

Effets thermiques de l'arrosage de l'espace public comme moyen d'adaptation au changement climatique

Martin HENDEL^{1,2,3*}, Morgane COLOMBERT², Youssef DIAB², Laurent ROYON³

¹Mairie de Paris, Service Technique de l'Eau et de l'Assainissement
27, rue du Commandeur – 75014 Paris

²EIVP, Université Paris Est
80, rue Rébeval – 75019 Paris

³Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, Université Paris Diderot
10, rue Alice Domont et Léonie Duquet – 75013 Paris

* (auteur correspondant : martin.hendel@paris.fr)

Résumé - L'arrosage de l'espace public comme méthode de rafraîchissement des zones urbaines a été étudié à Paris pendant l'été 2013. La rue du Louvre a été instrumentée afin de suivre la température de surface de sa chaussée et le flux de chaleur à 5 cm de profondeur. Il est montré que l'arrosage réduit significativement ces paramètres et affecte la relation flux-ensoleillement mise en évidence. Des pistes d'amélioration de la méthode d'arrosage sont tirées de l'analyse des résultats expérimentaux.

Nomenclature

APUR atelier parisien d'urbanisme

ICU îlot de chaleur urbain

S, S' irradiances solaire, W/m^2

MRT température moyenne de rayonnement, °C

IBM moyenne de température sur 3 jours consécutifs, °C

G densité de flux conductif à 5 cm de profondeur, W/m^2

1. Introduction

L'arrosage de l'espace public comme méthode de rafraîchissement des zones urbaines est étudié au Japon depuis les années 1990 [1]–[4]. Cette technique y est d'abord vue comme un moyen de lutte contre l'îlot de chaleur urbain (ICU). En France, et notamment à Paris, le contexte d'augmentation en fréquence et en intensité des épisodes caniculaires due au changement climatique [5] et de forte sensibilité des villes denses à ces épisodes [6] en fait un outil potentiel d'adaptation au changement climatique.

La Ville de Paris s'est penchée sur la question de son adaptation au changement climatique en finançant le projet de recherche EPICEA [7] menée par Météo-France et le CSTB en partenariat avec l'APUR en 2008. Parmi d'autres solutions de rafraîchissement, l'arrosage de la voirie a été étudié. Suite à ces travaux, une étude expérimentale [8] a été conduite en 2012. Celle-ci a montré des réductions des températures apparentes de surface allant de 4 à 7°C.

Les quatre études japonaises citées précédemment se sont focalisées sur l'effet météorologique de la technique. Toutefois, trois d'entre elles [1]–[3] s'intéressent également à l'évolution des températures de surface, rapportant des effets similaires qu'à Paris [8], le rafraîchissement variant de 3° à 8°C pour Yamagata et al. [3] et dépassant les 10°C dans les travaux de Kinouchi et Kanda [1], [2].

Les flux conductifs au sein de la chaussée ont été peu étudiés. C'est pourtant par ce flux que l'énergie solaire est accumulée en profondeur par la chaussée. Mieux connaître l'effet de l'arrosage sur cette grandeur est donc important pour mieux comprendre les mécanismes d'amélioration du confort thermique en ville et de réduction des ICU. Kinouchi et Kanda montrent que le premier arrosage crée une forte rupture de tendance de ce flux pour un

revêtement classique [1] et rapportent un effet similaire à 5 cm de profondeur pour un revêtement perméable [2].

La Ville de Paris a poursuivi les expérimentations pendant l'été 2013. Cet article présente les résultats des essais menés sur la rue du Louvre (1^{er} et 2^e Arr.) les 8, 11, 16 et 22 juillet.

2. Matériels et méthodes

2.1. Sites et instrumentation

Les flux conductifs et les températures de surface ont été mesurés en continu rue du Louvre pendant l'été 2013 aux deux endroits indiqués sur la Figure 1.

Les mesures sont effectuées à l'heure d'été locale. L'ensemble des analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de la version 3.0.1 du logiciel libre de traitement statistique R.

