



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Modélisation de la formation de la rosée (condensation/évaporation) sur des toitures conventionnelles et cool d'un quartier industriel à Singapour : potentiel, impact et limites

Margot Ruiz, [Xenia Stavropulos-Laffaille](#), Auline Rodler, Marjorie Musy

Cerema DTer Ouest - BPE, Nantes

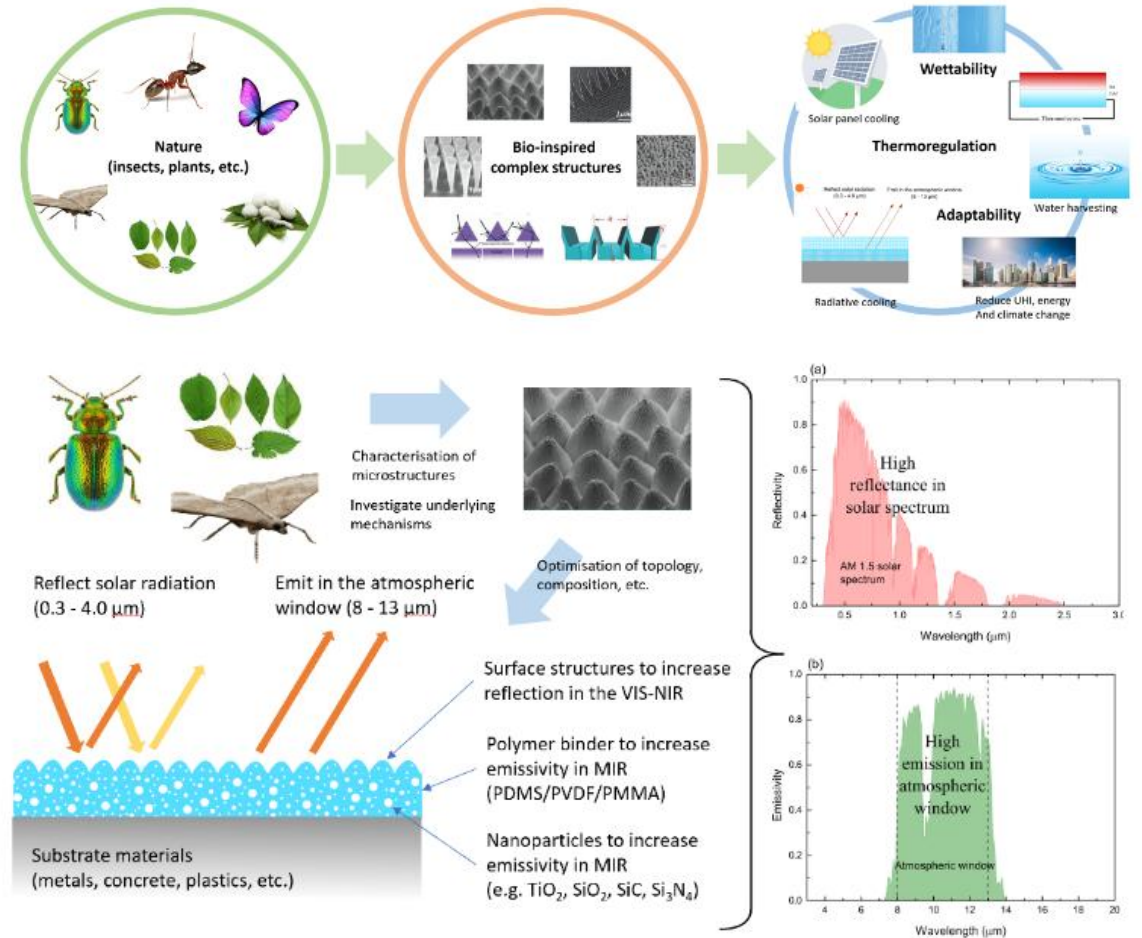
Journée thématique SFT le 4 décembre 2025

Contact : xenia.laffaille@cerema.fr, auline.rodler@cerema.fr

Contexte – ANR BioCool

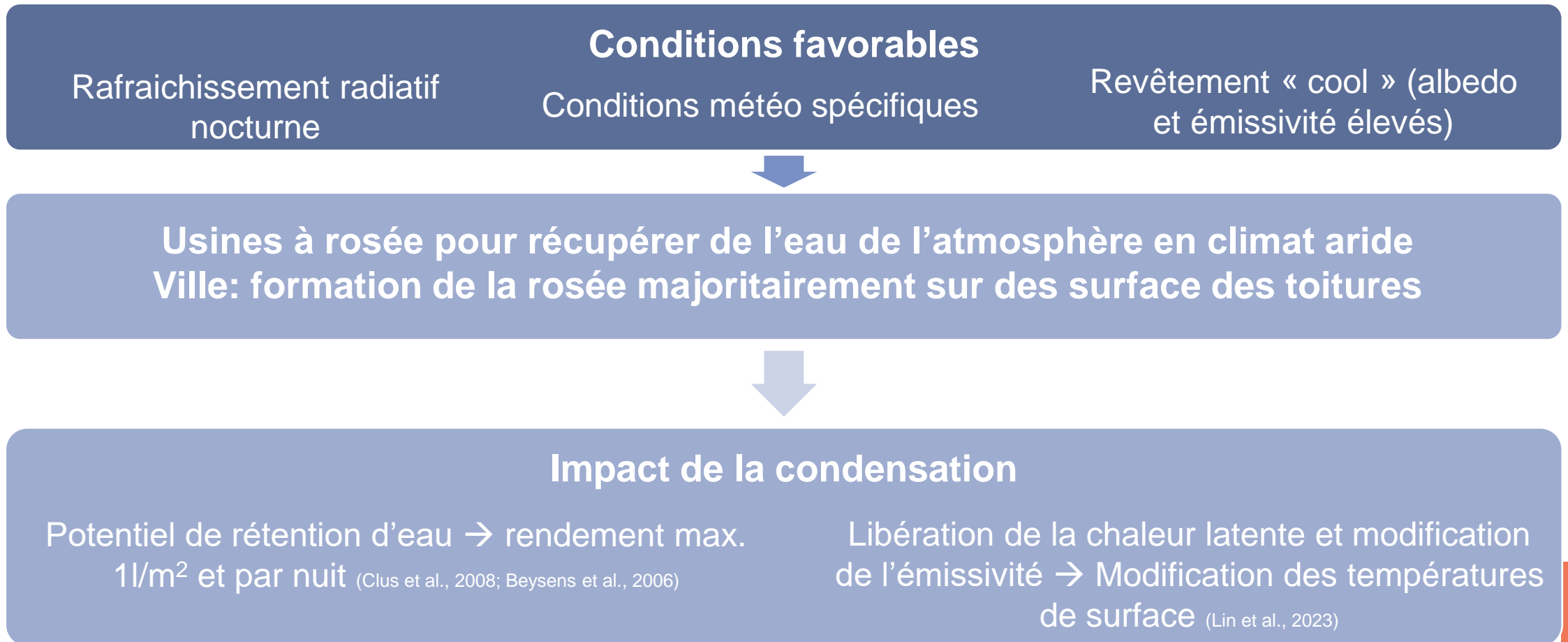
Recherche sur le refroidissement radiatif passif par émission thermique dans la fenêtre atmosphérique quasi transparente (8 à 13 μm)

