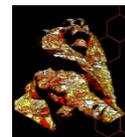
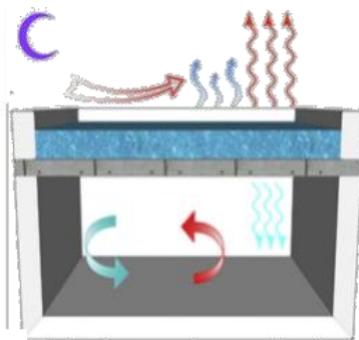
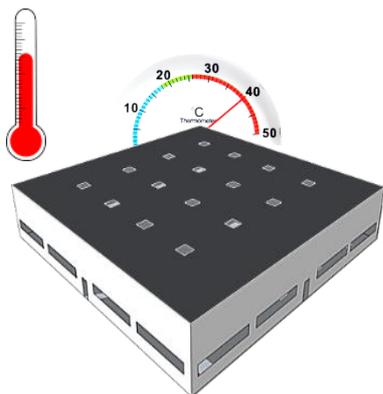


# Comparaison de deux techniques de rafraîchissement passif en toiture sous différentes conditions climatiques

Feryal CHTIOUI, Anaïs MACHARD, Emmanuel BOZONNET, Patrick SALAGNAC

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement, La Rochelle



**1**

**Problématique**

**2**

**Modélisation de la toiture évaporative**

**3**

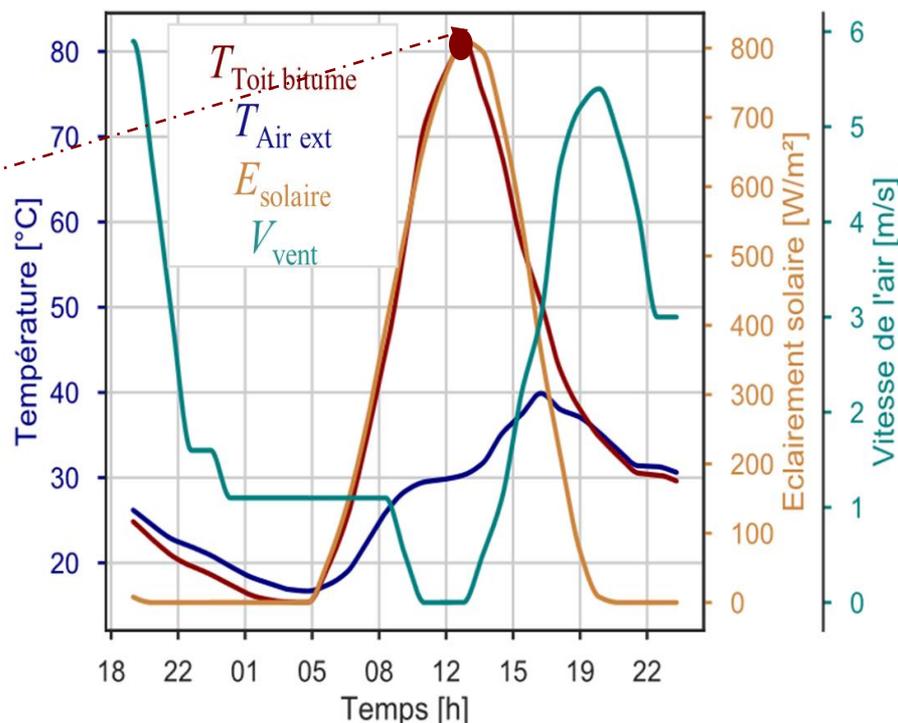
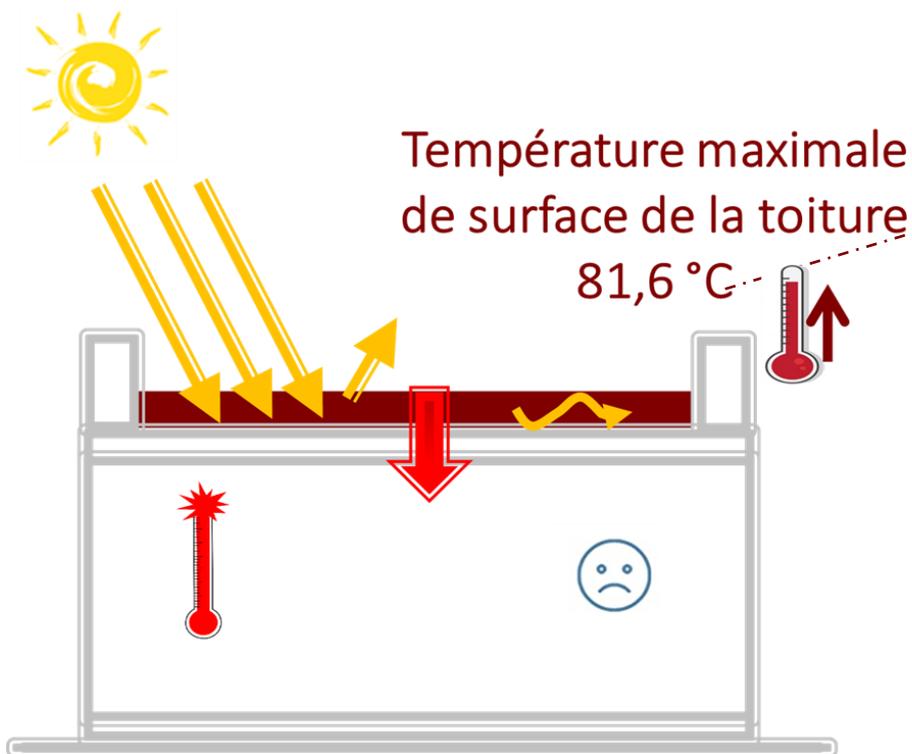
**Impacts des paramètres et du changement climatique**

