

Étude de l'effet rafraichissant du béton drainant en condition sèche et humide

K. Seifeddine

Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

RESUME Le béton drainant est un matériau en constante augmentation car il présente des avantages environnementaux, tels que la réduction du bruit, la gestion des eaux pluviales et la limitation des polluants en permettant à l'eau de retourner dans le sol. Il présente aussi des avantages pour lutter contre les îlots de chaleur urbains (ICU), mais jusqu'à présent, peu d'études ont été faites à ce sujet. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement thermique du béton drainant à base de gravier naturel (BD) en conditions sèche et humide afin de réduire les effets de l'ICU. Un modèle analytique est proposé. Il est validé par des mesures obtenues en condition sèche à partir d'un banc expérimental innovant développé spécialement pour cette étude. Une étude de sensibilité de paramètres menée sur la base du modèle analytique en condition sèche montre que la température de surface du BD est plus sensible aux variations de l'albédo qu'à celles de la conductivité thermique. En condition humide, les résultats montrent que l'effet de refroidissement par évaporation du BD est efficace pendant trois jours. Cet effet est conditionné par la présence de l'eau près de la surface.

Mots-clefs béton drainant, refroidissement par évaporation, îlots de chaleur urbains

I. INTRODUCTION

Actuellement, plus de 50% de la population mondiale vit dans les villes. D'ici 2050, cette proportion passera aux deux tiers, soit à peu près 6,5 milliards de personnes [1]. Un effet produit par la croissance des villes est l'îlot de chaleur urbain (ICU) qui est défini comme une zone urbaine qui a une température significativement plus élevée que celles des zones rurales et suburbaines environnantes. La raison principale de l'ICU est liée au fait que l'urbanisation entraîne à la fois une augmentation des surfaces imperméables qui absorbent la chaleur et une diminution de la végétation naturelle. Comme les chaussées représentent 20 à 40% de la surface totale des villes [2]. L'idée d'utiliser des chaussées rafraichissantes pour lutter contre les ICUs est aujourd'hui une solution intéressante.

Les chaussées en béton drainant font partie des revêtements perméables les plus utilisés. Ces revêtements sont caractérisés par une structure poreuse qui permet à l'eau de s'infiltrer [3], [4]. Ces revêtements jouent un rôle essentiel dans la gestion des eaux pluviales, l'amélioration de la qualité de l'eau, la réduction de la pollution, l'absorption acoustique et la réduction des bruits de roulement des véhicules. Plusieurs études dans la littérature ont mis en évidence les propriétés mécaniques et hydrauliques du béton drainant [5], [6], mais les propriétés thermiques de ces revêtements et leur contribution à la réduction des ICUs restent à ce jour peu étudiées.

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement thermique du béton drainant à base de ciment et de gravier naturel (BD) via une étude analytique et expérimentale. Dans un premier temps, le bilan énergétique à la surface d'une chaussée est décrit. Les matériaux d'études sont

ensuite présentés. Un montage expérimental innovant est ensuite proposé, permettant d'étudier le comportement thermique de chaussée en condition sèche et humide. La première partie des résultats permet de comparer le comportement thermique du BD à celui au béton ordinaire (BO) en condition sèche, et d'étudier l'influence des paramètres thermophysiques sur la température de surface du BD. Cette étude permet de concevoir un mélange qui permet de minimiser sa température de surface en condition sèche. La deuxième partie des résultats concerne l'étude du pouvoir rafraichissant du BD en condition humide.

