



**HAL**  
open science

## Comparaison de deux techniques de rafraîchissement passif en toiture sous différentes conditions climatiques

Féryal Chtioui, Emmanuel Bozonnet, Patrick Salagnac, Anaïs Machard

### ► To cite this version:

Féryal Chtioui, Emmanuel Bozonnet, Patrick Salagnac, Anaïs Machard. Comparaison de deux techniques de rafraîchissement passif en toiture sous différentes conditions climatiques. 29e Congrès Français de Thermique, Société Française de Thermique, Jun 2021, Belfort, France. 10.25855/SFT2021-010 . hal-03695433

**HAL Id: hal-03695433**

**<https://hal.science/hal-03695433>**

Submitted on 14 Jun 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Comparaison de deux techniques de rafraîchissement passif en toiture sous différentes conditions climatiques

## Comparison of two passive cooling techniques for roofs under various climatic conditions

Féryal CHTIOUI\*, Anaïs MACHARD, 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** – Depuis quelques années, du fait de la hausse des températures et de périodes caniculaires, les bâtiments doivent répondre à de nouveaux enjeux qui sont d'éviter l'inconfort d'été. Ce contexte nous a amenés à étudier, en période estivale, une technique de rafraîchissement passif par rétention d'eau en toiture-terrasse de bâtiments commerciaux, d'en évaluer son potentiel et de la comparer à une autre solution de rafraîchissement passif de type « cool-roof ». Les performances thermiques de ces solutions sont évaluées pour différents paramètres de conception, différentes localisations et pour différents climats (actuel, futur et canicule future). Les résultats des simulations montrent une diminution de 83 à 196 % des besoins de froid par rapport à une toiture classique bitumineuse.

**Mots-clés** : Rétention d'eau, Evaporation, Changement climatique, Toiture, Simulation

**Abstract** - In recent years, due to rising temperatures and heat waves, buildings have had to respond to new challenges to avoid summer discomfort. This context has led us to study, during the summer period, a passive cooling technique using water retention in the roof terraces of commercial buildings, to evaluate its potential and to compare it to another passive cooling solution of the "cool-roof" type. The thermal performances of these solutions are evaluated for different design parameters, different locations and for different climates (current, future and future heat wave). Simulation results show a reduction in cooling needs ranging from 83 % to 196 % in comparison to a conventional bituminous roof.

**Keywords**: Water Retention, Evaporation, Climate Change, Roof, Simulation

### Nomenclature

$\Delta B$  réduction des besoins de froid, kWh  
 $c_p$  chaleur massique à p. cste, J/(kg.K)  
 $e$  épaisseur, m  
 $E_s$  éclairement solaire, W/m<sup>2</sup>  
 $h$  coeff. d'échange surfacique, W/(m<sup>2</sup>.K)  
 $l_v$  chaleur latente de vaporisation, J/kg  
 $n$  vecteur normal  
 $p$  pression, Pa  
 $q_m$  débit évaporé, kg/s  
 $t$  temps, s  
 $T$  température, °C  
 $V$  vitesse de l'air, m/s

### *Symboles grecs*

$\alpha$  absorptivité solaire  
 $\varphi$  densité de flux, W/m<sup>2</sup>  
 $\lambda$  diffusivité thermique, W/(m.K)  
 $\rho$  masse volumique, kg/m<sup>3</sup>

### *Indices et exposants*

c plafond  
o air extérieur  
op opérative  
rs surface de toiture  
v vapeur  
w eau  
ws surface de bassin

## 1. Introduction

Dans un contexte de changement climatique, les bâtiments doivent s'adapter à de nouvelles contraintes. Jusqu'à présent, lorsqu'un bâtiment était dimensionné du point de vue thermique, on s'intéressait essentiellement à la problématique d'hiver en France (chauffage du bâtiment). Depuis quelques années, du fait de la hausse des températures et de l'augmentation de la fréquence des périodes caniculaires en été, les bâtiments doivent répondre à de nouveaux enjeux qui sont d'éviter l'inconfort de l'été. Les apports de chaleur sont généralement bénéfiques en hiver lorsqu'ils participent au chauffage d'un bâtiment et néfastes en été quand il s'agit de combattre ces apports au sein du bâtiment pour éviter/limiter les surchauffes. La solution généralement envisagée est d'installer un système de climatisation. Ces derniers sont cependant fortement consommateurs d'énergie et utilisent des fluides frigorigènes qui sont de puissants gaz à effet de serre (GES). Pour faire face à la forte augmentation de cette consommation, il est nécessaire de développer des systèmes de rafraîchissement « passifs ».

