



# Combinaisons biosolaires : retours d'expériences d'un écologue

Patrice Prunier<sup>1</sup>, Julie Steffen<sup>1</sup>, Fabienne Mörch<sup>1</sup> et  
Julien Winkelman<sup>2</sup>

HEPIA – University of Applied Sciences of Western Switzerland

Services Industriels de Genève

Genève – 11 mars 2025

*Crédits photos : P. Prunier, J. Steffen et F. Mörch*

# *Le contexte...*

Pédagogie

Hydrologie

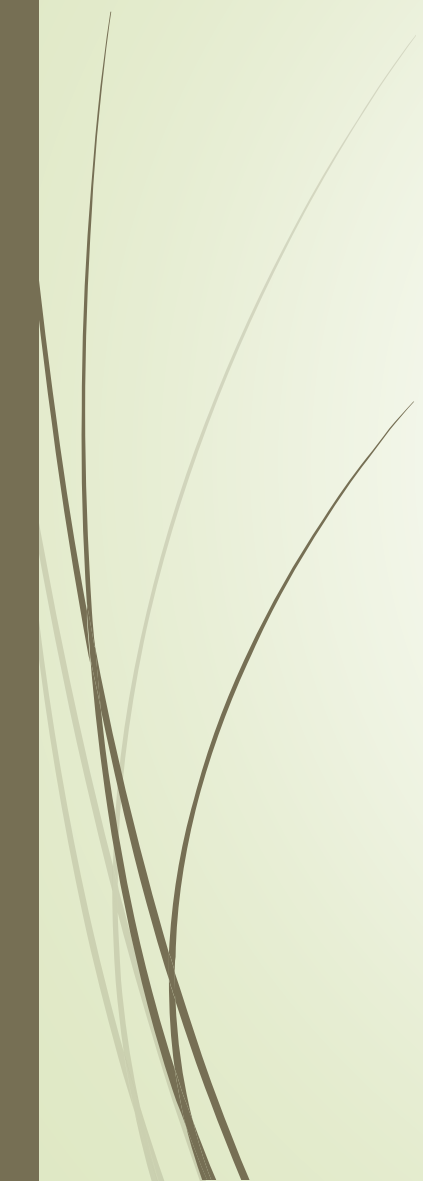
Energie

Biodiversité





# Objectif : identifier les intérêts et limites de différents cas

- **Panneaux mono-pan ou en dômes au sol**
  - **Panneaux mono-pan surélevés**
  - **Panneaux en dômes surélevés**
  - **Panneaux en dômes inversés surélevés («papillons»)**
  - **Panneaux verticaux**
- 

# Méthode



Expérimentations  
mélanges,  
substrat,  
épaisseur

SEED < Fleurs locales < Montoit

Toitures  
Mousses

BryoTOP



2015

2021

2014

2016

2017

2018

2019

2022

2023

2024

TVEG

Diagnostic  
Toitures

2020

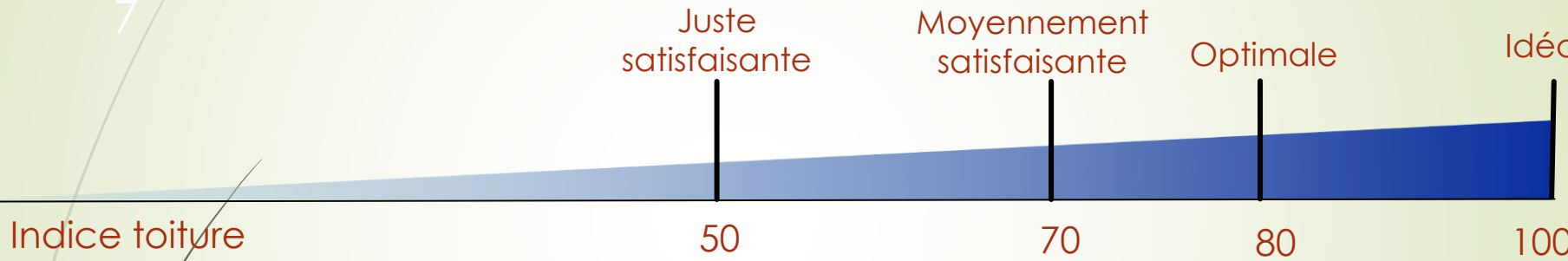
Expérimentations  
avec panneaux  
solaires

