

## ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU REFROIDISSEMENT PAR ÉVAPORATION DES PAVÉS RAFRAICHISSANTS À RÉTENTION D'EAU.

M. Rachedi<sup>A</sup>, R. Bui<sup>A</sup>, O. Maurel<sup>A</sup>, C. La Borderie<sup>A</sup>.

A Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, SIAME, Anglet, France

**RÉSUMÉ** : L'objectif du projet de recherche est de concevoir un revêtement urbain horizontal de type dallage en béton rafraichissant avec rétention d'eau permettant de diminuer l'Ilot de Chaleur Urbain(ICU). Le principe de conception est de retrouver le fonctionnement hygro-thermique d'un sol naturel : absorption de l'eau de ruissellement, stockage de l'eau puis évaporation de l'eau de surface par utilisation de cheminées capillaires. Le système a pour but d'avoir une efficacité sur une durée de plusieurs jours en alimentant l'évaporation par capillarité. Le dallage sera situé sur un dispositif de rétention d'eau récupérant les eaux de ruissellement. La structure poreuse permettra d'alimenter, depuis le dispositif de stockage par capillarité, la surface supérieure en eau pour évaporation et rafraichissement de l'air ambiant. Cet article présente les principes d'élaboration d'un dispositif expérimental simplifié permettant de caractériser l'efficacité de refroidissement de matériaux constitutifs de dallages urbains. Trois résultats d'essais réalisés sur un béton de composition usuelle sont présentés et discutés et permettent de mettre en évidence l'efficacité thermique de tels systèmes avec ou sans capillarité.

### 1. INTRODUCTION

L'îlot de chaleur est un phénomène météorologique provoquant une hausse des températures dans les centres urbains fortement minéralisés en été et la nuit quand la chaleur accumulée est relâchée dans l'atmosphère. Il est principalement dû aux transports, à la consommation énergétique des bâtiments et à l'activité humaine et demeure fortement dépendant des matériaux utilisés dans l'espace urbain (béton, asphalte, métal) et de leur capacité à absorber la chaleur (Beckers., 2013).

Végétaliser les espaces urbains permet de diminuer la température de l'air par la rétention d'eau dans les végétaux, d'augmenter le taux d'humidité par le stockage temporaire de l'eau de pluie, de rafraîchir naturellement l'air ambiant, d'améliorer la qualité de l'air et de participer à la biodiversité urbaine.

Les bétons traditionnels et matériaux bitumineux sont les principaux matériaux utilisés comme revêtement de surface urbaine. Du fait de leurs fortes capacités calorifiques, ils contribuent à stocker la chaleur (radiations solaires et convection) et la restituer à l'air ambiant accentuant ainsi l'ICU.

A l'opposé, les matériaux de chaussée dits « rafraichissants » utilisent principalement trois phénomènes physiques : la réflexion des radiations solaires, la diminution de la capacité de stockage de la chaleur et l'évaporation de l'eau de ruissellement. Trois types de revêtements de chaussée rafraichissants, basés sur ces trois propriétés physiques, sont essentiellement utilisés : les pavés réfléchissants, les pavés dont la capacité de stockage de la chaleur est modifiée et les pavés utilisant l'évaporation de l'eau.

Par leur clarté, les revêtements de chaussée en béton bénéficient d'un albedo (quantité de rayonnement solaire réfléchi) élevé. L'utilisation de béton clair pour les parvis, les trottoirs ou les parements permet ainsi d'augmenter la réflexion solaire.

Il est également possible de rafraîchir les matériaux constitutifs des revêtements : matériaux drainants permettant l'humidification des sols par infiltration ou matériaux rafraîchissants.

Plusieurs types de revêtements de chaussées contribuent ainsi à l'humidification des sols et rafraîchissement de l'air ambiant (Anupan B.R. et al., 2021). Les pavés drainants sont munis de drains (encoches ou trous verticaux) permettant à l'eau d'atteindre le sol sous le pavé. Les pavés poreux sont constitués de granulats agglomérés avec des liants et possèdent une structure poreuse perméable permettant d'infiltrer les eaux de ruissellement. Ils possèdent une meilleure capacité de stockage de l'eau que les pavés drainants (perméabilité de  $10^{-8}$  à  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>) mais transmettent néanmoins l'eau au sol supportant les pavés. Le troisième type de pavés est dit à joint large. Des écarteurs entre les pavés permettent des joints perméables larges de 2 à 4 cm.

Le dernier type de pavé rafraîchissant est perméable à rétention d'eau. Les couches supérieures sont perméables et absorbent l'eau de pluie, les couches inférieures sont imperméables et permettent de stocker l'eau au sein du matériau. La structure poreuse est dimensionnée de façon à permettre un effet de « pompe capillaire » permettant de maintenir un front de vaporisation d'eau proche de la surface supérieure et de rafraîchir, à la fois, la surface supérieure et l'air ambiant par vaporisation de l'eau. (Wang, J. et al., 2018) ont étudié les propriétés d'absorption d'eau de pavés en brique de céramique poreuse et en béton perméable. Il a été mis en évidence que l'efficacité du refroidissement était accrue par des forces capillaires importantes. Cependant, les conclusions sont restreintes à des conditions de températures et hygrométries très élevées.

