

Quel est le meilleur revêtement pour limiter la formation des îlots de chaleur urbains ?

Martin HENDEL^{1,2,3*}, Arnaud GRADOS³, Morgane COLOMBERT², Youssef DIAB², Laurent ROYON³

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

²Université Paris-Est, Lab'Urba, EA 3482, EIVP, F-75019, Paris, France

³Univ Paris Diderot, Paris Sorbonne Cité, MSC, UMR 7057, CNRS, F-75013, Paris, France

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

Résumé - Les matériaux utilisés en milieu urbain ont un fort impact sur le climat urbain et par conséquent sur le confort thermique du piéton. Selon leurs propriétés thermiques, ils peuvent contribuer au développement d'îlots de chaleur urbains. Pour diminuer leur effet, différentes stratégies sont étudiées, comme la végétalisation ou l'arrosage de l'espace urbain.

Notre étude s'inscrit dans ce cadre et propose d'analyser le comportement thermo-climatique de revêtements urbains dans des conditions similaires à une canicule. La sollicitation climatique est découpée en une période diurne de 8h, avec une température de l'air de 35°C, 35% d'humidité et un ensoleillement artificiel, et une période nocturne de 16h à 25°C, 70% d'humidité et sans ensoleillement.

Les échantillons se présentent sous la forme d'éprouvettes cylindriques de 16 cm de diamètre pour 32 cm de hauteur, entourées d'une couche isolante de 5 cm (Figure 1). La température de surface de chaque échantillon est suivie par un thermocouple de type K. Un indicateur de l'échauffement atmosphérique par les échantillons est proposé pour les caractériser.

Des essais menés sur trois cycles consécutifs de 24h ont permis de classer les structures par leur contribution à l'échauffement atmosphérique. Les structures noires sont les plus chaudes, suivies des structures claires et du gazon, largement plus frais que les autres revêtements. Enfin, la succession des cycles expérimentaux sur trois jours ont permis d'identifier le gazon et les trottoirs comme les structures qui manifestent le plus d'effets cumulatifs. Le trottoir asphalté devient ainsi la structure la plus chaude au troisième jour.