- **Objectif:** Création d'un nouveau revêtement bioinspiré à haute réflectance solaire et émission thermique
- **Innovations:** Revêtements multifonctionnels, incluant l'auto-nettoyage, la collecte de l'eau, la thermorégulation et l'adaptabilité climatique
- **Approche interdisciplinaire:** combinaison de la recherche théorique et des tests expérimentaux



Introduction

La formation de rosée est souvent moins importante sur les surfaces urbaines artificielles que dans les zones rurales.



Objectifs

Intégration de la rosée (condensation) dans **SOLENE-Microclimat**



Simulation d'un site industriel à Singapour

Validation

Comparaison des données simulées avec les observations

Impact thermique de la condensation

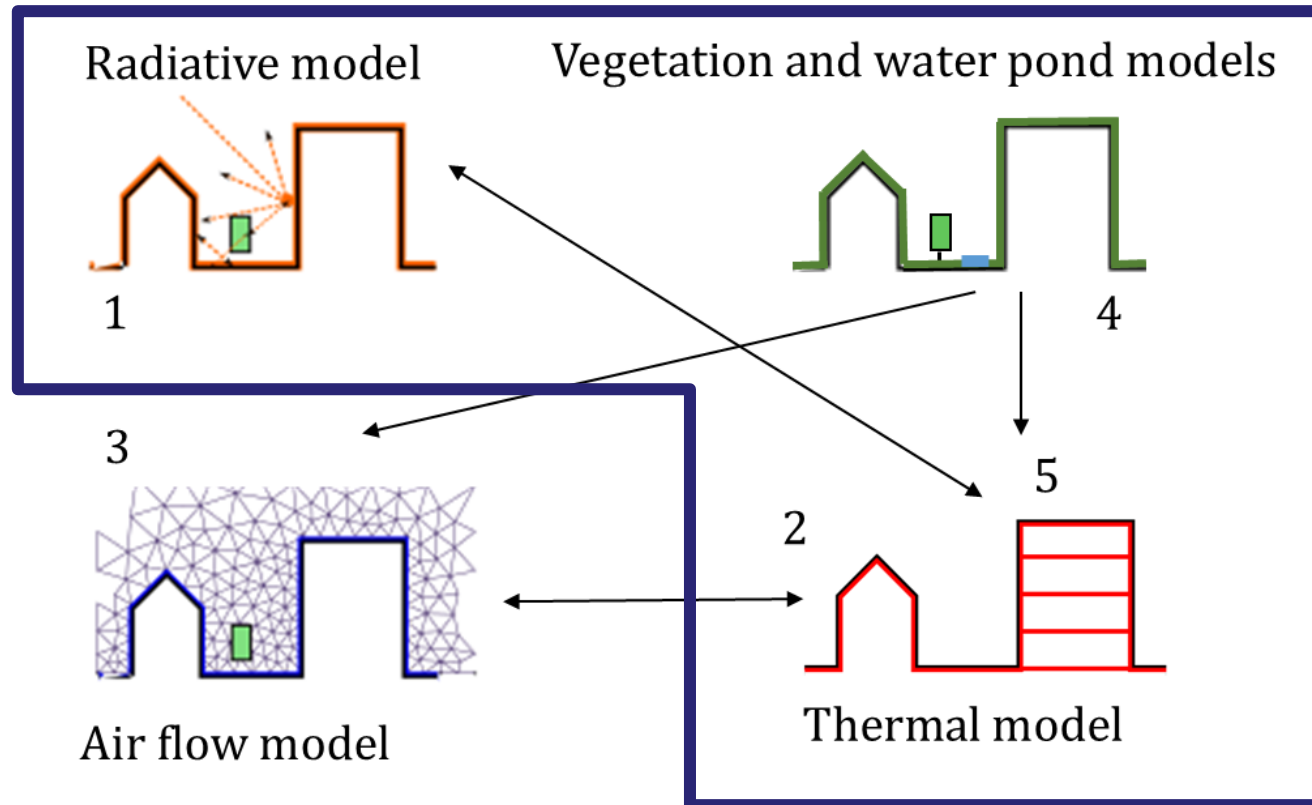
Comparaison des données simulées avec et sans condensation

Analyse de différents revêtements

Comparaison de trois scénarios avec différents revêtements (**conventionnel, cool et bioinspiré**) selon trois critères: confort thermique ext., consommation énergétique du bâtiment et le volume d'eau potentiel

Modèle microclimatique: SOLENE-Microclimat

Sous-modèles de SOLENE-Microclimat (Musy et al. 2021)



Simulation thermo-radiative sans CFD

Possibilité de décrire les transferts de chaleur par **conduction** dans l'enveloppe du bâti et dans le sol (1R2C, 3R4C, différences finies 1D), et par **convection** (ASHRAE, Denby, Vehrencamp, Nusselt)