**4**

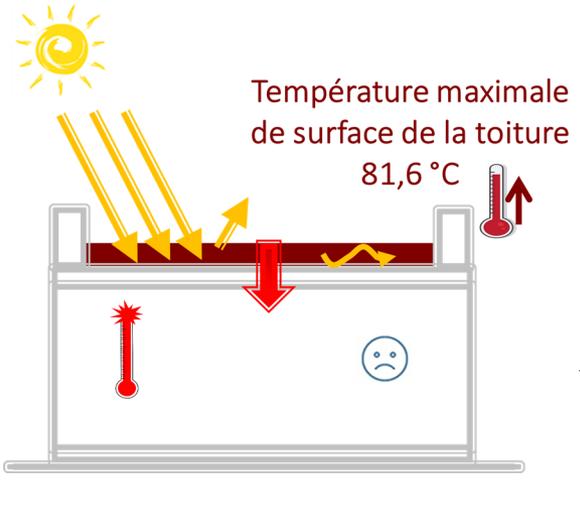
**Conclusion**

# Problématique

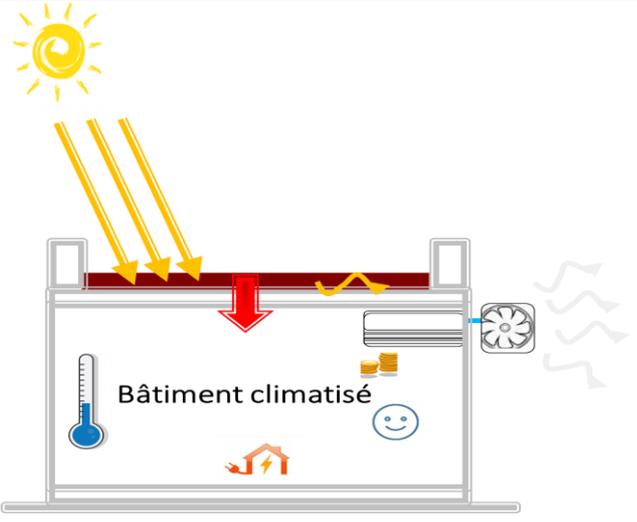
Inconfort thermique dans les bâtiments de grande surface en période estivale lié aux apports solaires absorbés par la toiture terrasse.



