

Projet PLANETE

(PLANtes, Énergie & Température)



Rapport final

Genève, 27.11.2024



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

Auteurs : Julie Steffen¹, Charlène Heiniger¹, Fabienne Mörch¹, Julien Winkelmann², Patrice Prunier¹

¹Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève HEPIA

²Services Industriels de Genève SIG

Correspondante fonds vitale environnement : Estelle Lecomte

Correspondant fonds vitale innovation : Alexandre Bagnoud

Table des matières

1	Contexte	7
2	Objectifs et partenaires du projet	8
3	Description du plan expérimental	9
3.1	Présentation du site et de l'expérience	9
3.2	Description des alvéoles	10
3.3	Caractéristiques des centrales	11
3.3.1	Structure	11
3.3.2	Panneaux photovoltaïques	11
3.3.3	Plans de calepinage	11
3.3.4	Onduleurs et raccordement	17
3.3.5	Introduction, comptage et injection AC	17
3.3.6	Monitoring	17
4	Volet Végétation	18
4.1	Problématique – Volet végétation	18
4.2	Matériel & Méthode – Volet végétation	18
4.2.1	Paramètres testés	18
4.2.2	Indicateurs	18
4.2.3	Relevés quantitatifs et qualitatifs	18
4.2.4	Analyses statistiques	19
4.3	Résultats & discussion -- Volet végétation	19
4.3.1	Recouvrement vasculaire total	19
4.3.2	Contribution au recouvrement des espèces semées et expression du mélange	20
4.3.3	Richesse spécifique vasculaire	21
4.3.4	Recouvrement des bryophytes (mousses)	22
4.4	Synthèse & conclusions - Volet végétation	23
5	Volet Entomofaune	25
5.1	Problématique – Volet entomofaune	25
5.2	Matériel & Méthode - Volet entomologique	25
5.3	Résultats & discussion - Volet entomologique	26
5.4	Synthèse & conclusions - Volet entomologique	28
6	Volet Microclimat	28
6.1	Problématique	28
6.2	Matériel & Méthode - Volet microclimatique	28
6.2.1	Matériel et paramètres testés	28

6.2.2	Traitement de données	29
6.3	Résultats & discussion – Volet microclimatique	30
6.3.1	Les températures sous les dômes surélevés	30
6.3.2	Les températures sous les panneaux monopans	31
6.3.3	Comparaison entre les températures sous panneaux en dômes et monopans	33
6.3.4	Comparaison des températures sous panneaux et entre panneaux monopans sur substrat végétalisé de 8 cm d'épaisseur	34
6.4	Synthèse & conclusions – Volet microclimatique	36
7	Volet énergétique.....	38
7.1	Problématique	38
7.2	Matériel & Méthode – Volet énergétique	38
7.3	Résultats & discussion - Volet énergétique	39
7.3.1	Modules monocristallins orientation Est.....	39
7.3.2	Modules monocristallins orientation Ouest.....	39
7.3.3	Modules monocristallins orientation Sud	41
7.3.4	Modules bifaciaux orientation Est.....	41
7.3.5	Modules bifaciaux orientation Ouest	42
7.3.6	Modules bifaciaux orientation Sud.....	44
7.4	Synthèse & conclusions – Volet énergétique	44
8	Analyses complémentaires.....	46
8.1	Relation production énergie et recouvrement vasculaire	46
8.1.1	Méthode	46
8.1.2	Résultats pour les panneaux en dômes.....	46
8.1.3	Résultats monopans	47
8.1.4	Synthèse et conclusions.....	48
8.2	Effet du microclimat généré par les panneaux monopans sur la croissance végétale.....	49
9	Synthèse et conclusion générale.....	51
10	Bibliographie	54
11	Annexes	55
11.1	Annexe1 : Schéma des placettes	55
11.2	Annexe 2 : Schéma des transects de végétation	56

1 Contexte

Les objectifs de la stratégie énergétique 2050 suisse visent notamment à remplacer la production d'énergie nucléaire et les énergies fossiles en encourageant les énergies renouvelables (OFEN, 2017).