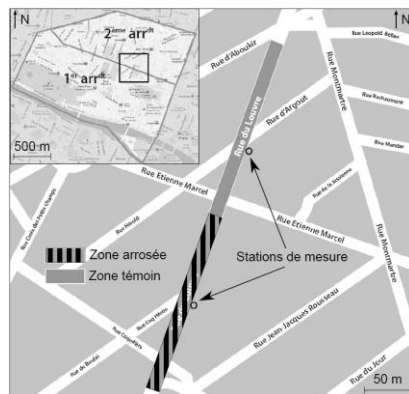


Figure 1 : Plan du site et positionnement des stations de mesure

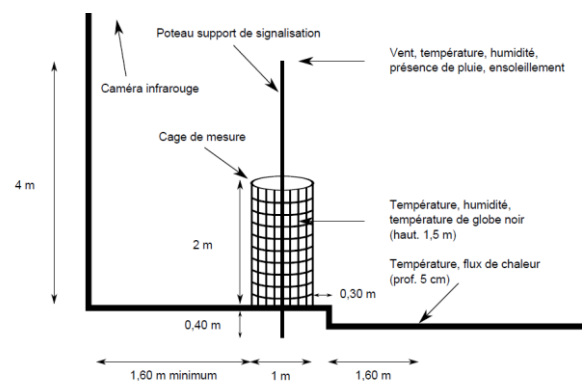


Figure 2 : Conception des stations de mesure installées rue du Louvre

Les stations ont été placées afin que l'environnement urbain de chacune soit le plus identique possible (morphologie, orientation, matériaux, trafic, etc.). Les températures de surface et les flux dans la chaussée sont mesurés par une station de mesure comprenant le matériel d'enregistrement, des instruments météorologiques et une alimentation électrique. Une cage a été utilisée pour protéger le matériel à hauteur d'homme. La Figure 2 présente un plan de ces stations. Les mesures sont enregistrées toutes les minutes.

La chaussée devant chaque station a été équipée d'un thermo-fluxmètre, placé à 5 cm de profondeur. La Figure 3 propose une vue en plan du dispositif instrumental.

Une caméra infrarouge Flir B400 a été posée sur la toiture-terrace du 46, rue du Louvre. Celle-ci a enregistré des clichés infrarouges et visibles toutes les 15 minutes le 8 juillet. Des campagnes mobiles les soirées des 16 et 22 juillet à l'aide d'une caméra Fluke TiR32 ont permis de comparer le site arrosé avec le site témoin.

Paramètre	Flir B400 (7,5-13 μm)	Fluke TiR32 (7,5-14 μm)
Emissivité de la chaussée	0,97	0,97
Température réfléchie	Température moyenne de rayonnement (MRT)	
Température de l'air	Température de l'air à 1,5 m	
Humidité relative	Humidité relative à 1,5 m	Non disponible
Distance à la cible	20 m	

Tableau 1 : Corrections appliquées aux températures apparentes enregistrées par les caméras IR.

Ces clichés ont été utilisés pour estimer la température de surface de la chaussée. Les corrections du Tableau 1 ont été appliquées aux températures apparentes. L'émissivité a été obtenue par la méthode du corps noir de référence [9], ici un adhésif d'émissivité 0,95. Les thermographies ont été réalisées avec un angle compris entre 0° et 60° à la verticale, l'émissivité est considérée comme isotrope pour cet intervalle. L'albédo n'a pas été mesuré.

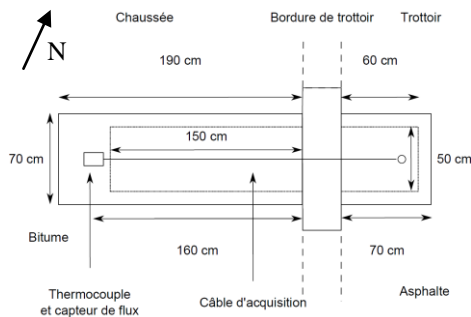


Figure 3 : Vue en plan du capteur de chaussée

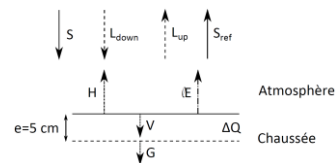


Figure 4 : Modélisation des flux entrants et sortants à la surface de la chaussée

2.2. Modélisation des échanges thermiques

La Figure 4 est une modélisation des échanges thermiques à la surface de la chaussée, adaptée des travaux de Kinouchi et Kanda [2]. Les densités de flux conductif à la surface et à 5 cm de profondeur sont respectivement notées V et G . ΔQ , égal à la différence entre V et G , correspond à une densité de flux de stockage de chaleur par la couche supérieure de chaussée. Ainsi orienté, un stockage de chaleur en deçà de 5 cm de profondeur se traduit par une valeur positive de G , alors qu'une restitution de chaleur vers l'atmosphère correspond à G négatif.