La conception de toitures-terrasses (élément de l'enveloppe le plus exposé aux apports solaires) intégrant de nouveaux composants peut alors jouer un rôle primordial sur la demande énergétique et sur le confort estival intérieur. Parmi les solutions existantes, on peut citer la végétalisation des surfaces [1], l'utilisation de techniques d'ombrage, les traitements radiatifs de surface (« cool-roof ») [2] ou la rétention d'eau comme les bassins de toiture [3]. Ce sont ces deux dernières techniques qui font l'objet de cet article avec un focus sur la rétention d'eau.

La solution de rétention d'eau comme technique de refroidissement est basée sur les phénomènes naturels d'évaporation, d'échanges radiatifs nocturnes et d'inertie thermique de la masse d'eau. En journée, les apports d'énergie provenant du rayonnement solaire et du bâtiment sont convertis en chaleur latente (évaporation de l'eau) et chaleur sensible (inertie de la masse d'eau). La nuit, la chaleur stockée dans la masse d'eau est évacuée par convection naturelle avec l'air ambiant plus froid et par rayonnement de grandes longueurs d'onde avec la voûte céleste. Quelques expériences ont montré que ce type de dispositif est efficace sur le confort thermique dans les zones arides et tempérées [4].

Après une description des différents mécanismes physiques de transfert au sein d'une toiture-terrace et du modèle numérique développé, différents paramètres pour la technique de rétention d'eau sont étudiés comme l'épaisseur de la lame d'eau, les propriétés radiatives de la toiture et l'importance de la localisation. Dans une seconde partie, les performances thermiques de la toiture « évaporative » sont comparées à celles d'une toiture de référence bitumineuse et à une toiture « froide » pour différents climats (actuel, futur et caniculaire futur).

## 2. Modélisation de la toiture évaporative

Dans le cas des bâtiments commerciaux ou industriels, la toiture est la paroi qui échange la plus avec l'environnement du fait de ses dimensions. L'intégration d'une toiture évaporative ou à rétention d'eau aux bâtiments permet de créer un rafraîchissement de ce dernier en limitant les apports radiatifs en courtes longueurs d'onde (CLO) la journée par évaporation. Pendant la période diurne, la toiture reçoit du rayonnement solaire qui est absorbé pour une part par la couche d'eau et pour l'autre part par la toiture. L'augmentation de la température de l'eau favorise le phénomène d'évaporation ce qui limite les apports d'énergie au bâtiment. Durant la nuit, l'eau cède une partie de l'énergie accumulée pendant la journée par rayonnement de grandes longueurs d'onde (GLO) avec la voûte céleste et par convection naturelle et/ou forcée avec l'air extérieur, généralement à une température plus basse.

## 2.1. Bilan thermique

La toiture étudiée est composée d'une lame d'eau d'épaisseur  $e_w$ , d'un isolant (PU) d'épaisseur 6 cm et d'une couche de béton d'épaisseur 20 cm. Dans la suite de l'étude, une surface de  $1 \text{ m}^2$  a été considérée. Les différents échanges thermohydrauliques au sein de la toiture et avec son environnement sont présentés sur la Figure 1.

