

Webinaire BatyLab Solaire et végétalisation en toiture

BATYLAB

Évaluation des bénéfices multi-échelles des toitures biosolaires : le projet PROOF

Rémy Claverie

Chercheur en climatologie urbaine – Équipe de Recherche TEAM



N° ANR-19-CE22-0008

Contexte

Forte **concurrence** en toiture (Panneau photovoltaïque (PV), toiture végétalisées (TV), antennes 4G, etc.).

Plusieurs **labels** possibles (Biodiversity, BEPOS)

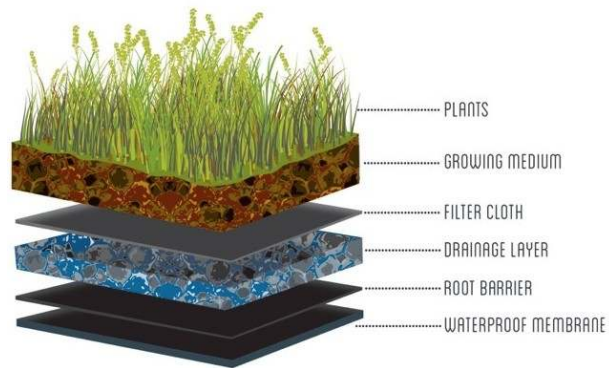
→ Quel choix, pour quel besoin, pour quelle configuration urbaine ?



Trame verte à Paris - Arnaud Bouissou - TERRA

PROOF cherche à développer un dispositif innovant, basé sur une **Solution Fondée sur la Nature** et qui permettra d'évaluer et d'améliorer les performances des bâtiments, tout en favorisant les services écosystémiques rendus.

Toitures végétalisées : les technologies



From : <http://www.architectureanddesign.com.au>

Il existe trois technologies :

- ♦ Extensive (**Substrat 3cm → 15cm**) : Forte teneur en matière minérale
- ♦ Semi-intensive (**Substrat 15cm → 60cm**)
- ♦ Intensive (**Substrat > 60cm**) : terre végétale



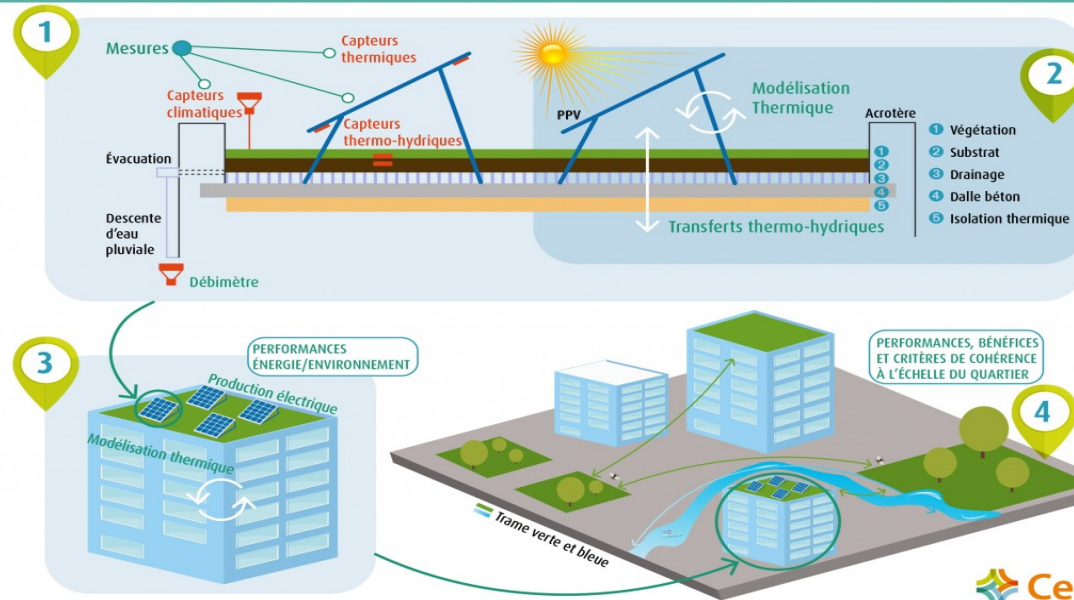
Bénéfices

- Une toiture végétalisée permet de
 - Réduire la température de surface [Pisello et al, 2015]
 - Allonger la durée de la couche d'étanchéité [Scherba et al, 2011]
 - Réduire la consommation d'énergie du bâtiment [Yang et al, 2018]
 - Participer à la réduction de l'îlot de chaleur urbain [Santamouris, 2014]
- Mais aussi :
 - Sociaux [Jim et al, 2017], Environnementaux [Rang et al, 2018]
 - Économiques [Shafique, 2019] et esthétiques [Yang et al, 2015]