S et S' sont les irradiances solaires reçues respectivement par la surface de la chaussée et le pyranomètre. S_{ref} est le rayonnement visible réfléchi par la chaussée. L_{down} est le rayonnement infrarouge reçu par la chaussée, tandis que L_{up} est le rayonnement infrarouge émis par celle-ci, capté et interprété par les caméras IR. Le bitume utilisé est assimilé à un corps gris.

2.3. Méthode d'arrosage

L'arrosage était déclenché si certaines conditions météorologiques étaient annoncées à trois jours par Météo-France. Quatre seuils devaient être atteints : 1) $IBM_{Min} > 16^\circ C$, 2) $IBM_{Max} > 25^\circ C$, 3) vitesse du vent inférieure à 10 km/h et 4) ciel non couvert. A Paris, l'alerte canicule est déclenchée pour des IBM_{Min} et IBM_{Max} supérieurs à 21° et $31^\circ C$, respectivement.

L'aspersion d'eau était assurée par des laveuses de rue qui apportaient environ $1 L/m^2$ toutes les heures entre 6h30 et 11h30 et toutes les 30 minutes (45 minutes le 8 juillet) de 14h à 18h30 sur le trottoir et la chaussée. Cette quantité d'eau était excédentaire et provoquait un ruissellement vers l'égout. Les horaires de passage exacts étaient notés par les chauffeurs. L'eau utilisée pour ces essais est issue du réseau d'eau non potable de la Ville de Paris. Ce réseau est considéré comme très prometteur pour le développement durable de Paris [10].

3. Résultats et discussion

3.1. Températures de surface

Les températures de surface de deux zones équivalentes de la chaussée, l'une arrosée, l'autre servant de témoin sec, ont été étudiées le soir, quelques heures après la fin de l'arrosage. Les données collectées sont présentées aux Figures 6 et 7. Les arrosages sont

représentés par une droite verticale en pointillés. Les mesures effectuées par la caméra Flir posée en toiture sont représentées par la série de (x). Les (o) et (+) représentent les mesures par la caméra Fluke dans les zones témoin et arrosée, respectivement. En plus des mesures brutes, la droite des moindres carrés a également été tracée pour les deux séries Fluke.

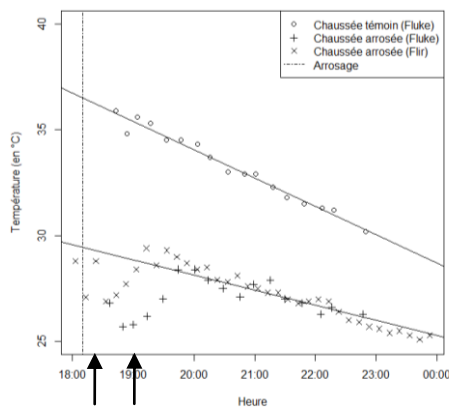


Figure 6 : Températures apparentes corrigées de la chaussée le soir du 16/07

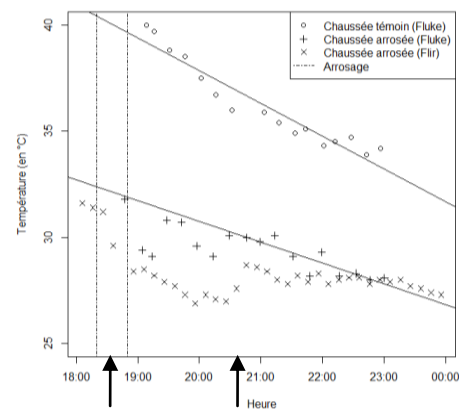


Figure 7 : Températures apparentes corrigées de la chaussée le soir du 22/07

Le dernier arrosage a eu lieu à 18h10 le 16 juillet, tandis qu'il a eu lieu à 18h50 le 22 juillet. Toutes les mesures Fluke ont été réalisées sur des zones ombragées, tandis que ce n'est pas le cas des mesures Flir avant 18h30.