(Li H., et al., 2014) ont mesuré et testé des taux d'évaporation de différents pavés perméables sous conditions in-situ. Les résultats ont montré qu'un faible pourcentage de vides et une faible perméabilité permettent d'accroître l'évaporation et de contenir l'eau dans les pores du matériau. Des taux d'évaporation à trois jours compris entre 0,1 et 0,3 mm/h ont été enregistrés sur des pavés d'asphalte et bétons perméables. Le programme expérimental de (Dong Q., et al., 2019) sur un pavé à rétention d'eau indique qu'un coefficient de perméabilité saturé supérieur à  $5 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup> était préférable pour optimiser l'efficacité thermique du système. De plus, le rafraîchissement par évaporation n'est efficace qu'à partir d'une température de surface de 40°C. Cependant, ces conclusions sont issues de simulations et essais de laboratoire et doivent être vérifiées in-situ. (Qin Y., et al., 2016) ont modélisé les taux d'évaporation de pavés en béton poreux. Les résultats montrent que plus la distance entre la surface supérieure de l'eau dans le matériau et la surface supérieure chaude, est faible plus le refroidissement est important. Les systèmes utilisant la capillarité pour rafraîchir la partie supérieure du pavé sont efficaces si la distance entre l'eau et la face supérieure est inférieure à 25 mm. (Liu Y., et al. 2018) ont constaté, sur la base d'essais de laboratoire, que les chaussées rafraîchissantes par évaporation contribuent grandement à l'atténuation de l'îlot de chaleur, avec un refroidissement maximal de 9,4 °C par rapport aux chaussées perméables traditionnelles. Une confirmation de cet effet bénéfique a été effectuée en conditions in-situ et à échelle réelle sur des modules de surface 6m x 6m par (Liu Y., et al. 2021) à Tongji (Chine). Les pavés étaient constitués d'une zone inférieure de stockage d'eau en polyéthylène haute densité et de colonnes capillaires. La température de tels pavés était de 15°C à celle de pavés conventionnels. De plus, le volume des eaux de ruissellement est réduit de 90% en utilisant des pavés à rétention d'eau et cheminée capillaire par rapport à des pavés traditionnels.

Il apparaît à l'issue de cet état des connaissances que l'efficacité des pavés à rétention d'eau avec effet capillaire est indéniable (rafraîchissement important et captation importante des eaux de pluie).

Les paramètres influençant la mise au point et l'efficacité de ces dispositifs sont nombreux (Wardeh. Y. et al. 2022) : propriétés physiques du matériau (porosité, perméabilité, structure granulaire, épaisseur du pavé, gradient thermique entre la face supérieure et inférieure, hauteur du front de vaporisation et capacité de stockage de l'eau de pluie). Cependant, les diverses campagnes expérimentales en conditions réelles ou de laboratoire ne sont pas uniformisées et ne permettent d'analyse comparative de l'efficacité des divers types de pavés présentés. C'est pourquoi, l'objectif premier de ce projet de recherche est d'élaborer un dispositif expérimental simplifié permettant de caractériser l'efficacité thermique de pavés rafraîchissants avec rétention d'eau.

## 2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

### 2.1 Matériaux et échantillons

Des échantillons de mortier avec des thermocouples placés à l'intérieur sont utilisés pour étudier le rafraîchissement par capillarité lorsqu'ils sont soumis à une source de chaleur. Du ciment CEM V et du sable normalisé (CEN EN 196-1) sont utilisés dans la composition de ce mortier. Le Tableau 1 résume les proportions de chaque constituant utilisé. Après malaxage du mortier, le mélange est coulé dans des éprouvettes en carton de 7 cm de diamètre et 10 cm de hauteur. L'épaisseur de 10cm choisie correspond à l'épaisseur habituelle de pavés ou éléments de chaussée en béton. Les thermocouples sont disposés avant coulage dans ces éprouvettes, répartis au milieu selon l'axe vertical de chaque éprouvette. Les éprouvettes sont vibrées pendant 2 min afin d'éliminer l'excès d'air et obtenir un mélange compact. Après 24h, les échantillons sont démoulés et placés dans un bassin de cure pendant 28 jours. Le positionnement spatial des thermocouples est vérifié par tomographie des échantillons.

Tableau 1. Composition du mortier

CEM V	Sable Normalisé	Eau	Superplastifiant
22,7%	68%	9%	0,3%

### 2.2. Séchage et préparation des échantillons

Au terme des 28 jours, les échantillons sont placés dans une étuve à une température de 80°C. Le séchage à cette température permet la préservation de la structure du réseau poreux. Une fois les échantillons secs, les faces latérales sont isolées avec de la mousse de polyuréthane (Figure 1 b) afin d'avoir un transfert thermique et massique vertical unidirectionnel. La plaque en polyuréthane mesure 25 cm de côté et 9 cm d'épaisseur, laissant l'échantillon dépasser de 1 cm. Cette épaisseur de 1 cm (face inférieure de l'échantillon) est en contact avec l'eau pensant l'essai.