Bénéfices des toitures biosolaires

- Peu d'études dans la bibliographie scientifique
- Principalement expérimentales (~80%)
- Bénéfices étudiés :
 - Augmentation de la production électrique de 6 % [Kohler, 2007]
 - Augmentation de l'énergie de 1,3 % [Osma-Pinto, 2019] ; 1,4 % [Alshayeb, 2018]
 - Peut participer jusqu'à 8,3 % de la consommation total d'un bâtiment [Hui et al, 2011]
- Facteurs d'impacts :
 - Convection devant le PPV
 - Température de surface sous panneau

PROOF



Partenaires :

LEMTA, LSE, LMOPS, CSTB, Efficacity + INES

Dates :

1^{er} octobre 2019, durée : 4 ans (+14m)

Budget :

1,32M€, aide accordée de 503k€

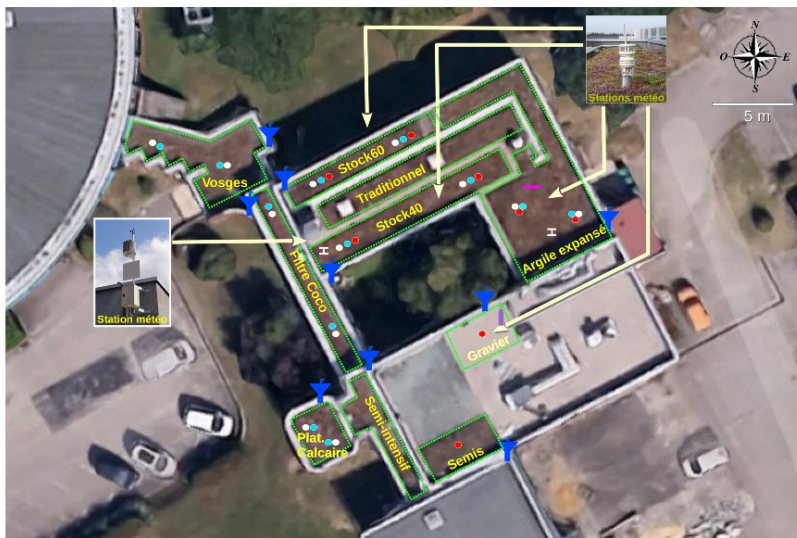
Quatre configurations de toiture étudiées : TTV+PPV (Biosolaire), TTVStockante + PPV (Biosolaire), Coolroof + PPV et Gravier (référence)