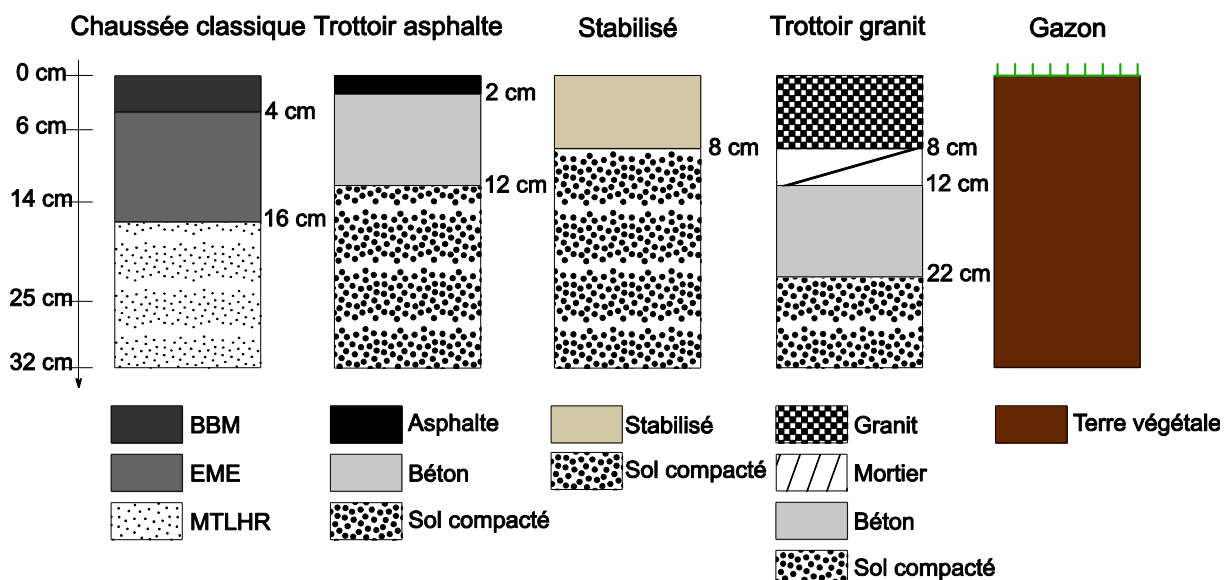


Figure 1 : Structure des échantillons étudiés

Nomenclature

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

1. Introduction

Les matériaux utilisés en milieu urbain ont un fort impact sur le climat urbain et par conséquent sur le confort thermique du piéton [1]. Selon leurs propriétés thermiques, ils peuvent contribuer plus ou moins fortement au développement d'îlots de chaleur urbains [2]. Pour diminuer leur effet, différentes stratégies sont étudiées, comme l'arrosage ou la végétalisation de l'espace urbain [3], [4]. Ces moyens d'adaptation sont particulièrement importants pour limiter l'impact sanitaire des canicules en ville [5].

Pour autant, les travaux existants sur le comportement des revêtements se focalisent sur les couches de surface, sans tenir compte de la superposition de plusieurs couches de matériaux différents [6]–[8]. Afin d'éclairer leurs choix de revêtements, les décideurs ont donc besoin de s'appuyer sur l'analyse du comportement des structures réellement mises en œuvre.

Notre étude s'inscrit dans ce cadre et propose de caractériser le comportement thermo-climatique de revêtements urbains dans des conditions similaires à une canicule. Pour cela, cinq structures de la voirie parisienne sont soumises à une même sollicitation climatique.

2. Matériels et méthodes

2.1. Structures étudiées

Cinq structures ont été retenues pour l'analyse, à savoir une chaussée classique, un trottoir asphalté, un sable stabilisé, un trottoir granit et un gazon. Ces structures sont couramment employées à Paris dans les rues, parcs et jardins de la capitale. 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.

Le Tableau 1 présente les valeurs d'albédo et d'émissivité de chacune de ces structures. Seules les valeurs d'émissivité ont été mesurées, celles d'albédo étant tirées de la littérature.

	Chaussée classique	Trottoir asphalté	Stabilisé	Trottoir granit	Gazon
Albédo	0,05-0,12	0,05-0,12	0,3-0,5	0,3-0,4	0,25
Emissivité	0,98	0,98	0,92	0,99	0,98

Tableau 1 : *Propriétés radiatives des échantillons*

Les échantillons se présentent sous la forme d'éprouvettes cylindriques de 16 cm de diamètre pour 32 cm de hauteur, entourées d'une couche isolante de 5 cm composée de mousse polyuréthane expansée. La température de surface de chacun des échantillons est suivie à l'aide d'un thermocouple de type K. Leur composition est illustrée à la Figure 1.

2.2. Protocole expérimental

Placé dans une enceinte climatique sous température et humidité contrôlées, l'échantillon est soumis à une sollicitation climatique cyclique d'une période de 24h pendant 72h. La sollicitation est découpée en une période diurne de 8h, avec une température de l'air de 35°C, 35% d'humidité, et une période nocturne de 16h à 25°C, 70% d'humidité.

Entre les essais, chaque échantillon est entreposé à une température de 20°C. Afin de s'assurer de son équilibre avant le lancement de l'essai, celui-ci est installé au moins 24h avant dans l'enceinte réglée en mode nuit. Le gazon est prélevé dans un parc dans les 10 jours précédents l'essai et est abondamment arrosé en attendant son installation dans l'enceinte climatique.

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 µm. 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 [9].