Figure 1. a) Échantillon de mortier couvert latéralement de papier en aluminium, b) Échantillon placé à l'intérieur de la plaque isolante en polyuréthane.

### 2.3 Dispositif expérimental

La Figure 2 montre le dispositif expérimental utilisé pour étudier les pavés rafraichissants par capillarité. Le bloc éprouvette en mortier avec l'isolant est suspendu à une balance de précision 0,1 g. Cette dernière mesure la variation de masse de l'ensemble, due à l'évaporation ou à la capillarité, tout le long de l'essai. Une lampe infrarouge, est utilisée comme source de chaleur, elle est placée à 30 cm au-dessus de la face supérieure de l'échantillon. La face inférieure demeure en contact avec l'eau. Le niveau de l'eau est maintenu constant à l'aide d'un dispositif de déversoir en deux bacs et reliés entre eux par une pompe péristaltique. L'eau qui se déverse du premier bac au deuxième bac est réacheminée jusqu'au premier bac

grâce à la pompe. Les sept thermocouples disposés à l'intérieur du matériau mesurent l'évolution de la température dans l'échantillon en fonction du temps. Le thermocouple le plus proche de la surface supérieure chauffée est à une distance de 5mm, les autres sont positionnés tous les 15 mm. Trois thermocouples complémentaires sont placés sur la face inférieure EN CONTACT AVEC l'eau et un dernier mesure la température de l'air. La vitesse de l'air en contact avec la face supérieure est également mesurée à l'aide d'un anémomètre afin d'évaluer à la fois la convection sur la face supérieure chauffée et la force de dépression verticale sur la face supérieure. L'ensemble du dispositif est placé dans une salle dont la température est contrôlée et fixée à 23°C. La température de surface est mesurée ponctuellement par une caméra thermique. Ceci permet, tout d'abord, de comparer la température de surface et la température à 5 mm de la surface supérieure et ensuite de vérifier l'uniformité de la température de surface. Le gradient de température mesuré sur la surface supérieure est inférieur à 1°C.

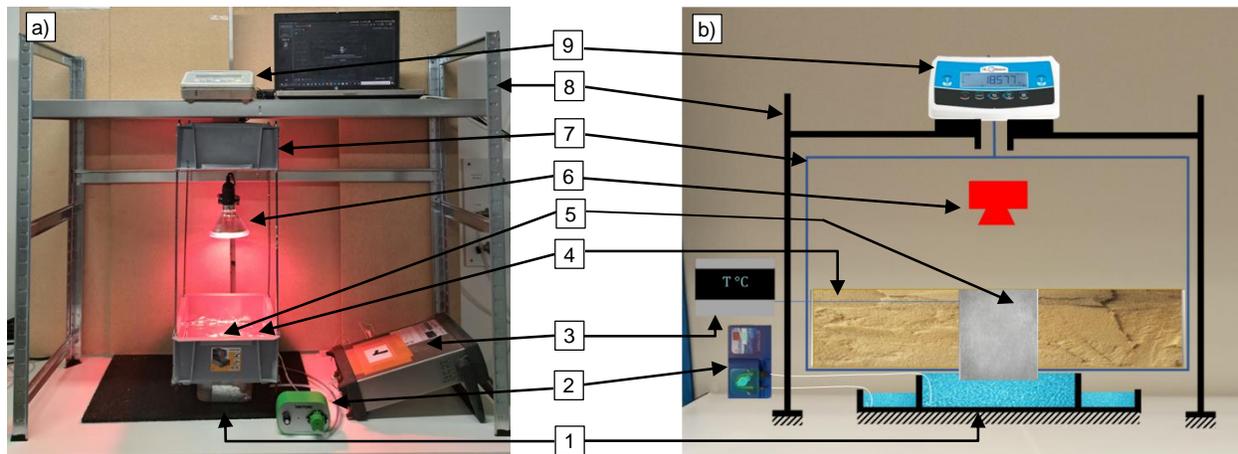


Figure 2. Dispositif de test sur les échantillons de mortier. a) Photo du dispositif réel, b) Schéma descriptif de principe du dispositif (1 : bac d'eau, 2 : pompe péristaltique, 3 : thermocouples + acquisition, 4 : mousse polyuréthane, 5 : Pavé en mortier, 6 : Lampe infrarouge, 7 : support suspendu à la balance, 8 : bâti support pour la balance, 9 : balance)

### 3. PROGRAMME D'ESSAIS

Trois tests comparatifs sont illustrés dans la partie suivante. Le premier échantillon de béton ordinaire est entièrement sec et isolé de l'eau durant la phase de chauffage. Le second échantillon est entièrement sec au début de l'essai puis mis au contact étanche de l'eau durant l'essai. Un film étanche permet d'empêcher la capillarité. La puissance de la lampe (source de chaleur) a été réglée pour que la température de surface sur l'échantillon complètement sec et sans contact avec l'eau soit de 65°C. Pour le troisième essai, l'échantillon complètement sec est mis en contact avec l'eau sans film d'étanchéité et l'effet de capillarité apparaît pendant le chauffage. Ces trois essais permettront de caractériser l'influence de la capillarité et du bain de la face inférieure sur la distribution de température dans un matériau poreux complètement sec.