# Espace expérimental toitures végétalisées de Lullier (CH-GE)

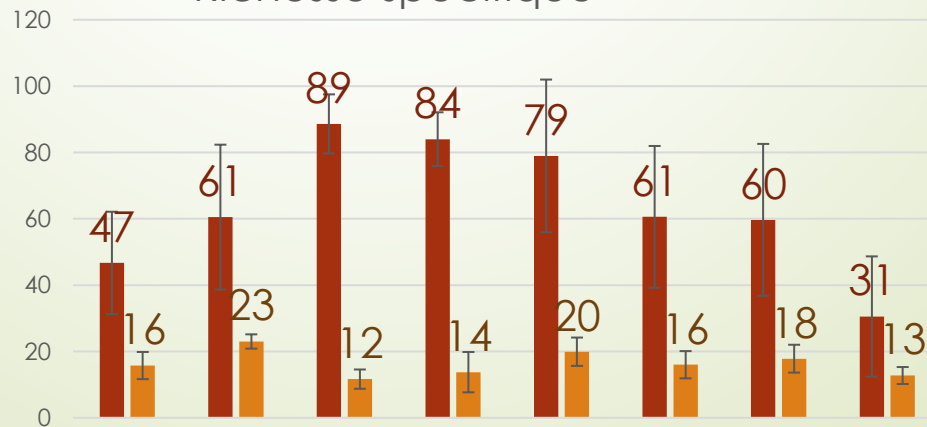


# Evaluation des résultats (référence végétation)

7



■ Recouvrement vasculaire %  
■ Richesse spécifique

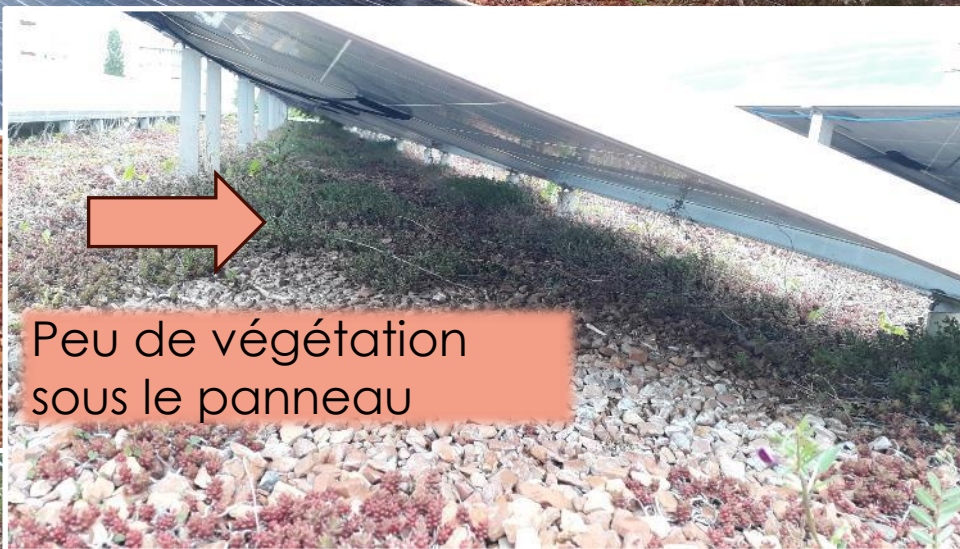




# **Panneaux mono-pan ou en dômes au sol**

*Parmi les premiers modèles - ex Beaulieu - Lausanne*





Peu de végétation sous le panneau



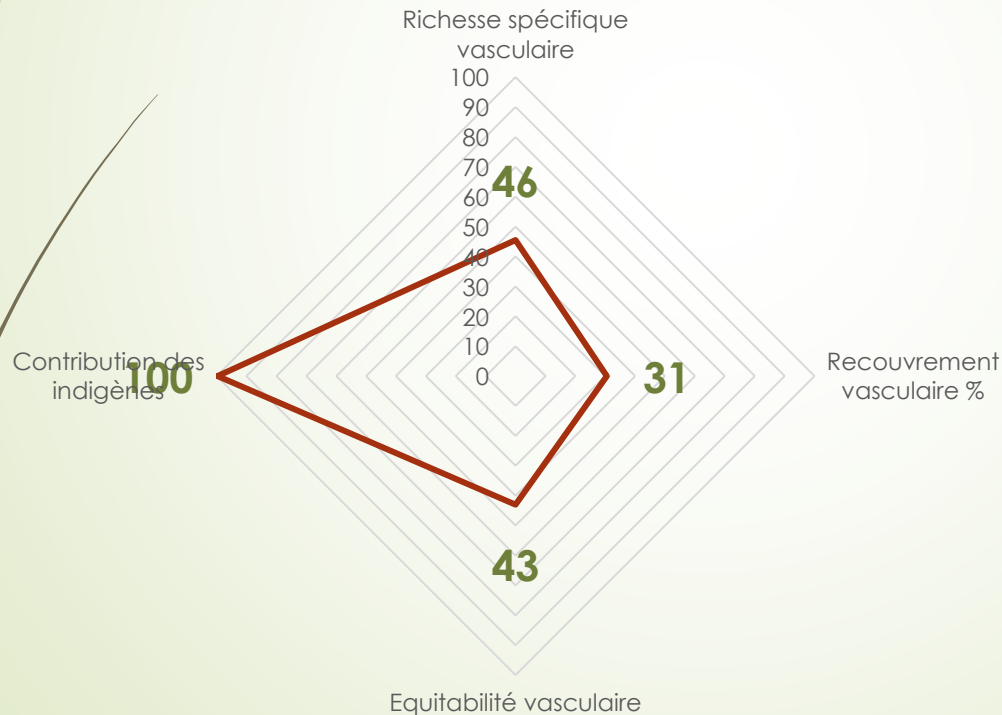
Pas de végétation sous le panneau



# Aspect végétalisation

Une toiture juste satisfaisante

**Indice 55**



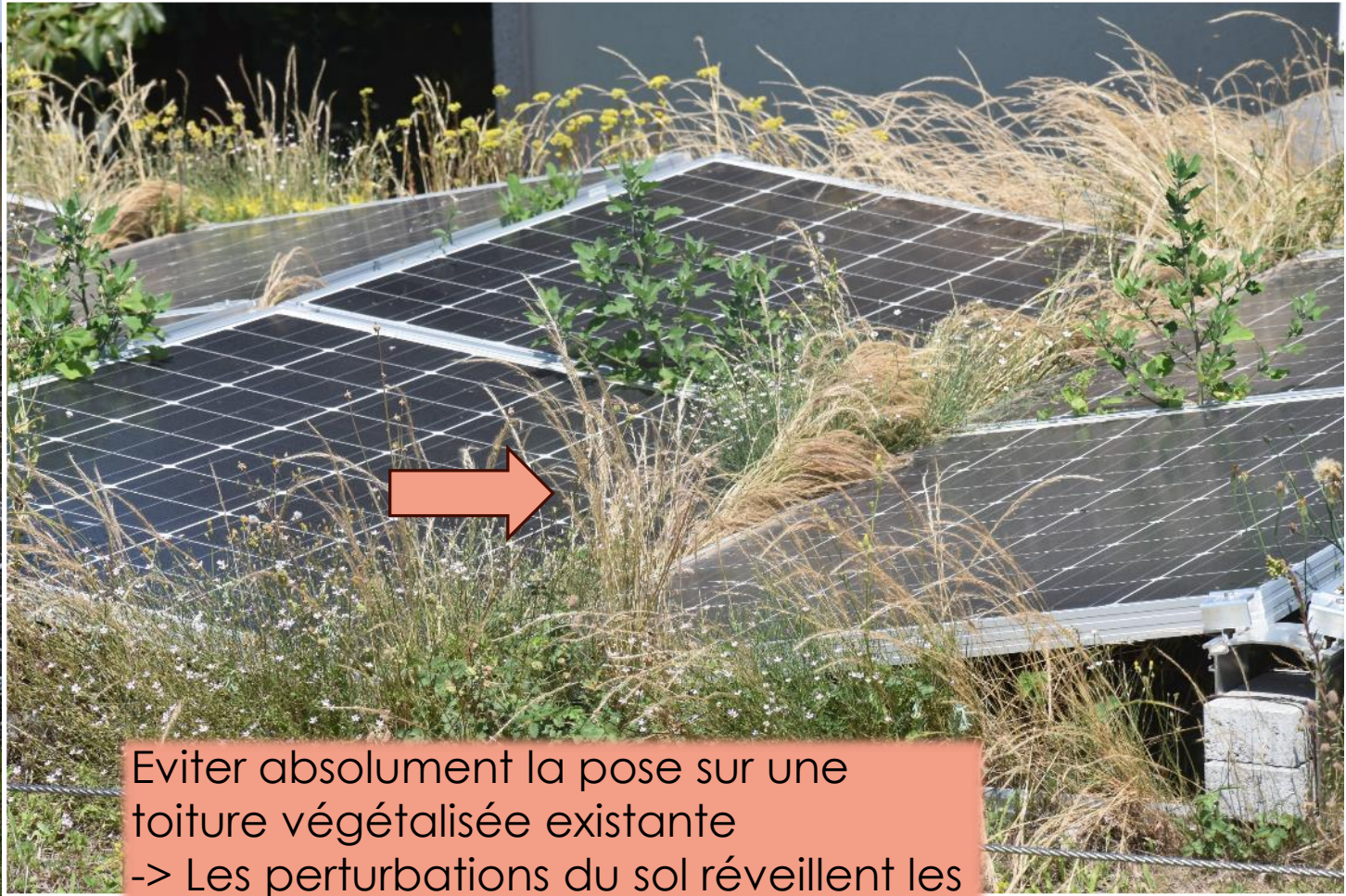
**Lancy (dômes rasants)**



Dômes rasants  
Toiture végétation extensive  
Substrat commercial minéral

Difficulté d'entretien –  
Quel accès ?





Eviter absolument la pose sur une  
toiture végétalisée existante  
-> Les perturbations du sol réveillent les  
espèces pionnières

# Aspects thermiques

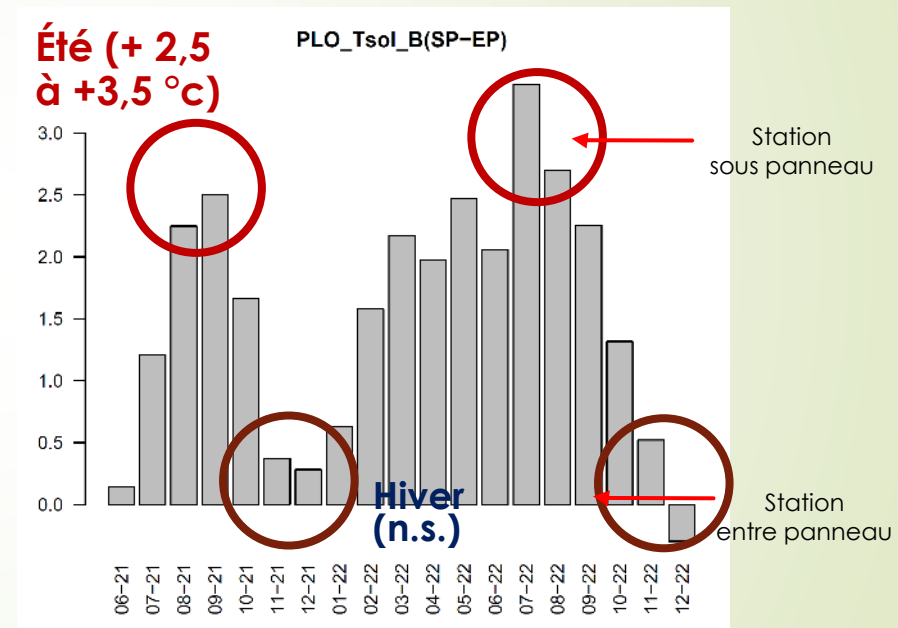
## ➤ Un effet de « four » sous les dômes rasants



