

Étude expérimentale à échelle réduite d'un bassin de toit – Performance de rafraîchissement en climat océanique

Feryal CHTIOUI*, Jean-Paul BAROUX, Emmanuel BOZONNET, Patrick SALAGNAC

LaSIE (UMR CNRS 7356), La Rochelle Université, Av. M. Crépeau, 17042 La Rochelle, France

*(auteur correspondant : feryal.chtioui1@univ-lr.fr)

Résumé - Dans ce papier, on s'intéresse à une technique de rafraîchissement qui est la rétention d'eau en toiture. Un prototype expérimental à échelle réduite, représentant un bâtiment climatisé possédant une toiture-terrasse, a été mis en place et instrumenté. Différents prototypes de toitures sont considérés (bitume, revêtement « cool », bassin d'eau) et testés en climat océanique (La Rochelle). Le prototype, installé en extérieur, permet d'évaluer le flux de chaleur traversant la toiture et les températures de surface de l'enveloppe. Les résultats montrent que la solution du revêtement « cool » et celle du bassin d'eau génèrent un rafraîchissement passif significatif en termes de réduction de température de surface de toiture.

Mots-clés : Expérimentation, Rafraîchissement passif, Bassin d'eau, Toiture, Bâtiment

Nomenclature

e	épaisseur, m	<i>Indices et exposants</i>	
E	éclairage solaire, W/m ²	CD	conduction
p	pression, Pa	CR	toiture « froide » (cool roof)
T	température, K	CV	convection
v	vitesse de vent, m/s	i	intérieur
<i>Symboles grecs</i>		LW	grandes longueurs d'onde
α	absorptivité solaire, -	o	extérieur
ε	émissivité thermique, -	rs	surface de la toiture
φ	densité de flux, W/m ²	Réf	référence (toiture bitumineuse)
λ	conductivité thermique, W/(m.K)	RPB	bassin d'eau avec fond en bitume
f	facteur de décrétement, -	SW	courtes longueurs d'onde
		vs	vapeur saturante
		V	évaporation
		w	eau

1. Introduction

Historiquement, les bâtiments ont été conçus pour répondre à un ensemble connu et prédéterminé de conditions climatiques. Cependant, le climat évolue et sera très différent dans les années à venir avec des périodes caniculaires importantes. On peut le constater actuellement avec les nombreux problèmes d'inconfort générés en période estivale pour les bâtiments non climatisés. La solution « tout climatisé » n'est pas pérenne du fait que ces derniers sont fortement consommateurs d'énergie et utilisent des fluides frigorigènes qui sont de puissants gaz à effet de serre (GES). Pour pallier à cette évolution et limiter le recours à des systèmes de climatisation, il est important de proposer et de développer des solutions de rafraîchissement passif.

Dans cette étude, on s'intéresse aux solutions de rafraîchissement passif qui peuvent être intégrées aux bâtiments possédant des toitures-terrasses afin d'améliorer leur résilience face aux fortes vagues de chaleur. Le rafraîchissement passif a été clairement défini par Jeffry

Cook [1] comme toute technique de conception de bâtiment qui non seulement empêche la chaleur extérieure de pénétrer au sein de celui-ci, mais qui transfère également la chaleur intérieure vers un puits de chaleur naturel. Abrams [2] et Cook [1] résument les recherches sur le rafraîchissement passif en cinq grandes catégories, à savoir : le rafraîchissement radiatif, le rafraîchissement par évaporation, la limitation des gains de chaleur, le couplage avec le sol et le rafraîchissement par ventilation.

Ici, on s'intéresse aux bâtiments commerciaux et industriels. Ceux-ci possèdent généralement une toiture-terrasse de grande dimension. Cette dernière est l'élément de l'enveloppe de bâtiment le plus exposé aux conditions météorologiques. La littérature scientifique présente différents travaux réalisés pour ce type de toiture.