Plateforme expérimentale

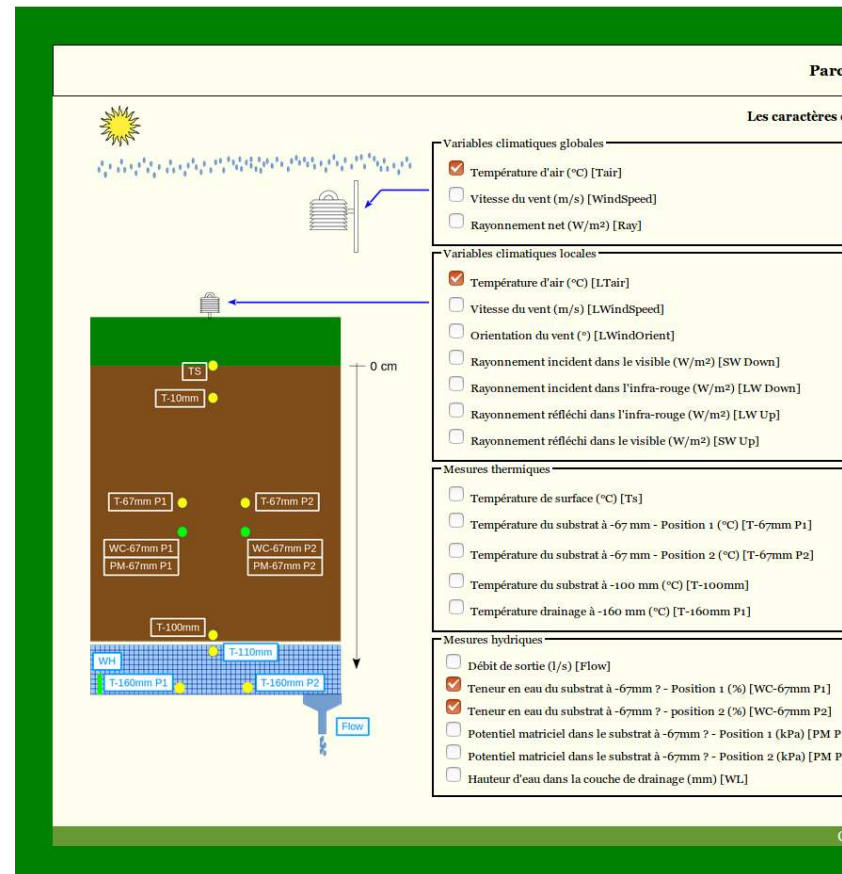


Toitures végétalisées
Plateforme expérimentale
de Nancy

Information	Unité
Teneur en eau	%
Potentiel matriciel	m
Température	°C
Débit à l'exutoire	m³/s
Hydrométéore	Pluie, grêle, neige
Flux radiatif net	W/m²
Hauteur d'eau (drainage)	m



	Vosges	Argile expansée	Stock40	Stock60	Filtre Coco	Plateau Calcaire	Semi-intensif	Semis	Traditionnel	Gravier
Végétation	Orig. Vosges	TV classique	TV classique	TV classique	TV classique	Plateau Calcaire	TV classique	Sedums + éch. « Plante & cité »	TV classique	
Substrat	Sub. Vosges (Végétot)	classique	classique	classique	classique	Sub. Vosges (Végétot)	Sub. Vosges (Végétot)	classique	classique	Gravier
Drainage	Argile expansée	Argile expansée	Nidaroo	Nidaroo	Argile expansée	Argile expansée	Argile expansée	Argile expansée	Argile expansée	