Le Tableau 2 résume les caractéristiques du cycle climatique et la Figure 2 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 µm)	1 320 W/m ²	0
Rayonnement GLO (3-100 µm)	230 W/m ²	430 W/m ²

Tableau 2 : Découpage et paramètres de la sollicitation climatique

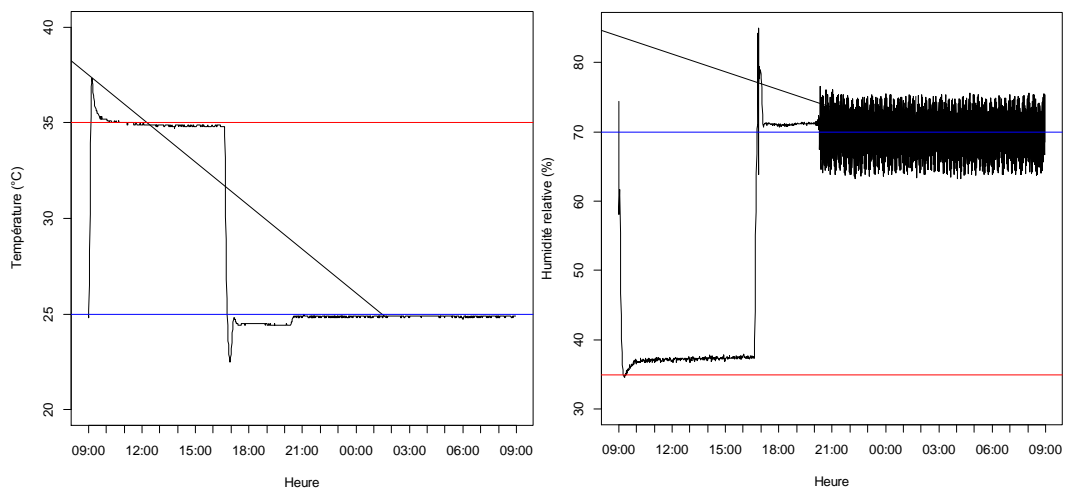


Figure 2 : Profil de la température (gauche) et de l'humidité relative (droite) dans l'enceinte climatique. Les droites rouge et bleue indiquent les consignes jour et nuit, respectivement.

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

Les revêtements urbains sont susceptibles d'aggraver les effets des canicules lorsque ceux-ci contribuent à augmenter la température atmosphérique, c'est-à-dire lorsqu'ils sont plus chauds que l'air ambiant. Pour comparer les contributions diurnes et nocturnes des structures, on suppose un coefficient de convection identique pour tous les échantillons et on s'intéresse à l'aire entre la courbe de température de surface et la température de consigne pendant chaque phase. Par analogie avec le domaine du bâtiment et l'unité « degré-jour », utilisée pour quantifier un besoin de chauffage ou de rafraîchissement, on utilisera l'unité « degré-heure » pour quantifier la contribution atmosphérique des structures étudiées. Ainsi construit, 1°C.h correspond à une heure pendant laquelle la surface est un degré plus chaude que l'air.

Ayant supposé que le coefficient de convection est le même pour toutes les structures, cet indicateur est homogène à une énergie transférée à l'air par unité de surface de revêtement.

3. Résultats et discussion

Dans l'analyse des données observées, on se focalisera dans un premier temps sur les données obtenues à J, puis dans un second temps aux observations de J à J+2.

