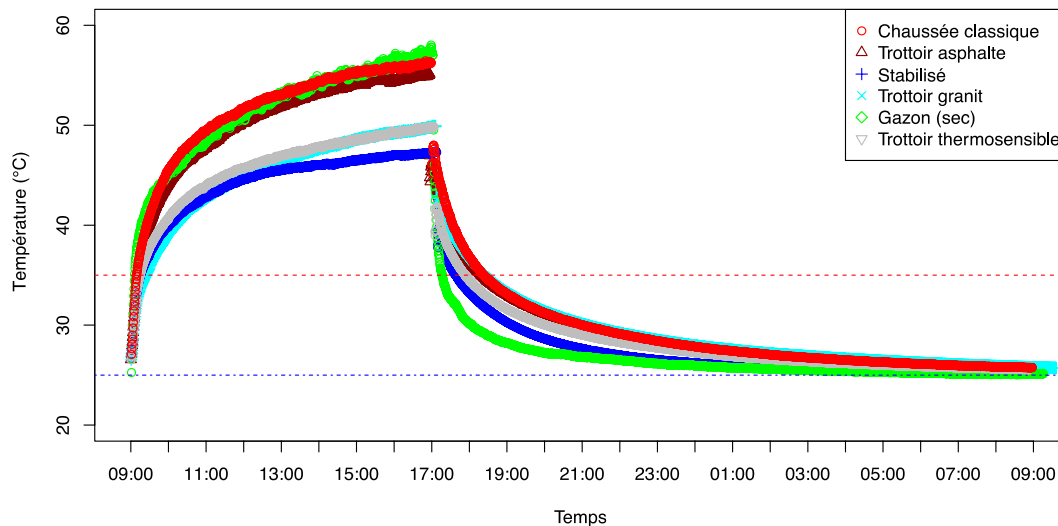


Figure 2 : Evolution des températures de surface durant un cycle climatique (heures)

Pour rappel, dans les travaux précédents de la Phase 1, on constatait qu'en phase diurne les structures sombres (chaussée classique et trottoir asphalté) formaient une catégorie de matériaux dits « chauds », tandis que les structures plus claires (stabilisé, trottoir granit et trottoir asphalté thermosensible) formaient une catégorie de matériaux dits « frais ». Sur la Figure 2 on constate que ce classement reste valable, sauf pour le gazon.

Ici, le gazon, faiblement arrosé avant le début de l'essai, est en situation de stress hydrique ce qui empêche toute évapotranspiration. Par conséquent, on constate que ce dernier s'échauffe très vite, excédant même la température de la chaussée classique ou du trottoir asphalté en fin de phase diurne, ce qui s'explique d'une part par l'arrêt de l'évapotranspiration et, d'autre part, par la chute de la capacité calorifique de la terre végétale une fois desséchée. Cet essai illustre donc très bien l'impact positif de l'évapotranspiration et souligne bien la nécessité de bien irriguer les végétaux en milieu urbain.

En gris, le trottoir asphalté avec peinture thermo-chromique a un comportement très similaire à celui du trottoir granit. L'emploi de peinture thermosensible a ainsi permis la réduction de la température de surface de 5°C par rapport au trottoir asphalté non peint. Toutes choses étant égales par ailleurs, ce résultat est dû à l'impact du changement d'albédo de la peinture lorsqu'elle dépasse les 29°C, soit dès les premières minutes de l'essai.

3.1.2. Avec arrosage

On s'intéresse à présent à l'impact de l'arrosage sur ces échantillons, ce qui n'avait pas été étudié lors de la Phase 1 de l'étude. La Figure 3 illustre l'évolution des températures de surface sans et avec arrosage pour chaque échantillon. L'arrosage est effectué toutes les cinq minutes.

En phase diurne, l'impact de l'arrosage se manifeste par la présence de fortes fluctuations sur la température de surface, qui croît globalement. Ces fluctuations sont dues à l'alternance des processus d'évaporation et de séchage. L'évaporation de la fine couche d'eau projetée sur la surface de l'échantillon provoque une diminution brutale de la température (pouvant atteindre jusqu'à 5,5°C), qui remonte ensuite brutalement lorsque la surface est sèche.