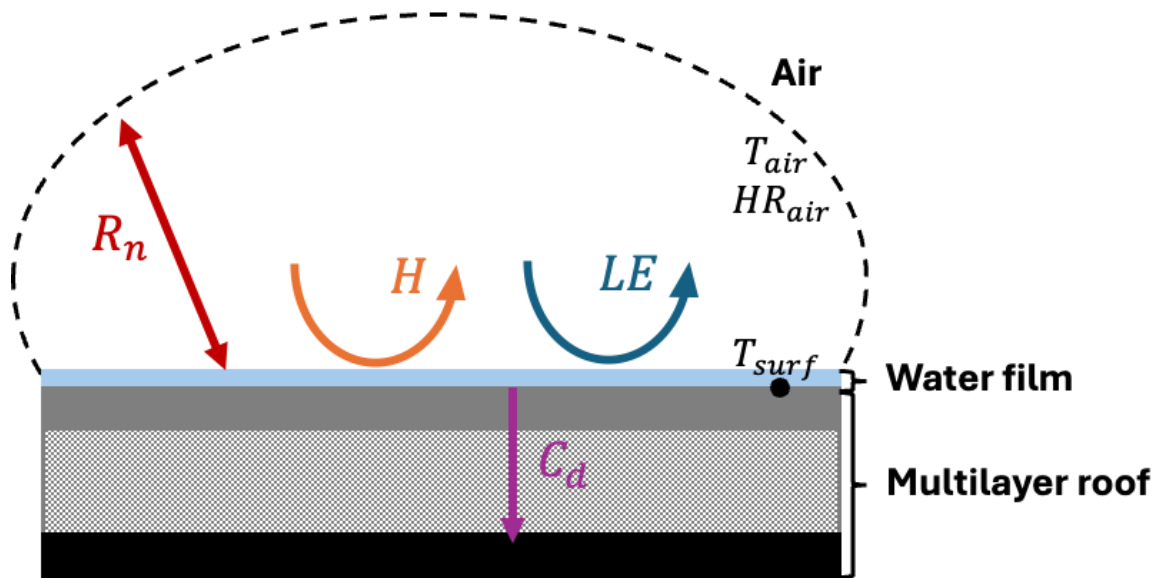
Source : Robineau et al. (2022)

Intégration de la rosée sur les toitures

Bilan énergétique à la surface du toit:

$$R_n = H + C_d + LE$$

avec R_n le rayonnement net ($W.m^{-2}$), H le flux de chaleur sensible ($W.m^{-2}$), C_d le flux de chaleur conductive ($W.m^{-2}$) et le flux de chaleur latente ($W.m^{-2}$).



Flux de chaleur latente (LE) suite à la condensation et l'évaporation de l'eau sur la surface

Hypothèses pour la simulation de la rosée (Lin et al. 2023):

- **Imperméable et opaque,**
- **Condensation and évaporation** de l'eau uniquement sur des surfaces extérieures,
- **Capacité thermique** sensible de l'eau est négligée,
- **Différence de température** entre la surface et le point de rosée est négligée,
- **Film avec hauteur d'eau uniforme,**
- Impact thermique du ruissellement négligé (Beysens et al., 2005).

Modélisation de la rosée



Conditions nécessaires pour la condensation:

- Vent faible : $u < 4.4 \text{ m.s}^{-1}$
- Air humide : $q_{surf} < q_{air}$
- Température de surface faible: $T_{surf} \leq T_{dew}$
- Film d'eau (Jacobs et al., 2008) : $h_{water} \leq 0.8 \text{ mm}$



Conditions nécessaires pour l'évaporation:

- Air sec : $q_{surf} > q_{air}$
- Film d'eau : $h_{water} > 0 \text{ mm}$

Calculution des flux de chaleur latente potentiels : (Beysens et al. 2005)

$$LE_{pot} = L_v * \rho_{air} * [q_{sat}(T_{surf}) - q_{air}(T_{air})] / r_{aero}$$

$$r_{aero} = \rho_{air} * c_{p,air} / h_c$$

Calculution de la hauteur d'eau:

$$\Delta h_{pot} = -LE_{pot} * dt / (L_v * \rho_w) * 1000$$

avec L_v le chaleur latent de vaporisation ($J.kg^{-1}$), ρ_{air} la densité de l'air ($kg.m^{-3}$), $c_{p,air}$ la capacité thermique de l'air ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), q l'humidité spécifique ($kg_{water}.kg_{moistair}^{-1}$), r_{aero} résistance thermique ($s.m^{-1}$), dt le pas de temps, ρ_w la densité de l'eau ($kg.m^{-3}$) et h_c le coefficient de convection ($W.m^{-2}.K^{-1}$).

$$L_v = 2450000 \text{ J/kg}$$

$$\rho_{air} = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{p,air} = 1006 \text{ J/(kg.K)}$$

$$\rho_{water} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Modification de l'émissivité

Le film d'eau surfacique a tendance à augmenter son émissivité:

Equation pour estimer l'émissivité thermique apparente (Xu and Shen, 1992):

$$\varepsilon_{eq} = \begin{cases} \varepsilon_s, & \text{dry roof} \\ \frac{(1-r_{water})[1-r_s \exp(-2\alpha_A \delta)]}{1-r_s r_{water} \exp(-2\alpha_A \delta)}, & \text{wet roof} \end{cases}$$

avec ε_s l'émissivité de la toiture (sèche),
 δ la masse de charge de la rosée (μm),
 α_A le coefficient d'absorption de Lambert (fixé à $0.0592 \mu m^{-1}$ (Bassett and Trethewen, 1984)),
 r_{water} le réflectance pour les grandes longueur d'ondes du film d'eau (fixé à 0.02 (Trosseille et al., 2022))
et r_s la réflectance de l'interface toiture-eau (égal à $1-\varepsilon_s$).

Cette équation se base sur les **effets d'absorption du rayonnement dans le film d'eau**, mais aussi sur les **réflexions radiatives entre les interfaces air- eau puis eau-toiture**.