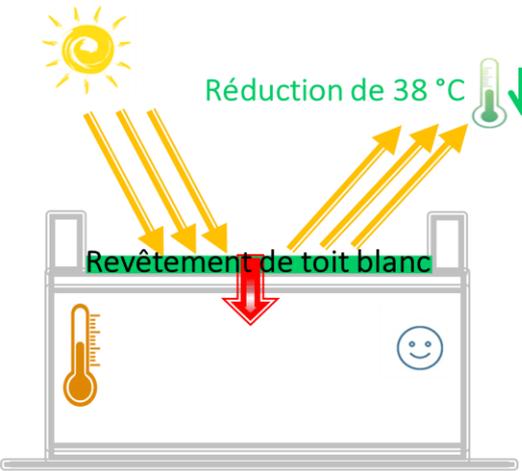
# Solutions de rafraîchissement



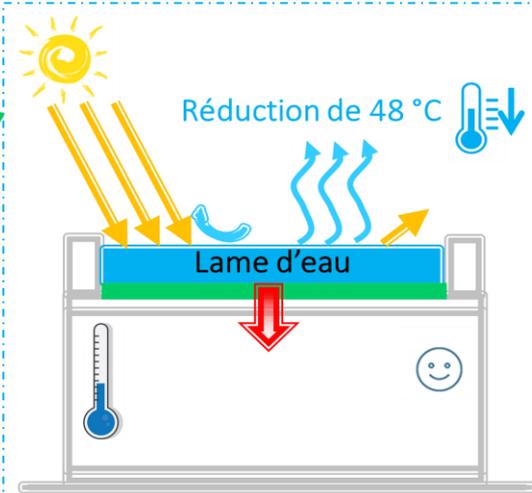
## Solution active



## Solutions passives à étudier



Rafrâchissement par réflexion du rayonnement solaire

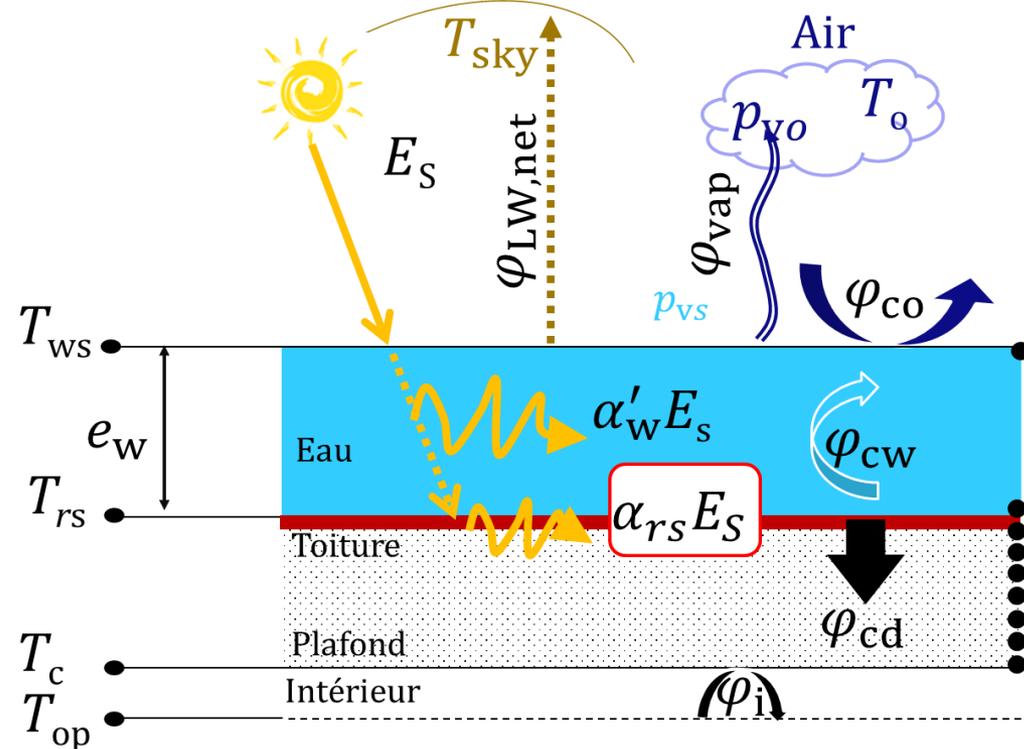


Rafrâchissement par évaporation de l'eau



# Modélisation de la toiture évaporative

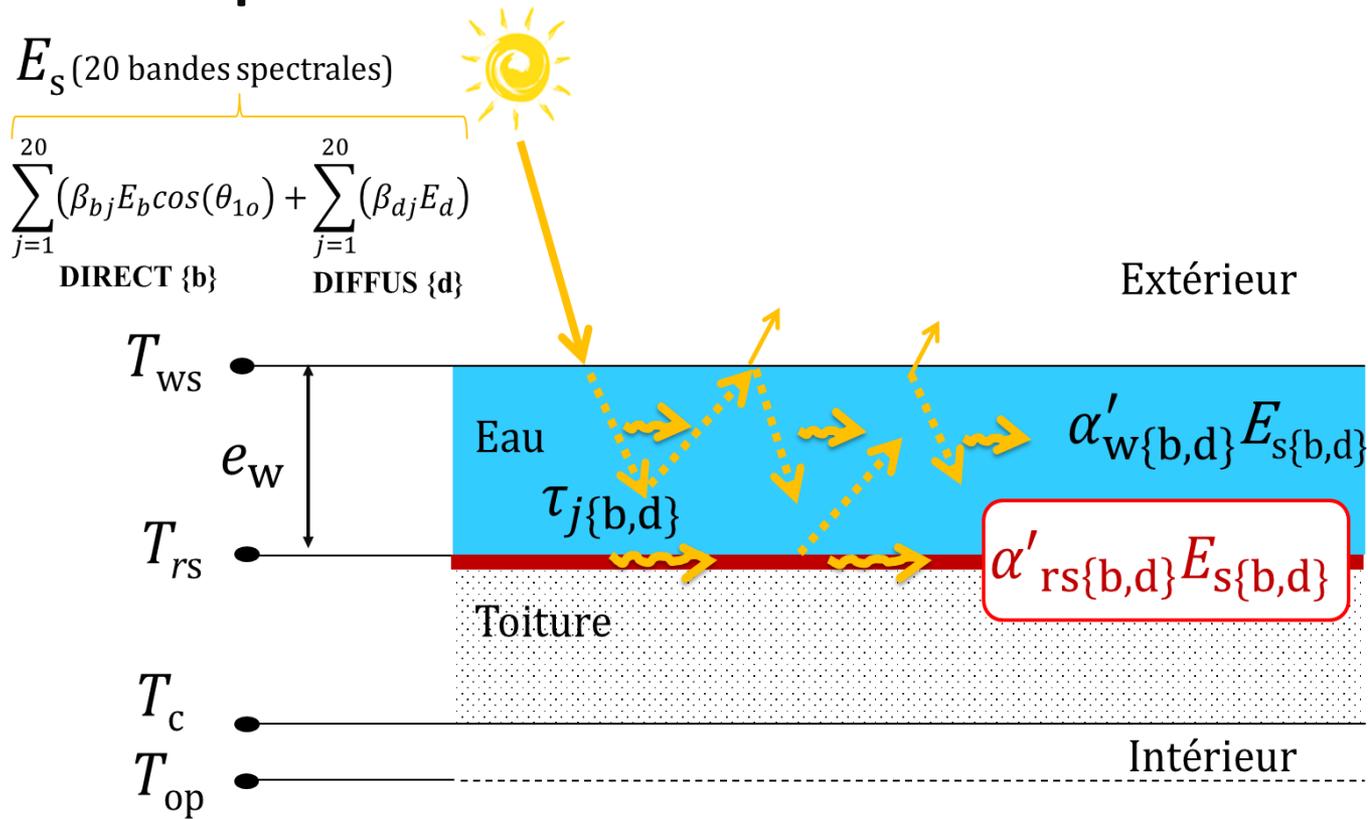
- $$\left(\rho c_p \frac{e}{2}\right)_w \frac{\partial T_{ws}}{\partial t} = \underbrace{h_{co}(T_o - T_{ws})}_{\varphi_{co}} + \underbrace{h_{re}(T_{sky} - T_{ws})}_{\varphi_{re}} + \underbrace{h_{cw}(T_{rs} - T_{ws})}_{\varphi_{cw}} + \underbrace{\frac{\alpha'_w}{2} E_s}_{\varphi_{w,CLO}} - \underbrace{q_{mv} l_v}_{\varphi_v}$$
- $$(\rho c_p)_{rs} \frac{\partial T_{rs}}{\partial t} = \underbrace{-\vec{n} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T_{rs})}_{\varphi_{cd}} + \underbrace{h_{cw}(T_{ws} - T_{rs})}_{\varphi_{cw}} + \underbrace{\frac{\alpha'_w}{2} E_s}_{\varphi_{w,CLO}} + \underbrace{\alpha'_{rs} E_s}_{\varphi_{r,CLO}}$$