La technique de type « cool roof » consiste à utiliser un revêtement ayant un albédo élevé afin de réfléchir fortement l'éclairement solaire, et ainsi de réduire les apports solaires au bâtiment. Il a été prouvé que cette technique réduit considérablement les charges de refroidissement dans les régions chaudes pendant les périodes estivales. À Iráklion, en Crète, une économie d'énergie de 27 % a été réalisée en utilisant une peinture « cool » ayant une réflectivité solaire de 0,89 [3]. À Catane, en Italie, lors de la journée la plus chaude de l'année, la température du toit a été diminuée de 60°C à 30°C et la charge de pointe de refroidissement a été réduite de 44 % avec une peinture de réflectivité solaire de 0,85 [4].

Concernant le rafraîchissement par évaporation, la littérature scientifique décrit cette solution comme étant probablement l'approche la plus efficace pour les bâtiments situés dans les régions chaudes et arides. Le système de bassin de toit a été étudié pour la première fois en 1920 à l'Université du Texas [2]. A partir de 1967, Harold R. Hay et al. [5] ont travaillé sur un système de bassin de toit et ont déposé un brevet « Skytherm » utilisant ce principe de rafraîchissement. À ce jour, de nombreuses études théoriques et expérimentales sur les bassins de toit ont été réalisées. Plusieurs configurations de bassins de toit ont été proposées et classées en fonction de l'épaisseur de la lame d'eau, de la masse thermique, des propriétés d'isolation et de l'ajout d'éléments d'ombrage ou de matériaux réfléchissants [6,7]. On peut citer notamment une typologie de bassin de toit développée pour limiter les pertes d'eau par évaporation en plaçant une couverture réfléchissante sur le bassin d'eau [8]. La nuit, la vapeur se condense et retombe dans le bassin. Tang et al. [9] ont conçu un système de bassin de toit avec des matériaux absorbants remplis d'eau. Cette typologie se comporte comme un réservoir tampon, stockant l'énergie de la chaleur excédentaire sous forme d'eau chaude. Diverses typologies ont été développées sur ce principe [10,11]. Krüger et al. [12] ont étudié un bassin de toit situé à Maracaibo au Vénézuéla et estimé l'effet du bassin sur la réduction de la température intérieure à partir d'un coefficient de performance (COP). Une valeur de 0,3 pour un climat chaud et humide a été trouvée, comparable aux valeurs obtenues (environ 0,45) pour un climat chaud et sec (région du Néguev, Israël). Raeissi [13] a étudié différents bassins de toit pour un bâtiment climatisé à Shiraz, Iran. Pour les jours d'été typiques, les charges de refroidissement quotidiennes ont été réduites respectivement d'environ 79 %, 58 % et 44 % pour un bassin de toit ombragé, un bassin de toit ouvert et un toit nu ombragé.

Le présent article étudie trois techniques de toitures : une toiture avec un bassin d'eau (5 cm d'eau initialement) dont le fond est en bitume (Solution 1), une toiture avec un revêtement de type « cool-roof » (Solution 2) et une toiture bitumineuse que l'on considérera comme la toiture de référence. La Figure 1 présente ces trois toitures et les échanges thermiques entre les toitures et le milieu extérieur : le rayonnement courtes longueurs d'onde (SW) qui correspond aux apports solaires (E), les échanges convectifs vers l'air ambiant (φ_{Cv0}), les échanges radiatifs en grandes longueurs d'onde (LW) vers la voûte céleste ($\varphi_{LW,net}$) et les échanges évaporatifs (φ_v) pour le bassin d'eau.