II. BILAN ENERGETIQUE À LA SURFACE D'UNE CHAUSSEE : METHODE ANALYTIQUE

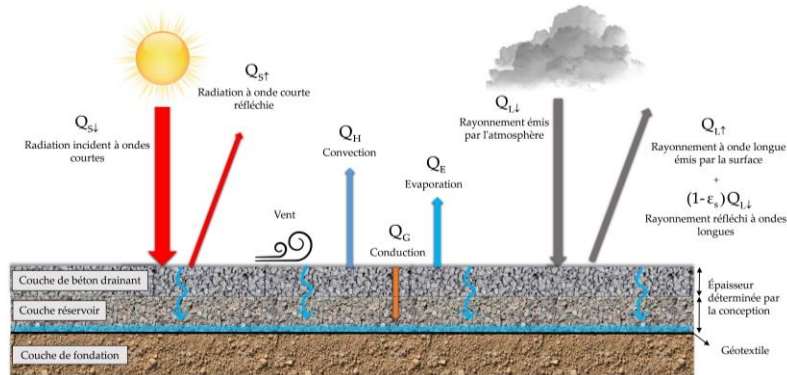


FIGURE 1. Schématisation du bilan d'énergie à la surface d'un revêtement routier

Le bilan énergétique à la surface du revêtement humide est donné par l'Eq. (1). Cette équation inclut les échanges de chaleur dus à la radiation solaire ($Q_{S\downarrow}$, $Q_{S\uparrow}$), à la radiation infrarouge ($Q_{L\downarrow}$, $Q_{L\uparrow}$), à la convection à la surface (flux de chaleur sensible Q_H), à la conduction sous le revêtement (Q_G) et à l'évaporation (flux de chaleur latente Q_E) à condition que l'eau soit présente dans la chaussée (Figure 1) [7]. L'Eq. (1) montre le bilan énergétique à la surface d'un revêtement drainant en condition humide.

$$Q_{S\downarrow} + Q_{L\downarrow} = Q_{S\uparrow} + Q_{L\uparrow} + (1 - \varepsilon_s) Q_{L\downarrow} + Q_H + Q_E + Q_G \quad (1)$$

En écrivant chacun des flux énergétiques en fonction de la température on obtient une équation impliquant la température de surface T_s , la température de l'air T_a et la température à une profondeur donnée T_z . Le bilan énergétique obtenu est une équation du quatrième degré, qui peut être résolue pour trouver la température de surface des chaussées sèches (Eq. (2)).

$$Q_{S\downarrow} + Q_{L\downarrow} = \alpha Q_{S\downarrow} + (1 - \varepsilon_s) Q_{L\downarrow} + \sigma \varepsilon_s (T_s + 273,15)^4 + h_c (T_s - T_a) + L \cdot ER - \lambda \left(\frac{\partial T_z}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (2)$$

avec ε_s : émissivité de la surface, σ : constante de Stefan-Boltzmann égale à $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$, h_c : coefficient de convection thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$), α : albédo, λ : conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), L : 2260 kJ/kg est la chaleur latente spécifique de vaporisation de l'eau, ER : taux d'évaporation ($\text{kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$) égal à la masse d'eau évaporé par unité de temps et de surface.

III. MATERIAUX DE L'ETUDE

A. Dosage et préparation des échantillons

Le tableau 1 montre les dosages des échantillons du BO et du BD. Un ciment Portland ordinaire CEM II/B-LL 32,5 R CE NF a été utilisé. Les agrégats grossiers utilisés dans le mélange de BD ont

une granulométrie répartie de 5 à 12,5 mm. Le sable a été utilisé uniquement dans le mélange du béton ordinaire et a une granulométrie répartie de 0,08 mm à 5 mm (l'analyse granulométrique a été effectué par tamisage en suivant la norme NF P 94-056.

TABLEAU 1. Dosage des échantillons

Mélange	Sable (kg/m ³)	Gravillons (kg/m ³)	Ciment (C) (kg/m ³)	Eau efficace (E) (kg/m ³)	E/C
BO	996	833	400	200	0,5
BD	0	1600	350	112	0,32

B. Propriétés mécaniques, hydrauliques et thermophysiques des échantillons

Le tableau 2 montre les propriétés mécaniques, hydrauliques et thermophysiques des échantillons testés. La résistance à la compression R_{28j} a été mesurée en se référant à la norme NF EN 12390-3. La perméabilité K a été mesurée à l'aide d'un perméamètre ASTM C 1701. L'albédo α et l'émissivité ϵ_s des revêtements ont été mesurés à l'aide d'un pyranomètre et d'un pyrgéomètre. La conductivité thermique λ a été mesurée en condition sèche à l'aide d'un conductivimètre à fil chaud après avoir été séché pendant 48h pour obtenir une masse constante et laissé refroidir à la température ambiante du laboratoire.