Des sauts dans les températures apparentes sont visibles pour les données Flir entre 18h et 21h pour les deux journées. Ces événements sont soulignés par des flèches sur l'axe des abscisses. L'amplitude de ces sauts est d'environ 3°C le 16 juillet et de 2°C le 22 juillet. Ils coïncident avec la forte variabilité visible dans les données Fluke obtenues avant 19h30 et 20h30 les 16 et 22 juillet, respectivement.

Ces deux transitions correspondent respectivement au passage à l'ombre et au séchage de la zone de mesure. Il se peut qu'elles soient également dues à une lacune dans les corrections appliquées aux températures apparentes. Il a donc été décidé de ne pas tenir compte des données récoltées avant 19h30 le 16 juillet et avant 20h30 le 22 juillet pour les régressions linéaires. En revanche, la série témoin n'a pas été tronquée.

Le Tableau 2 résume les paramètres de régression linéaire des températures de chaussée. Etant donné le nombre de degrés de liberté, le test de nullité de Student montre que les corrélations trouvées sont significatives avec un niveau de confiance d'au moins 99,9%.

Paramètre	16 juillet 2013		22 juillet 2013	
	Zone témoin	Zone arrosée	Zone témoin	Zone arrosée
Pente	-1,33 K/h	-0,71 K/h	-1,54 K/h	-0,98 K/h
R ²	0,9759	0,8262	0,6052	0,7844

Tableau 2 : Paramètres de la régression linéaire

Sur la période d'étude, les températures de surface des zones témoins diminuent donc près de deux fois plus rapidement que dans les zones arrosées avec une différence au moment du séchage du support de 7,5°C à 19h30 le 16 juillet. Le 22 juillet, sensiblement plus chaud que le 16 juillet, la zone témoin se rafraîchit près de 60% plus rapidement que la zone arrosée, avec une différence au moment du séchage de 6°C à 20h30. L'arrosage au long de la journée réduit donc non seulement les températures de surface, mais aussi la vitesse de restitution de

la chaleur emmagasinée par la chaussée. Cela devrait se répercuter sur le confort des piétons. Des mesures de flux devraient permettre de confirmer ou d’infirmer cette dernière conclusion.

3.2. Densité de flux de chaleur

G et S' ont été mesurés en continu pendant toute la durée de l’été. Les Figures 7 et 8 illustrent ces deux grandeurs pour les 8 et 11 juillet, journées avec et sans arrosage respectivement. Pour chacun de ces graphiques, la courbe des (---) représente les mesures du 11 juillet, tandis que celle des (- - -) représente celles du 8. Les verticales en pointillés sur la Figure 7 indiquent les arrosages de la chaussée directement au-dessus du capteur.

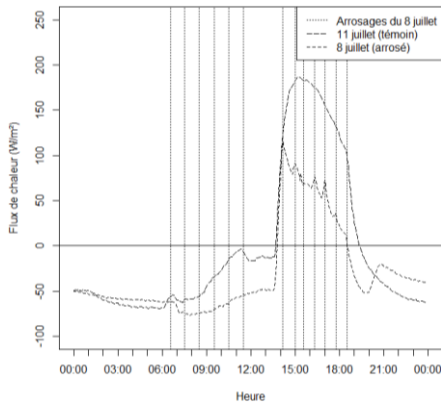


Figure 8 : G mesuré les 08/07 et 11/07

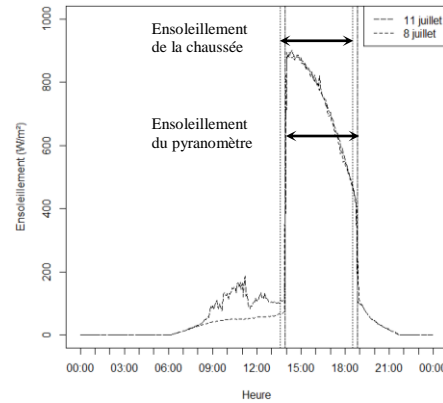


Figure 9 : S' mesuré les 08/07 et 11/07

Ces figures mettent en évidence que le fluxmètre est ensoleillé environ vingt minutes avant le pyranomètre. Cela est dû à la différence de positionnement des deux capteurs. Par un calcul théorique de la trajectoire du soleil tenant compte du masque des immeubles, cet écart est évalué à 20 minutes au solstice d’été et à 15 minutes à l’équinoxe d’automne. De la même façon, la chaussée est à l’ombre 20 minutes plus tôt que le pyranomètre. Il est à noter que le zénith solaire est atteint à 13h43 les 8 et 11 juillet. La période d’ensoleillement de la chaussée (13h35-18h30) et celle du pyranomètre (13h55-18h50) sont représentées sur la Figure 8 par les verticales pointillées et tiretées, respectivement.