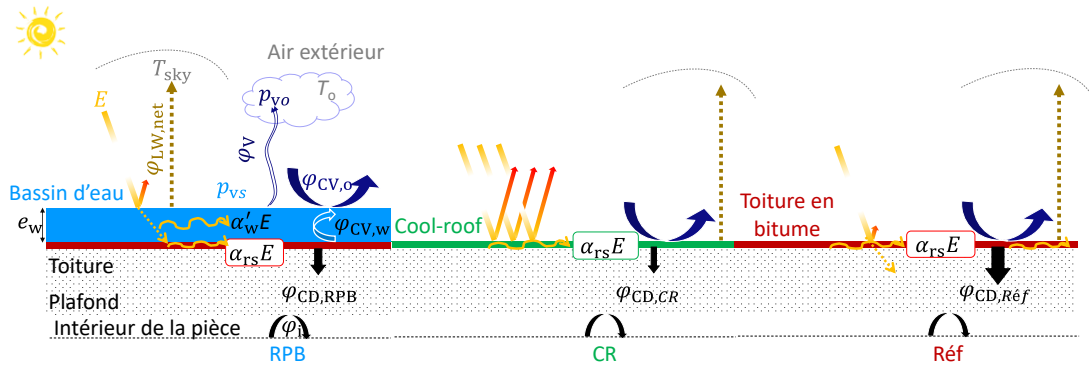


Figure 1 : Les différents échanges thermiques et massiques pour trois configurations de toiture.

L'objectif de l'étude est de comparer expérimentalement le potentiel de rafraîchissement de la solution « cool roof » (CR) et de la solution « bassin d'eau » (RPB) avec la solution de référence (Réf).

Après une description du dispositif expérimental mis en place, les premiers résultats obtenus pour les trois configurations en termes de température de surface et de flux échangés sont présentés et comparés.

2. Dispositif expérimental

Un montage expérimental a été installé à La Rochelle, en climat océanique, avec des hivers doux et des étés assez chauds. Le dispositif expérimental, présenté sur la Figure 2, possède un caisson en bois (OSB3) de dimension $250 \times 70 \times 70 \text{ cm}^3$ et isolé par une couche de polystyrène extrudé d'épaisseur 4 cm.

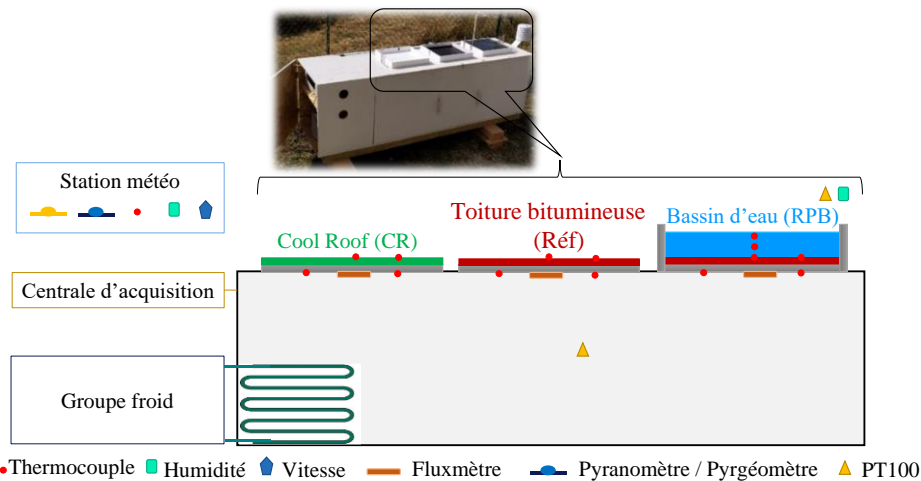


Figure 2 : Photo du dispositif expérimental et positionnement des capteurs sur les trois prototypes : toiture bitumineuse sèche, toiture froide (cool roof) et bassin d'eau.

Au-dessus du caisson sont positionnés trois bacs représentant les trois prototypes de toiture étudiés, chacun de dimension $40 \times 40 \times 5 \text{ cm}^3$. Ces bacs ont été construits en PVC de 18 mm ($\lambda = 0,13 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Trois configurations de toiture sont testées. La première (toiture de référence) est équivalente à une toiture bitumineuse sèche. Une peinture noire, d'émissivité thermique de 0,94 a été déposée sur le PVC. Pour la seconde toiture, de type « cool roof », le PVC a été peint avec une peinture « cool » produite par PrimaCoating©. Son émissivité

thermique ε est de 0,92, et son coefficient d'absorptivité solaire α est de 0,07. Le dernier bac représente une toiture bitumineuse équipée d'un bassin d'eau. Le niveau d'eau initiale du bassin est de 5 cm et l'émissivité thermique de la peinture au fond du bac est de 0,94 et celle de l'eau de 0,96. L'expérience consiste à comparer les deux solutions de rafraîchissement passif à la solution de référence.