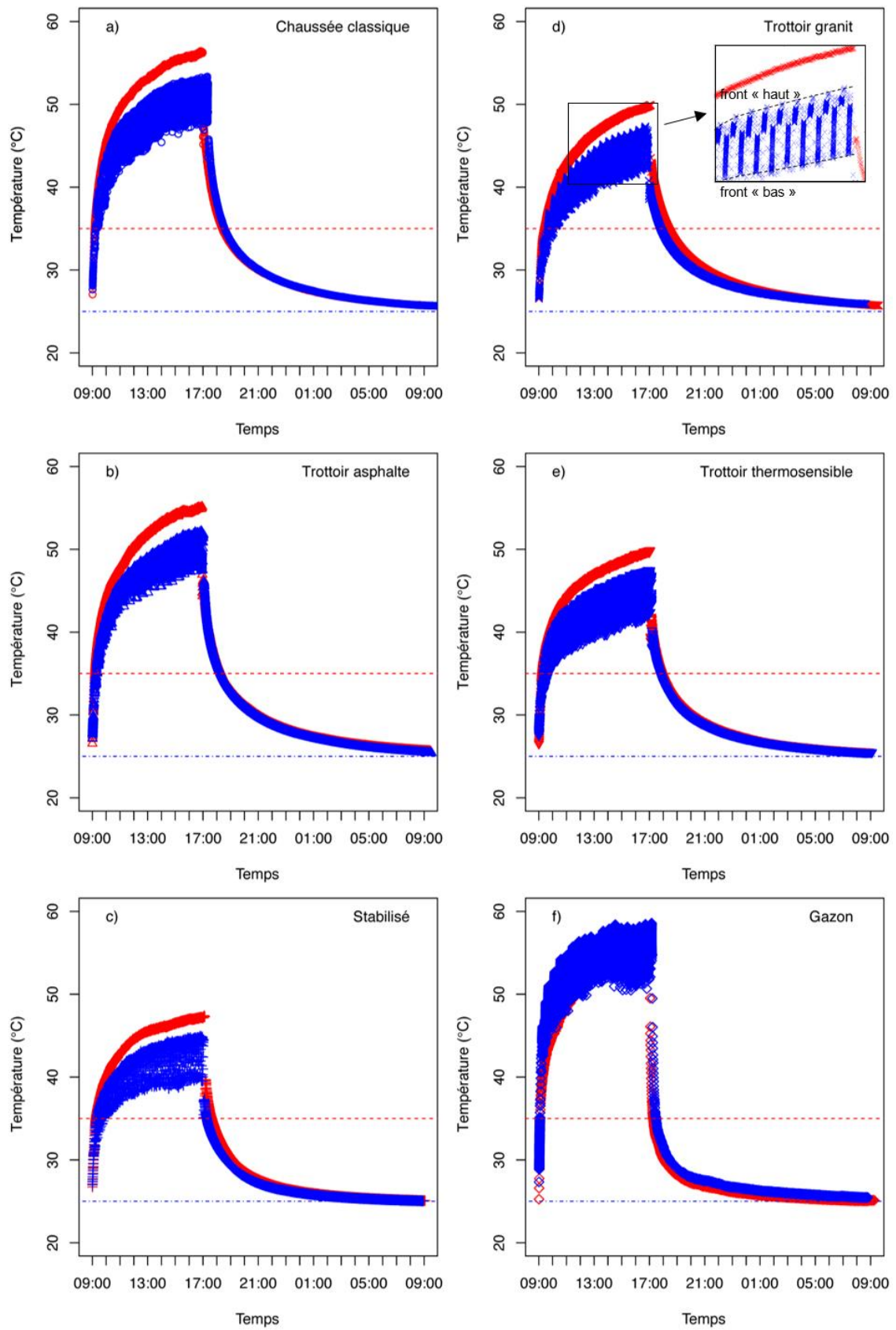


Figure 3 : Evolution des températures de surface sans (rouge) et avec (bleu) arrosage pour tous les échantillons : a) Chaussée classique, b) trottoir asphalte, c) stabilisé, d) trottoir granit, e) trottoir thermosensible et f) gazon

La présence de ces pics montre que la fréquence d'arrosage peut être encore optimisée. A partir de ces essais, il est pour autant possible d'estimer l'effet maximal de l'arrosage en s'intéressant à la réduction maximale de température avec arrosage (nommée front « bas » sur la Figure 3d), qui tend vers la température idéale que l'on pourrait obtenir si le revêtement ne séchait pas, toutes choses égales par ailleurs.

L'échantillon de gazon, s'est manifestement complètement desséché entre les deux cycles consécutifs sans et avec arrosage, ce qui signifie que l'apport en eau durant cette seconde phase n'a pas été suffisant pour raviver son effet rafraîchissant. Exception faite de cette structure, le Tableau 3 résume les réductions moyennes (nommée front « haut » sur la Figure 3d) et maximale (front bas) de température observées en fin de phase diurne suite à l'arrosage.