Station  
entre  
panneaux  
(EP)

Station  
sous  
panneau  
(SP)

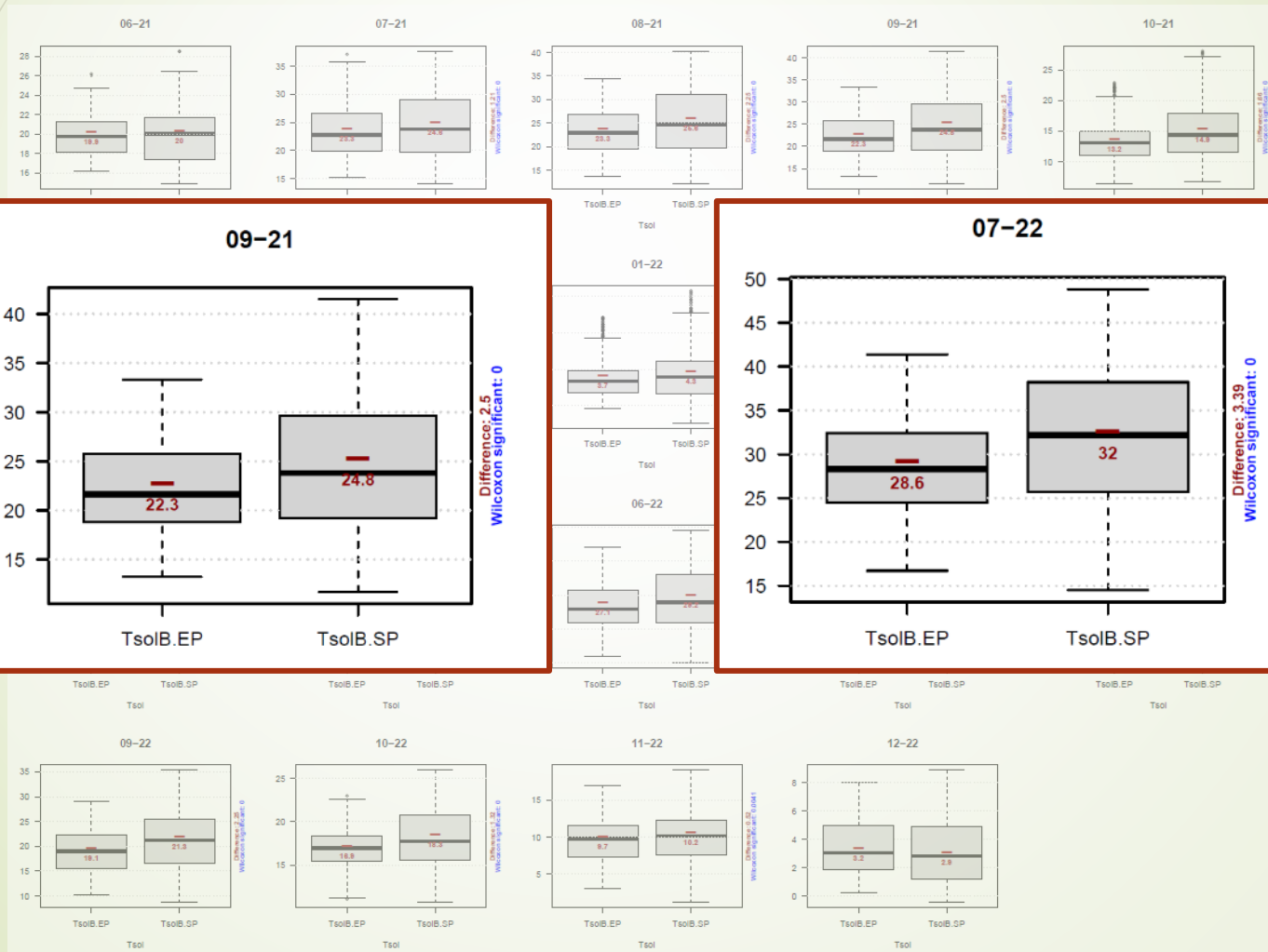
Site Ecole de Pré-du-Camp



Ecart de température moyenne mensuelle au sol sous les panneaux (SP) et entre les panneaux (EP). Test de Wilcoxon significatif, sauf en novembre et décembre.

# Aspect thermique dômes appliqués contre le sol

- Pré-du-Camp – Dômes appliqués au sol
- Comparaison de la température moyenne mensuelle sous et entre panneau





# Conclusions

- Très faible couverture végétale sous les panneaux
- Difficultés d'entretien lorsque les panneaux sont proches
- Perte de production (surtout lors d'une pose sur toiture végétalisée existante)
- Augmentation de la température sous les panneaux -> « Effet de four »



# **Panneaux en dômes surélevés**



18

*Espace expérimental toitures végétalisées de Lullier*



Mai 2021 (n+1)





octobre 2021 (n+1)



Septembre 2022 (n+2)

# Aspect végétalisation

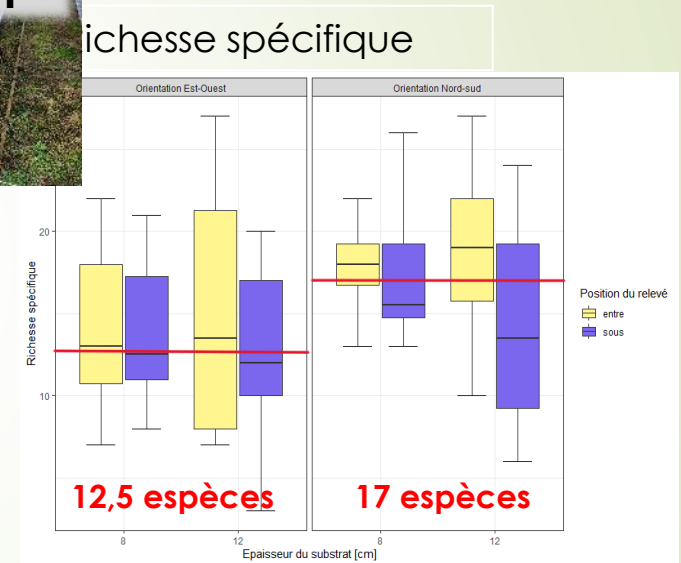
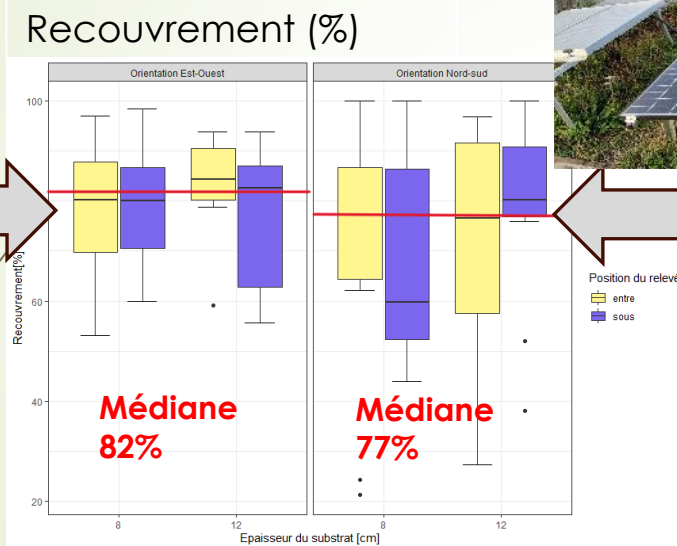
- Projet PLANETE - Site de Lullier
- Comparaison du recouvrement végétal et de la richesse spécifique pour des panneaux en dômes et monopan surélevés (n = 3 ans)