L'ambiance intérieure du caisson est climatisée avec un groupe froid ayant une puissance de 150 W (Blue Marine Chiller 200) afin de conserver une température d'air intérieur du caisson quasi-constante et inférieure, pendant la journée, à la température d'air extérieur.

Une station météorologique est installée à côté du montage expérimental (Température de l'air extérieur, éclairement solaire, humidité relative vitesse de vent, et température de ciel). Une mesure est prise tous les 5 minutes. Une centrale d'acquisition (Keysight 34980A) est placée au-dessus de groupe froid dans un compartiment ventilé pour assurer l'enregistrement des données pour chaque essai. Les données sont collectées toutes les minutes et moyennées sur 5 minutes. Le Tableau 1 récapitule les différents capteurs utilisés dans le montage expérimental pour assurer la mesure des différents paramètres physiques à analyser. Les capteurs de température ont été préalablement étalonnés à partir d'une sonde de référence.

Tableau 1 : Description des capteurs installés sur le montage expérimental.

Capteurs	Marque	Description	Précision
1 capteur d'humidité et de température	Vaisala	HMP110	$\pm 1,5 \%$ HR & $\pm 0,2^\circ\text{C}$
2 capteurs de température PT 100	TC SA	PT 100	$\pm 0,55^\circ\text{C}$
14 capteurs de température	TC direct	Type K	$\pm 1,5^\circ\text{C}$
3 fluxmètres	Captec	Capteur de flux thermique ($30 \times 30 \text{ mm}^2$)	$\pm 3 \%$

Une sonde PT 100 a été placée au centre du caisson (Figure 2) pour mesurer la température intérieure. Deux capteurs de température de type K ont été positionnés en surface des bacs avant de peindre ceux-ci. Deux autres thermocouples et un fluxmètre ont été placés au niveau du plafond (en sous-face du bac). Les fluxmètres ont pour objectif de mesurer les flux de chaleur traversant les bacs, pour identifier le potentiel de refroidissement passif des solutions « cool roof » et de bassin d'eau par rapport à la solution de référence. Pour le bassin d'eau, la température de l'eau est mesurée à 2 cm et à 3,5 cm du fond. Un capteur d'humidité et un thermocouple PT 100 sont présents au niveau de l'air juste au-dessus de la surface de l'eau de bassin pour mesurer l'humidité relative et la température extérieure.

3. Résultats et discussion

3.1. Données météorologiques

Plusieurs expériences comparatives ont été réalisées entre le 6 et le 12 octobre 2021 à La Rochelle (France). Une journée type, le 9 octobre, a été choisie pour analyser le comportement thermique des différentes solutions. La Figure 3 présente l'évolution des conditions météorologiques journalières ainsi que la température de surface de la toiture de référence ($T_{Ts,Réf}$). Pour cette journée type, l'éclairement solaire (E) est maximal à 13h55 avec une valeur de $511,5 \text{ W/m}^2$. Quelques passages de nuage sont visibles en début de matinée. La vitesse de vent varie entre 0,1 et 3,15 m/s et la température d'air oscille entre $10,5^\circ\text{C}$ la nuit et $27,6^\circ\text{C}$ au

plus chaud de la journée (16h15). La température à l'intérieur du caisson n'est pas fixe du fait de la puissance très limitée du climatiseur, mais identique pour les 3 toitures.

Concernant la température de surface de la toiture ($T_{rs,Réf}$), celle-ci est inférieure d'environ 2°C à la température extérieure la nuit du fait des échanges radiatifs en grandes longueurs d'onde avec la voûte céleste qui atteint une valeur minimale de 5,6°C (avec une moyenne journalière de 11,7°C). Elle augmente la journée et atteint une valeur maximale de 45,02°C à 14h15, bien supérieure à la température d'air extérieure. On peut noter que cette température augmente très fortement vers 11h. Ceci est dû à un effet d'ombrage d'un bâtiment voisin sur la période 9h – 11h. Le décrochage de la température de surface de la toiture de référence vers 15h15 est dû au passage d'un nuage non visible sur la courbe de l'éclairement solaire du fait du pas d'acquisition de 5 minutes.