Structure	ΔT (moy) (°C)	ΔT (max) (°C)
Chaussée classique	3,0	9,1
Trottoir asphalte	3,0	7,7
Stabilisé	2,5	7,8
Trottoir granit	3,2	7,8
Trottoir thermosensible	2,5	8,1

Tableau 3 : Réduction de la température de surface suite à l'arrosage pour les profils « haut » et « bas »

Ainsi, les effets moyens de l'arrosage se traduisent par une réduction de l'ordre de 3°C quel que soit l'échantillon de revêtement considéré, tandis que les effets maximaux atteignent les 8° à 9°C environ. Notons que le rafraîchissant maximal est observé pour la chaussée classique, structure qui atteint la plus forte valeur de température en fin de phase diurne lors d'un essai sans arrosage. En phase nocturne, on ne constate qu'une légère réduction des températures par rapport aux essais sans arrosage, bien moins importante que celle observée lors d'essais *in situ* conduits à Paris [10]. Cela est attribué à la stratégie non optimale d'arrosage ainsi qu'à la chaleur accumulée pendant la phase sans arrosage qui a précédé les essais avec arrosage.

3.2. Echauffement atmosphérique

On se propose à présent de quantifier l'impact de l'arrosage sur l'échauffement atmosphérique provoqué par les revêtements. Les réductions de température de surface qui viennent d'être décrites ont un impact direct sur l'échauffement atmosphérique provoqué par les revêtements étudiés. La Figure 4 illustre cet indicateur pour chaque échantillon avec et sans arrosage.

Sans arrosage, le classement du matériau « le plus chaud » au « plus frais » est le même que celui établi à partir des températures de surfaces dans le paragraphe 3.1.1. La forte ressemblance de comportement entre les températures de surface des trottoirs granit et thermosensible est également observée sur l'indicateur d'échauffement atmosphérique, avec un léger avantage pour le thermosensible, en terme d'impact sur l'échauffement.

On remarque également que le traitement à la peinture thermosensible du trottoir asphalte a principalement un effet sur ses performances diurnes relativement à l'échantillon non peint, ce qui est dû à l'augmentation de l'albédo de la structure peinte.

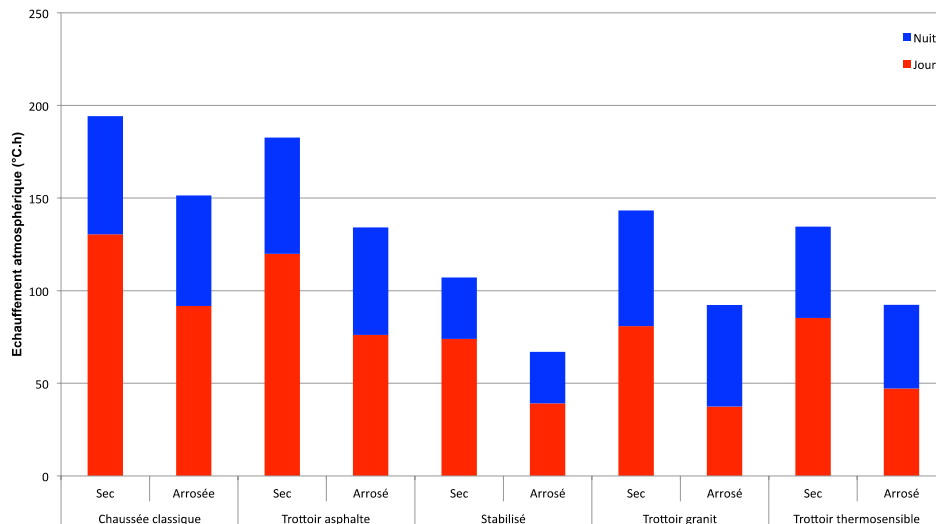


Figure 4 : Contribution à l'échauffement atmosphérique par le revêtement avec (droite) et sans (gauche) arrosage

L'impact rafraîchissant de l'arrosage est très clair. Les échanges convectifs journaliers sont réduits entre 22% et 37% selon l'échantillon. Cette réduction, calculée en se basant sur la réduction d'échauffement atmosphérique observée entre un essai sans arrosage et un essai avec arrosage, est principalement due à celle de l'impact diurne qui est réduit de 30% à 54%, alors que l'impact sur l'échauffement nocturne est diminué entre 7% et 16%.