Remarque : (Lin et al 2023)

- Pour un toit conventionnel => effet de la modification de l'émissivité domine par rapport aux effets latents
- Pour un « cool » roof => l'inverse

Site expérimental à Singapour

Site industriel Tuas



Source : Donthu et al. (2024)

Deux rues canyon parallèles:
Une en état initial (conv) et une couverte d'un revêtement à haut pouvoir rafraichissant (cool)



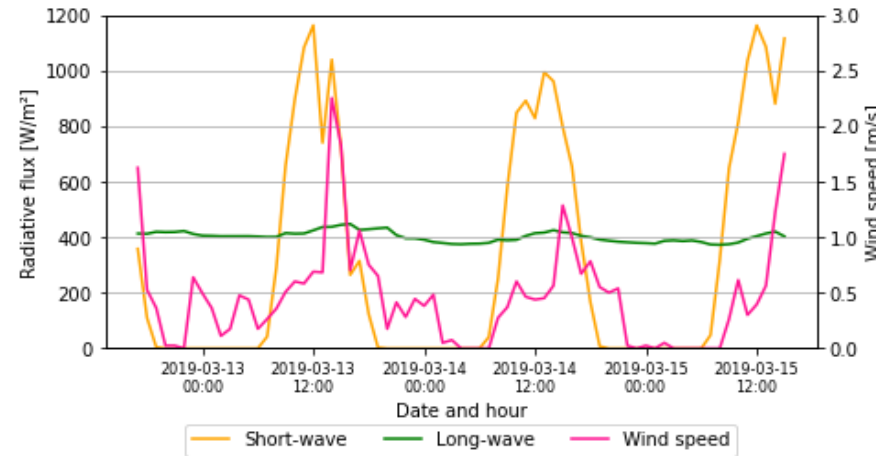
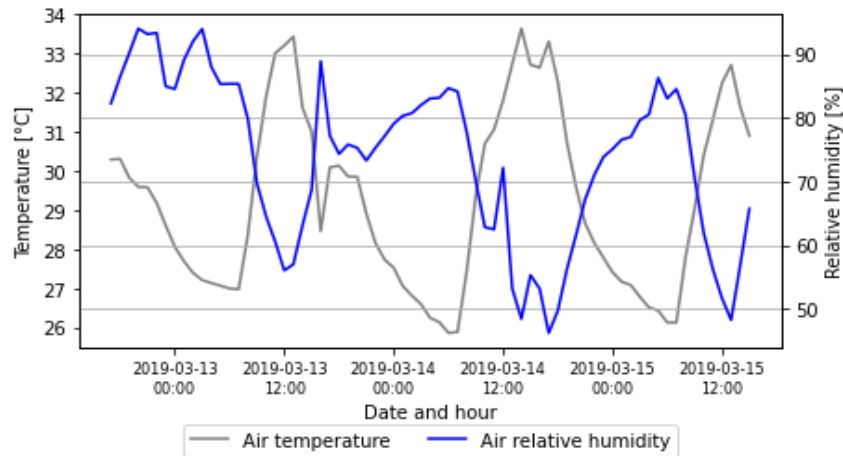
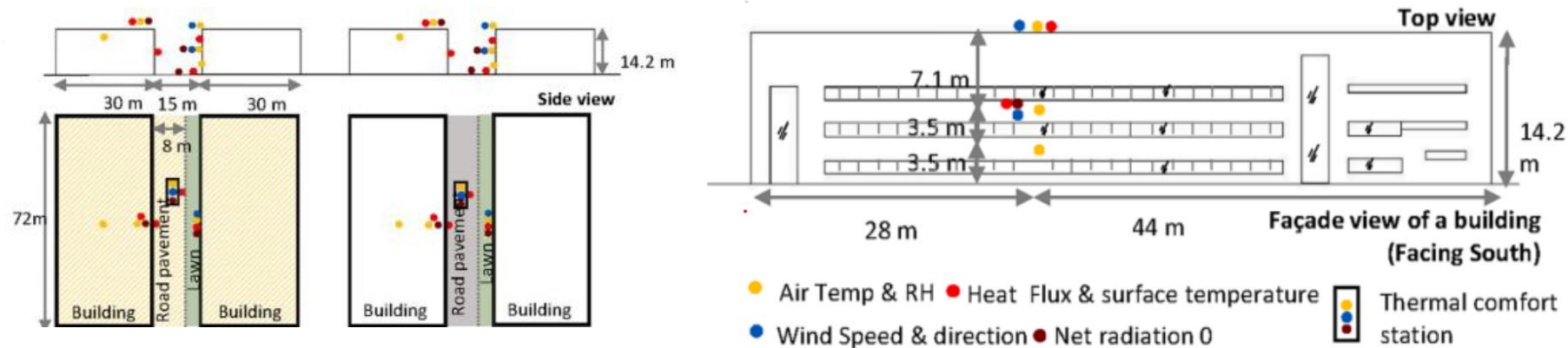
Source : Donthu et al. (2024)

	Roof		Wall		Road	
	Conv	Cool	Conv	Cool	Conv	Cool
Albédo	0.34	0.88	0.68	0.79	0.09	0.57
Emissivité	0.85	0.86	0.85	0.85	0.87	0.88

Observations météorologiques

Observations in-situ dans les deux canyons:

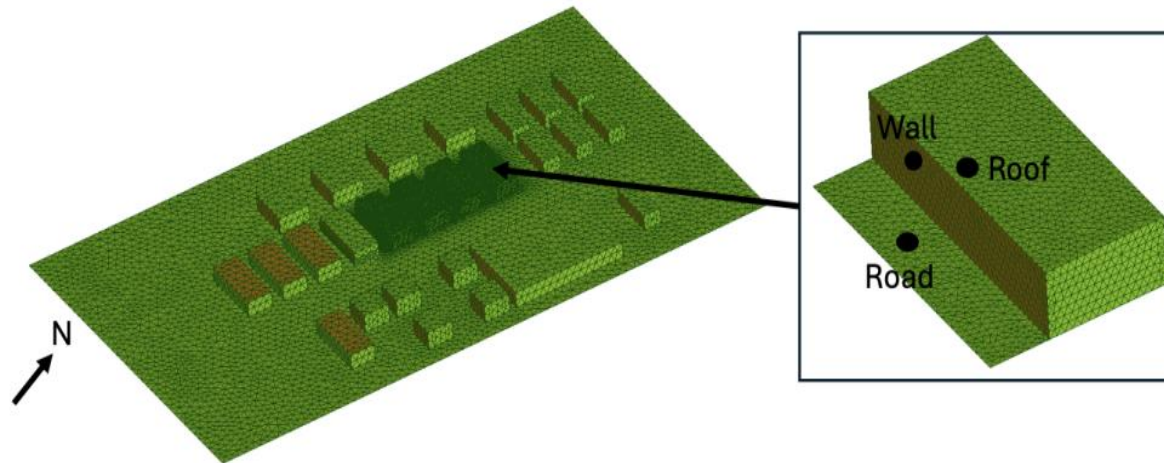
Source : Donthu et al. (2024)



Source : Ruiz et al. (2026)

Configuration de SOLENE-Microclimat

Maquette numérique et période de simulation:



Conduction pour l'énergétique du bâtiment: différences finies 1D avec 10 nœuds

Conduction pour les autres surfaces: modèle 3R4C pour toitures et murs et différence finies 1D avec 22 nœuds pour le sol

Coefficient de convection: Denby pour toitures, ASHRAE pour les murs et Vehrencamp pour le sol

Conditions limites:

Mesures in-situ de la météo et des conditions intérieures des bâtiments
Pas de temps: 30 min

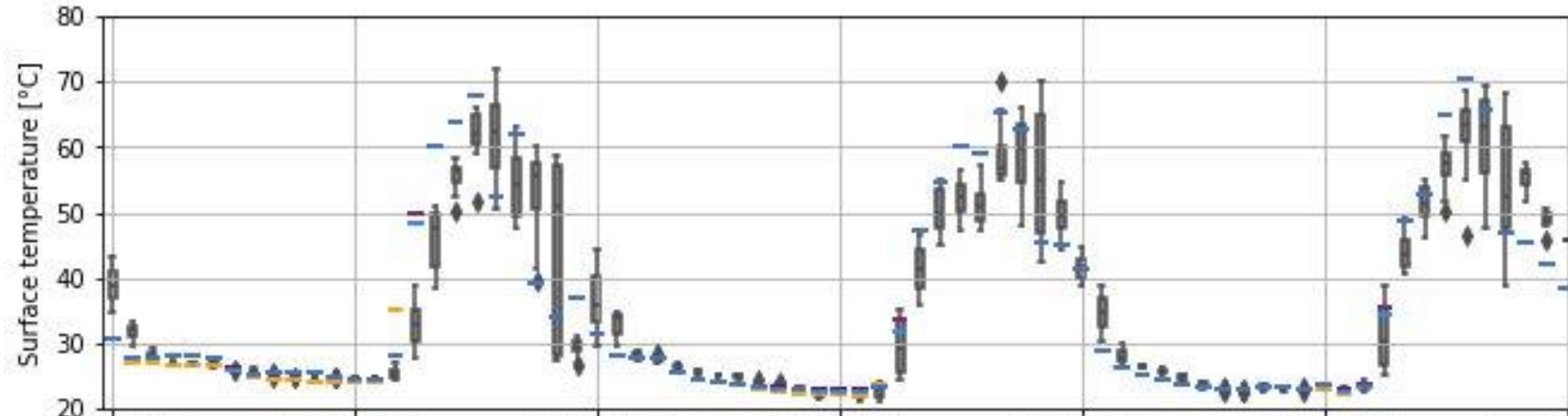
Simulation avec SOLENE-Microclimat

11 mars 2019 à 17h – 15 mars 2019 à 17h
Phase d'initialisation: 24 h
Phase d'évaluation: 72 h
Pas de temps: 1 min

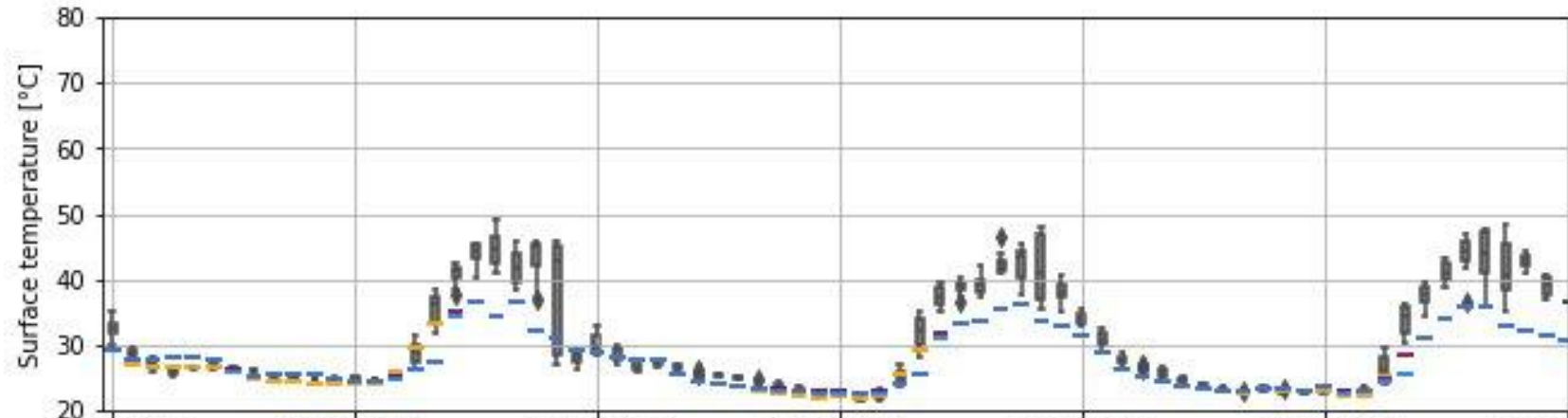
Comparaison entre simulations et observations

Evaluation des températures de surface des toitures

Toiture
« conv »



Toiture
« cool »



— Simulated with dew — Simulated without emissivity modification — Simulated without dew — Measured

Négliger la condensation :

- Températures des surfaces nocturnes plus basses
- Températures des surfaces augmentent plus rapidement au lever du soleil

Négliger la modification de l'émissivité suite à la condensation :