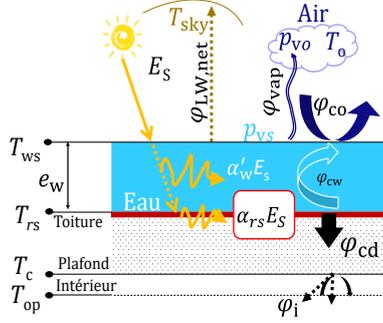


Figure 1 : Mécanismes thermohydrauliques d'une lame d'eau en toiture-terrasse

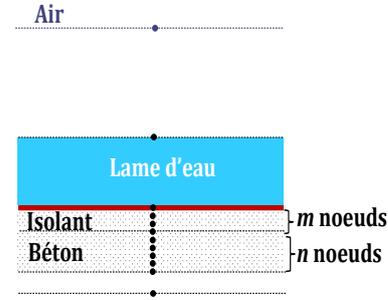


Figure 2 : Discrétisation de la toiture équipée d'une lame d'eau

Le modèle simulant le comportement thermique de la toiture est présenté ci-dessous.

- Pour le nœud de surface  $T_{ws}$ , le bilan thermique s'écrit :

$$\left(\rho c_p \frac{e}{2}\right)_w \frac{\partial T_{ws}}{\partial t} = \underbrace{h_{co}(T_o - T_{ws})}_{\varphi_{co}} + \underbrace{h_{re}(T_{sky} - T_{ws})}_{\varphi_{re}} + \underbrace{h_{cw}(T_{rs} - T_{ws})}_{\varphi_{cw}} + \underbrace{\frac{\alpha'_w}{2} E_s}_{\varphi_{w,CLO}} - \underbrace{q_{mv} l_v}_{\varphi_v} \quad (1)$$

où  $\varphi_{co}$  représente le flux de chaleur échangé par convection avec l'air extérieur ;  $\varphi_{re}$  est le flux de chaleur échangé par rayonnement avec la voûte céleste ;  $\varphi_{cw}$  est le flux convectif échangé au sein de la lame d'eau ;  $\varphi_{w,CLO}$  est la puissance radiative solaire absorbée par la  $\frac{1}{2}$  couche d'eau et  $\varphi_v$  est le flux de chaleur évaporé. Le coefficient de transfert par convection  $h_{co}$  entre la surface de l'eau et l'air extérieur s'exprime en fonction de la vitesse moyenne du vent  $V$  [5]. En ce qui concerne l'échange convectif au sein de la lame d'air, il est représenté par le coefficient  $h_{cw}$  obtenu par la relation de Kutateladze [6]. Le débit d'évaporation  $q_{mv}$  à la surface du bassin est déterminé par la relation [7] :

$$q_{mv} = h_{co} \frac{p_{vs} - p_{vo}}{1,6 c_{po} p_{atm}} \quad (2)$$

- Pour le nœud  $T_{rs}$  à l'interface entre le bassin et l'isolant, on peut écrire :

$$(\rho c_p)_{rs} \frac{\partial T_{rs}}{\partial t} = \underbrace{-\vec{n} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T_{rs})}_{\varphi_{cd}} + \underbrace{h_{cw}(T_{ws} - T_{rs})}_{\varphi_{cw}} + \underbrace{\frac{\alpha'_w}{2} E_s}_{\varphi_{w,CLO}} + \underbrace{\alpha'_{rs} E_s}_{\varphi_{r,CLO}} \quad (3)$$

$\varphi_{cd}$  représente le flux conductif au sein de l'isolant ;  $\varphi_{w,CLO}$  et  $\varphi_{r,CLO}$  sont respectivement les puissances radiatives en CLO absorbées par la  $\frac{1}{2}$  couche d'eau et la toiture. Les coefficients d'absorption du rayonnement solaire pour la toiture  $\alpha'_{rs}$  et pour l'eau  $\alpha'_w$  dépendent du spectre et de l'angle d'incidence et sont calculés en prenant en compte les inter-réflexions. Ces coefficients ont été évalués à partir du modèle proposé en 2009 par Wu et al. [8].