- $$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T) = 0$$
- $$\underbrace{-\vec{n} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T_c)}_{\varphi_{cd}} = \underbrace{h_i(T_{op} - T_c)}_{\varphi_i}$$



Résolution par la méthode nodale

$$C \frac{\partial \vec{T}}{\partial t} = A \vec{T} + \vec{B}$$

# Modèle d'absorption solaire



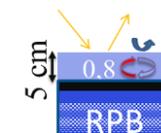
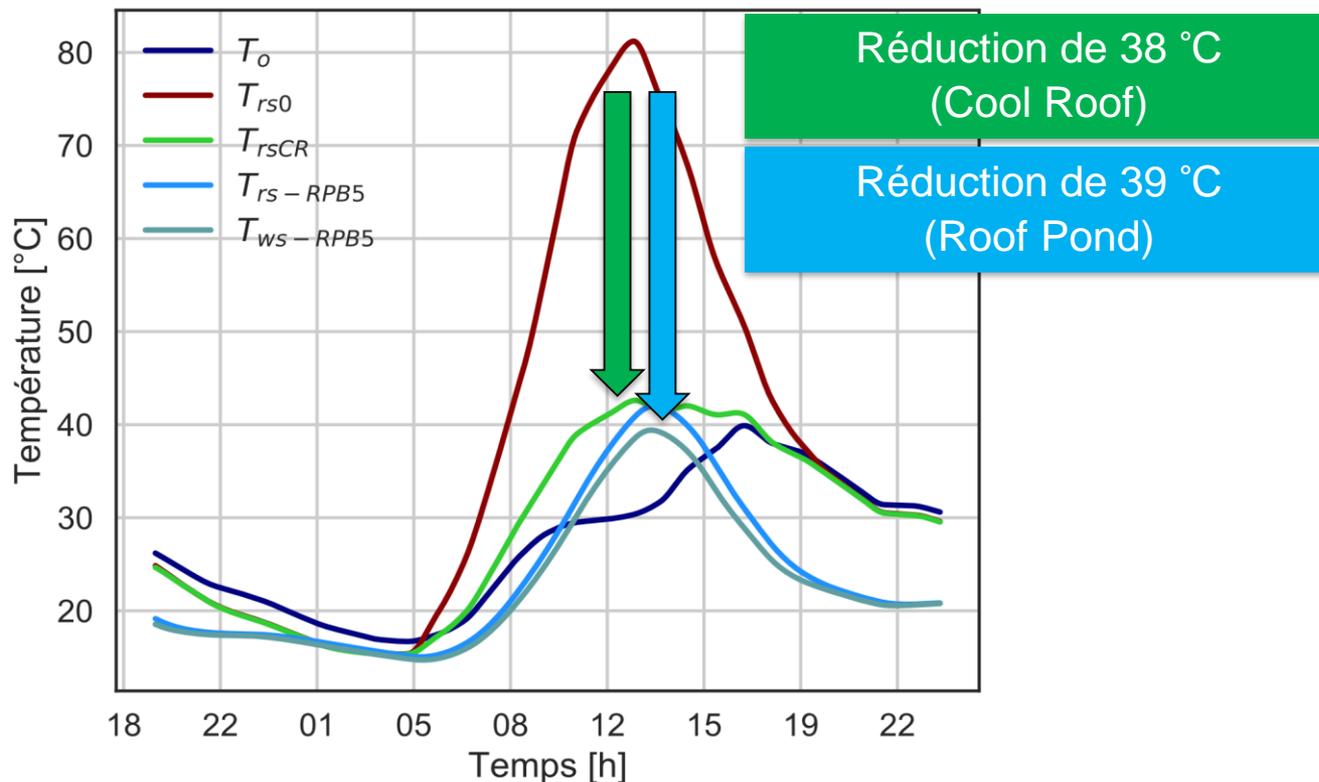
$$\alpha'_{rs} = \frac{\alpha_{rs}}{E_s} \left[ (1 - \rho_{swb}) \left( \sum_{j=2}^n \frac{\beta_{jb} \tau_{jd}}{1 - \rho_{swb} (1 - \alpha_{rs}) \tau_{jd}^2} + \frac{\beta_{1b} \tau_{1b}}{1 - \rho_{swb} (1 - \alpha_{rs}) \tau_{1b}^2} \right) E_b + (1 - \rho_{swd}) \left( \sum_{j=1}^n \frac{\beta_{jd} \tau_{jd}}{1 - \rho_{swd} (1 - \alpha_{rs}) \tau_{jd}^2} \right) E_d \right]$$