TABLEAU 2. Propriétés des échantillons étudiés

Mélange	Porosité ouverte (%)	Masse volumique (kg/m ³)	R_{28j} (MPa)	K (cm/s)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	α	ϵ_s
BO	-	2349 ±19	41,19 ±1,14	-	1,231 ±0,08	0,28 ±0,008	0,9
BD	21,97 ±1,67	1951 ±42	11,60 ±0,46	1,30 ±0,05	0,613 ±0,02	0,20 ±0,007	0,877

IV. PRESENTATION GENERALE DU BANC EXPERIMENTAL

Pour étudier le comportement thermique des revêtements de chaussées en condition sèche et humide, un banc expérimental a été conçu (figure 2). Il est équipé de plusieurs appareils qui permettent d'établir le bilan énergétique complet d'une chaussée. Il est aussi équipé d'un bac à deux compartiments séparés par une plaque en verre transparente qui servent à étudier simultanément le comportement thermique d'un revêtement en condition sèche et humide. Il est possible d'enlever cette plaque pour avoir des échantillons ayant une surface plus importante de 40 × 30 cm². C'est le choix fait pour cette étude. Le dispositif expérimental se trouve dans une salle du laboratoire en conditions climatiques contrôlées : 20°C ≤ Température ambiante ≤ 23°C ; 35% ≤ Humidité relative ≤ 40%. Les parois latérales du bac sont isolées par des panneaux isolant en laine de roche ($\lambda = 0,03 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Le bac a été rempli avec une couche de sable (0,08-5 mm) ayant une épaisseur de 10 cm sur laquelle un pavé de 5 cm d'épaisseur est posé. Cette disposition sert à simuler la structure complète d'une

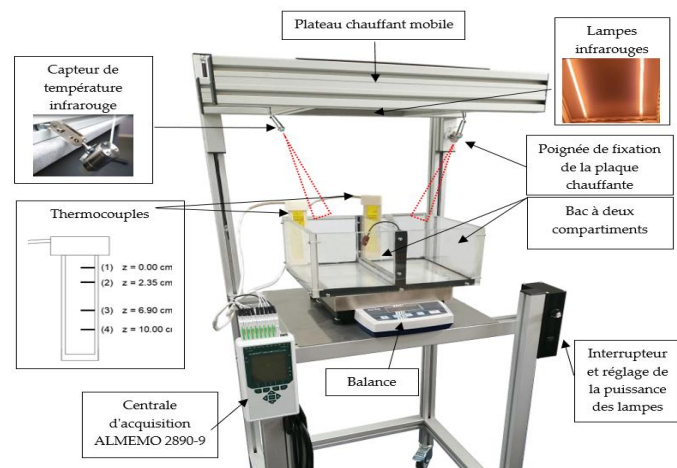


FIGURE 2. Présentation du banc expérimental

chaussée perméable (couche de roulement + couche réservoir). Les flux radiatifs incidents ont été mesurés à l'aide d'un pyranomètre et d'un pyrgéomètre. Pour mesurer la température dans la profondeur de cette structure, deux capteurs ont été introduits à deux profondeurs différentes : $z = 5$ cm (face inférieure du pavé) et $z = 15$ cm (fond du bac).

D'un point de vue pratique, il est possible d'optimiser la conception du BD pour réduire sa température de surface maximale à l'état sec sans avoir recours à d'autres techniques telles que la peinture de la chaussée ou l'ajout de différents produits pour augmenter la conductivité thermique (par exemple, fibre d'acier) ou l'albédo (par exemple, pigments réfléchissant les infrarouges). Cette optimisation consiste à utiliser un liant et des agrégats de couleur claire (augmentation de l'albédo), des agrégats plus fins (surface moins rugueuse) et ayant une conductivité thermique plus élevée (par exemple le quartzite).

V. RÉSULTATS ET ANALYSE

A. Prédiction de la température de surface des pavés et validation expérimentale en condition sèche

La résolution analytique de l'Eq. (2) permettant de prédire la température de surface (TS) des revêtements de chaussées a été effectuée par une résolution numérique effectuée avec le logiciel MATLAB.