L’énergie solaire reçue le 11 et 8 juillet sont presque identiques, sauf pour le matin quand 1,2 MJ/m² supplémentaires ont été reçus sous forme diffuse le 11 juillet. Son effet sur G est clairement visible le matin du 11 juillet. A la même date, une phase transitoire d’une heure et demie environ est visible dans la courbe de G qui débute avec l’ensoleillement de la chaussée.

L’effet de l’arrosage se remarque immédiatement en comparant les profils des deux courbes de G . Conformément aux conclusions de Kinouchi et Kanda [1], [2], le premier arrosage matinal coïncide avec une soudaine rupture de tendance de G . Une fois la chaussée ensoleillée, les deux courbes suivent la même tendance, jusqu’à la reprise de l’arrosage. La tendance croissante entamée est alors brutalement inversée pendant environ 30 minutes, suivi d’une reprise de l’augmentation de G jusqu’à l’arrosage suivant. Cela se reproduit jusqu’à 18h30 avec chaque arrosage, créant des pics. Sur cette période arrosée, G est réduit d’environ 100 W/m², tandis que le pic journalier est 60 W/m² plus faible qu’en conditions sèches. Enfin, le soir après 21h, l’amplitude de G est environ 25 W/m² moins forte qu’en conditions sèches. Cela traduit une restitution moins intense de la chaleur emmagasinée au cours de la journée grâce à l’arrosage, conformément à l’analyse précédente des températures de surface.

Etant donné ces constats sur l’allure de G au début de l’ensoleillement et avant le premier arrosage de l’après-midi, la réduction du pic de flux aurait pu être accentuée si l’arrosage

avait commencé plus tôt, juste avant le début de l'ensoleillement de la zone de mesure. En effet, la tendance est inchangée car la chaussée est sèche lors de l'ensoleillement.

L'après-midi, la presque parfaite adéquation entre les pics de flux et les cycles d'arrosage est révélatrice d'un séchage complet de la chaussée entre les passages de la laveuse. Le matin en revanche ce phénomène ne se manifeste pas, alors que le capteur est à l'ombre et que la chaussée n'a pas le temps de sécher avant l'arrosage suivant. Il serait donc possible d'augmenter le rafraîchissement l'après-midi en arrosant plus souvent que toutes les 45 minutes et, inversement, d'arroser moins que toutes les heures le matin sans le réduire.

3.3. Densité de flux de chaleur vs. irradiance solaire

Kinouchi et Kanda [2] montrent l'existence d'une corrélation entre le rayonnement net, c'est-à-dire la différence entre les rayonnements incidents visible (S) et infrarouge et les rayonnements réfléchis et émis, et la chaleur transmise par conduction à 5 cm de profondeur. Faute de la mesure du rayonnement net, nous opérons de façon analogue avec S à la place.

Pour compenser l'effet du décalage d'ensoleillement signalé précédemment, les mesures d'ensoleillement (S') ont été modifiées de manière à reproduire le flux reçu par la chaussée (S). L'opération s'apparente à un décalage « vers la gauche » avec lissage aux bords de S' . Le résultat de cette procédure est présenté aux Figures 10 et 11.