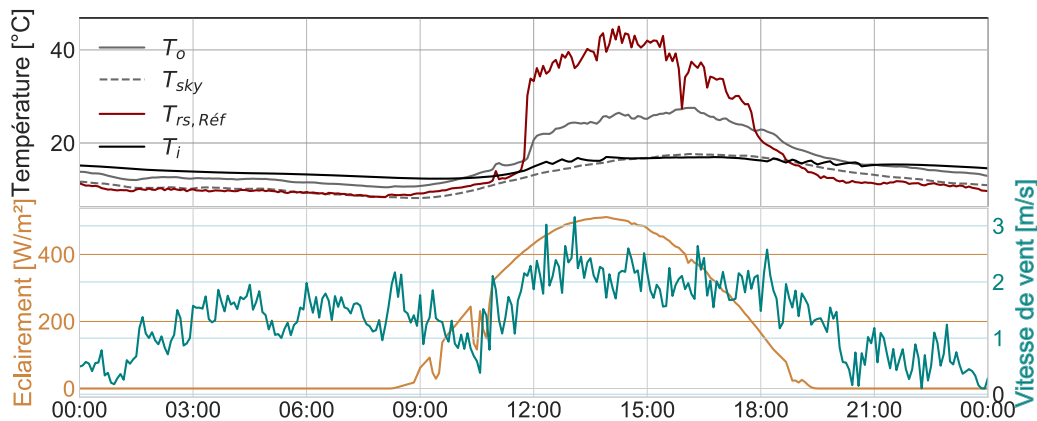


Figure 3 : Evolution des conditions météorologiques (T_{sky} , T_o , E , v), de la température intérieure du caisson (T_i) et de la température de la surface de la toiture de référence ($T_{rs,Réf}$) – le 9/10/2021 à La Rochelle

3.2. Températures de surface des toitures

Les évolutions de température de surface des trois types de toiture (Réf, CR et RPB) et des écarts de température par rapport à la solution de référence sont présentées sur la Figure 4. En journée, les solutions de rafraîchissement passif présentent une réduction de température de surface importante par rapport à la solution de référence. Les températures maximums atteintes par les 3 toitures ($T_{rs,Réf}$, $T_{rs,RPB}$, $T_{rs,CR}$) sont respectivement de 45,02°C, 27,27°C et 20,76°C. La solution « cool roof » est la plus performante, elle permet une réduction de 24,26°C comparée à la solution « bassin d'eau » qui réduit la température maximale de 21,47°C. Il faut noter que l'épaisseur de la lame d'eau est seulement de 5 cm et diminue au cours du temps pour atteindre 4 cm en fin de journée. Du fait de la faible épaisseur de la lame d'eau, une grande partie du rayonnement solaire est directement absorbé par la surface noire du fond du bassin et non par l'eau. Le phénomène d'évaporation permet de réduire la température en surface de la lame d'eau ($T_{w,RPB,max} = 26,38°C$) mais à un effet plus faible au niveau de l'interface eau-PVC ($T_{w,RPB} < T_{rs,RPB}$)

Concernant les déphasages en température que l'on peut observer sur la Figure 4, on peut noter que la température de la toiture de référence suit l'évolution de l'éclairement solaire contrairement aux deux solutions de rafraîchissement qui suivent l'évolution de la température d'air. Un déphasage thermique de 70 minutes peut être observé. Ceci s'explique pour la toiture « cool roof » par le fait que le coefficient d'absorption solaire est très faible, cette toiture est plus sensible aux échanges convectifs avec l'air extérieur. Pour la toiture « bassin d'eau », c'est

l'échange par évaporation avec l'air extérieur qui est le mécanisme principal. Le déphasage de 5 minutes observé entre les deux solutions de rafraîchissement peut s'expliquer aussi par l'inertie générée par la masse d'eau.