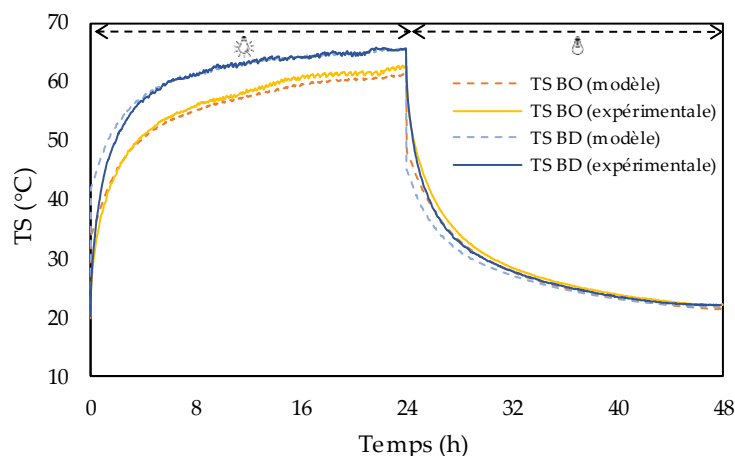


FIGURE 3. Variation de la TS du BO et BD analytique et expérimentale en fonction du temps

La figure 3 présente la variation de température de surface du BD et du BO en condition sèche en fonction du temps dans les mêmes conditions climatiques (lumière allumée pendant 24 h, puis éteinte pendant 24 h). Le modèle et les mesures présentent des écarts importants durant les phases du régime transitoire (jusqu'à 2 heures après l'allumage ou l'extinction des lampes). Durant le régime permanent, l'écart entre les résultats du modèle et les résultats expérimentaux devient relativement faible et varie entre 0°C et $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$.

Les résultats montrent que durant la période diurne ($0 \leq t \leq 24$ h) la température de surface du BD est de 0 à 6°C plus grande que celle du BO. En effet, la conductivité thermique relativement faible du BD limite le transfert de chaleur par conduction vers l'intérieur du matériau, tandis que son faible albédo induit une forte absorption de rayonnement incidente à onde courte ce qui cause une augmentation rapide de sa température de surface. La morphologie du BD (surface rugueuse et présence de cavités) induisent une absorption plus grande des radiations solaires que la surface du BO qui est beaucoup plus lisse. Durant la période nocturne ($24 \text{ h} < t \leq 48$ h), en raison d'une conductivité thermique plus faible (tableau 2), le BD a moins de résistance à la chute de température et devient donc plus froid que le béton conventionnel. Il a été constaté qu'en

condition sèche, il faut éviter l'utilisation du béton drainant. Ces résultats sont en accord avec les résultats expérimentaux de Li et al. [8] et les résultats numériques de Qin & Hiller, 2016 [9].

Comme le modèle analytique présente un faible écart avec les résultats expérimentaux, il a été utilisé pour faire une étude de sensibilité des paramètres. L'objectif est d'identifier le facteur qui a la plus grande influence sur la température de surface des revêtements de chaussées en BDG. Cette étude servira par conséquent à optimiser la conception de ces types de revêtements en condition sèche durant les périodes des canicules. Les deux facteurs étudiés sont la conductivité thermique et l'albédo.

Pour étudier l'influence de la conductivité thermique sur la température de surface du BD, des échantillons de BD issues de l'étude de Chen et al. [10] ont été étudiés. Ces échantillons sont obtenus en variant la porosité ouverte de 15% à 30% ($0,473 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \leq \lambda \leq 0,835 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), avec un albédo constant de 0,2. Pour étudier l'influence de l'albédo, des échantillons de BD ayant un albédo variant de 0,15 à 0,35 ont été étudiés en supposant qu'ils ont les mêmes propriétés que celles du BD de cette expérience. Il existe plusieurs techniques pour augmenter l'albédo tels que l'utilisation des pigments de dioxyde de titane (TiO₂) dans les couches de revêtement, agrégat de couleur claire, peinture de couleur blanche [11] ou par l'optimisation de la conception du mélange du BD [12].