- Au sein du béton et de l'isolant, l'équation de la chaleur s'écrit de la forme :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T) = 0 \quad (4)$$

- A l'interface béton – intérieur, le flux de chaleur conductif  $\varphi_{cd}$  est transféré sous forme convectif et radiatif GLO ( $\varphi_i$ ) à l'intérieur du bâtiment :

$$\underbrace{-\vec{n} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T_c)}_{\varphi_{cd}} = \underbrace{h_i (T_{op} - T_c)}_{\varphi_i} \quad (5)$$

Les différents paramètres ( $T_0$ ,  $V$ ,  $E_s$ ,  $HR$ ) proviennent de fichiers météorologiques extraits de METEONORM. La température de ciel  $T_{sky}$  a été évaluée à partir du modèle de Pepin-Bosc [9].

La température opérative  $T_{op}$  de consigne est définie à partir de la moyenne glissante sur 24 h de la température extérieure  $T_{o,moy}$ . En mode chauffage  $T_{op} = 20^\circ\text{C}$  si  $T_{o,moy} \leq 18^\circ\text{C}$ , et en climatisation  $T_{op}$  varie linéairement, et limitée à  $28^\circ\text{C}$  si  $T_{o,moy} \geq 32^\circ\text{C}$ .

## 2.2. Modélisation

Pour résoudre le problème, la méthode nodale a été utilisée. Du fait de la faible épaisseur de la lame d'eau, celle-ci a été décomposée en deux volumes, un en surface et un au fond du bassin. L'isolant a été discrétisé spatialement en  $m$  volumes et le béton en  $n$  volumes (Figure 2). L'écriture du bilan thermique sur chaque volume conduit au système d'équations différentielles ordinaires couplées et non linéaires suivant :

$$C \frac{\partial \vec{T}}{\partial t} = A \vec{T} + \vec{B} \quad (6)$$

où  $C$  représente la matrice des capacités thermiques,  $A$  la matrice des conductances thermiques,  $\vec{T}$  le vecteur des températures à déterminer et  $\vec{B}$  le vecteur des sollicitations thermiques. La résolution temporelle du système s'effectue à l'aide d'un schéma de type Euler implicite. Un pas de temps de 1 min a été utilisé par la suite.

Les paramètres de simulation sont présentés dans le Tableau 1.

Absorptivité CLO de la toiture, $\alpha_{rs}$	0,8	Épaisseur d'eau constante, $e_w$	5 cm
Emissivité GLO de la toiture, $\varepsilon_{rs}$	0,9	Emissivité GLO de l'eau, $\varepsilon_w$	0,9

Tableau 1 : Paramètres de simulation

Pour la solution de la toiture « froide », une absorptivité solaire  $\alpha_{rs}$  de 0,2 a été choisie.

## 2.3. Economie de climatisation

Afin de caractériser les performances de la toiture à rétention d'eau et de la toiture « froide », l'indicateur  $\Delta B$  [kWh/m<sup>2</sup>/an] quantifie les économies de climatisation ( $T_{op} > 20^\circ\text{C}$ ).

$$\Delta B = \sum_{t, \varphi_{réf} > 0 \text{ et } T_{op} > 20^\circ\text{C}} (\varphi_{réf} - \varphi_{solution}) \Delta t \quad (7)$$

L'évaluation de la performance des deux solutions de rafraîchissement passif a été réalisée en prenant comme solution de référence le cas d'une toiture sèche bitumineuse.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Étude des solutions passives pour une journée « chaude »

Cette première étude a été réalisée pour une journée « chaude ». La simulation a été réalisée sur 15 jours pour prendre en compte l'inertie de la toiture, seule la dernière journée a été conservée et présentée.

### 3.1.1. Comparaison des différentes solutions

Dans cette section, le comportement thermique de différents types de toiture est présenté : Une toiture bitumineuse (0), un système de rétention d'eau (RPB) et une toiture « froide » (type cool roof CR) sont analysés pour la ville de Carpentras (climat méditerranéen). La Figure 3 présente les évolutions de la température d'air ( $T_o$ ), de la vitesse d'air ( $V$ ), de l'éclairement solaire ( $E_s$ ) et de la température de surface extérieure de la toiture bitumineuse ( $T_{rs0}$ ) pour une journée en été. Sur la Figure 4 sont tracées les températures d'air et de surface pour les différentes technologies ainsi que la température d'eau ( $T_{ws}$ ) pour la toiture RPB5, solution RP avec une couche d'eau d'une épaisseur de 5 cm et un fond en bitume ( $\alpha_{rs} = 0,8$ ).