Le séchage est réalisé dans une étuve à 80°C et les échantillons sont considérés secs si la variation de masse entre deux mesures espacées de 24h est inférieure à 0,1%. Le séchage est effectué à 80°C afin de ne pas endommager la structure poreuse du matériau, même si un chauffage à 105 °C permettrait un meilleur séchage, il risquerait de modifier la structure poreuse par création de microfissures.

#### 3.1 Test sur échantillon sec sans contact avec l'eau

Ce premier test a pour but de mesurer l'évolution de la température dans l'échantillon de mortier sans l'influence de la capillarité et sans contact avec l'eau. Ce test servira de référence pour le test suivant durant lequel l'échantillon sera en contact avec l'eau mais sans capillarité possible. Comme le dispositif est suspendu à la balance, la face inférieure est soumise à l'air ambiant. Au cours de l'essai, l'air entre la lampe

et l'échantillon chauffe alors que l'air ambiant reste à température constante (23°C). Ce qui nous donne deux modes de convection à des températures différentes sur chaque face.

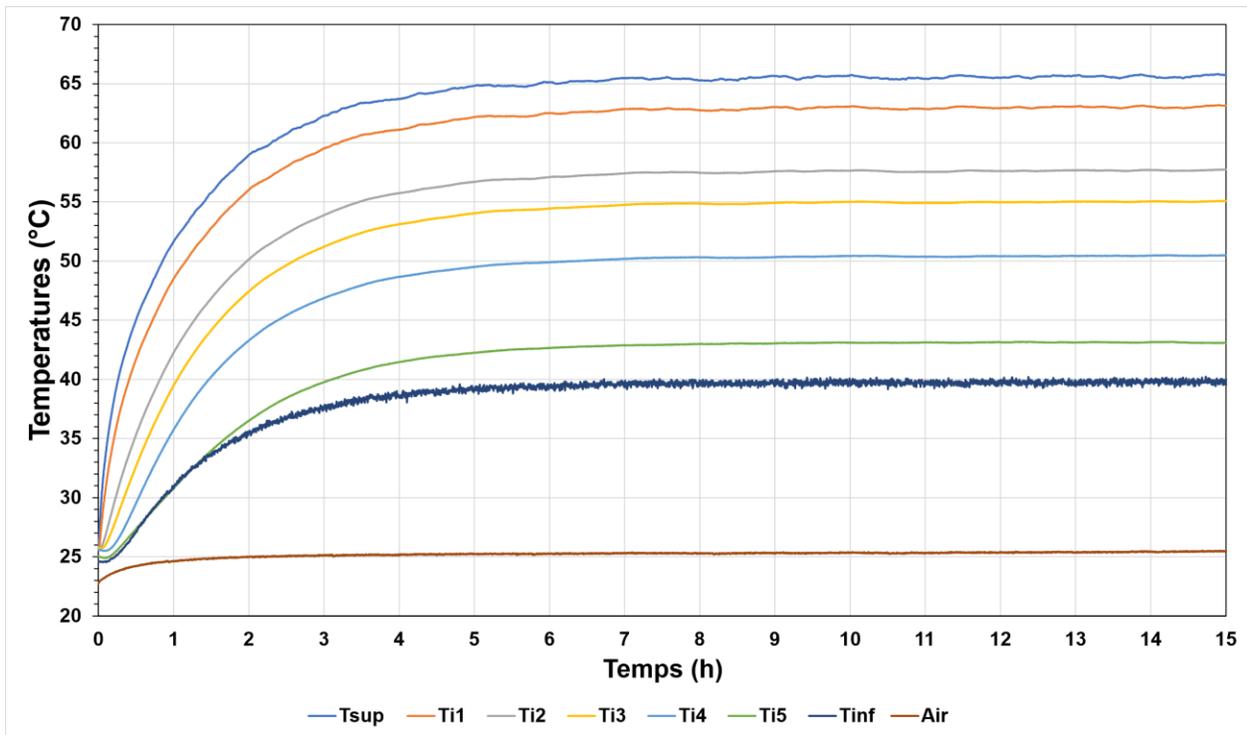


Figure 3. Distribution de la température en fonction du temps d'un échantillon sec sans l'effet de capillarité.