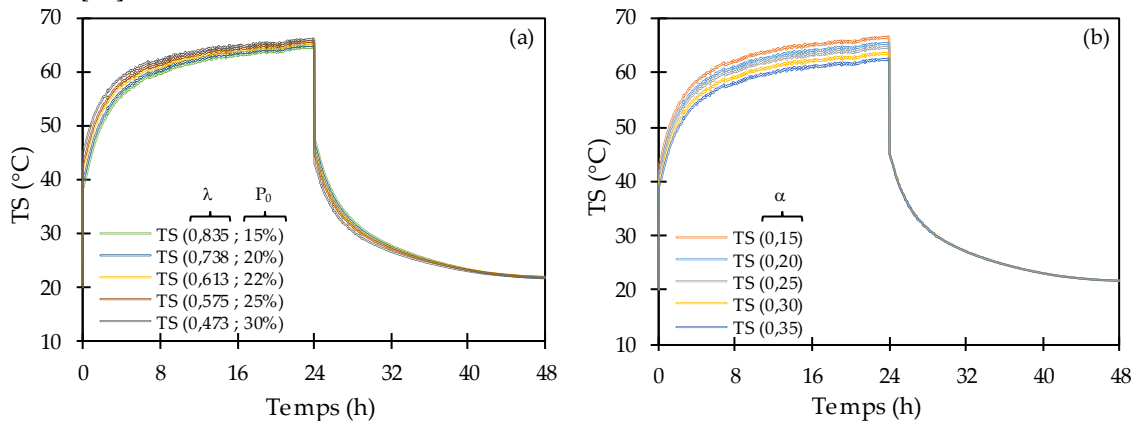


FIGURE 4. Variation de la TS du BD ayant des conductivités thermiques différentes (a) et des albédos différents (b) en fonction du temps

Les résultats du modèle montrent que lorsque la conductivité thermique augmente de 0,473 à 0,835 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, la température de surface maximale du BD diminue de 1,6°C durant la période diurne (figure 4a). Tandis que la température de surface nocturne augmente jusqu'à 4°C, ce qui signifie la quantité de chaleur absorbée durant la journée sera diffusé pendant la nuit. De plus, les résultats montrent que l'augmentation de l'albédo de 0,15 à 0,35 donne lieu à une diminution de température de surface maximale de 4°C durant la journée (figure 4b). Concernant la période nocturne, lors de la résolution analytique de la température de surface et pour être conforme aux conditions de cette expérience, le flux radiatif à onde courte incidente $Q_{s\downarrow}$ passe de 520 W/m^2 à 0 W/m^2 à $t = 24$ h (au moment de l'extinction des lampes infrarouges). Cette variation cause la disparition du terme α de l'Eq. (2) et la résolution de cette équation durant la période nocturne devient indépendante de l'albédo. Dans la réalité, le flux solaire radiatif diminue d'une façon progressive, ce qui peut créer des légères variations sur les résultats en périodes journalière.

Pour étudier l'influence de l'albédo durant la période nocturne, on suppose que le flux radiatif à onde courte incident $Q_{s\downarrow}$ diminue linéairement de 520 W/m^2 ($t = 24$ h) jusqu'à 0 W/m^2 ($t = 48$ h, lampes éteintes). De même, le flux radiatif à onde longue incident $Q_{L\downarrow}$ diminue de 531 W/m^2 ($t =$

24 h) jusqu'à 420 W/m^2 ($t = 48 \text{ h}$, lampes éteintes). La variation des flux radiatifs incidents est présentée sur la figure 5a.