TV Argile
Expansé



Stock60



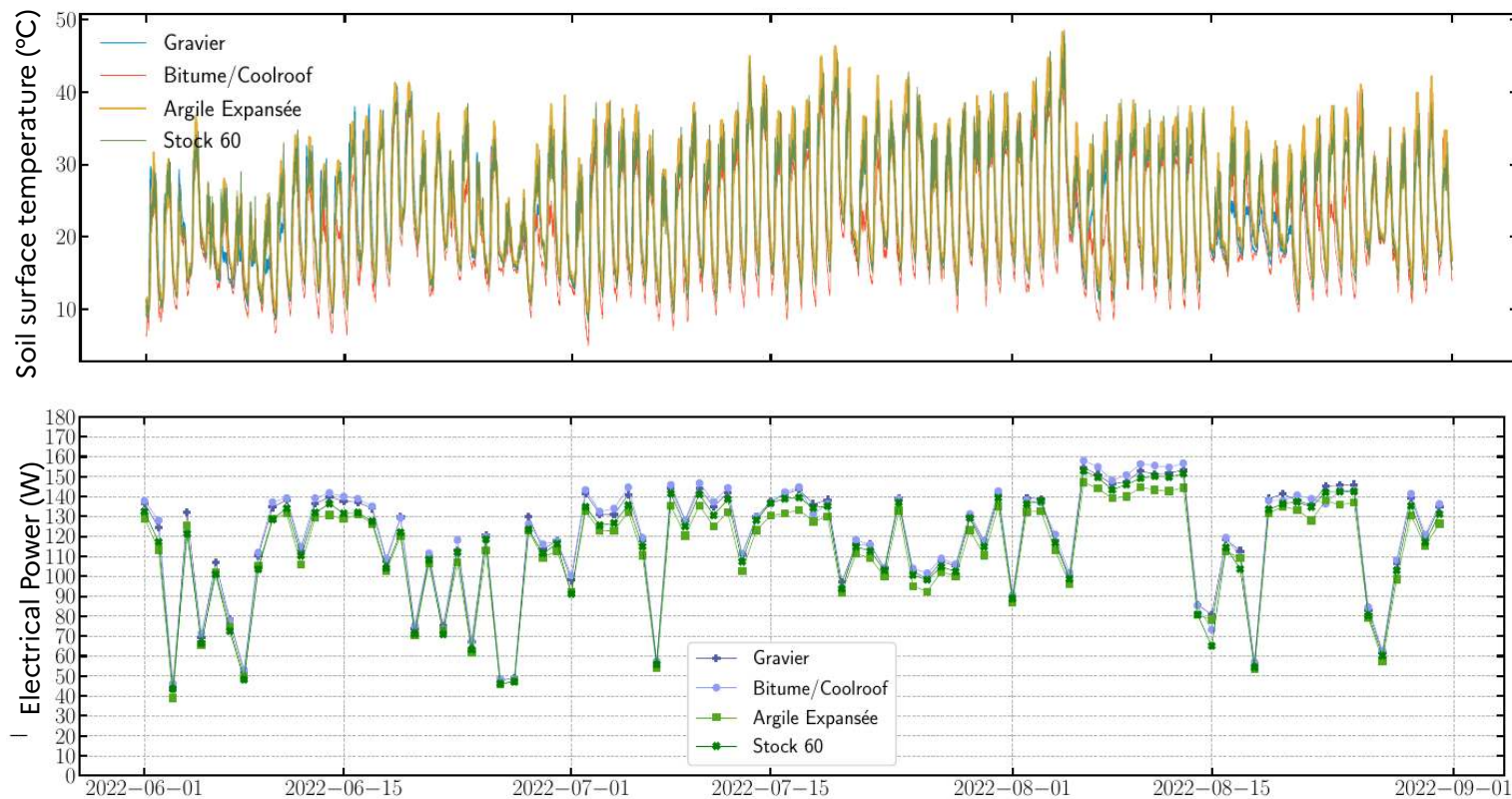
Bitume puis coolroof (>12 mai 2022)



Gravier
(référence)



Puissance électrique et température de surface



Thèse de Thomas Villemin (UL, 2023)

● Énergie produite (kWh) par saison météorologique

Installation Coolroof

Min.
Max.



Caractérisation des effets des PV sur la flore

Objectifs du suivi

- Documenter les effets du PPV sur le **recouvrement** de la végétation,
- Documenter les effets des PPV sur la **composition floristique et l'abondance des espèces**, notamment au regard des exigences écologiques
- Documenter les effets des PPV sur certains **traits**, notamment ceux susceptibles de moduler la transpiration (développement, état de santé...).

Méthodes

- Relevé mensuel (avril → septembre) des espèces sous panneau et sur témoin exposé, sur quadrat (depuis 2021),
- Mesure de quelques traits pour les individus des espèces les plus abondantes (*S. floriferum*) : hauteur totale, pigments (mesure optique, pince Dualex).
- Suivi photo du développement via 2 caméras (CCFC) pour un PPV et son témoin (depuis 2022).

Caractérisation des effets des PV sur la flore

Tendances en 2021 - 2022 :

(ce ne sont pas des résultats consolidés / significatifs mais des observations qualitatives)

- Développement massif sous panneau de certaines annuelles au mois de mai (3 espèces de fabacées, spontanées) ;
- Couvert végétal plus important sous panneau d'avril à août ;
- Disparition quasi totale des *S. floriferum* et des espèces de *sedum* minoritaires à partir du mois d'août (été humide ?), et faible recouvrement par rapport au témoin exposé



Avril 2022

← PPV AE

Témoin AE



En conclusion

Impact sur la production électrique

- La production électrique est principalement impactée par les températures de sol sous le PV : diminution des échanges radiatifs
- La configuration *PV/bitume* est celle possédant les moins bonnes performances
- Sans eau dans le substrat et les plantes, les températures de surfaces sont plus élevées que les associations *coolroof* et *gravier*
- L'évapotranspiration ne semble pas jouer un rôle clef sur l'augmentation de la production électrique

Impact sur la biodiversité

- Les sedums sous les PV ont laissé leur place à d'autres espèces
- Espèces présentant un fort stress à la période estivale



Journée de restitution du
projet PROOF
le 5 novembre 2024 à Paris
ou sa périphérie

Merci de votre attention !