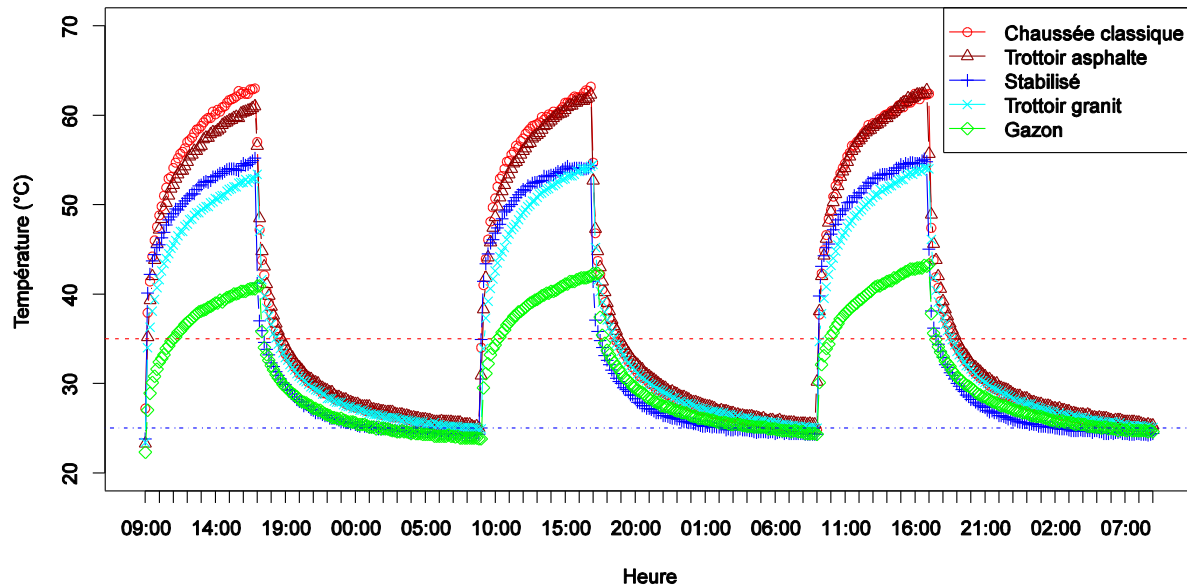


Figure 3 : Evolution des températures de surface sur 72h

La Figure 3 représente l'évolution des températures de surface de tous les échantillons étudiés pendant trois journées consécutives. Les lignes horizontales bleue (pointillés-tirés) et rouge (tirets) indiquent les températures de consigne nocturne et diurne, respectivement.

3.1. Observations au bout du premier jour de sollicitation (J)

On remarque tout d'abord qu'en début d'expérimentation les températures de surfaces sont en dessous de la consigne nocturne, c'est-à-dire que les échantillons sont plus froids que l'air ambiant. Cela se répète pour certains échantillons en fin de cycle également. Ceci est expliqué par le faible rayonnement ambiant présent au sein de l'enceinte climatique, dû à ses parois métalliques lisses à basse émissivité. La température de surface stabilisée pendant la période nocturne est de 23,5°C environ pour tous les échantillons.

Quelle que soit la structure envisagée, les températures croissent très fortement dès que l'ensoleillement est enclenché et dépassent la consigne de 35°C dès les premières minutes d'ensoleillement, sauf pour le gazon qui met deux heures à franchir ce seuil.

Après une première phase de croissance exponentielle qui dure entre deux et trois heures selon la structure, la température croît de manière quasi-linéaire jusqu'à l'arrêt de l'ensoleillement.

Pendant la phase diurne, deux catégories de structures se distinguent selon l'évolution de leur température de surface : les matériaux « chauds », dont la température dépasse 60°C, et les matériaux « frais » qui restent en deçà de ce seuil. Les structures « noires », c'est-à-dire la chaussée et le trottoir asphalté appartiennent à la première catégorie, tandis que le stabilisé, le

trottoir granit et le gazon appartiennent à la deuxième. Le gazon, plus de 10°C plus frais que les deux autres structures, pourrait constituer sa propre catégorie de matériaux « très frais ».

Intervenant au bout de 8h d'ensoleillement, l'arrêt de la lampe provoque une chute exponentielle des températures qui tendent ensuite vers la température initiale. On remarque qu'aucune des structures ne retrouve l'état d'équilibre initial, le différentiel le plus élevé étant de 2,5°C environ pour le trottoir asphalté. Ainsi, toutes les structures terminent le cycle avec un surplus d'énergie par rapport à la situation de départ.

Dès la première heure après extinction de la lampe, les structures se regroupent en deux groupes, avec d'une part le stabilisé et le gazon qui sont les plus fraîches, et d'autre part les structures restantes, significativement plus chaudes. Le granit, pourtant classé en tant que matériau frais en journée, rejoint le niveau de température des structures noires pendant la nuit.

Par ailleurs, on remarque que la chaussée, qui était pourtant la structure la plus chaude en journée, est plus fraîche que le trottoir asphalté au bout de quelques minutes suivant l'arrêt de l'ensoleillement.

La Figure 4 exprime la contribution à l'échauffement atmosphérique pendant le premier jour de chacune des structures étudiées en « degré-heure ». Les contributions diurnes sont indiquées en rouge tandis que les contributions nocturnes sont en bleu.