La nuit, les échanges radiatifs avec la voûte céleste sont prépondérants. La solution « bassin d'eau » est moins impactée du fait de la capacité thermique de l'eau qui limite cet effet. Les solutions Réf et CR ont des températures similaires du fait de leurs émissivités thermiques très proches.

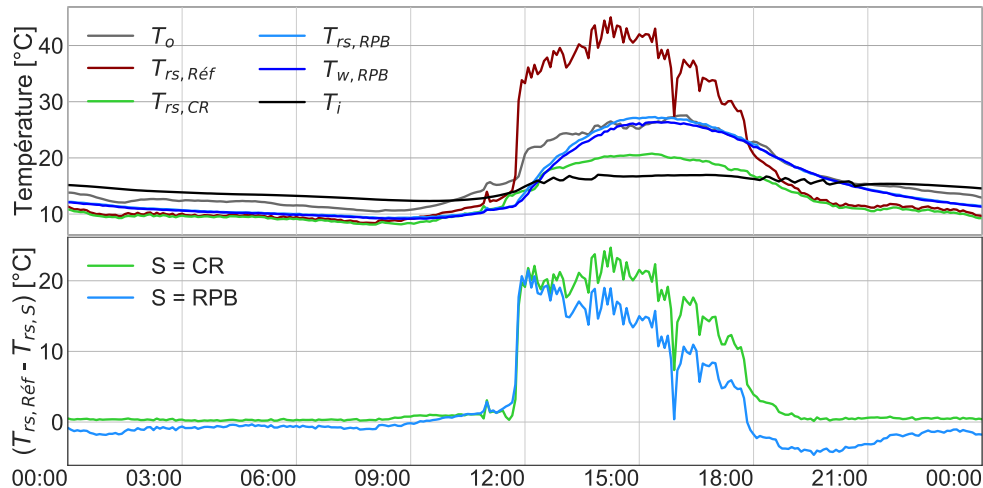


Figure 4 : Evolution de la température d'eau du bassin ($T_{w,RPB}$) et des températures de surface pour les solutions « cool roof » ($T_{rs,CR}$), bassin d'eau ($T_{rs,RPB}$) et référence bitumineuse ($T_{rs,Réf}$).

3.3. Flux de chaleur traversant le bac

La Figure 5 présente l'évolution des flux de chaleur pour les trois types de toiture. En journée, les flux de chaleur maximum entrants (comptés positifs) sont de 139,7 ; 58,8 et 24,9 W/m^2 respectivement pour les solutions Réf, RPB et CR. La nuit, les flux deviennent négatifs (pertes vers l'extérieur). Les valeurs des flux maximum sont respectivement de -28,6 ; -14,5 et -27,1 W/m^2 pour les solutions Réf, RPB et CR. Si on s'intéresse à l'énergie en période diurne, on peut constater que la solution CR est la plus efficace (0,073 $kWh/m^2/jour$) contre 0,159 $kWh/m^2/jour$ pour la solution RPB et 0,642 $kWh/m^2/jour$ pour la référence. Les besoins en rafraîchissement ont été ainsi réduits par 4 avec le bassin d'eau et par 8,7 avec le « cool roof ». La nuit, l'énergie émise pour chaque solution (Réf, RP et CR) est respectivement de -0,318, -0,148 et -0,284 $kWh/m^2/jour$. Si on fait le bilan sur la journée, la toiture de référence absorbe 0,323 $kWh/m^2/jour$, la solution RPB est presque neutre (0,010 $kWh/m^2/jour$) et la solution CR évacue 0,211 $kWh/m^2/jour$ du fait des échanges radiatifs et de la faible quantité d'énergie solaire absorbée en période diurne.