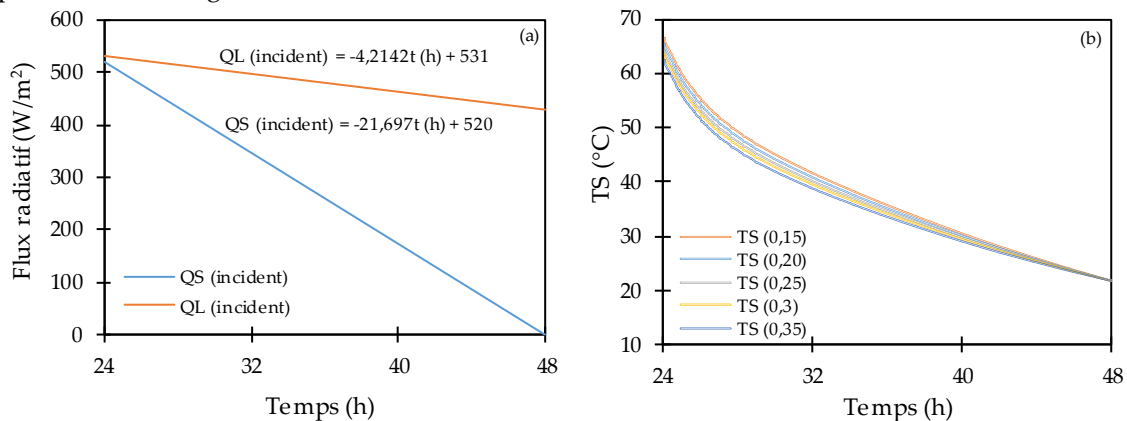


FIGURE 5. Variation des flux radiatifs incidents (a) et de la TS du BD ayant des albédos différents (b) pendant la phase nocturne

La figure 5b montre que la température de surface du béton drainant diminue avec l'augmentation de l'albédo. De plus, l'écart entre les températures de surface de ces échantillons diminue lorsque les flux radiatifs à onde courte et à onde longue diminuent. A $t = 48 \text{ h}$, ces échantillons ont la même température de surface au moment où le flux radiatif à onde courte $Q_{s\downarrow}$ est nul.

L'importance des variables (λ et α) a été analysée à l'aide de l'analyse de sensibilité. L'objectif est d'étudier la sensibilité de la température de surface maximale à ces deux variables. Cette analyse montre le facteur d'importance relative de l'albédo $R_{\alpha} = 0,71$ (calculé comme le gradient d'une variable d'entrée divisé par la somme des gradients, voir [13] pour plus de détails) est plus important que celle de la conductivité thermique $R_{\lambda} = 0,29$. Il a été constaté que l'albédo a une influence plus importante sur la température de surface maximale du BD durant la phase diurne que la conductivité thermique.

B. Etude du comportement thermique du béton drainant en condition humide

Pour étudier le comportement thermique du BD en condition humide, le même montage expérimental présenté précédemment a été adopté dans les mêmes conditions climatiques. La seule différence est que les quatre côtés du bac ont été scellés avec un joint de silicone transparent afin d'éliminer l'évaporation latérale. Le comportement thermique du BD a été étudié pendant 5 jours climatiques (lumière allumée pendant 8h puis éteinte pendant 16h chaque jour). Le comportement thermique du BO n'a pas été étudié en condition humide vu sa faible capacité de rétention d'eau ce qui rend l'effet de refroidissement par évaporation négligeable. De plus, Qin et al, [14] montre que le BO sèche au bout d'environ 10 minutes après arrosage lors d'une journée chaude.

La figure 6a montre que la différence de température entre le BD humide et sec diminue avec le temps. La température de surface maximale de chaque jour en condition humide est comparée à celle obtenue le premier jour en condition sèche qui égale à 59°C . L'écart de température est important pendant les 3 premiers jours ($19,9^{\circ}\text{C}$ à $6,8^{\circ}\text{C}$). Cet écart est ensuite moins important pour les deux derniers jours ($3,9^{\circ}\text{C}$ à $2,3^{\circ}\text{C}$). Cette faible diminution montre qu'à partir du 4^{ème} jour, l'effet de refroidissement par évaporation dans le BD est devenu négligeable.