$$\alpha'_w = \frac{E_s - E_{a,rs} - E_{r,sw}}{E_s} = (1 - \alpha'_{rs} - \rho'_{sw})$$

# Comparaison des différentes solutions

Journée la plus chaude

Carpentras

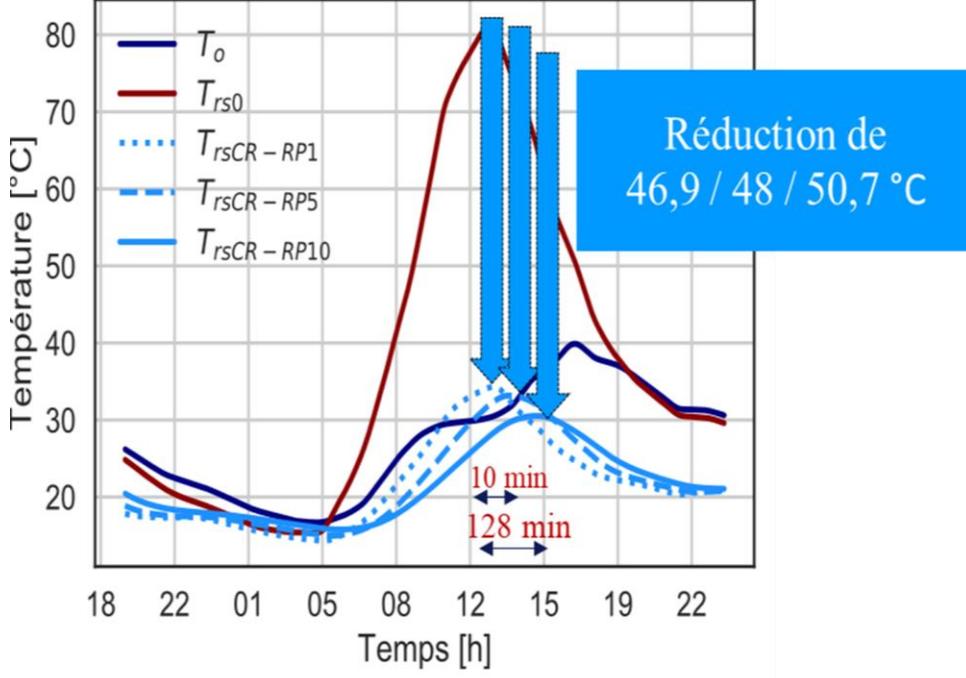
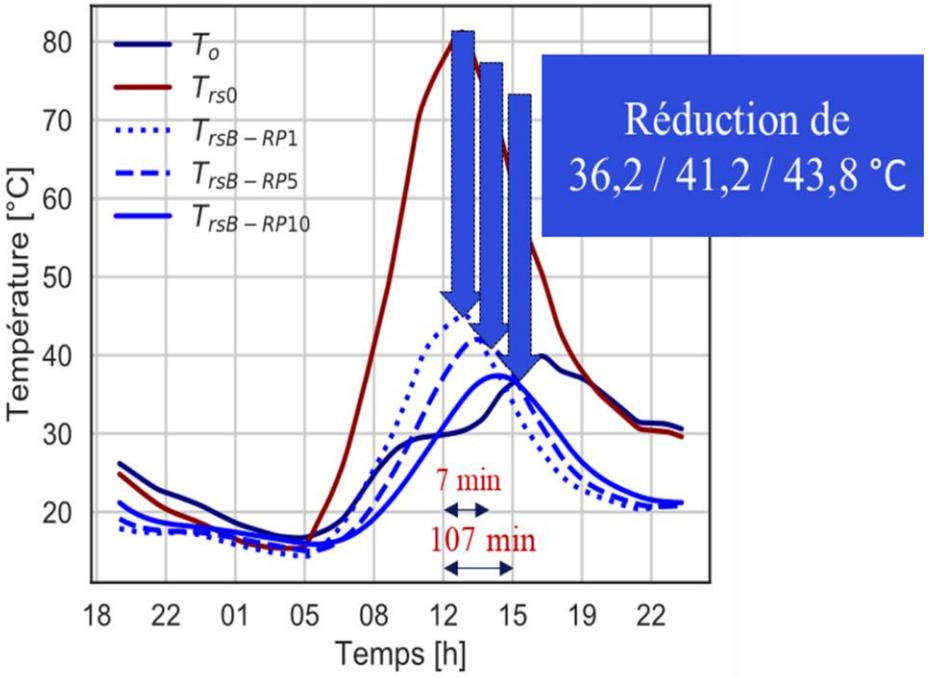
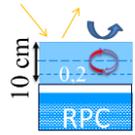
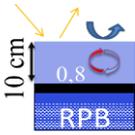