La Figure 3 montre la distribution de la température en fonction du temps. La courbe  $T_{sup}$  correspond au thermocouple placé à 5 mm de la face supérieure. Un thermocouple est collé sur la face inférieure et les mesures sont représentées par la courbe  $T_{inf}$  en fonction du temps. Entre ces deux thermocouples, cinq thermocouples intermédiaires ( $T_{i1}$ ,  $T_{i2}$ ,  $T_{i3}$ ,  $T_{i4}$  et  $T_{i5}$ ) mesurent la température à l'intérieur de l'échantillon. Un dernier thermocouple est utilisé pour mesurer la température de l'air autour du dispositif.

En régime permanent, la température maximale atteint les 65,8 °C mesuré à l'intérieur de l'échantillon à 5 mm de la face chauffée par la lampe. La température maximale sur la face inférieure est de 39,2°C.

### 3.2 Test sur échantillon en contact étanche avec l'eau

Mettre en contact la face inférieure avec l'eau fait intervenir deux phénomènes pendant le test : l'évaporation de l'eau remontée dans l'échantillon par capillarité ainsi que la dissipation de l'énergie thermique par le bac à eau qui reste à température constante. L'objectif de ce test est d'isoler l'effet de l'eau capillaire sur l'évolution de la température. Par conséquent, une membrane d'étanchéité est placée entre l'eau et la face inférieure de l'échantillon. Un thermocouple supplémentaire est utilisé pour mesurer la température de l'eau. D'après la Figure 4, les températures maximales  $T_{sup}$  et  $T_{inf}$  mesurées en régime permanent sont respectivement de 56,7°C et de 29,9°C, soit une diminution de 9,1 °C sur  $T_{sup}$  et de 13,3 °C sur  $T_{inf}$  par rapport au test précédent. La température de l'eau dans le bac, initialement à 23°C a augmenté jusqu'à atteindre 26,5°C.

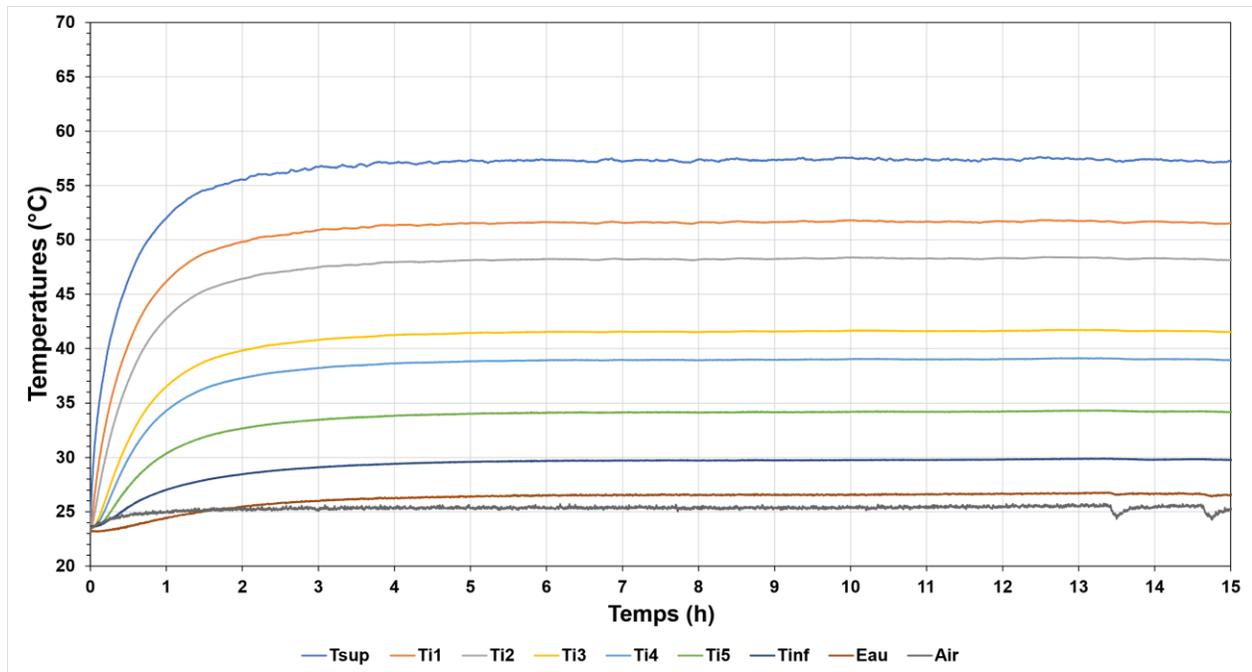


Figure 4. Distribution de la température en fonction du temps d'un échantillon sec en contact étanche avec l'eau (sans l'effet de capillarité)

Mettre en contact l'échantillon avec de l'eau permet de dissiper de la chaleur et fait diminuer d'environ 9°C la température maximale au voisinage de la face supérieure.