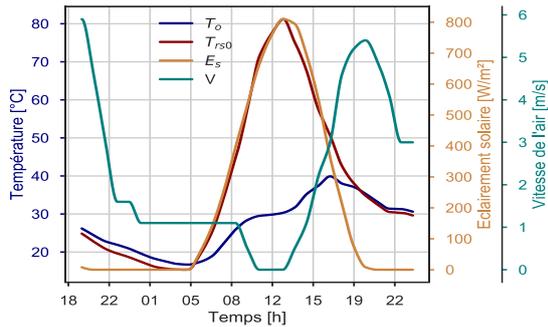


Figure 3 : Evolution des conditions météorologiques

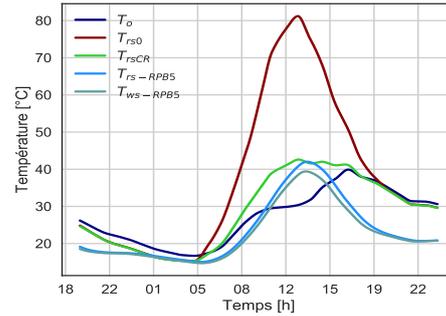


Figure 4 : Evolution de la température d'air et des températures de surface

On peut noter (Figure 3) que la température de surface de la toiture de référence ( $T_{rs0}$ ) atteint  $81,2^{\circ}\text{C}$  pour un éclairement solaire de  $810 \text{ W/m}^2$  et une vitesse de vent de l'ordre de  $6 \text{ m/s}$  alors que la température d'air maximale est de  $39,9^{\circ}\text{C}$ .

Pour les mêmes conditions météorologiques, la solution CR permet de réduire la température de surface d'environ  $38,6^{\circ}\text{C}$  ( $T_{rsCR} = 42,6^{\circ}\text{C}$ ) et la solution RP de  $39,2^{\circ}\text{C}$ , ( $T_{rs-RPB5} = 42^{\circ}\text{C}$ ). La température de l'eau du bassin est au maximum de  $39,4^{\circ}\text{C}$  et demeure inférieure à celle du fond du bassin avec une différence de l'ordre de  $2,6^{\circ}\text{C}$  au plus chaud de la journée (Figure 4). La solution RP réduit fortement la température de la toiture grâce au phénomène d'évaporation de l'eau mais déphase aussi le pic de chaleur de 45 min du fait de l'ajout de la capacité volumique de l'eau contrairement à la solution CR. Entre le coucher du soleil et son levé, les températures  $T_{rs0}$  et  $T_{rsCR}$  sont superposées et suivent l'évolution de la température d'air. La température  $T_{rs-RPB5}$  reste, quant à elle, plus basse jusqu'à minuit. Les températures de la surface de l'eau ( $T_{ws}$ ) et du fond du bassin ( $T_{ws-RPB5}$ ) ne présentent pas d'écart la nuit, ce qui est dû à une évaporation 24 fois plus faible que la journée ( $33 \text{ W/m}^2$  à 6 h et  $781 \text{ W/m}^2$  à 16 h) et une température de ciel plus basse.

### 3.1.2. Influence de l'épaisseur de la couche d'eau et des propriétés radiatives de la surface de la toiture

La Figure 5 et la Figure 6 présentent les évolutions de la température de surface de la toiture de la solution RP pour différentes épaisseurs  $e_w$  de couche d'eau (1, 5 et 10 cm) et de la température de surface de la solution de référence. Le coefficient d'absorption solaire  $\alpha_{rs}$  du revêtement sous la couche d'eau a été pris respectivement à 0,8 (Figure 5) et 0,2 (Figure 6), ce qui correspond à une toiture classique et à une toiture « froide ».

Dans le cas d'un revêtement classique bitumineux (Figure 5), l'augmentation de l'épaisseur d'eau atténue les variations de température de la toiture. La baisse de température maximum

est respectivement de 36,1, 39,19 et 43,8°C pour les épaisseurs de 1, 5 et 10 cm d'eau, soit une température maximum moyenne de 41,4°C (courbes  $T_{rsB}$ ).