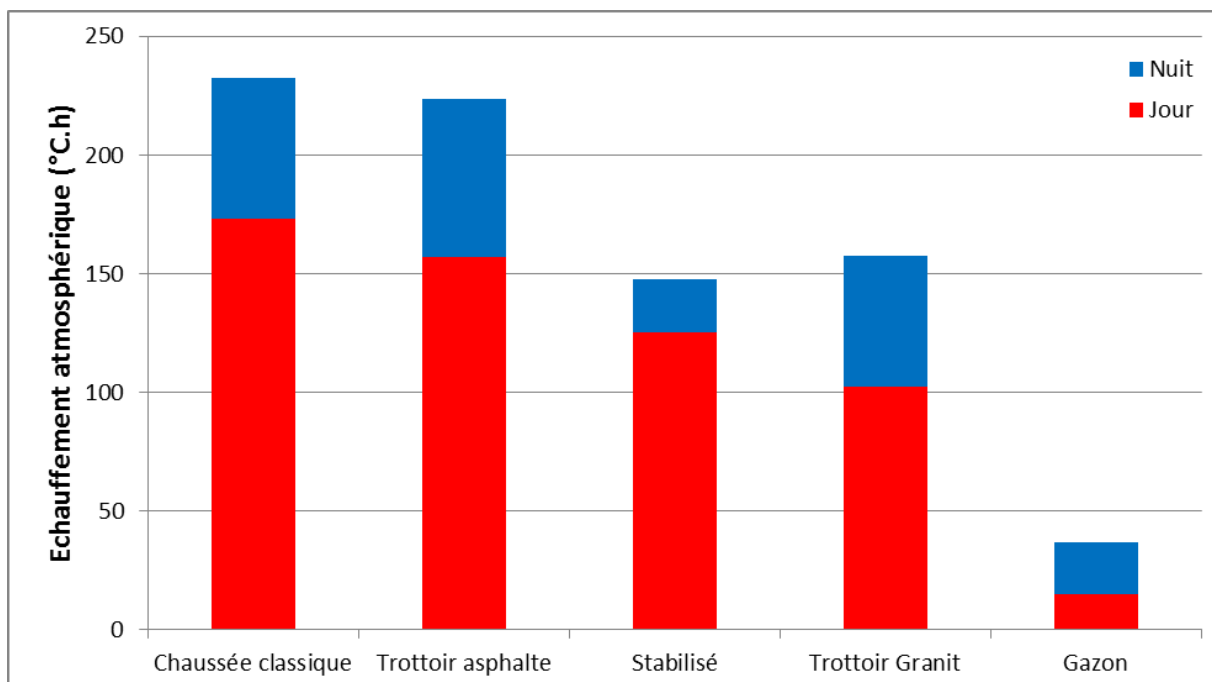


Figure 4 : Contribution à l'échauffement atmosphérique à J

Pour tous les échantillons, l'échauffement diurne est le plus important, sauf pour le gazon. Pour autant, les contributions nocturnes ne sont pas négligeables et sont déterminantes pour classer les échantillons par leur contribution atmosphérique. Les regroupements effectués à partir des températures de surface se retrouvent, avec les structures noires étant les plus chaudes, le gazon étant la structure la plus fraîche et les structures claires se situant à un niveau intermédiaire. C'est donc le gazon qui contribue le moins à échauffer l'air ambiant, alors que les matériaux noirs ont la contribution la plus importante, suivis par les matériaux clairs.

3.2. Effets cumulatifs de J à J+2

Au bout de trois journées consécutives, les structures manifestent des signes d'accumulation de chaleur. Si le comportement de la chaussée classique et du stabilisé n'est que très peu modifié à J+1 et J+2 par rapport à J, ce n'est pas le cas du trottoir asphalté, du trottoir granit ou du gazon. Ces trois structures voient effectivement leur température de surface augmenter avec l'enchaînement des cycles climatiques, comme le montre l'évolution des températures maximales résumée au Tableau 3.