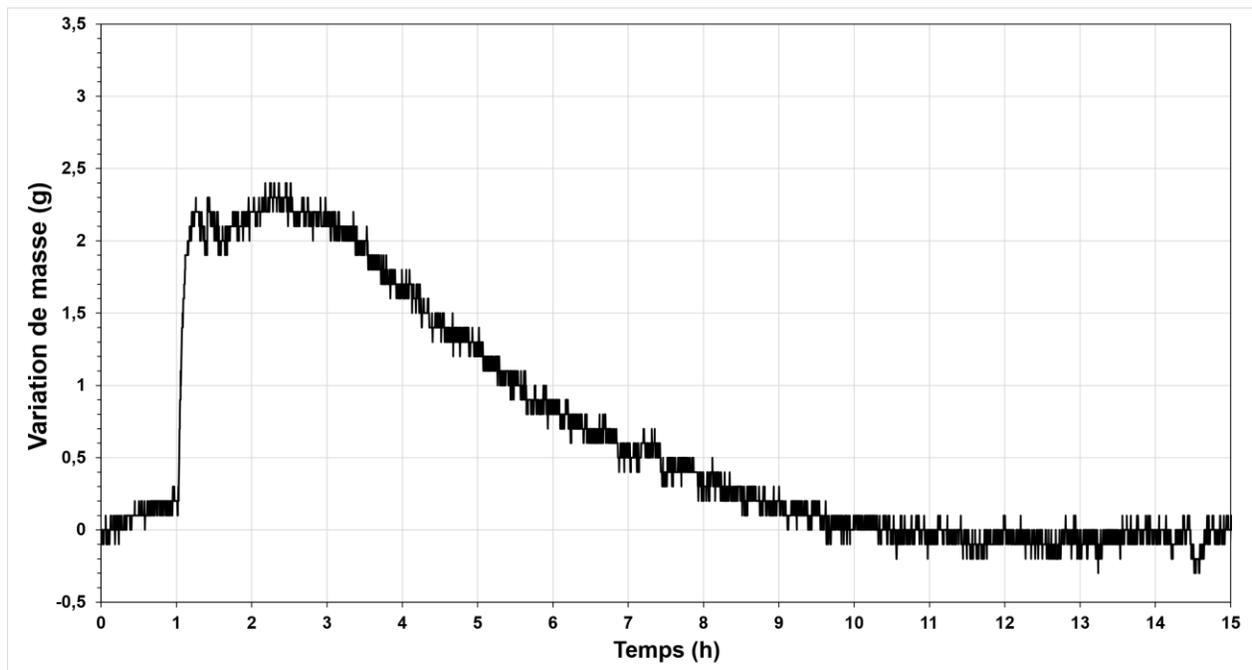


Figure 5. Variation de masse de l'échantillon de mortier en contact étanche avec l'eau (sans la capillarité).

La figure 5 présente la variation de masse de l'échantillon en fonction du temps. La courbe ne se stabilise qu'après quatre heures en raison des deux modes de convection différents sur les faces supérieures et inférieures de l'échantillon. Une augmentation subite de la masse de l'échantillon est observée au moment où la lampe infrarouge est allumée (après 1h de mesure). Cette augmentation concorde avec l'augmentation de la température de la surface supérieure de l'échantillon. Plusieurs phénomènes simultanés peuvent expliquer cette singularité : dépression de la face supérieure due à la convection de l'air, poussée d'Archimède sur la face inférieure, ou encore la dilatation thermique des tiges supports.

### 3.3 Test sur échantillon en contact direct avec l'eau

Ce dernier test a pour but d'identifier l'influence de l'eau capillaire sur la distribution de température dans l'échantillon. L'échantillon est en contact direct avec l'eau qui peut s'infiltrer par capillarité dans l'échantillon. Les températures mesurées au cours du test sont représentées sur la Figure 6.

Les deux températures  $T_{sup}$  et  $T_{inf}$  mesurées en régime permanent sont respectivement  $53,1^{\circ}\text{C}$  et de  $28,3^{\circ}\text{C}$ . Les températures respectives étaient de  $56,7^{\circ}\text{C}$  et de  $29,9^{\circ}\text{C}$  pour l'essai sans capillarité. La baisse des températures respectives de la face supérieure et inférieure est de  $3,6^{\circ}\text{C}$  et  $1,6^{\circ}\text{C}$ . Une légère diminution est constatée par rapport à l'essai en contact étanche avec l'eau. Cette tendance reste toutefois trop faible pour conclure sur l'impact de l'eau capillaire. Cet effet s'explique par l'épaisseur importante de l'échantillon diminuant l'efficacité de la « pompe capillaire ».