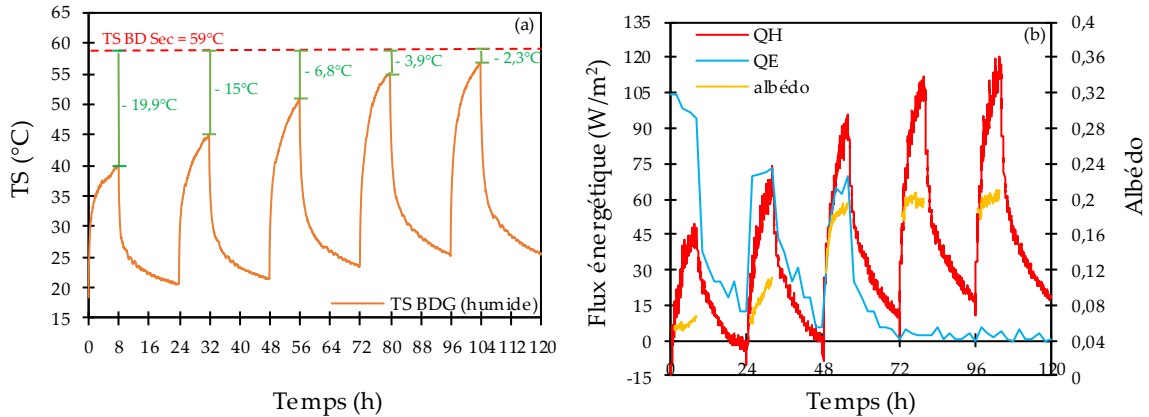


FIGURE 6. Variation de la température de surface (a), de l'albédo et des flux énergétiques (b) du BD en condition humide pendant 5 jours

Le suivi de la masse totale de l'échantillon de BD au cours du temps permet de calculer la masse d'eau évaporé, le taux d'évaporation et le flux de chaleur latente absorbé (flux d'évaporation). La figure 6b montre que le flux d'évaporation passe de 105 W/m² (1^{er} jour) à une valeur inférieure à 5 W/m² (à partir du 3^{ème} jour). De plus, le flux de chaleur sensible augmente durant l'expérience, passant de 47 W/m² (1^{er} jour) jusqu'à 120 W/m² (5^{ème} jour). Cette augmentation explique la diminution de l'effet de refroidissement surtout après le 3^{ème} jour. À partir du 4^{ème} jour l'albédo du BD humide est égale à 0,2 ce qui indique que sa surface est devenue totalement sèche (tableau 2).

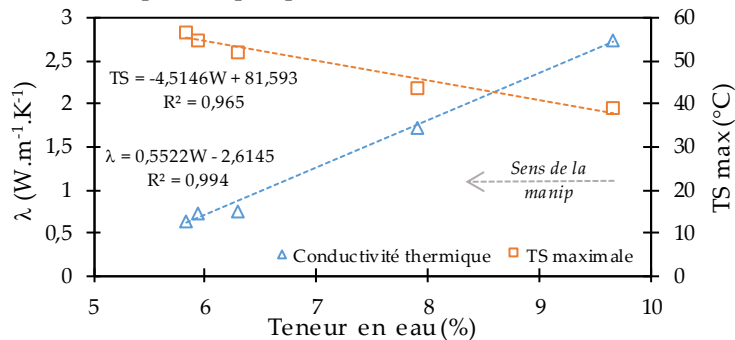


FIGURE 7. Variation de la conductivité thermique et de la TS maximale en fonction du teneur en eau

La conductivité thermique du BD évolue avec la teneur en eau. L'Eq. (2) permet de la calculer, à partir de la variation de flux de chaleur conductif Q_c . La figure 7 montre la variation de la température de surface maximale et la conductivité thermique du BD à la fin de la période diurne de chaque jour. Cette figure montre que la conductivité thermique augmente linéairement avec l'augmentation de la teneur en eau. La conductivité thermique à la fin du 5^{ème} jour est de 0,638 W.m⁻¹.K⁻¹ ce qui correspond à une teneur en eau de 5.83%. Cette valeur est proche de celle obtenue en condition sèche (0,613 W.m⁻¹.K⁻¹). La raison est liée à la non-homogénéité de la quantité d'eau dans le pavé du BD. À la fin du 5^{ème} jour la partie supérieure du BD exposé au chauffage était sèche et la partie inférieure était humide ce qui a rendu sa conductivité thermique effective très faible. D'autre part, la température de surface maximale diminue linéairement avec l'augmentation de la teneur en eau. Au 5^{ème} jour, le BD n'étant pas totalement sec dans le volume, le phénomène de refroidissement est encore actif, même si la surface de BD est sèche.