Selon cet indicateur, les échantillons pour lesquels l'arrosage de la surface est le plus bénéfique sont les trottoirs asphalte et granit. Il serait tentant de corrélérer cela avec leur forte inertie thermique, mais le trottoir thermosensible, qui partage pourtant cette caractéristique, n'est pas impacté de la même façon par l'arrosage. Il se peut que cela soit dû à la combinaison de l'augmentation de son albédo et de l'arrosage urbain, qui limite ainsi l'impact de l'arrosage seul. Finalement, en arrosant, le classement initial est toujours conservé : le stabilisé est la structure ayant le moins d'impact sur l'échauffement atmosphérique, suivi des trottoirs granit et thermosensible, équivalents, puis du trottoir asphalte et de la chaussée classique.

4. Conclusion et perspectives

Cinq échantillons de revêtements de voirie couramment mis en œuvre sur l'espace public parisien ont été soumis à des conditions caniculaires en laboratoire. L'expérimentation réalisée a permis l'étude du comportement thermo-climatique de ces structures ainsi que de l'effet de l'emploi d'une peinture thermosensible et de l'arrosage urbain.

Dans un premier temps, le comportement thermo-climatique des structures étudiées a été caractérisé. Cette étude a permis de souligner l'importance de l'albédo des matériaux et de l'évapotranspiration des végétaux. Pour autant, l'influence des sous-couches en béton, qui augmente la conductivité et l'inertie thermique globale des revêtements, a également pu être mise en avant. Par ailleurs, le trottoir asphalte traité avec une peinture thermosensible réfléchissante au-delà de 29°C a permis de réduire la température de surface jusqu'à 5°C au regard de la structure non traitée.

Dans un deuxième temps, des essais d'arrosage ont été effectués sur ces mêmes revêtements. Globalement, les réductions de température dues à l'arrosage se révèlent être similaires pour tous les revêtements et sont comprises entre 8° et 9°C. Ces effets se traduisent par une forte réduction de la contribution à l'échauffement atmosphérique des revêtements, comprise entre 22% à 37%. Finalement, entre la structure la plus « fraîche », à savoir le

stabilisé arrosé, et la plus « chaude », à savoir la chaussée sèche, un écart maximal de 16,5°C est constaté. Par ailleurs, bien que l'on constate que l'arrosage reste plus efficace que l'usage seul de peinture thermosensible la combinaison de ces deux procédés a permis d'obtenir le rafraîchissement maximal, avec une réduction de la température de surface atteignant 13°C et de l'échauffement atmosphérique de 60%.

Dans un souci de limitation de l'échauffement atmosphérique provoqué par les revêtements, il est essentiel de réduire le rayonnement absorbé sous forme de chaleur sensible par la couche de surface. Agrégats réfléchissants, incorporation de matériaux à changement de phase ou rétention d'eau constituent des solutions intéressantes de modification des propriétés de la couche de surface. Augmenter la performance de l'arrosage urbain par l'utilisation de revêtements perméables et/ou à rétention d'eau est également une piste pertinente. Ils devraient en effet permettre de réduire la fréquence d'arrosage grâce à une augmentation de la quantité d'eau apportée tout en évitant son ruissellement vers les égouts.

Références

- [1] E. Erell, D. Pearlmutter, D. Boneh, and P. B. Kutiel, "Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons," *Urban Clim.*, Oct. 2013.
- [2] M. Santamouris, "Appropriate materials for the urban environment," in *Energy and Climate in the Urban Built Environment*, M. Santamouris, Ed. 2001.
- [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, "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.
- [5] T. Asaeda, V. T. Ca, and A. Wake, "Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere," *Atmos. Environ.*, vol. 30, no. 3, pp. 413–427, Feb. 1996.
- [6] T. Ueno and K. Tamaoki, "Thermal Characteristics of Urban Land Cover by Indoor Lamp-Irradiation Experiment," in *The Seventh International Conference on Urban Climate*, 2009, no. July, pp. 1–4.
- [7] M. Hendel, A. Grados, M. Colombert, Y. Diab, L. Royon, *Quel est le meilleur revêtement pour limiter la formation des îlots de chaleur urbains ?* Congrès SFT, 2015a
- [8] M. Hendel, A. Grados, M. Colombert, Y. Diab, L. Royon, *Comparaison des matériaux de l'espace public parisien : caractérisation de la contribution aux îlots de chaleur urbains*, CIFQ, 2015b
- [9] M. Hendel, A. Grados, L. Royon, *Caractérisation du comportement de revêtements urbains soumis à arrosage urbain*, Congrès SFT, 2016
- [10] 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.

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 termes de revêtements parisiens.