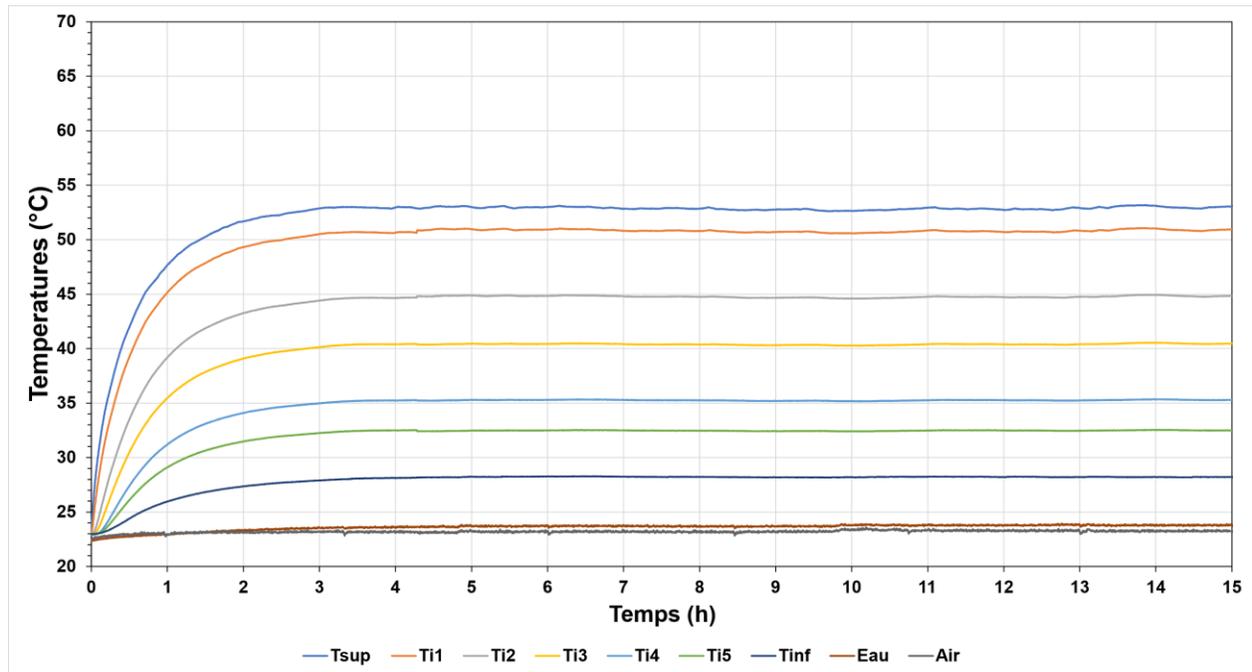


Figure 6. Distribution de la température en fonction du temps d'un échantillon sec en contact avec l'eau (avec capillarité)

La figure 7 illustre la variation de masse de l'échantillon au cours du chauffage. Il apparaît que la courbe obtenue suit une variation identique à celle de l'essai sur l'échantillon en contact étanche avec l'eau. Cependant, la courbe se stabilise autour d'une perte de masse de  $0,5\text{g}$  à la fin de l'essai après 11 h. Ceci peut s'expliquer par une faible quantité d'eau qui a pu s'infiltrer dans l'échantillon. La durée de l'essai et l'évaporation de l'eau n'ont pas permis d'observer un réel impact sur les températures.

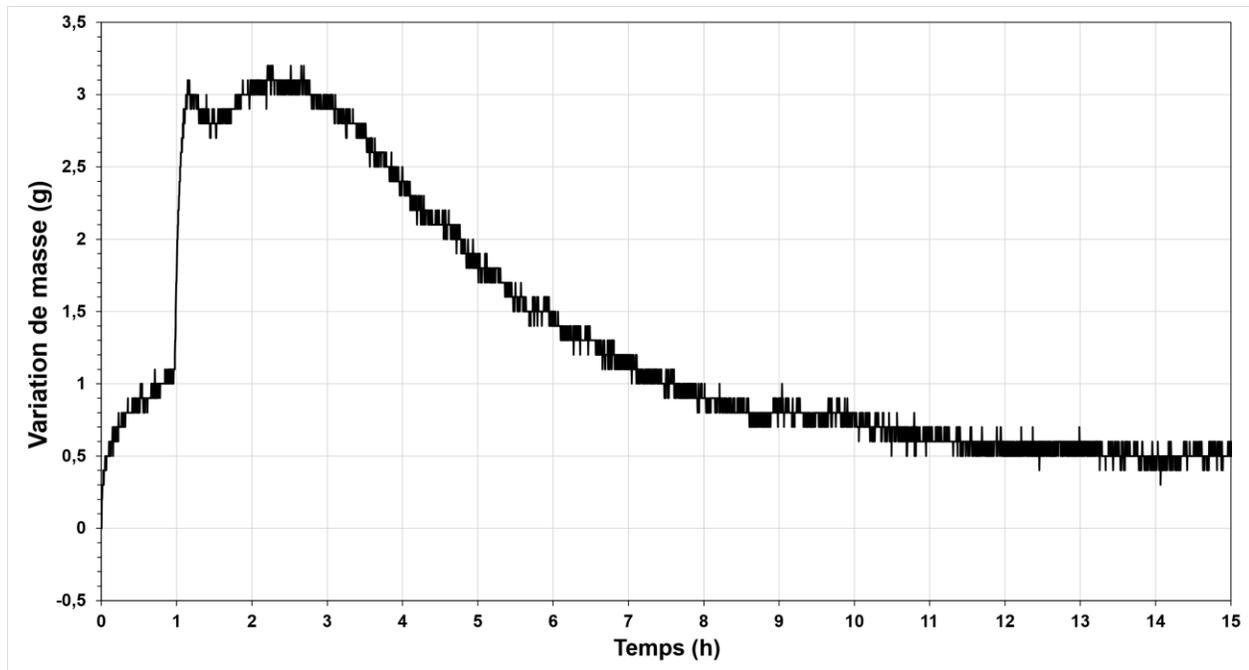


Figure 7. Variation de masse de l'échantillon de mortier en contact avec l'eau (avec la capillarité)