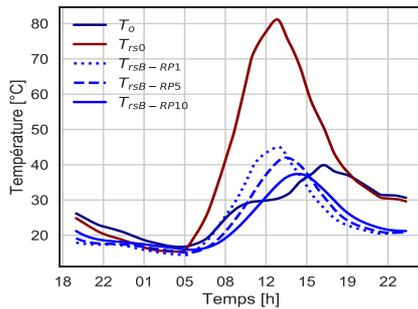


Figure 5 : Evolution de la température du fond du bassin pour  $\alpha_{rs} = 0,8$

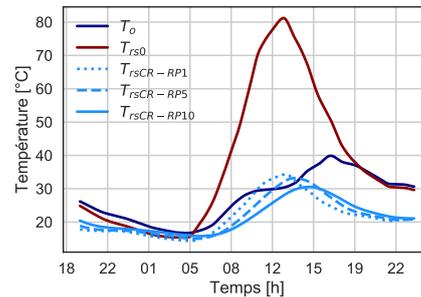


Figure 6 : Evolution de la température du fond du bassin pour  $\alpha_{rs} = 0,2$

On constate par ailleurs un déphasage entre les courbes de température pour les différentes épaisseurs de la couche d'eau qui correspond au temps mis par la chaleur pour atteindre le fond du bassin. L'augmentation de l'épaisseur d'eau permet de retarder la pénétration de la chaleur au sein du bâtiment. Ce retard est de 7 minutes pour 1 cm et atteint 107 minutes pour 10 cm. Concernant le revêtement « froid » (Figure 6), on peut noter un comportement similaire, avec une atténuation plus importante de la température de surface par rapport au revêtement classique, courbes  $T_{rsCR}$  (10,7, 8,8 et 6,9°C). En termes de déphasage, la solution intégrant un revêtement froid génère un retard supplémentaire (3, 11 et 21 min). La combinaison du bassin d'eau et du revêtement « froid » semble une solution intéressante pour limiter les apports d'énergie solaire pendant l'été mais aussi les gradients de température qui peuvent accélérer le vieillissement de la toiture. Dans la suite de l'article, les solutions revêtement froid (CR), rétention d'eau avec revêtement bitume (RPB) et rétention d'eau avec revêtement froid (RPC) sont comparées.

### 3.2. Impact des technologies et de la localisation sur l'année

Dans cette partie, les températures de surface de toiture sont évaluées et comparées pour les différentes solutions passives (Figure 7) et pour trois villes La Rochelle, Paris et Carpentras (Figure 8) qui correspondent respectivement à un climat océanique, continental et méditerranéen. Les fichiers climatiques ont été reconstitués suivant la méthode décrite dans [10], ils sont issus du modèle de climat IPSL-RCA4 pour les périodes actuelle et future du milieu du siècle suivant le scénario RCP 8,5. La Figure 7 et la Figure 8 illustrent le nombre d'heures cumulées en fonction de l'évolution de  $T_{rs}$  sur une période annuelle ainsi que les maximums atteints par chaque solution durant le climat type actuel.

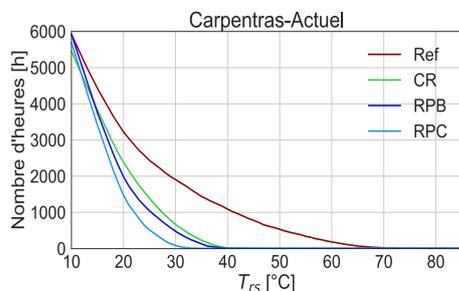


Figure 7 : Distributions cumulées du nombre d'heures pour la ville de Carpentras

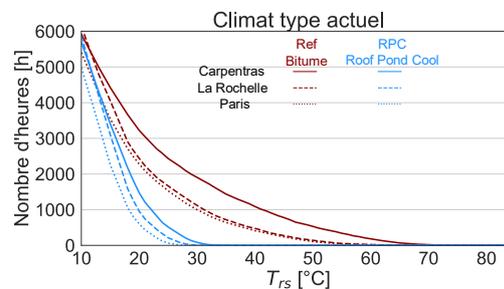


Figure 8 : Distributions cumulées du nombre d'heures pour différentes villes

Pour la ville de Carpentras (Figure 7),  $T_{rs}$  atteint 81,6°C pour la solution de référence lors du climat type actuel, ce qui sollicite fortement les matériaux. Pour les solutions CR et RPB et