Domes



Monopan

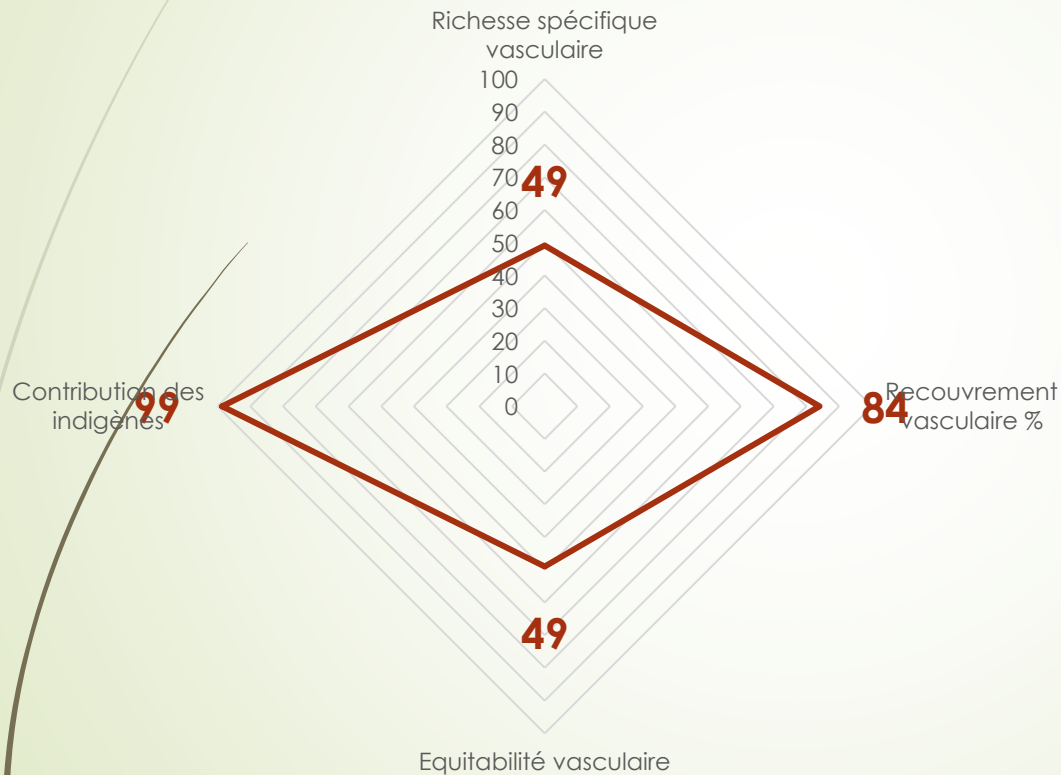


- Recouvrement global plus élevé pour la configuration en dômes surélevés (non significatif  $P = 0.12$ )
- Richesse spécifique moyenne plus élevée pour la configuration monopan ( $P = 0.002$ )

# Aspect végétalisation

Une toiture juste satisfaisante

**Indice 70,3**



## 4. Lullier (dômes surélevés)



Dômes surélevés  
Toiture végétation extensive  
Substrat commercial minéral

# Aspect thermique

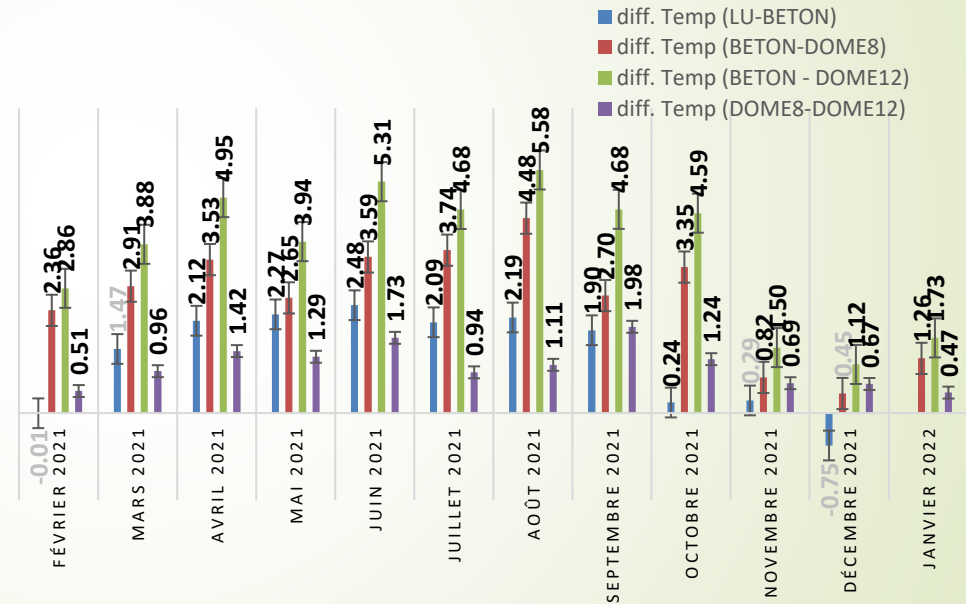
- ▶ PLANETE site de Lullier – comparaison des températures moyennes mensuelles sous les panneaux en dômes surélevés
  - ▶ Par rapport à un témoin sur béton en plein soleil (LU).
  - ▶ Par rapport à un substrat végétalisé.

Substrat brut (T° béton sous panneau versus T° béton en plein soleil)

- ▶ jusqu'à - **2,5 °C**

Substrat végétalisé vs sans substrat (béton):

- ▶ Jusqu'à - **4,5 °C** pour 8cm de substrat
- ▶ Jusqu'à - **5,6 °C** pour 12cm de substrat

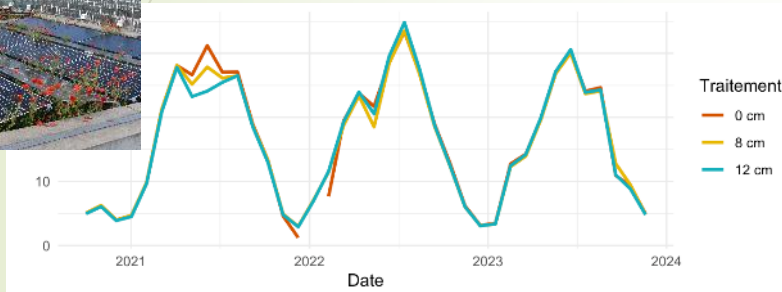


- ▶ **Effet significatif de la diminution de la température moyenne mensuelle par l'ombrage des panneaux (de 2,5 à 5,6 °C)**
- ▶ **Effet amplifié par la présence d'un substrat végétalisé.**

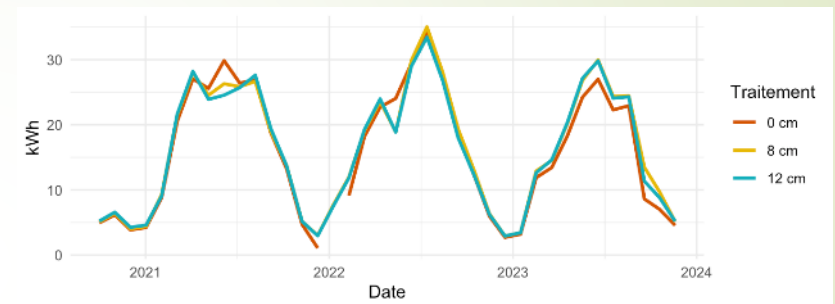
# Aspect production électrique

## ➤ Projet PLANETE site de Lullier – Dômes surélevés

Productible modules monocristallins orientation EST



Productible modules monocristallins orientation OUEST



- Effet de la végétation globalement positif sur la production +3,4%
- Plus important pour les panneaux orientés ouest (+ 5,4 %) qu'à l'est (+ 1,3 %)