Actuellement, la part de l'énergie solaire dans le réseau électrique suisse demeure très faible. En 2018, elle correspondait à 3,38 % des besoins en électricité (OFEN, 2019). Pour permettre le déploiement du solaire photovoltaïque, l'efficacité de production doit pouvoir être augmentée, notamment sur les toitures qui, dans les villes, représentent jusqu'à un cinquième de la surface du territoire. À Genève, par exemple, il y a davantage de surfaces de toits plats que de surfaces de parcs publics (<https://ge.ch/sitg/>).

Il se trouvent que les toitures végétalisées font parties des aménagements encouragés par le Programme « nature en ville », fondé sur la Loi sur la biodiversité à Genève (Etat de Genève, 2013). Il est avéré que les toitures végétalisées peuvent constituer un refuge pour la biodiversité indigène : flore, mousses, insectes (Rochefort et al., 2016), et que la nature du substrat conditionne fortement la nature et le développement de cette biodiversité (Prunier & Steffen, 2018). Le choix d'espèces écologiquement les plus adaptées aux conditions locales est également un facteur clé de réussite du projet (Prunier et al., 2018). Enfin, la végétation possède des qualités pour réduire la pollution de l'air dans certains contextes (Litschke & Kuttler, 2008) et stocker de l'eau dans le substrat de l'écosystème constitué.

Si en terme d'occupation spatiale la végétalisation d'une toiture n'apparaît pas compatible avec le développement d'une centrale solaire, il semble cependant que, en respectant certaines dispositions techniques (choix des espèces végétales, positionnement des modules, albédo) l'efficacité des modules solaires pourrait, à minima ne pas être affectée voire améliorée, en limitant leur « surchauffe », qui réduit la production électrique (Baumann et Catalano, 2017, Krauter et Ochs, 2002). Selon les cas étudiés, la végétalisation permettrait une augmentation de l'efficacité des modules solaires de 0,1 à 10 % (Bracha Schindler, 2016 ; Kölher et al, 2007).

Ainsi, les toitures plates peuvent assurer quatre rôles très importants dans la transition écologique : accueillir des panneaux solaires photovoltaïques pour produire de l'électricité renouvelable, accueillir des communautés végétales de milieux arides pour favoriser la biodiversité, stocker de l'eau dans le substrat de ces écosystèmes urbains et atténuer les pics de chaleur estivaux. Néanmoins, la question des bénéfices et limites en terme énergétiques, biologiques et microclimatiques par type de toitures biosolaires se posent. Quelles sont les combinaisons bénéfiques pour chacun de ses enjeux ?

La quantification précise des plus-values biologiques, microclimatiques et énergétiques des différents types de toitures solaires végétalisées constitue donc l'objet de ce rapport. Elle a été investiguée pour obtenir des références expérimentales précises.

2 Objectifs et partenaires du projet

Au regard du contexte préalablement présenté, le projet PLANETE vise à évaluer sur les plans biologiques, microclimatiques et énergétiques différents types d'implantations de modules photovoltaïques en situation de toitures végétalisées afin d'identifier les limites et intérêts des combinaisons déployées.

Il comporte ainsi 3 approches disciplinaires visant à quantifier :

1) L'influence des différents types de modules solaires sur le développement de la biodiversité indigène, floristique (volet 1) et faunistique (volet 2) – approche biologique ;

2) l'influence combinée de la végétalisation et de la présence de modules solaires sur le microclimat local (volet 3) – approche climatique ;

3) l'influence de la végétalisation indigène sur l'efficacité de différents types de modules solaires (volet 4) – approche énergétique.