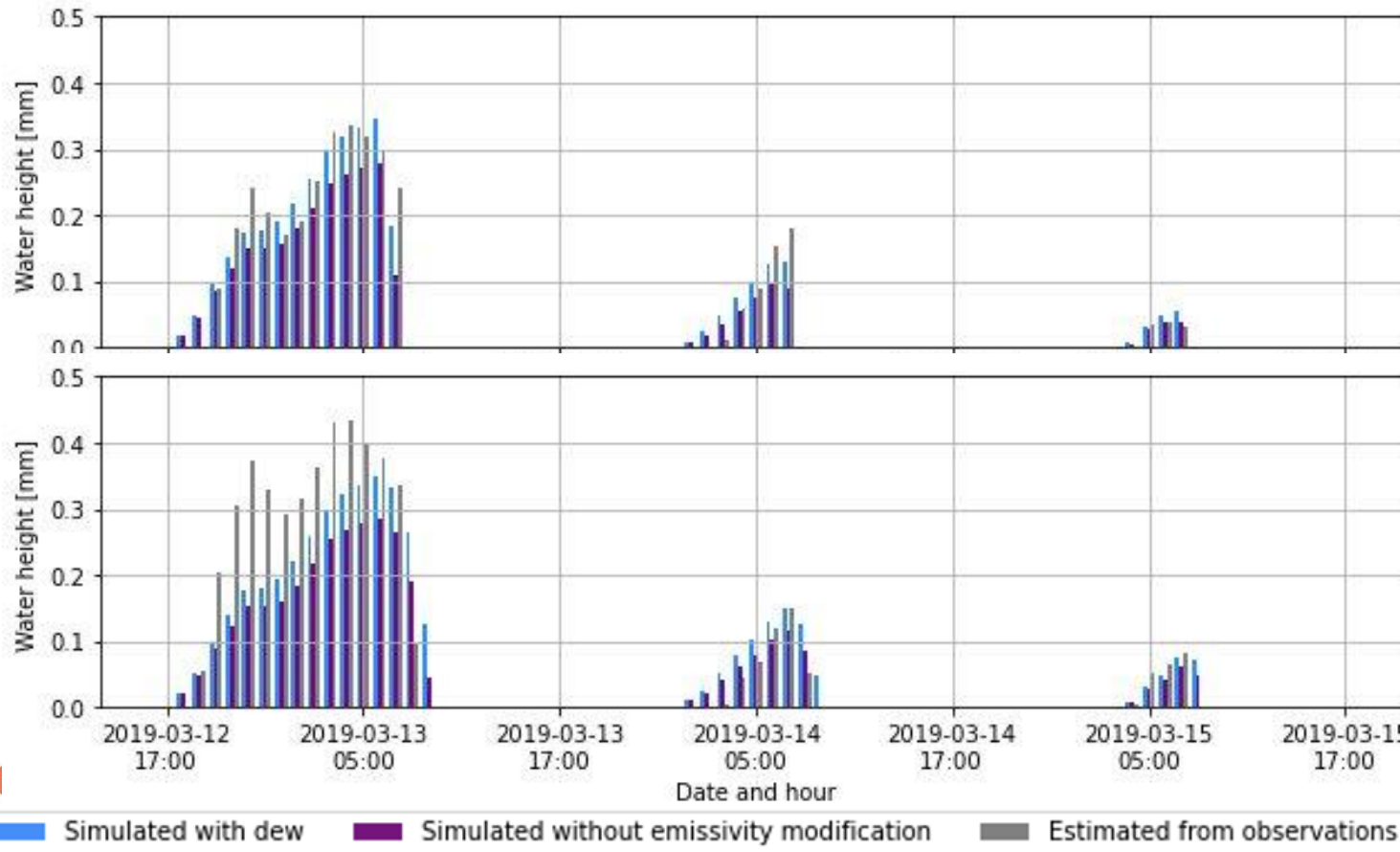
- Température de surface augmente plus rapidement le matin

Hauteur d'eau condensée

Comparaison d'évolution temporelle des hauteurs d'eau – 3 scenarios :

- Simulation avec condensation et modification d'émissivité
- Simulation avec condensation mais négligence de la modification d'émissivité
- Hauteur d'eau estimée à partir d'observations météo in-situ, basée sur l'équation proposée par Beysens et al. (2005)

Toiture
« conv »



Toiture
« cool »

Bonne représentation de la hauteur d'eau condensée.

Négliger la modification de l'émissivité suite à la condensation:

- Sous-estimation de la hauteur d'eau condensée

Sensibilité des résultats aux incertitudes des mesures

La condensation dépend fortement de la température et l'humidité relative de l'air:

Précision des capteurs

Instrument	Model	Parameter	Accuracy	Range
RTC analog	DeltaOhm	Air	± 0.12 °C	40 to 100 °C
temperature and relative humidity sensor	HD32.3	temperature		
		Air relative humidity	± 1.5 %	0 to 100 %
12 Bit smart sensor	HOBO TMB-M006	S- Surface temperature	± 0.2 °C	- 40 to 100 °C

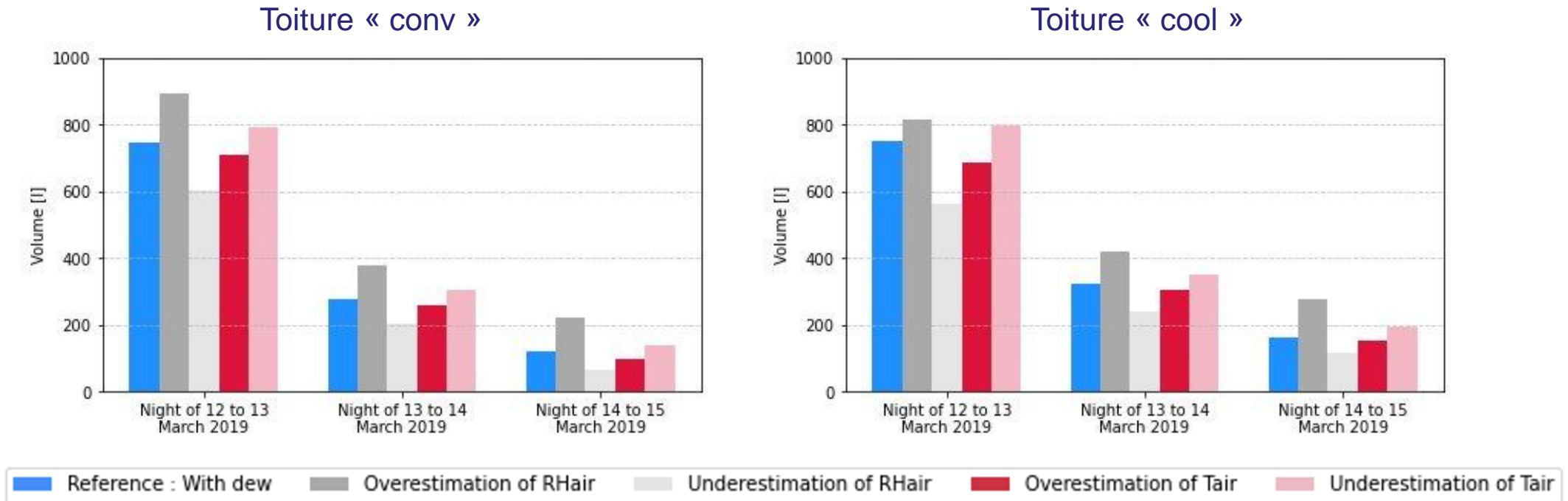
Configurations comparées pour évaluer l'impact d'incertitudes en lien avec les capteurs:

1. **Sous-estimation de la température de l'air de 0.12 °C**, sur la période étudiée;
2. **Surestimation de la température de l'air de 0.12 °C**, sur la période étudiée;
3. **Sous-estimation de l'humidité relative de l'air de 1.5 %RH**, sur la période étudiée;
4. **Surestimation de l'humidité relative de l'air de 1.5 %RH**, sur la période étudiée.