# Conclusions – Dômes surélevés

- ▶ Couverture végétale favorisée (82 %), mais peu diversifiée (12 sp.) -> juste satisfaisant
- ▶ Effet significatif de réduction de la température (-2,5 °C), plus marqué avec un substrat épais (-5,6 °C pour 12 cm)
- ▶ Légère augmentation de la production (+ 3,4 %), surtout en exposition ouest (+ 5,4%)
- ▶ Difficulté d'entretien en raison de la proximité des panneaux



# Panneaux monopan



Mai 2021 (n+1)



octobre 2021 (n+1)



Novembre 2022 (n+2)



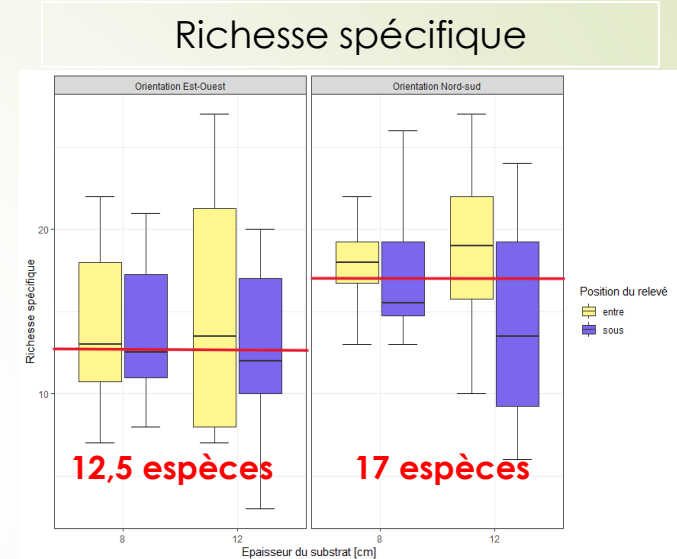
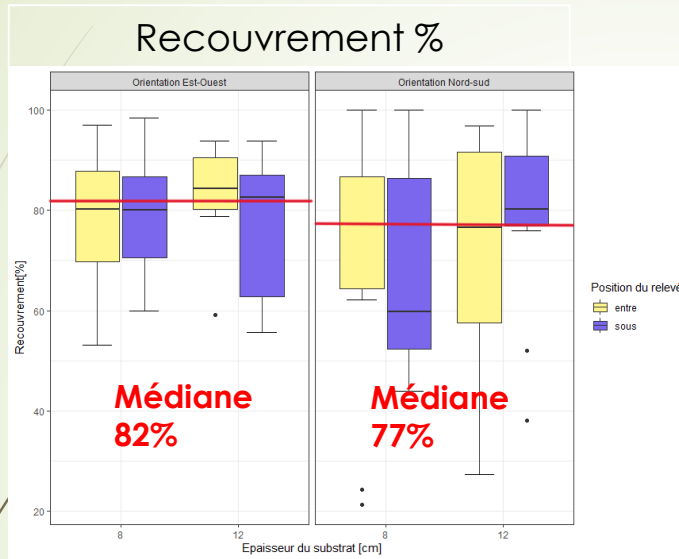
En 2023 (année n+ 2) : un tapis végétal ras dominé par le trèfle champêtre s'est développé



En 2024 (année n+ 3) : le tapis végétal ras se maintien

# Aspect végétalisation

➤ Projet PLANETE site de Lullier



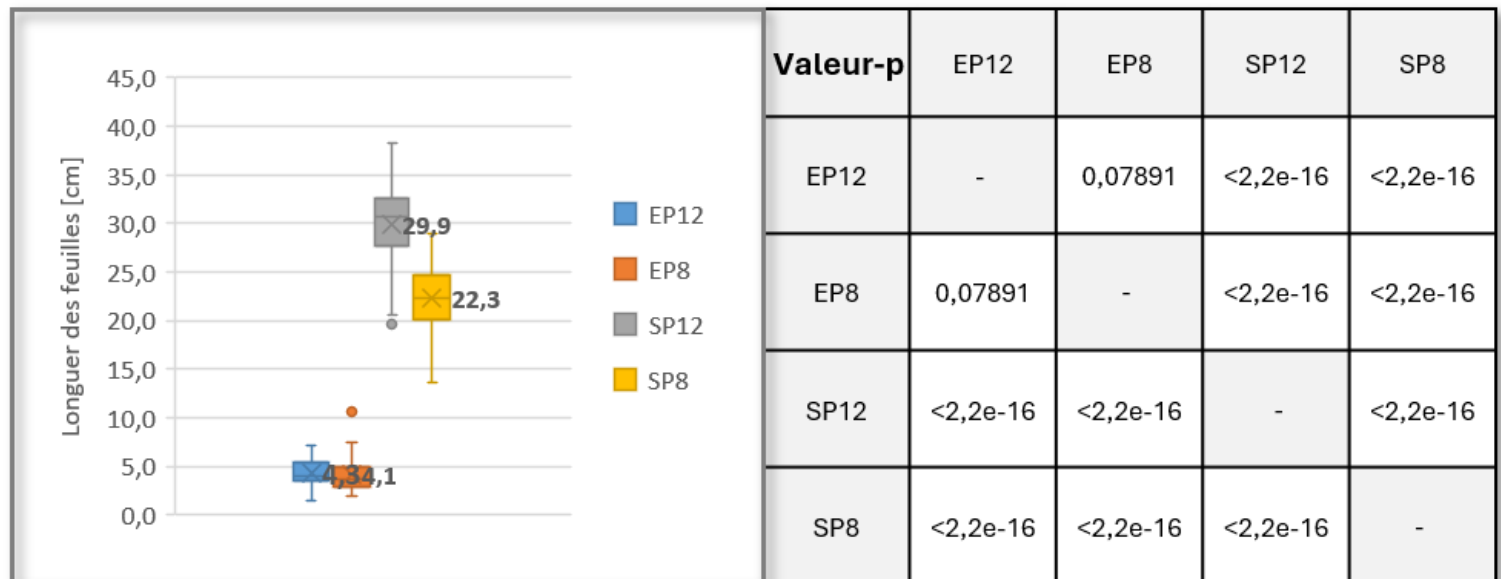
- Recouvrement global plus élevé pour la configuration en dômes surélevés (non significatif  $P = 0.12$ )
- Richesse spécifique moyenne plus élevée pour la configuration monopan ( $P = 0.002$ )

# Aspect végétalisation

- Projet PLANETE site de Lullier – monopan surélevés



**Effet du microclimat hivernal et printanier** sur la croissance des végétaux (année n) -> les feuilles de coquelicots sont beaucoup plus longues sous les panneaux.