- ↪ Différence de l'ordre de 2,5°C au plus chaud de la journée entre  $T_{ws}$  et  $T_{rs-RPB5}$
- ↪ Evaporation la nuit 24 fois plus faible que la journée
- ↪  $T_{ws}$  et  $T_{rs-RPB5}$  ne présentent pas d'écart la nuit

# Impact de $e_w$ et de $\alpha_{rs}$

Journée la plus chaude

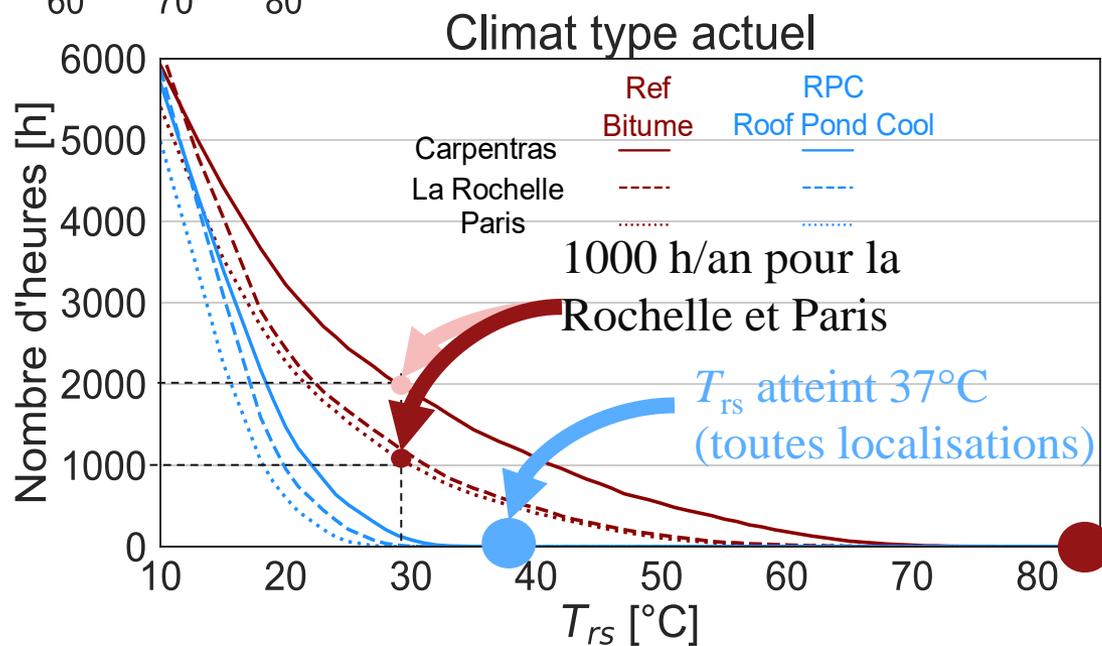
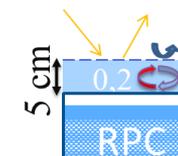
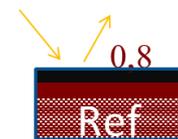
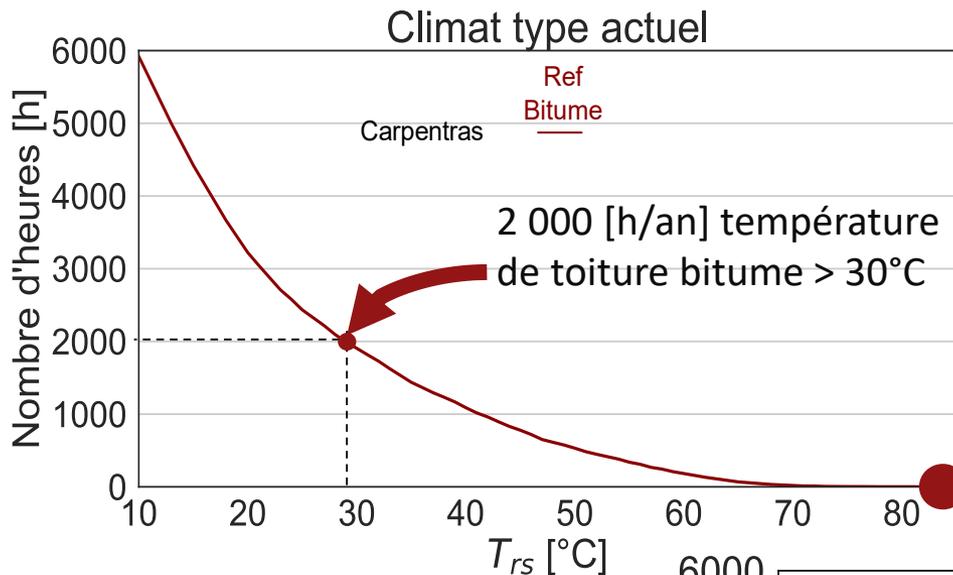
Carpentras