Le présent projet est co-porté par les Services Industriels de Genève (SIG) et la Haute Ecole du Paysage d'ingénierie et d'Architecture (HEPIA). Il a été développé dans le cadre d'échanges mutuels avec le soutien :

- du Fond Vitale Innovation, qui a pour mission de financer des projets de recherche, des études académiques, du développement de systèmes expérimentaux, de la construction d'installations prototypes dans le domaine des économies d'énergie (électricité et chaleur) et de la production de nouvelles énergies renouvelables (électricité et chaleur) (article 2.1 du règlement du fonds SIG) ;
- du Fond Vitale Environnement, qui a pour mission de mettre en œuvre des mesures d'améliorations écologiques dans le bassin versant du Rhône genevois ;
- de l'Institut Terre Nature Paysage d'HEPIA, dont un des axes de recherche vise à déployer la nature en ville, l'écologie urbaine et optimiser ses services.

3 Description du plan expérimental

3.1 Présentation du site et de l'expérience

Le projet s'est déroulé sur l'espace d'expérimentation des toitures végétalisées de Lullier situé au 150 route de Presinge, 1254 Jussy. L'axe principal du bâtiment concerné est orienté à 180° Nord / Sud (Figure 1).

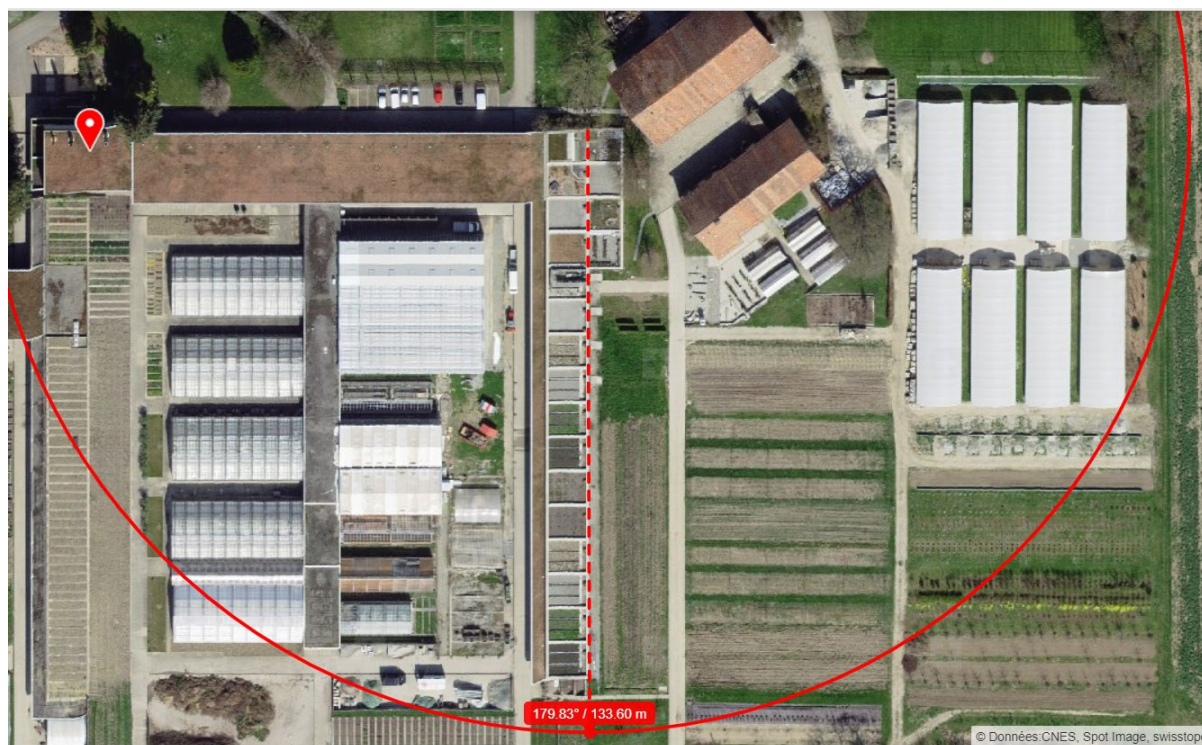


Figure 1 : Plan de situation du bâtiment

Au total, 84 panneaux solaires ont été installés sur quatre parcelles expérimentales, totalisant une surface de 134 m². Des modules solaires de différentes natures, ont été disposés selon deux modalités : en dômes surélevés et en ligne (monopans surélevés), sur un substrat à base d'argile expansée et de pouzzolane, d'épaisseur variable (0, 8, 12 cm), ensemencé en septembre 2020 avec un mélange de semences indigènes xérophiles reconnu pour sa spécificité (Annexe 1 : Schéma des placettes).