# Aspect thermique

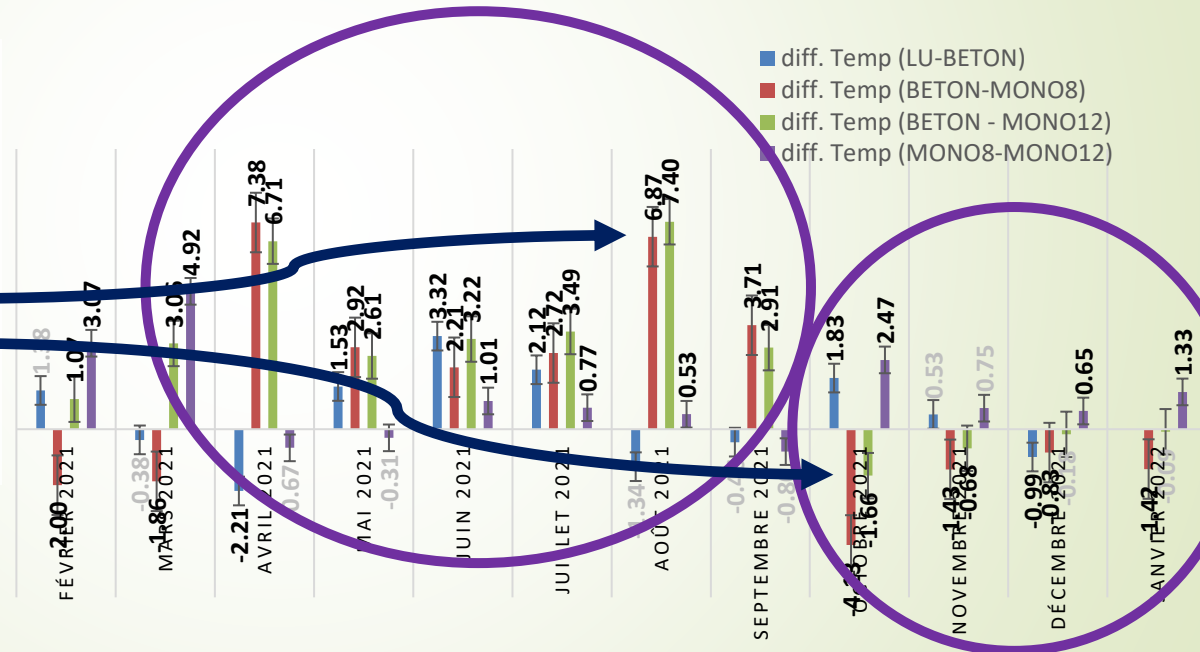
- Projet PLANETE site de Lullier – Comparaison des températures moyennes sous les panneaux monopan surélevés
  - Par rapport à un témoin sur béton en plein soleil (LU).
  - Par rapport à un substrat végétalisé.

## Béton vs sans panneau

- Jusqu'à **- 3,3°C** en été
- Jusqu'à **+1°C** en hiver

## Substrat végétalisé versus substrat brut (béton):

- Jusqu'à **-7,4°C** en été
- Jusqu'à **+ 4,1°C** en automne et **+ 2°C** en hiver



Les modules étant espacés entre eux, il y a un effet contrasté sur la température au sol :

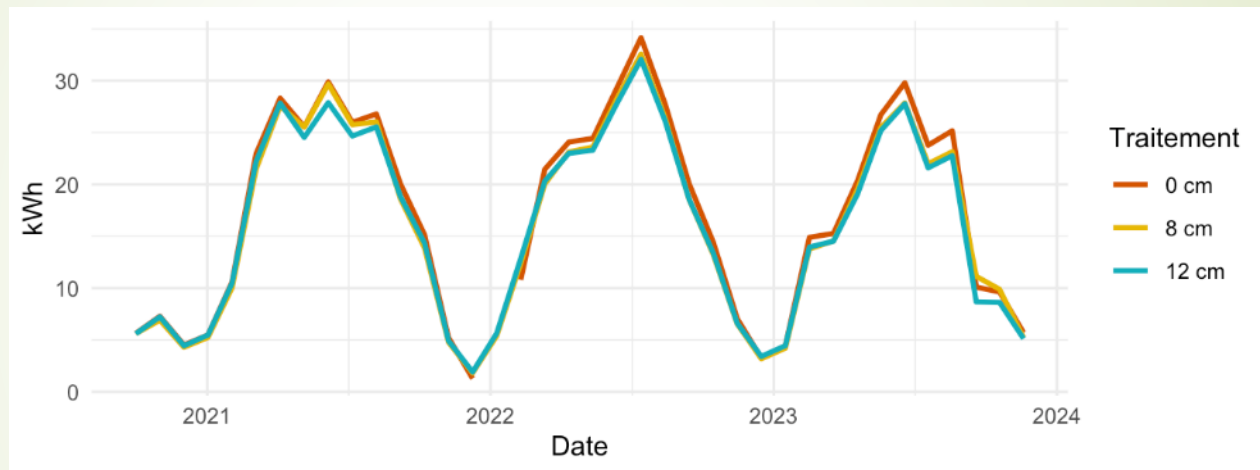
- Diminution de la température en période estivale uniquement
- Augmentation en période hivernale lié à un éclairage rasant
- La présence du substrat végétalisé amplifie ce contraste



Incidence du rayonnement solaire le 28 mars 2022

# Aspect production électrique

## Projet PLANETE site de Lullier

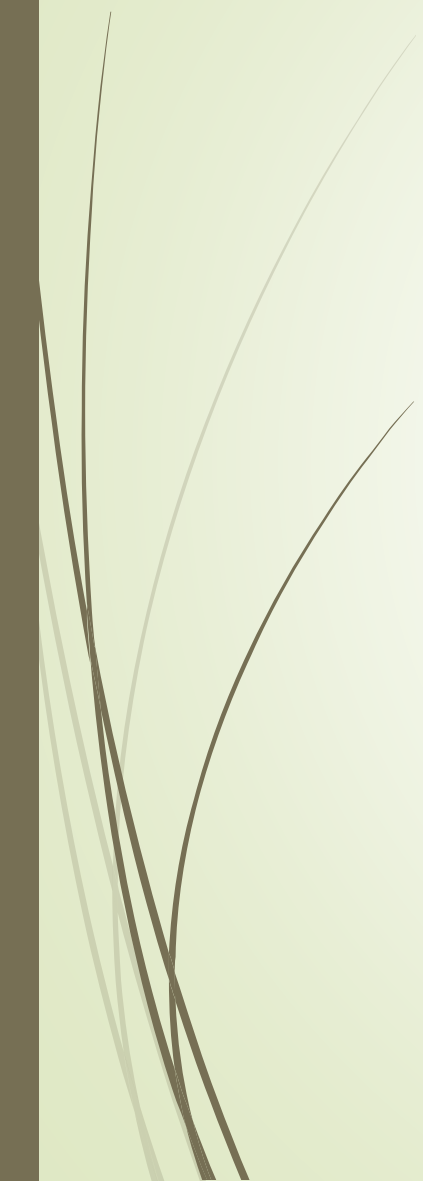


Productible modules solaires monopan bifaciaux

- **Effet de la végétation légèrement négatif** sur la production -2,4% (N = 3 ans)



# Conclusions - Monopan

- Couverture végétale assez favorisée (77 %), diversifiée (17 sp.)
  - Effet significatif de réduction de la température en période estivale ( $-1,5^{\circ}\text{C}$  sur béton brut à  $-9^{\circ}\text{C}$  pour un substrat de 12 cm) / situation de pleine lumière
  - Effet significatif de l'augmentation de la température en période automnale ( $+1^{\circ}\text{C}$  à  $+4^{\circ}\text{C}$  pour un substrat de 12 cm) / situation de pleine lumière -> facilitant la croissance végétale
  - Légère perte de production (-2,5 %)
  - Facilité d'entretien en raison de l'espacement entre les panneaux
- 



# **Panneaux surélevés en dômes inversés**

Ecole Champs-Joly à Plan-Les-Ouates  
(Projet PV-Plantes)