- RPC : limiter les apports d'énergie solaire pendant l'été et les gradients de température qui peuvent accélérer le vieillissement de la toiture.
- Plus  $e_w$  est grande plus le déphasage thermique important

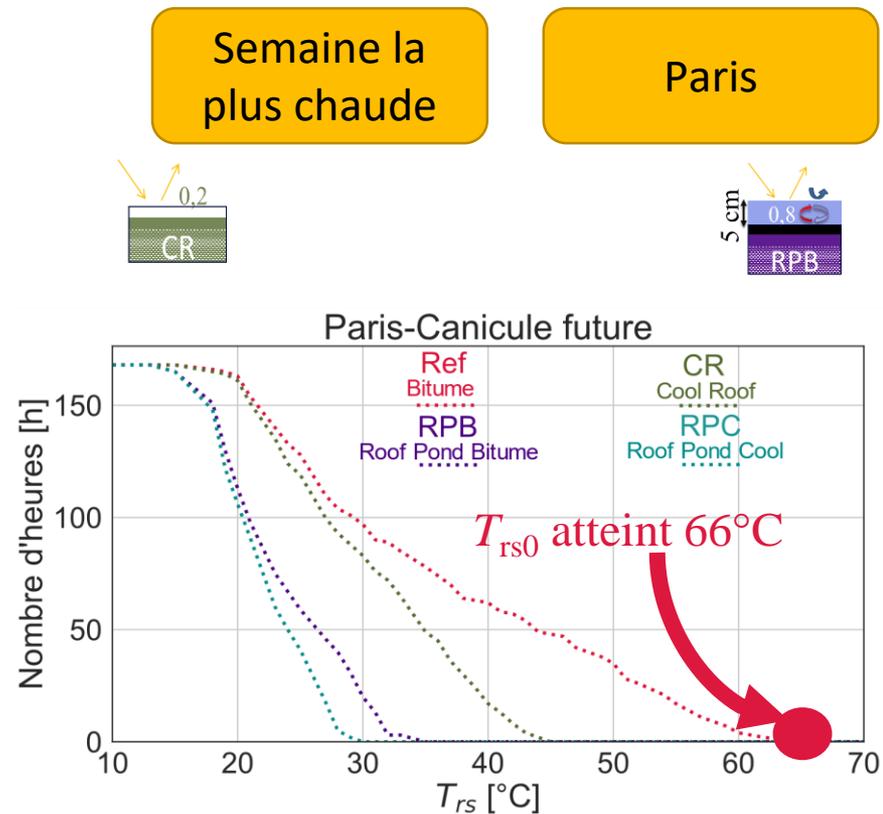
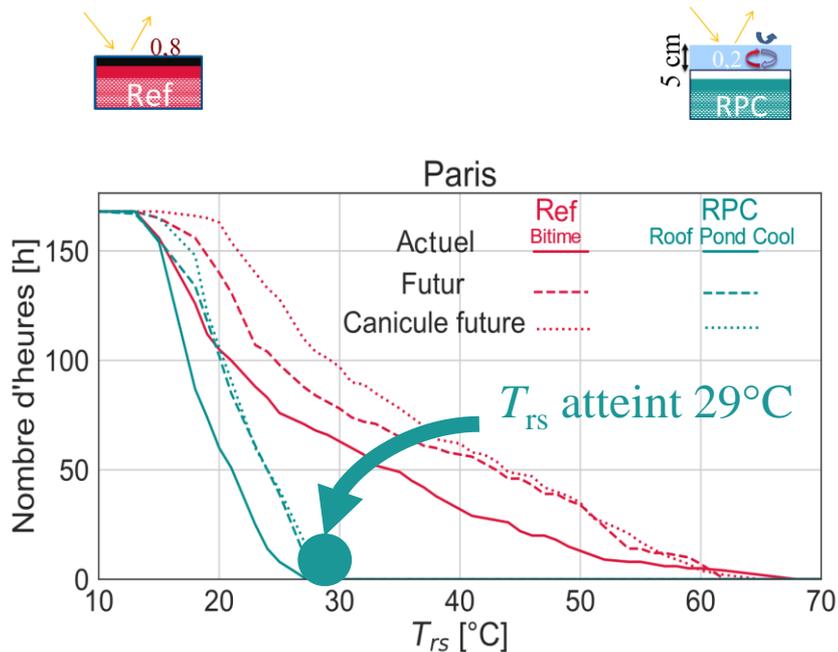