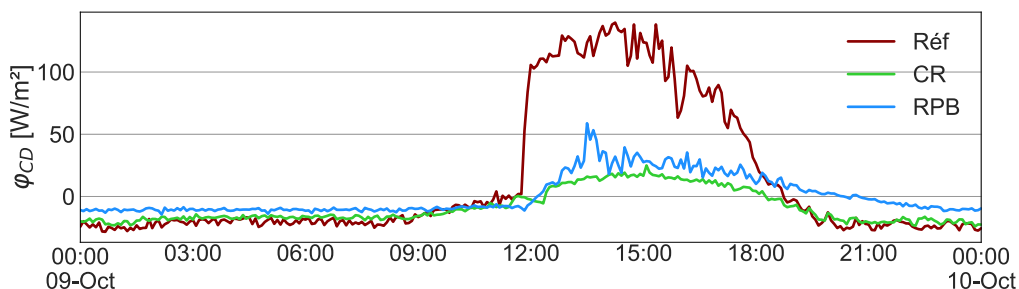


Figure 5 : Evolution des flux de chaleur surfaciques traversant le bac en PVC (+ apports, - pertes).

3.4. Distribution spatiale de la température dans la lame d'eau

La Figure 6 montre l'évolution de l'écart de température entre l'air extérieur et la lame d'eau à différentes hauteurs d'eau z à partir du fond $z = 0$. Les écarts de températures au fond, à 20 et à 35 mm sont similaires de 18h à midi. Durant cette période, les échanges thermiques sont faibles avec l'environnement. On peut considérer que la température au sein du bassin est relativement homogène. A partir de midi, l'écart augmente pour obtenir une valeur absolue maximale de $7,91^\circ\text{C}$ au plus proche de la surface ($z = 35$ mm). Les températures à 20 et 35 mm sont très similaires. La température de l'eau est pratiquement homogène dans la lame d'eau, sauf à l'interface PVC-eau, en raison de la forte absorption solaire du fond du bassin. Le niveau d'eau dans le bassin la fin de la journée est de 41 mm.

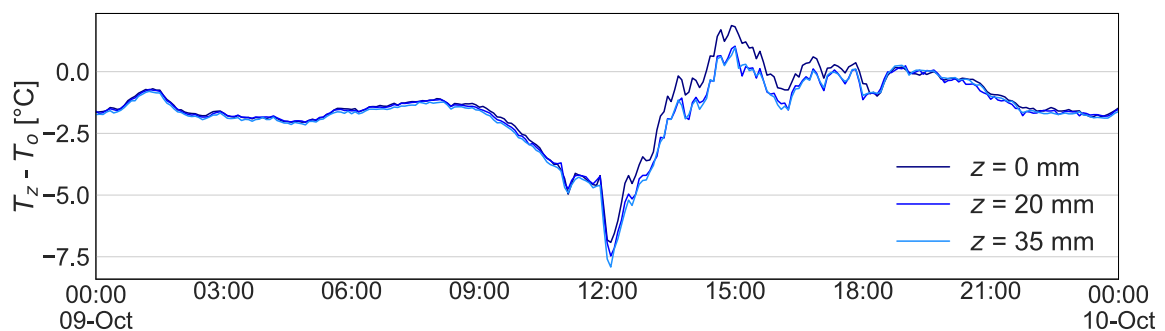


Figure 6 : Distribution de la température dans la lame d'eau par rapport à la température de l'air extérieur.

3.5. Analyse de la performance

Le potentiel de rafraîchissement peut être quantifié via le facteur de décrétement f de la toiture, toiture qui atténue les amplitudes quotidiennes de température à l'intérieur par rapport à l'extérieur [14]. f est donc défini par le rapport entre l'amplitude quotidienne de température en sous-face de toiture ($T_{c,max} - T_{c,min}$), et celle de l'air extérieur ($T_{o,max} - T_{o,min}$). f est ici de 0,95 pour la référence, 0,44 pour le « cool roof », et 0,69 pour le bassin de toit (plus f est faible, plus le flux de chaleur traversant le plafond est atténué).

4. Conclusions

Ces premiers résultats expérimentaux obtenus dans des conditions climatiques océaniques ont permis de quantifier et comparer le potentiel de rafraîchissement en toiture des techniques « cool roof » et bassin d'eau, en référence à un revêtement de toiture classique. Pour une journée type, ce potentiel se traduit par une très forte réduction des apports de chaleur par la surface de toiture (et donc la climatisation), d'un facteur 4 pour le bassin de toit, et 8,7 pour le cool roof. Ces deux solutions permettent non seulement de réduire les apports thermiques au bâtiment, mais également de diminuer la température des composants de toiture.