#### 4. CONCLUSION

Cet article présente un dispositif expérimental simplifié de test d'efficacité de refroidissement de pavés de chaussées rafraichissants avec dispositif de rétention d'eau. Il est constitué d'une lampe infrarouge permettant de chauffer l'échantillon isolé thermiquement sur ses faces latérales et plongé dans un bac d'eau à niveau constant sur sa face inférieure. Il permet d'imposer un gradient thermique vertical et un gradient de pression capillaire vertical. Ce dispositif permet d'évaluer et faire varier les principaux paramètres influençant l'efficacité de refroidissement de tels systèmes : structure poreuse, nature du matériau, puissance de chauffage, effet de capillarité. Des thermocouples et une pesée en continu permettent d'enregistrer les pertes de masse et les profils de température dans l'épaisseur de l'échantillon. Les résultats de trois tests réalisés sur des échantillons cylindriques de mortier ordinaire de 10 cm d'épaisseur et préalablement séchés sont illustrés. Différentes conditions de contact avec l'eau sur la base inférieure sont testées. Un essai de référence est réalisé sur un échantillon sec sans contact avec l'eau. Le second échantillon est en contact étanche avec l'eau (sans capillarité). Le troisième échantillon est en contact non étanche avec l'eau (avec capillarité) Des profils de températures à 5 mm de la surface chauffée sont mesurés. La baisse de température entre un essai sec et un essai avec la face inférieure immergée de façon étanche dans l'eau atteint  $9,1^{\circ}\text{C}$  sans capillarité. La baisse de température entre l'essai sec et l'essai immergé avec capillarité atteint  $12,7^{\circ}\text{C}$ . Il est obtenu une diminution de  $3,2^{\circ}\text{C}$  supplémentaires en intégrant l'effet de capillarité.

Ces essais ont permis de montrer que sur un échantillon de mortier ordinaire avec une porosimétrie usuelle et une épaisseur classique d'éléments de chaussée (10 cm), l'effet de rafraichissement par capillarité est peu significatif, l'essentiel du refroidissement est dû au contact de l'eau avec la face inférieure de l'échantillon. Pour améliorer ce système, l'une des perspectives est de diminuer l'épaisseur de l'échantillon afin de rapprocher le front de vaporisation de l'eau capillaire de la face supérieure chauffée ou d'adapter les caractéristiques de sa structure poreuse (dimensions des pores) afin d'augmenter le flux ascendant d'eau capillaire et améliorer l'efficacité de refroidissement du système.

## 5. RÉFÉRENCES

- Beckers, B. (2013) *Solar Energy at Urban Scale*, 1<sup>st</sup> éd, John Wiley & Sons, NJ USA.
- Anupam B.R., Sahoo U.c ., Chandrappa A.K. et al., (2021), Emerging technologies in cool pavements: A review, *Constr. Build. Mater.*, 299, 123892
- Wang J., Meng Q., Tan K. et al. (2018), Experimental investigation on the influence of evaporative cooling of permeable pavements on outdoor thermal environment, *Build. Environ.*, 140, 184–193.
- Li H., Harvey J. et Ge Z., (2014), Experimental investigation on evaporation rate for enhancing evaporative cooling effect of permeable pavement materials, *Constr. Build. Mater.*, 65, 367–375,
- Dong Q., Wang C., Xiong C. et al., (2019), Investigation on the cooling and evaporation behavior of Semi-Flexible Water Retaining Pavement based on laboratory test and thermal-mass coupling analysis, *Materials (Basel).*, 546, 12-16.
- Qin Y., Hiller J.E.,(2016), Water availability near the surface dominates the evaporation of pervious concrete, *Constr. Build. Mater.*, 111, 77–84,
- Liu, Y., Li, T., & Peng, H. (2018). A new structure of permeable pavement for mitigating urban heat island. *Science of The Total Environment*, 634, 1119–1125.
- Liu Y., Li T. et Yu L., (2020), Urban heat island mitigation and hydrology performance of innovative permeable pavement: a pilot-scale study, *J. Clean. Prod.*, 244, 118938,
- Wardeh Y., Kinab E., Escadeillas G. et al., (2022), Review of the optimization techniques for cool pavements solutions to mitigate Urban Heat Islands, *Building and Environment*, 223, 109482