# Impact de la localisation



↳ Réductions maximales de  $T_{rs}$  de 58 % pour Paris et de 54,3 % pour La Rochelle pour RPC par rapport à Réf

# Impact du changement climatique



- ↪  $T_{rs}$  ne dépasse jamais  $30^{\circ}\text{C}$  pour la solution RPC et ce même en période de canicule future
- ↪ Réduction de 30 %, 45 % et de 54 % pour les solutions CR, RPB et RPC par rapport à la solution de référence

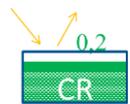
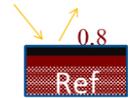
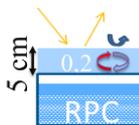
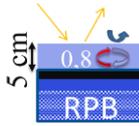
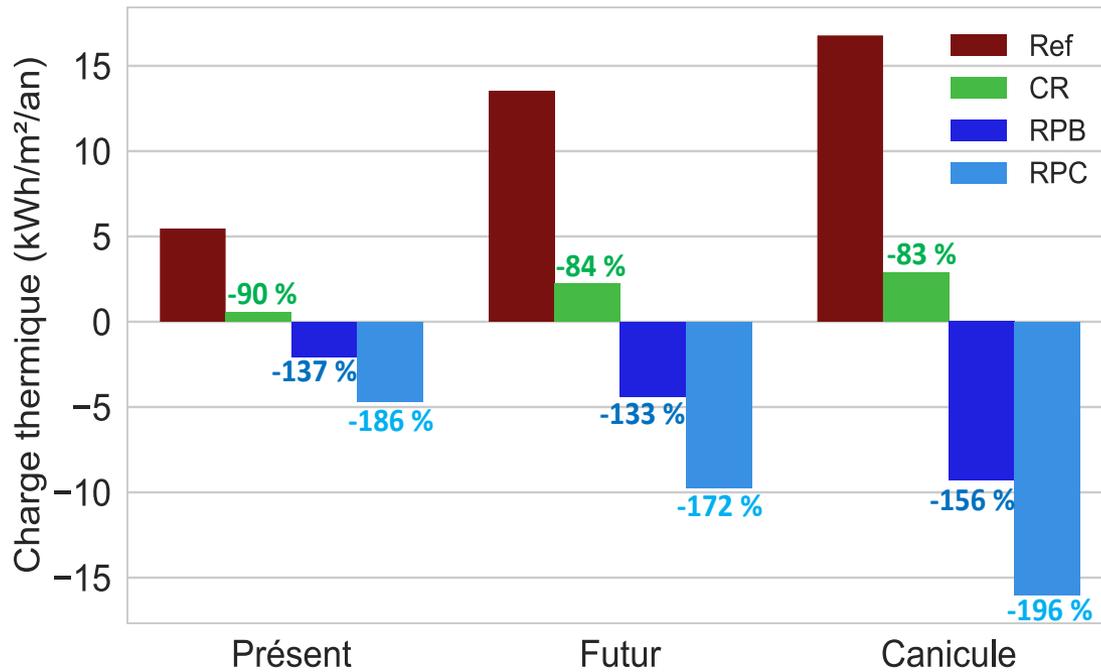
# Réduction des charges de chaque solution

Paris

 $T_{\text{set}} = 20^{\circ}\text{C}$ 

Economies de climatisation

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



- ↪ Augmentation des charges thermiques transmises pour la référence de plus de trois fois (+ 11 kWh/m<sup>2</sup>) entre le climat actuel-type et le climat futur-canicule.
- ↪ RPB et RPC sont efficaces pour diminuer les charges thermiques en valeur absolue, jusqu'à devenir un puit de chaleur dû à l'évaporation.

1 - Efficacité des solutions de CR et RP démontrée en climat chaud (Carpentras) ainsi qu'en période de canicule future à Paris

2 - Diminution maximale de température de surface de 48°C de RPC par rapport à la toiture de référence

*Conclusion*

3 - Charges thermiques transmises par la toiture quasiment 3 fois inférieures pour les solutions RP comparés à la solution CR en climat canicule future