Février 2021

Facilité d'entretien



Végétation sous le  
panneau

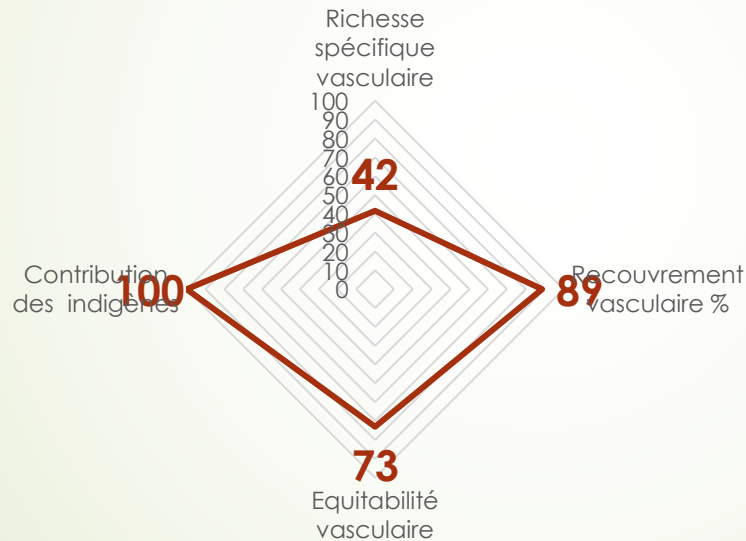
mai 2021

# Aspect végétalisation

44

- Espace pour la végétation
- Mélanges diversifiés (type prés secs, 45 sp)
- Epaisseurs de substrat moyennes (15-20 cm)

**Indice 76**



**Toiture Grand-Saconnex (dômes inversés)**

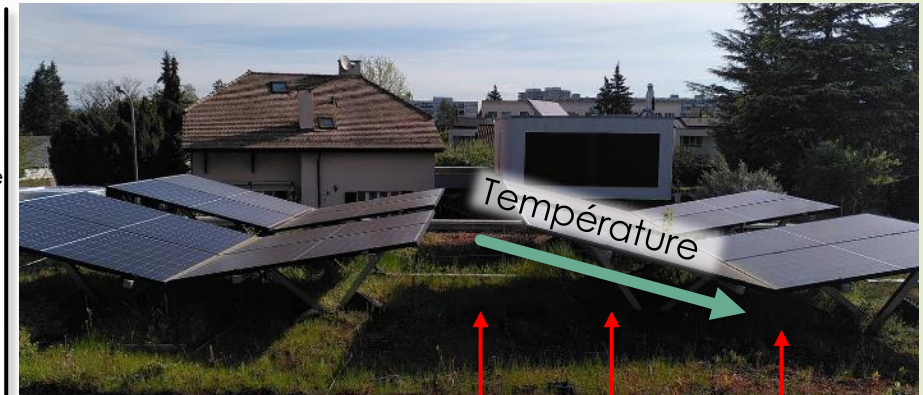
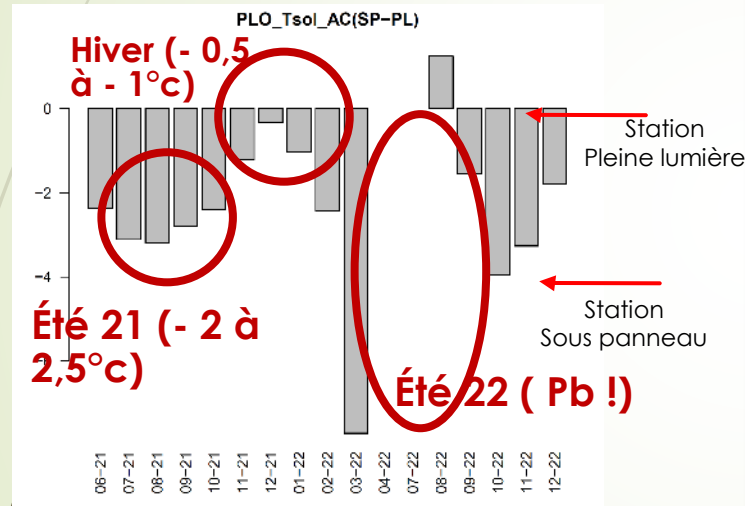


Dômes inversés  
Toiture végétation semi-intensive (14-20 cm)  
Substrat «sur mesure» organique

# Aspect thermique

## ► Projet PV Plantes Champs Joly – Dômes inversés

Ecart entre la température moyenne mensuelle au sol sous les panneaux (SP) et en pleine lumière. Tests de Wilcoxon significatifs.



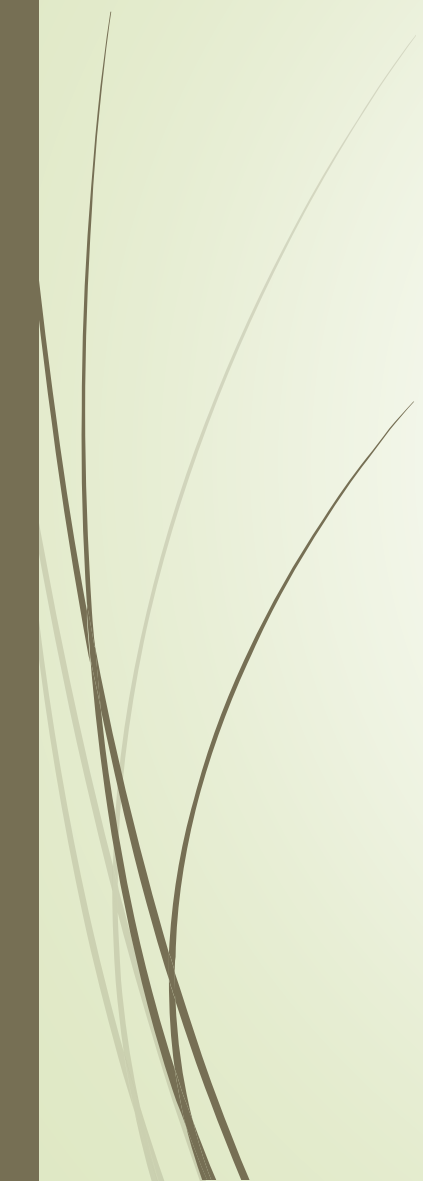
Station entre modules (EM)

entre panneau (EP)  
Pleine lumière (PL)

- Effet «atténuation thermique» par l'ombrage des panneaux
- Température Pleine Lumière > Entre modules > Sous-panneaux > Entre panneaux



## Conclusions – Dômes surélevés inversés

- Couverture végétale favorisée (90 %).
  - Effet significatif de réduction de la température en période estivale sous les panneaux – Forte ventilation (-2 à -2,5°C sur / situation de pleine lumière avec substrat).
  - Facilité d'entretien en raison de l'espacement entre les panneaux et de la hauteur des panneaux
- 



# **Panneaux verticaux (Projet PV-Plantes - Lullier)**



Octobre 2021 (n – semis en mars)



mai 2022 (n+1)



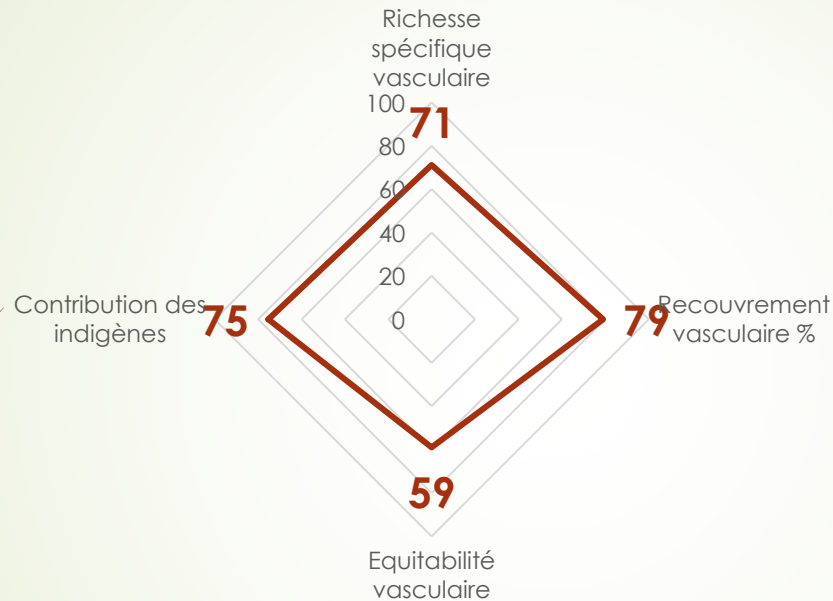
juin 2023 (n+2)



juin 2024 (n+3)