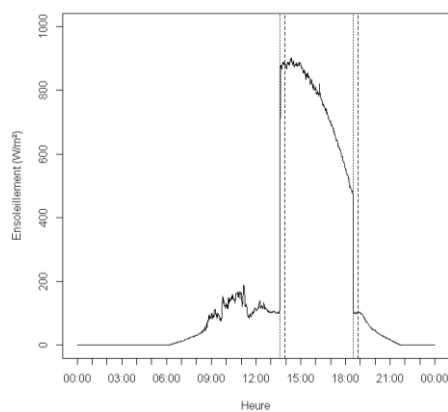


Figure 10 : Ensoleillement S du 11/07

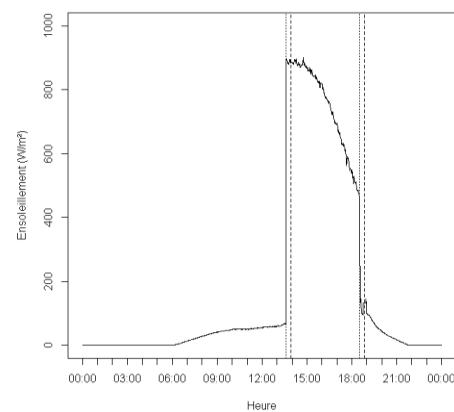


Figure 11 : Ensoleillement S du 08/07

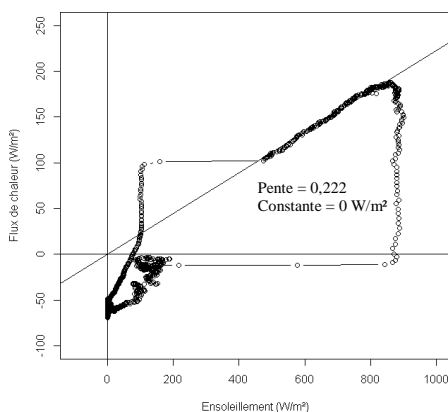


Figure 12 : Flux G en fonction de l'ensoleillement S le 11 juillet (sans arrosage)

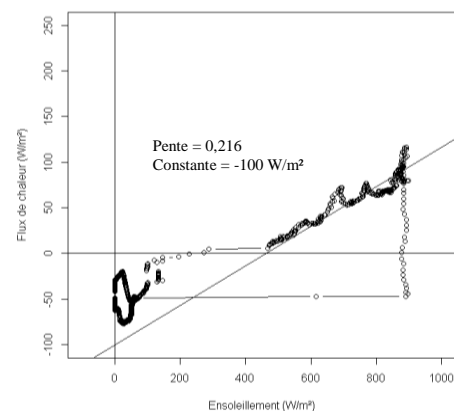


Figure 13 : Flux G en fonction de l'ensoleillement S le 8 juillet (avec arrosage)

Les Figures 12 et 13 présentent G en fonction de S les 11 et 8 juillet, respectivement. L'ordre chronologique est le sens trigonométrique.

Le lien entre G et S est clair. En régime permanent ensoleillé (entre 15h10 et 18h30), 22% de l'ensoleillement est convertit en flux conductif à 5 cm de profondeur le 11 juillet. Ce coefficient de conversion incorpore les échanges dus aux flux rayonnants ainsi que les flux de chaleur latente et sensible. L'influence du flux de stockage ΔQ y est compris également. L'arrosage le 8 juillet ne modifie pas sensiblement ce coefficient, malgré l'éventuel effet de l'arrosage sur l'albédo de la chaussée. En revanche, l'arrosage se répercute par une constante dans l'équation de régression linéaire égale à -100 W/m^2 .

3.4. Stockage de chaleur

Le stockage de chaleur par le revêtement bitumineux est estimé par intégration de la courbe de G en fonction du temps par la méthode des trapèzes. Comme pour les flux, les valeurs positives correspondent à un stockage, tandis que les valeurs négatives correspondent à une restitution d'énergie par la chaussée vers l'atmosphère.

Date	Matin (0h-13h30)		Après-midi (13h30-18h30)	Soir (18h30-0h)	Total
	Avant arrosage	Pendant l'arrosage			
8 juillet	-1,29	-1,58	0,93	-0,66	-2,60
11 juillet	-1,39	-0,83	2,44	-0,43	-0,21
Différence	+0,10	-0,75	-1,68	-0,06	-2,39
(8/07 – 11/07)	+7%	-90%	-64%	-10%	

Tableau 3 : Stockage de chaleur mesuré à 5 cm de profondeur en MJ/m^2

Le Tableau 3 résume la chaleur stockée par la chaussée à 5 cm de profondeur, selon les périodes de la journée. Le matin et le soir correspondent aux périodes d'ombre.

En adéquation avec les observations faites sur les flux, le stockage net de chaleur est fortement réduit par l'arrosage. Le stockage net la matinée du 8 juillet avant arrosage est expliqué par des températures atmosphériques plus élevées. Il apparaît en outre que la réduction du stockage de chaleur est la plus importante l'après-midi, pendant l'ensoleillement de la chaussée. Néanmoins, l'effet de l'arrosage matinal n'est pas négligeable.