3.2 Description des alvéoles

La toiture d'accueil est composée de plusieurs alvéoles réservées à des expérimentations diverses menées par HEPIA (Figure 2).

La centrale est installée sur 4 alvéoles de dimension identiques : 7,75 m x 7 m.



Figure 2 : Photo d'une alvéole non équipée

Pour les besoins de l'expérience, ces alvéoles ont été exploitées de la manière suivante (Tableau 1) :

Tableau 1 : Informations Toitures

Toiture	Epaisseur de substrat	Revêtement
Alvéole 1	8cm – 12cm	Végétalisée
Alvéole 2	8cm – 12cm	Végétalisée
Alvéole 3	8cm – 12cm	Végétalisée
Alvéole 4	0cm – alvéole référence	Nue

3.3 Caractéristiques des centrales

3.3.1 Structure

Les structures utilisées sont de type K2 Flex, adaptées aux toitures végétalisées et offrant une inclinaison de 10° pour les modules PV, quel que soit l'orientation (Figure 3).



Figure 3 : Montage des structures PV

3.3.2 Panneaux photovoltaïques

Différents modèles de panneaux ont été utilisés dans le cadre de cette expérimentation pour permettre de tester une incidence éventuelle sur le type de module.

- 42 modules monocristallins 335Wc de la marque QCells (voir « Fiche technique module standard.pdf » en document annexé).
- 42 modules bifaciaux 310Wc de la marque Kioto Solar (voir « Fiche technique module bifacial semi-transparent.pdf » en document annexé).
- 3 modules Theia 106Wc de la marque Insolight (voir « Fiche technique module Insolight.pdf » en document annexé).

3.3.3 Plans de calepinage

Le plan de calepinage de la centrale est disponible en annexe (Annexe 1 : Schéma des placettes). Les modules sont installés selon 3 orientations conformément aux critères de test et une inclinaison unique à 10° :

- Implantation en dôme Est-Ouest ;
- Implantation sur pan incliné Sud.

3.3.3.1 Alvéole N°1

Dans l'alvéole numéro 1 ont été installés des modules dans une configuration en dômes surélevés orientés est-ouest. Au total, 12 modules standard et 12 modules bifaciaux ont été installés à une hauteur de 400 mm par rapport au substrat. Le Tableau 2 ci-dessous montre de manière synthétique leur répartition selon les différentes modalités de l'expérience, c'est-à-dire deux types de modules solaires (standard et bifaciaux) et deux épaisseurs de substrat (8 cm et 12 cm). La Figure 4 schématise le plan de l'expérience et la Figure 5 l'illustre par une photographie.

Tableau 2 : répartition des modules - Alvéole n°1

Type de Module	Orientation	Epaisseur substrat	Nbre de modules
Standard	Ouest +90°	80mm	3
		120mm	3
	Est -90°	80mm	3
		120mm	3
Bifacial	Ouest +90°	80mm	3
		120mm	3
	Est -90°	80mm	3
		120mm	3