RPC, les réductions de  $T_{rs,max}$  calculées par  $100 \cdot \frac{T_{rs0,max} - T_{rs,max}}{T_{rs0,max}}$  sont respectivement de 48,0 %, 44,5 %, et 54,8 %. On constate un écart très faible entre les températures de surface pour les deux solutions CR et RPB.

Concernant la localisation (Figure 8), le comportement de la toiture RPC est similaire à Paris, La Rochelle et Carpentras, bien que les températures soient plus élevées à Carpentras car le climat y est plus chaud. La solution RPC permet de réduire  $T_{rs}$  de 58,0 % pour Paris et de 54,3 % pour La Rochelle. En outre,  $T_{rs}$  ne dépasse pas 37°C pour la solution RP pour toutes les localisations, contrairement à la solution de référence. Le nombre d'heures cumulées de  $T_{rs}$  supérieure à 37°C représente environ 2000 h/an pour Carpentras et 1000 h/an pour la Rochelle et Paris.

### 3.3. Impact du changement climatique et des périodes caniculaires

La Figure 9 est un focus sur les températures de la toiture pour les solutions RCP et de référence durant la semaine la plus chaude à Paris pour trois fichiers climatiques (année type actuelle, année type future, canicule future). La Figure 10 compare les trois solutions de rafraîchissement sur la période de canicule future.

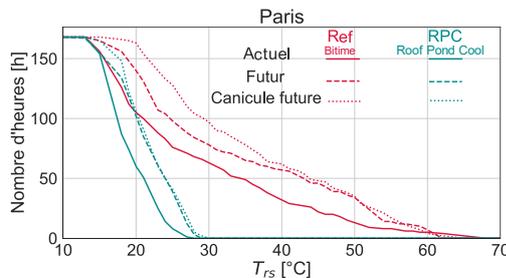


Figure 9 : Fréquences cumulées (semaines chaudes type actuelle, type future, et canicule future) de  $T_{rs}$  – Ref et RPC

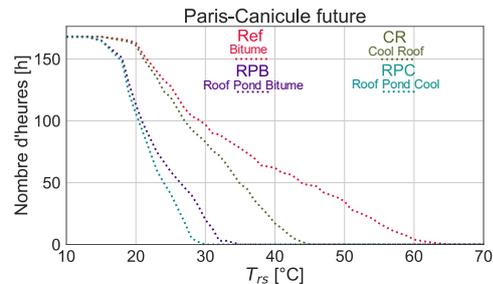


Figure 10 : Fréquences cumulées de  $T_{rs}$  (semaine canicule future) – Ref, CR, RPB et RPC

La solution RPC permet de réduire la température de surface maximale  $T_{rs}$  d'environ 37°C par rapport à la référence ( $T_{rs0}$  atteint 66°C) (Figure 9). En effet, pour la solution RPC, à Paris,  $T_{rs}$  ne dépasse jamais 30°C et ce même en période de canicule future. En comparant les différentes solutions lors de la canicule future à Paris (Figure 10), les solutions CR, RPB et RPC assurent une réduction de 30 %, 45 % et de 54 % par rapport à la solution de référence. Cela démontre l'efficacité élevée des solutions RP et plus particulièrement de la solution RPC lors de la canicule future par rapport aux autres solutions. On constate également une réduction de la température maximum significative pour la solution RPB par rapport à CR avec une réduction de 16°C. Si pour le climat actuel, l'écart entre les solutions CR et RPB est faible, cet écart devient plus important lors du climat futur type et encore plus lors de la canicule future. La solution CR n'intervient que sur le flux solaire reçu (celui si ne varie que faiblement pour les climats futurs) alors que la solution RP est liée aux apports solaires mais aussi aux variations de température et d'humidité extérieures.