Des questions ?

Rémy Claverie (remy.claverie@cerema.fr)

06 37 47 33 44

Cerema Est - Laboratoire Nancy - Équipe de Recherche TEAM



Bibliographie

- [Alshayeb, 2018] Alshayeb, Mohammed J. and Chang, Jae D., (2018), Variations of PV Panel Performance Installed over a Vegetated Roof and a Conventional Black Roof, *Energies*, 11, issue 5, p. 1-14, <https://EconPapers.repec.org/RePEc:gam:jeners:v:11:y:2018:i:5:p:1110-d:144063>
- [Hui et al, 2011] Hui, S. C. and S. C. Chan. "Integration of green roof and solar photovoltaic systems." (2011).
- [Jim et al, 2017] Green roof evolution through exemplars: Germinal prototypes to modern variants August 2017 *Sustainable Cities and Society* 35 doi:10.1016/j.scs.2017.08.001
- [Kohler, 2007] Köhler, M., Wiartalla, W., Feige, R., 2007. Interaction between PV-systems and extensive green roofs (Proceeding). In: Fifth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show, pp. 1-16.
- [Osma-Pinto, 2019] Osma-Pinto and Ordóñez-Plata, Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates, *Solar Energy*, Volume 185, 2019, Pages 112-123, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.053>.
- [Pisello et al, 2015] Anna Laura Pisello, Cristina Piselli, Franco Cotana, Thermal-physics and energy performance of an innovative green roof system: The Cool-Green Roof, *Solar Energy*, Volume 116, 2015, Pages 337-356, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.049>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15001887>)

Bibliographie

- [Shafique, 2019] Shafique and Xiaowei, Life Cycle Assessment of Green Roofs: A Review on the Current Research (June 25, 2019). Abstract Proceedings of 2019 International Conference on Resource Sustainability - Cities (icRS Cities), Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3409694>
- [Scherba et al, 2011] Scherba A, Sailor DJ, Rosenstiel TN, et al. Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. Build Environ 2011;46:2542-51
- [Yang et al, 2018] Junjing Yang, Devi Ilamathy Mohan Kumar, Andri Pyrgou, Adrian Chong, Mat Santamouris, Denia Kolokotsa, Siew Eang Lee, Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate, Solar Energy, Volume 173, 2018, Pages 597-609, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.006>.
- [Santamouris, 2014] Santamouris M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. Sol Energy 2014;103:682-703.

Production bibliographique

- Villemin T., Claverie R., Sawicki J.-P., Parent G., *Thermal characterization of a photovoltaic panel under controlled conditions*. In : Renewable Energy 198 (2022), p. 28-40.
- Villemin T., Farges O., Parent G., Claverie R., *Monte Carlo prediction of the energy performance of a photovoltaic panel using detailed meteorological input data*, Renewable Energy
- Villemin T., Farges O., Parent G., Claverie R., *Modélisation du bilan thermique d'un panneau photovoltaïque par la méthode de Monte Carlo et validation expérimentale*, SFT 2022
- Villemin T., Farges O., Parent G., Claverie R., *Modélisation et intégration temporelle d'un problème thermique couplé par la méthode de Monte-Carlo*, SFT2021.
- Villemin et al, *Multiphysics and Multiscale modeling of a photovoltaic panel using Monte Carlo methods*, JNPV 2022
- Villemin T., Royer A., Claverie R., Farges O., Parent G., *Simulation of a rooftop photovoltaic system: a focus on the energy performance of the building*, IHTC 2023
- Villemin T., Bouyer J., Claverie R., Parent G., Sabre M., *Experimental study and numerical simulations of the airflow around a photovoltaic panel in urban configuration*, accepted ICUC11
- Claverie et al, *PROOF : A collaborative project to assess the multi-scale benefits of biosolar roofs*, ICUC11, Sydnnet Aug. 2023