Sensibilité des résultats aux incertitudes des mesures

Impact de la précision des capteurs sur l'estimation du volume d'eau condensée

Surface de la toiture: 2160 m²



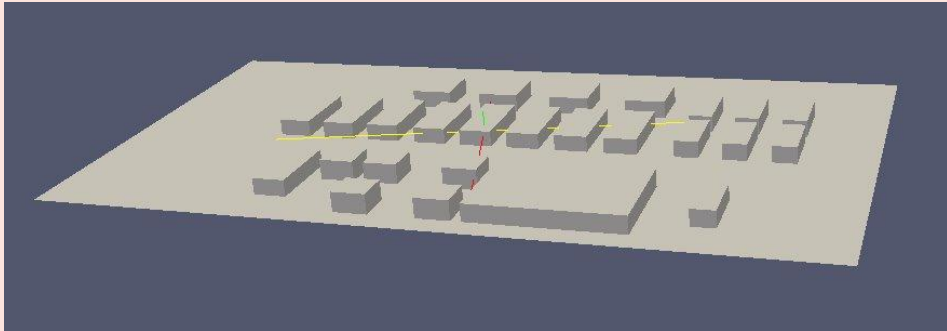
Le volume d'eau condensée est très sensible à la précision des capteurs.

Evaluation d'un revêtement bioinspiré – ANR Biocool

Revêtement bioinspiré avec albédo and émissivité élevés

Simulation thermoradiative avec SOLENE-Microclimat
(avec énergétique du bâtiment)

11 mars 2019 à 17h – 15 mars 2019 à 17h
Phase d'initialisation: 24 h
Phase d'évaluation: 72 h



Comparaison de trois scenarios:

1. Toutes surfaces urbaines avec revêtement « conv »
2. Toutes surfaces urbaines avec revêtement « cool »
3. Toutes surfaces urbaines avec revêtement « bioinspiré »

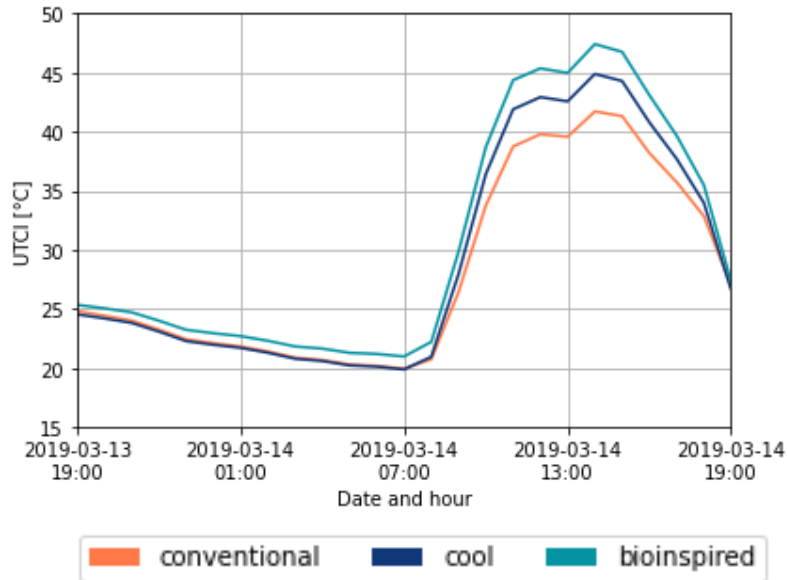
	« Conv »			« Cool »			« Bioinspiré »
	Roof	Wall	Road	Roof	Wall	Road	All
Albédo	0.34	0.68	0.09	0.88	0.79	0.57	0.95
Emissivité	0.85	0.85	0.87	0.86	0.85	0.88	0.94

Evaluation selon trois objectives:

1. Confort thermique ext. (UTCI – Universal Thermal Comfort Index)
2. Consommation énergétique du bâtiment
3. Volume d'eau potentiel

Evaluation d'un revêtement bioinspiré – ANR Biocool

Confort thermique ext.

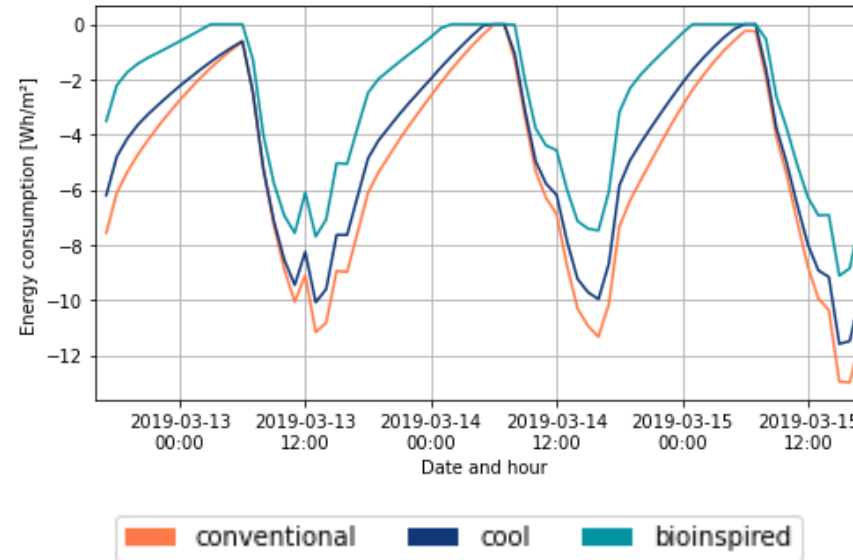


Le scénario « conv » est le plus confortable pour les piétons, en raison de la faible quantité de rayonnement réfléchi.