# Aspect végétalisation

Indice 71



- Espace pour la végétation
- Mélanges diversifiés (type prés secs, 45 sp)
- Epaisseurs de substrat élevées (20-35 cm)

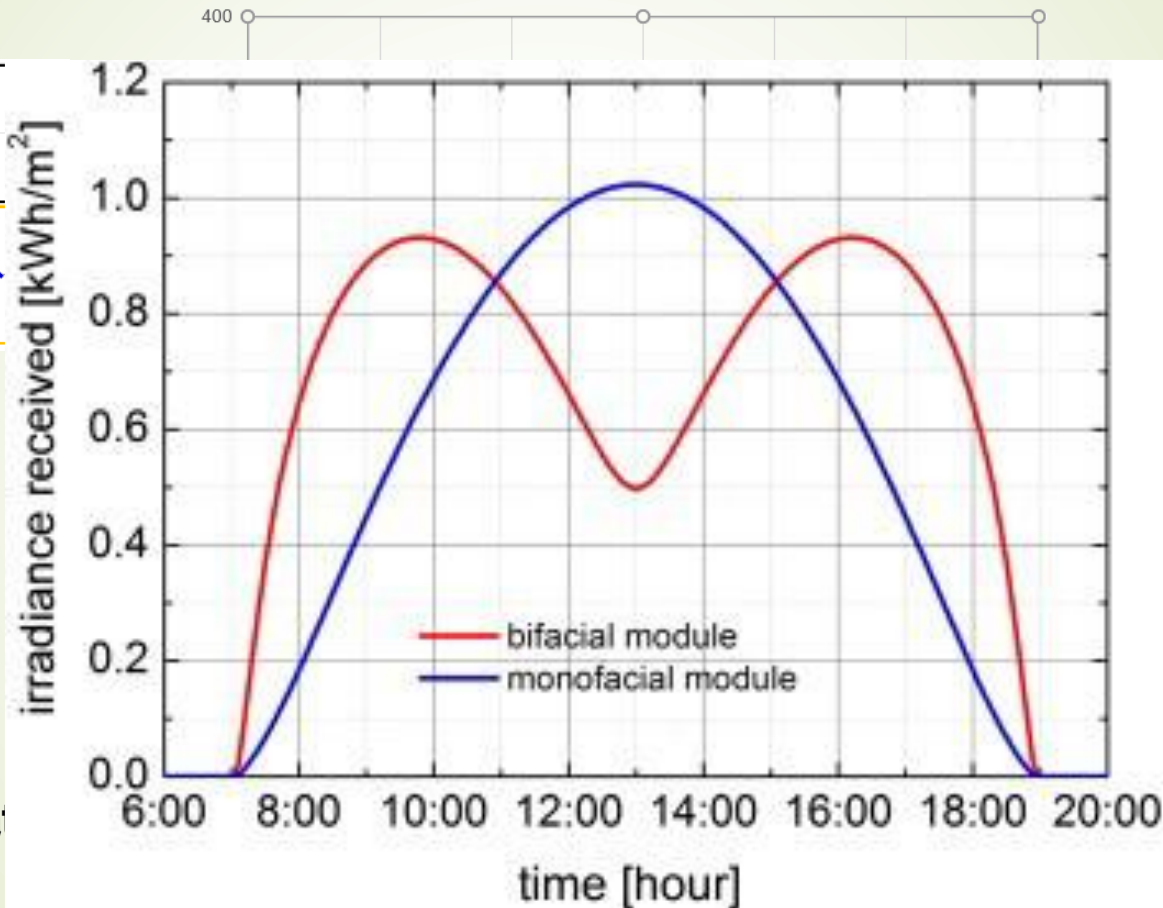
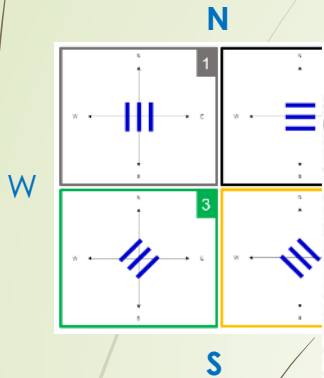
## 5. Lullier (panneaux verticaux)



Panneaux Verticaux  
Toiture végétation semi-intensive  
Substrat «sur mesure» organique

# Aspect production

## Simulations



Observa

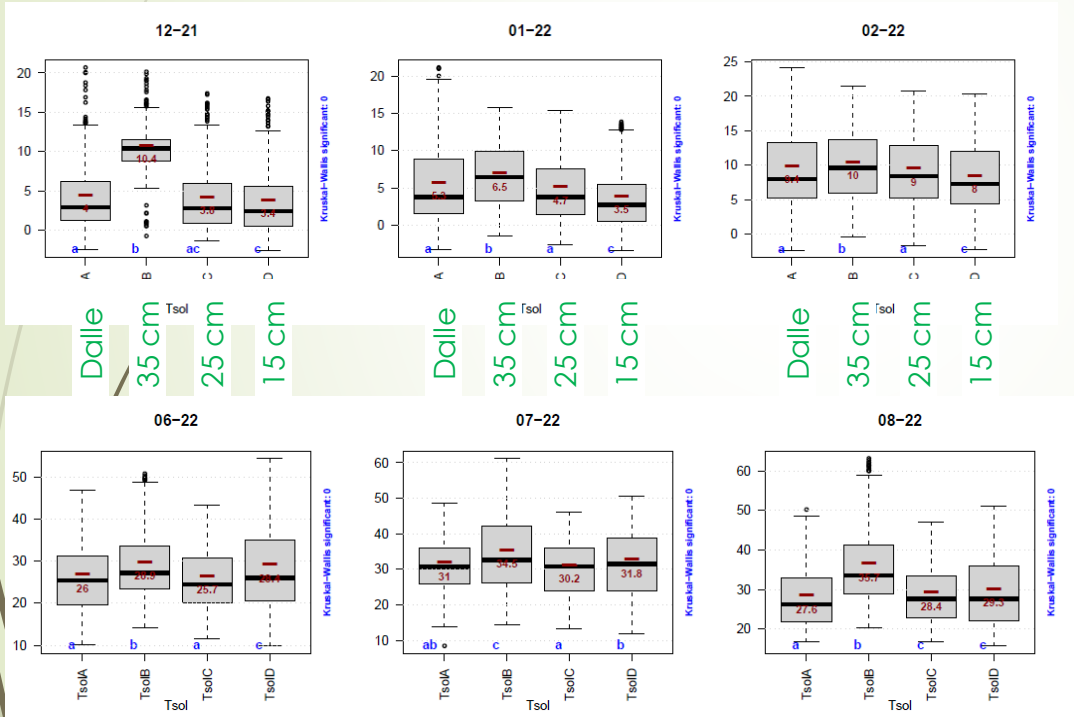
- Une orientation face au sud-est (3) permet la meilleure production par modules et par surface au sol !

# Aspect thermique

➤ PV Plante Lullier – Panneaux verticaux - Température à la surface du sol

La dalle (A) plus chaude en hiver, mais non en été. Effet d'ombrage ?

L'épaisseur n'a pas une incidence sur la température ; effet de compostage à 35 cm ?





# Conclusions générales

- De nombreuses possibilités
- Bien définir et s'entendre sur les objectifs
- Recherche d'équilibre entre les fonctions
- Importance de surélever et d'espacer les panneaux (atténuation des pics thermiques, biodiversité favorisée, facilité d'entretien)
- éviter la pose de dômes rasants (au sol)
- Mélanges diversifiés et substrats recyclés locaux (si possible > 15 cm)
- Planifier l'entretien