VI. CONCLUSION

Lors de cette étude on s'est intéressé au comportement thermique du béton drainant (BD) en condition sèche et humide sous conditions climatiques contrôlées en laboratoire. Un banc

expérimental innovant a été développé, et a permis de valider les résultats du modèle analytique. Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit :

- La température de surface du BD est jusqu'à 6°C plus élevée que celle du BO en condition sèche durant la journée et jusqu'à 4°C moins élevée que celle du BO durant la nuit.
- L'augmentation de la conductivité thermique du BD de 0,473 à 0.835 W.m⁻¹.K⁻¹ rend sa température de surface maximale de 1.6°C moins chaude durant la journée. Par contre elle rend sa température de surface plus chaude durant la nuit. L'augmentation de la conductivité thermique est une solution à éviter dans les pays qui souffrent du problème des ICUs nocturne.
- L'augmentation de l'albédo du BD de 0.15 à 0.35 donne lieu à une diminution de la température de surface maximale de 4°C durant la journée. En outre, une baisse de température de surface durant la nuit a été observée. Ainsi, ce facteur représente une solution avantageuse pour lutter contre les problématiques des îlots de chaleur urbains diurne et nocturne.
- L'étude de sensibilité montre que la température de surface du BD est plus sensible à l'albédo qu'à la conductivité thermique. Donc le facteur de l'albédo est à privilégier dans la conception des chaussées de béton drainant rafraichissant.
- Le BD joue un rôle important pour lutter contre la formation des îlots de chaleur urbains à condition qu'il soit humide. Lors du premier jour d'arrosage, l'effet de refroidissement par évaporation assure une baisse de température de surface de 19,9°C.
- Le BD ne peut être plus frais que le béton ordinaire que si sa surface est mouillée chaque 3 jours, soit par des précipitations, soit par des moyens artificiels.
- Le phénomène de refroidissement évaporation du béton drainant est contrôlée par la disponibilité de l'eau près de la surface même s'il n'est pas totalement sec dans le volume.
- La conductivité thermique du BD en condition humide diminue linéairement avec la diminution de la teneur en eau contrairement à la température de surface maximale.

REFERENCES

- [1] Carpio, M., González, Á., González, M., & Verichev, K. (2020). Influence of pavements on the urban heat island phenomenon: A scientific evolution analysis. *Energy and Buildings*, 226, 110379.
- [2] Akbari, H., & Rose, L. S. (2001). Characterizing the fabric of the urban environment: a case study of metropolitan Chicago, Illinois. *Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-49275, Berkeley, CA*.
- [3] Seifeddine, K., Amziane, S., & Toussaint, E. (2021). State of the art on the mechanical properties of pervious concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-29.
- [4] Seifeddine, K., Amziane, S., & Toussaint, E. (2021). Etat de l'art sur les propriétés mécaniques du béton drainant. *Academic Journal of Civil Engineering*, 39(1), 43-46.
- [5] Shan, J., Zhang, Y., Wu, S., Lin, Z., Li, L., & Wu, Q. (2022). Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. *Construction and Building Materials*, 327, 126874.
- [6] Li, L. G., Feng, J. J., Lu, Z. C., Xie, H. Z., Xiao, B. F., Kwan, A. K. H., & Jiao, C. J. (2022). Effects of aggregate bulking and film thicknesses on water permeability and strength of pervious concrete. *Powder Technology*, 396, 743-753.
- [7] Hendel, M. (2020). Cool pavements. In *Eco-efficient pavement construction materials* (pp. 97-125).
- [8] Li, H., Harvey, J. T., Holland, T. J., & Kayhanian, M. (2013). The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management. *Environmental Research Letters*, 8(1), 015023.
- [9] Qin, Y., & Hiller, J. E. (2016). Water availability near the surface dominates the evaporation of pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, 111, 77-84.
- [10] Chen, J., Wang, H., Xie, P., & Najm, H. (2019). Analysis of thermal conductivity of porous concrete using laboratory measurements and microstructure models. *Constr. Build. Mater.*, 218, 90-98.
- [11] S. R. O. Aletba et al., "Thermal performance of cooling strategies for asphalt pavement: a state-of-the-art review," *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 8, no. 3, pp. 356-373, 2021.
- [12] Zhang, R., Jiang, G., & Liang, J. (2015). The albedo of pervious cement concrete linearly decreases with porosity. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
- [13] Cortez, P., & Embrechts, M. J. (2013). Using sensitivity analysis and visualization techniques to open black box data mining models. *Information Sciences*, 225, 1-17.
- [14] Qin, Y., He, Y., Hiller, J. E., & Mei, G. (2018). A new water-retaining paver block for reducing runoff and cooling pavement. *Journal of Cleaner Production*, 199, 948-956.