Structure	Tmax à J	Tmax à J+1	Tmax à J+2
	°C	°C	°C
Chaussée classique	63,3	63,2	62,7
Stabilisé	55,2	54,6	55,1
Trottoir asphalté	61,2	62,3	62,9
Trottoir granit	53,6	54,6	54,3
Gazon	40,9	42,3	43,4

Tableau 3 : Température de surface maximale atteinte à J, J+1 et J+2.

Les observations nocturnes réalisées à J ne sont pas significativement modifiées à J+2. La température du gazon est celle qui augmente le plus, se distinguant nettement de la température du stabilisé par rapport à ce qui était observé à J.

La Figure 5 résume la contribution atmosphérique diurne et nocturne des structures à J+2. Toutes les contributions observées à J+2 sont augmentées par rapport à J. Conformément à ce qui avait été indiqué à partir des courbes de température de surface, la chaussée classique et le stabilisé sont les structures les moins affectées avec moins de 5% d'augmentation, tandis que la contribution du gazon est presque doublée, même si elle reste faible. Les contributions des trottoirs asphalté et granit augmentent de 10% environ. Ceci vaut au trottoir asphalté de détrôner la chaussée classique comme revêtement échauffant le plus l'atmosphère.

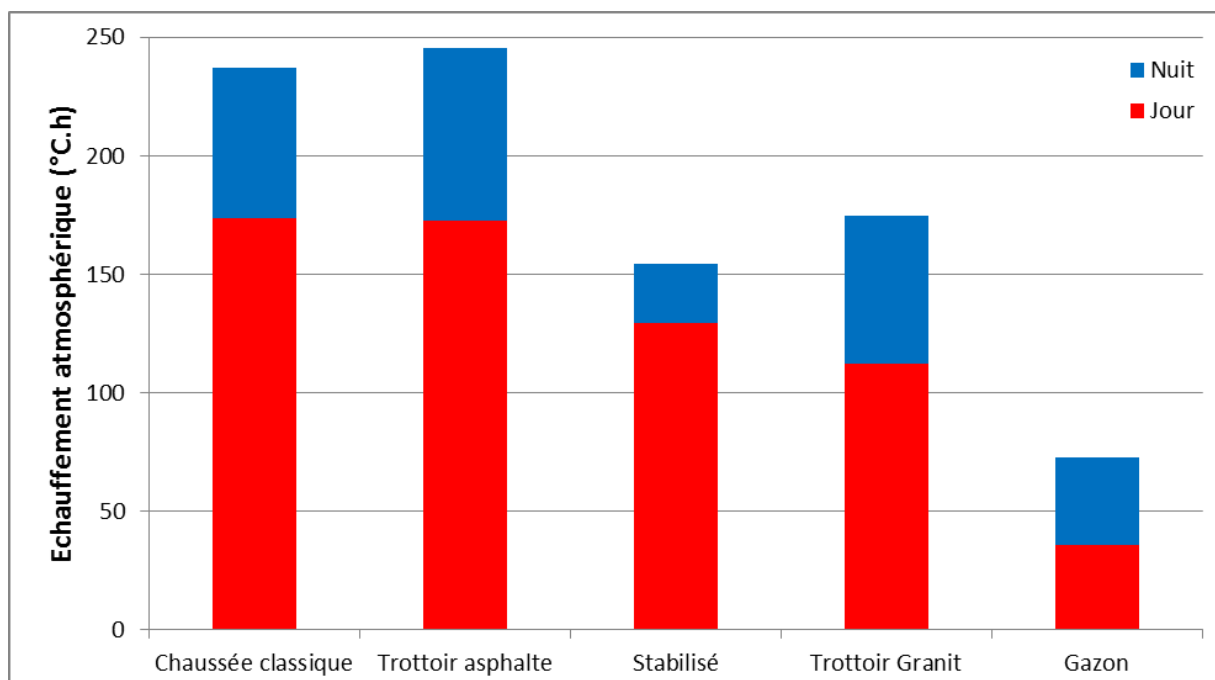


Figure 5 : Contribution à l'échauffement atmosphérique à J+2

Le gazon est donc le plus concerné par les effets cumulatifs provoqués par l'enchaînement de plusieurs « journées caniculaires », suivi du trottoir granit et du trottoir asphalté.