D'autres essais sont en préparation pour étudier la reproductibilité de ces résultats sur des périodes plus chaudes et en mi-saison. D'autres combinaisons seront également testées, tel qu'une solution combinant bassin d'eau avec un revêtement de fond de type « cool roof », puis comparées aux simulations développées par ailleurs. Ces résultats expérimentaux doivent permettre de consolider le modèle numérique, et à terme de mener des études paramétriques pour des préconisations de bassin de toit comme solution de rafraîchissement adaptée au climat

et aux typologies bâtiments. L'évaluation des indicateurs de performance, en particulier le facteur de décrément, nous permettra de mettre en évidence ce type de solution pour atténuer les effets de vagues de chaleur et du changement climatique tels qu'étudiés dans l'annexe 80 de l'AIE [15].

Références

- [1] Cook J (ed) 1989 *Passive cooling* (Cambridge, MA; Massachusetts Institute of Technology)
- [2] Abrams D W 1986 *Low-energy Cooling: A Guide to the Practical Application of Passive Cooling and Cooling Energy Conservation Measures* (Van Nostrand Reinhold)
- [3] Kolokotsa D, Diakaki C, Papantoniou S and Vlissidis A 2012 Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece *Energy and Buildings* **55** 85–93
- [4] Costanzo V, Evola G, Gagliano A, Marletta L and Nocera F 2013 Study on the Application of Cool Paintings for the Passive Cooling of Existing Buildings in Mediterranean Climates *Advances in Mechanical Engineering* **5** 413675
- [5] brownell blaine 2020 Harold Hay, Skytherm, and the Quest for Passive Cooling *Architect*
- [6] Sharifi A and Yamagata Y 2015 Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review *Applied Energy* **160** 336–57
- [7] Spanaki A, Tsoutsos T and Kolokotsa D 2011 On the selection and design of the proper roof pond variant for passive cooling purposes *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **15** 3523–33
- [8] Ben Cheikh H and Bouchair A 2004 Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates *Renewable Energy* **29** 1877–86
- [9] Tang R and Etzion Y 2004 On thermal performance of an improved roof pond for cooling buildings *Building and Environment* **39** 201–9
- [10] Hay H and Yellott J 1969 Natural air conditioning with roof ponds and movable insulation *ASHRAE Trans.; (United States)* **75**, Part 1
- [11] Runsheng T, Etzion Y and Erell E 2003 Experimental studies on a novel roof pond configuration for the cooling of buildings *Renewable Energy* **28** 1513–22
- [12] Krüger E, González Cruz E and Givoni B 2010 Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate *Building and Environment* **45** 1422–33
- [13] Raeissi S and Taheri M 1996 Cooling load reduction of buildings using passive roof options *Renewable Energy* **7** 301–13
- [14] Asan H and Sancaktar Y S 1998 Effects of Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor *Energy and Buildings* **28** 159–66
- [15] Zhang C, Berk Kazanci O, Levinson R, Heiselberg P, Olesen B W, Chiesa G, Sodagar B, Ai Z, Selkowitz S, Zinzi M, Mahdavi A, Teufl H, Kolokotroni M, Salvati A, Bozonnet E, Chtioui F, Salagnac P, Rahif R, Attia S, Lemort V, Elnagar E, Breesch H, Sengupta A, Leon Wang L, Qi D, Stern P, Yoon N, Bogatu D-I, Forgiarini Rupp R, Arghand T, Javed S, Akander J, Hayati A, Cehlin M, Sayadi S, Forghani S, Zhang H, Arens E and Zhang G 2021 Resilient cooling strategies- a critical review and qualitative assessment *Energy and Buildings* 111312

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'entreprise PrimaCoating à La Rochelle pour avoir fourni une de leur peinture de type « cool roof » et l'avoir appliquée au niveau des bacs expérimentaux.