Enfin, il est à noter que la restitution de chaleur entre 21h et minuit, une fois que la chaussée est de nouveau sèche, est de $-0,36 \text{ MJ/m}^2$ le 8 juillet et de $-0,59 \text{ MJ/m}^2$. La chaussée restitue donc 39% d'énergie en moins à l'environnement grâce à l'arrosage et devrait donc améliorer le confort thermique des piétons.

4. Conclusion

La campagne expérimentale menée rue du Louvre à Paris pendant l'été 2013 a permis de mettre en évidence les effets thermiques de l'arrosage de voirie. D'une part, les températures de surface de la chaussée ont été réduites de plusieurs degrés. D'autre part, le suivi du flux conductif à 5 cm de profondeur dans la chaussée a permis de dégager des pistes pour optimiser la méthode d'arrosage en ajustant notamment la fréquence des cycles d'arrosage pendant les périodes d'ensoleillement et d'ombrage de la chaussée. Il a en outre été montré que l'arrosage réduit le flux conductif de 100 W/m^2 en moyenne. Cela se répercute directement sur la relation ensoleillement-flux conductif, sans modification du coefficient de conversion. Enfin l'arrosage se solde par une réduction du stockage de chaleur et réduit de 39% la restitution d'énergie après séchage du support. L'arrosage devrait donc se traduire par une amélioration du confort des piétons.

Il n'a toutefois pas été possible de relier ce flux avec le rayonnement net qui tient compte des effets de réflexion et de réémission. Il est prévu de compléter l'instrumentation mise en œuvre en 2013 pour palier à ce manque pour la prochaine campagne prévue pour l'été 2014. Il faut également confirmer les gains en confort avec les mesures microclimatiques réalisées à cet effet.

Références

- [1] T. Kinouchi and M. Kanda, "An Observation on the Climatic Effect of Watering on Paved Roads," *J. Hydrosoci. Hydraul. Eng.*, 15-1 (1997), 55–64.
- [2] T. Kinouchi and M. Kanda, "Cooling Effect of Watering on Paved Road and Retention in Porous Pavement," in *Second Symposium on Urban Environment*, (Albuquerque, NM, USA, 2-7 Nov. 1998), 255–258.
- [3] H. Yamagata, M. Nasu, M. Yoshizawa, A. Miyamoto, and M. Minamiyama, "Heat island mitigation using water retentive pavement sprinkled with reclaimed wastewater," *Water Sci. Technol.*, 57-5 (2008), 763–771.
- [4] R. Takahashi, A. Asakura, K. Koike, S. Himeno, and S. Fujita, "Using Snow Melting Pipes to Verify the Water Sprinkling's Effect over a Wide Area," in *NOVATECH 2010*, (Lyon, France, 27 Jun.-1 Jul. 2010).
- [5] A. Lemonsu, R. Kounkou-Arnaud, J. Desplat, J.-L. Salagnac, and V. Masson, "Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate," *Clim. Change*, 116-3–4 (2012), 679–692.
- [6] 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.*, 331-2 (2008), 171–178.
- [7] Météo-France and CSTB, "EPICEA - Rapport final," (2012).
- [8] M. Bouvier, A. Brunner, and F. Aimé, "Arrosage nocturne des rues et effets induits sur le rafraîchissement ambiant en cas de canicule. Les expérimentations de la Ville de Paris," *Tech. Sci. Méthodes*, 108-12 (2013), 43–52.
- [9] D. Pajani, "Thermographie Principes et Propriétés Radiaves des Matériaux," *Techniques de l'Ingénieur*, 33 (2013).
- [10] APUR, "Étude sur le devenir du réseau d'eau non potable - Partie 1 : Analyse et diagnostic," (2010).

Remerciements

Les auteurs remercient l'APUR pour avoir gracieusement prêté leur caméra infrarouge Flir TiR32 et Orange pour avoir permis l'installation de matériel sur leur toiture de leur immeuble situé au 46, rue du Louvre. Ils remercient également Météo-France, l'APUR ainsi que les Directions des Espaces Verts et de l'Environnement (DEVE), de la Voirie et des Déplacements (DVD) et de la Propreté et de l'Eau (DPE) de la Ville de Paris pour leur soutien pendant la préparation de cette étude.

Le financement été assuré par le Service Technique de l'Eau et de l'Assainissement de la DPE de la Ville de Paris.