3.3. Discussion

Le classement des revêtements sur la base des températures obtenues à J correspond bien à ce qui est attendu à partir de leur albédo. En effet, les matériaux noirs, à faible albédo, sont les plus chauds, tandis que les matériaux plus clairs sont plus frais.

Pour autant, l'albédo ne suffit pas pour expliquer toutes les observations. En effet, le gazon, pourtant plus sombre que les matériaux clairs, est de loin le plus frais des revêtements. Cela est attribuable au rafraîchissement fourni par l'évapotranspiration de l'eau qu'il contient. Le rôle rafraîchissant des végétaux est signalé dans de nombreux travaux, mais ils soulignent souvent la condition de l'approvisionnement en eau [10]. Lors de nos essais, le gazon est resté largement alimenté en eau, lui permettant de rester très frais tout au long de l'expérience.

Par ailleurs, l'albédo ne permet pas d'expliquer l'évolution des températures d'un cycle climatique à un autre. En effet, alors que pour un état initial donné, le trottoir asphalté est plus frais que la chaussée, il devient la structure la plus chaude le 3^e jour. Ceci est dû aux matériaux sous-jacents, notamment à ses 10 cm de béton qui accumulent de la chaleur au fil des jours, avec un impact observable sur sa température de surface. Le même phénomène est à l'œuvre pour le trottoir granit. Le gazon voit sa température augmenter de 2°C entre le premier et le dernier jour. Cela est attribué à l'inertie de la terre mouillée.

Enfin, les températures de surface maximales atteintes à J sont cohérentes avec celles observées à l'occasion des travaux similaires [6], [7]. En effet, des températures maximales comprises entre 40°C pour le gazon et 65°C pour l'enrobé bitumineux y sont observées. Ces températures sont atteintes en extérieur sur des sites sans masque pour des conditions météorologiques semblables à celles de l'enceinte climatique. Les températures observées par Ueno et Tamaoki [8], bien plus faibles que les nôtres, ne sont pas comparables étant donné que leurs sollicitations climatiques ont une durée de quelques minutes seulement. On en déduit que le protocole expérimental utilisé ici permet de reproduire les températures maximales atteintes en extérieur pour un site sans obstruction en journée chaude d'été.

4. Conclusion

Cinq échantillons de structures couramment employés sur l'espace public parisien ont été soumis à des conditions caniculaires pendant trois journées consécutives. Nos observations ont permis de classer ces structures les unes par rapport aux autres en fonction de leur contribution à l'échauffement atmosphérique. Ainsi, les structures noires, à savoir la chaussée classique et le trottoir asphalté, y contribuent le plus, suivies des structures claires, à savoir le trottoir granit et le stabilisé, tandis que la structure gazon a la contribution la plus faible.

Si l'albédo des matériaux de surface joue un rôle déterminant dans les comportements observés, on a pu constater l'importance des couches sous-jacentes, notamment pour les effets cumulatifs. En effet, les matériaux sous-jacents stockent également une grande partie de l'énergie solaire accumulée et influence la température de surface des jours suivants. Les phénomènes cumulatifs affectent principalement les structures contenant une couche de béton ou de granit, faiblement poreuses. Le gazon montre également des phénomènes d'accumulation importants relativement à son faible échauffement de l'atmosphère. On retiendra également le rôle primordial de l'eau pour assurer les bonnes performances des surfaces végétalisées comme le gazon.

L'étude des températures et des flux de chaleur à différentes profondeurs permettra d'étudier plus précisément le rôle des différentes couches constitutives des structures étudiées ainsi que d'identifier le rôle de certaines de leurs propriétés thermiques.

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] A. H. Rosenfeld, H. Akbari, J. J. R. Ty, and M. Pomerantz, "Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction," *Energy Build.*, vol. 28, pp. 51–62, 1998.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] H. Takebayashi and M. Moriyama, "Study on Surface Heat Budget of Various Pavements for Urban Heat Island Mitigation," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–11, 2012.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Météo-France and CSTB, "EPICEA - Rapport de synthèse," 2012.

Remerciements

Le matériel utilisé pour cette étude a été entièrement financée par l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR). 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.