Échelle UTCI (°)	Niveau de stress
au-dessus de +46	Stress thermique extrême
+38 à +46	Stress thermique très élevé
+32 à +38	Stress thermique élevé
+26 à +32	Stress thermique modéré
+9 à +26	Pas de stress thermique

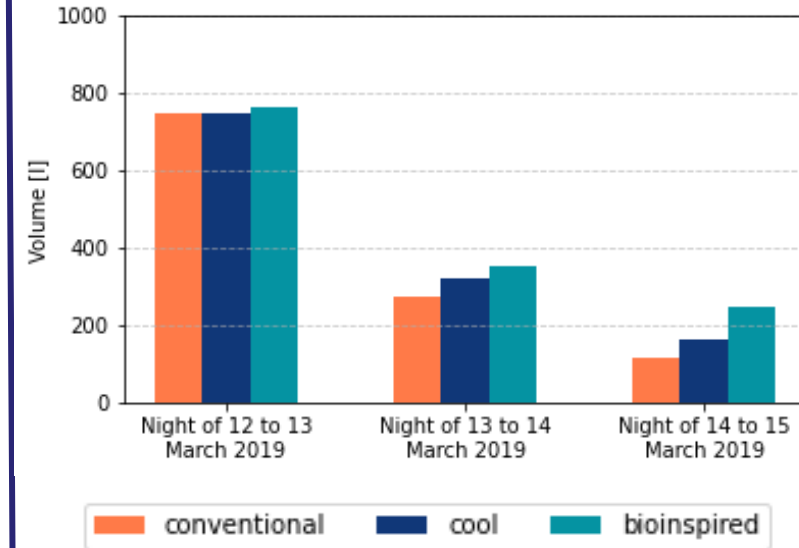
Source : Bröde et al. (2012)

Consommation énergétique du bâtiment



Le scénario « bioinspiré » réduit la consommation de climatisation de 47 % par rapport au scénario « conv », tandis que la réduction obtenue grâce au scénario « cool » n'est que de 15 %.

Volume d'eau potentiel



Le volume d'eau condensée pendant la nuit est légèrement plus élevé dans le scénario « bioinspiré », car celui-ci entraîne une baisse de la température de surface nocturne du toit.

Conclusion

Intégration de la condensation (rosée) dans SOLENE-Microclimat

- Estimation correcte des températures de surface nocturnes par SOLENE-Microclimat
- 0,17 l/m² d'eau condensée pour un toit « conv » et 0,19 l/m² pour un toit « cool » en moyenne par nuit dans un quartier industriel de Singapour
- Estimation du volume d'eau condensée très sensible aux données météorologiques observées

Evaluation d'un nouveau revêtement bioinspiré

- Augmentation du stress thermique au niveau piéton
- Baisse de la consommation énergétique pour climatisation de 47%
- Augmentation du volume d'eau condensée sur la toiture de 20%

Perspectives

- Comparaison avec observations in-situ du volume d'eau sur des toitures
- Evaluation du modèle dans d'autres climats et formes urbaines

Merci de votre attention

References

- Beysens, D., Muselli, M., Nikolayev, V., Narhe, R., Milimouk, I., 2005. Measurement and modelling of dew in island, coastal and alpine areas. *Atmospheric Research* 73, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.05.003>
- Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B. et Havenith, G. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI), *International Journal of Biometeorology*, Springer, vol. 56, no 3, mai 2012, p. 481–494 (ISSN 0020-7128 et 1432-1254, DOI 10.1007/s00484-011-0454-1).
- Donthu, E.V.S.K.K., Kyriakodis, G.-E., Zhang, X., Long, Y.P., Wan, M.P., Bozonnet, E., 2024a. Simulation advances with EnviBatE- A case study on urban heat island mitigation in Singapore. *Building and Environment* 258, 111580. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111580>
- Donthu, E.V.S.K.K., Long, Y.P., Wan, M.P., Zhou, M., Ng, B.F., 2024b. Dynamics of cool surface performance on urban microclimate: A full-scale experimental study in Singapore. *Sustainable Cities and Society* 102, 105218. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105218>
- Lin, W., Green, A., Ledo Gomis, L., Kokogiannakis, G., Cooper, P., 2023. Thermal effects of dew on cool roofs and conventional roofs in building performance simulations. *Energy and Buildings* 279, 112645. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112645>
- Musy, M., Azam, M.-H., Guernouti, S., Morille, B., Rodler, A., 2021. The SOLENE-Microclimat Model: Potentiality for Comfort and Energy Studies. pp. 265–291. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4_13
- Robineau, T., Rodler, A., Morille, B., Ramier, D., Sage, J., Musy, M., Graffin, V., Berthier, E., 2022. Coupling hydrological and microclimate models to simulate evapotranspiration from urban green areas and air temperature at the district scale. *Urban Climate* 44, 101179. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101179>
- Ruiz, Margot, Xenia Stavropoulos-Laffaille, Auline Rodler, et Marjorie Musy. « Assessment of dew water collection potential on conventional and cool roofs of an industrial district in Singapore ». *Energy and Buildings*, 18 février 2026, 117188. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117188>.
- Xu, W., Shen, S.C., 1992. Infrared radiation and reflection in an inhomogeneous coating layer on a substrate. *Appl. Opt.*, AO 31, 4488–4496. <https://doi.org/10.1364/AO.31.004488>

Composition des surfaces urbaines

Composition des surfaces urbaines

Toiture

Couverture en métal (0.15 cm)
 Insolation (10 cm)
 Couche d'air (20 cm)
 Panneaux métallique faux plafond (0.1 cm)

Mur

Mortier ciment (2 cm)
 Briques (18 cm)
 Mortier ciment (1 cm)

Rue

Asphalte (15 cm)
 Gravier (20 cm)
 Sol compacté (30 cm)
 Sous-sol terre (30cm)

	Layer	Thickness (mm)	Thermal conductivity ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Density ($kg \cdot m^{-3}$)	Specific heat capacity ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
Roof	Metal roofing	1.5	160	2800	890
	Insulation	100	0.045	10	830
	Air gap	200	0.9	1.225	1000
	Metal false ceiling	1	160	2800	890
Wall	Cement mortar	20	0.5	1300	1000
	Brick masonry	180	0.8	1800	800
	Cement mortar	10	0.5	1300	1000
Road	Asphalt concrete	150	0.96	2360	1030
	Gravel	250	1.1	2300	1000
	Compacted soil	300	1	1650	960
	Subsoil	300	0.8	1850	1040