La Figure 11 présente les charges thermiques transmises par la toiture de chaque technologie pour les trois années : type actuelle, type future et canicule future. La réduction des charges de chaque solution par rapport à la référence est écrite en pourcentage.

Les charges thermiques transmises pour la référence augmentent de plus de trois fois (+ 11 kWh/m<sup>2</sup>) entre le climat actuel-type et le climat futur-canicule. Plus le climat est chaud, plus les solutions de rafraîchissement passif CR, RPB et RPC sont efficaces pour diminuer les

charges thermiques en valeur absolue, jusqu'à devenir un puit de chaleur dû à l'évaporation. Les trois solutions sont très efficaces et la plus-value d'un système RP envers un système CR est démontrée spécialement en climat caniculaire futur.

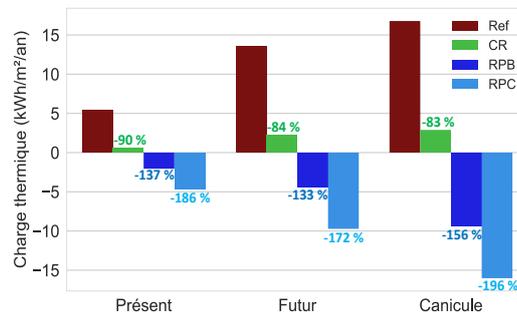


Figure 11 : Chaleur transmise par la toiture en période de climatisation

## 4. Conclusions

Les résultats ont montré l'intérêt de la toiture à rétention d'eau intégrant un revêtement « froid » par rapport à la référence bitumineuse. Cette solution passive contribue à une forte réduction des charges thermiques de 196 %, 172 % et 186 % respectivement pour les climats canicule future, futur-type et actuel-type. Le gain de RPC par rapport à la toiture de référence est une diminution maximale de température de surface de 48°C. L'efficacité de la solution est tout particulièrement démontrée en climat chaud (Carpentras) ainsi qu'en canicule future à Paris. Les charges thermiques transmises par la toiture sont quasiment 3 fois inférieures pour les solutions RP comparés à la solution CR en climat canicule future.

## Références

- [1] Besir, A. B., and Cuce, E., 2018, "Green Roofs and Facades: A Comprehensive Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, pp. 915–939.
- [2] Al-Obaidi, K. M., Ismail, M., and Abdul Rahman, A. M., 2014, "Passive Cooling Techniques through Reflective and Radiative Roofs in Tropical Houses in Southeast Asia: A Literature Review," *Frontiers of Architectural Research*, **3**(3), pp. 283–297.
- [3] Sharifi, A., and Yamagata, Y., 2015, "Roof Ponds as Passive Heating and Cooling Systems: A Systematic Review," *Applied Energy*, **160**, pp. 336–357.
- [4] Kharrufa, S. N., and Adil, Y., 2008, "Roof Pond Cooling of Buildings in Hot Arid Climates," *Building and Environment*, **43**(1), pp. 82–89.
- [5] Règles Th-U, 2015, *Les Règles Th-U*.
- [6] Kutateladze, S. S., 1964, "Fundamentals of Heat Transfer."
- [7] Kishore, V. V. N., and Joshi, V., 1984, "A Practical Collector Efficiency Equation for Nonconvecting Solar Ponds," *Solar Energy*, **33**(5), pp. 391–395.
- [8] Wu, H., Tang, R., Li, Z., and Zhong, H., 2009, "A Mathematical Procedure to Estimate Solar Absorptance of Shallow Water Ponds," *Energy Conversion and Management*, **50**(7), pp. 1828–1833.
- [9] Pepin-Bosc, M. H., 1984, "Le Rayonnement Atmosphérique."
- [10] Machard, A., Inard, C., Alessandrini, J.-M., Pelé, C., and Ribéron, J., 2020, "A Methodology for Assembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data," *Energies*, **13**(13), p. 3424.