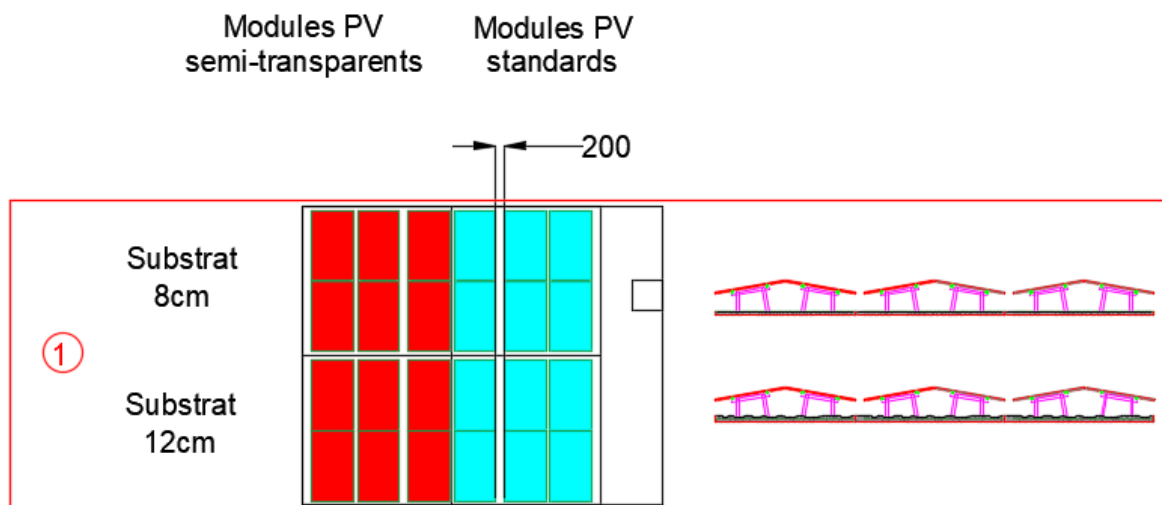


Figure 4 : calepinage et coupe de l'alvéole n°1



Figure 5 : Illustration des panneaux en dômes surélevés de l'alvéole n°1. © P. Prunier.

3.3.3.2 Alvéole N°2

Dans l'alvéole numéro 2 ont été installés des modules orientés vers le sud dans une configuration monopan. Au total, 6 modules standard, 8 modules bifaciaux et 2 modules Insolight ont été installés à une hauteur de 400 mm par rapport au substrat. Le tableau 3 ci-dessous montre de manière synthétique leur répartition selon les différentes modalités de l'expérience, c'est-à-dire trois types de modules solaires (standard, bifaciaux et Insolight) et deux épaisseurs de substrat (8 cm et 12 cm). La figure 6 schématise le plan de l'expérience et la figure 7 l'illustre par une photographie.

Tableau 3 : répartition des modules - Alvéole n°2

Type de Module	Orientation	Epaisseur substrat	Nbre de modules
Standard	Sud 0°	80mm	3
		120mm	3
Bifacial	Sud 0°	80mm	4
		120mm	4
Insolight	Sud 0°	80mm	1
		120mm	1

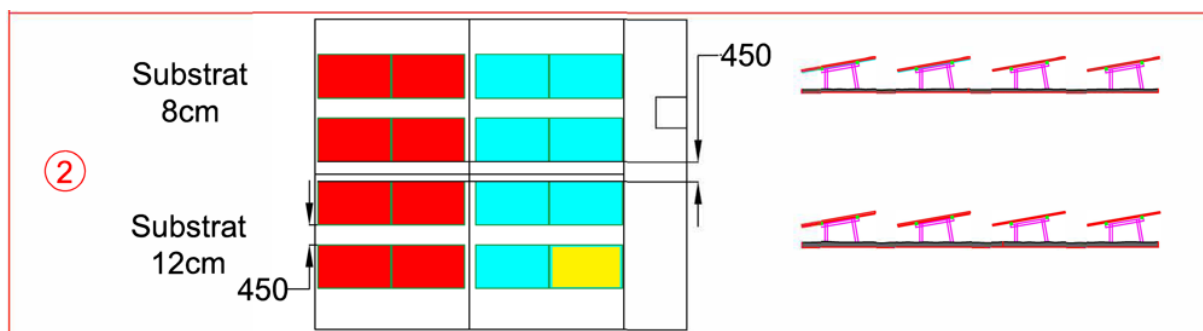


Figure 6 : calepinage et coupe de l'alvéole n°2



Figure 7 : Illustration des panneaux monopans surélevés de l'alvéole n°2. © P. Prunier.

3.3.3.3 Alvéole N°3

L'alvéole n°3 est identique à la n°1. Cependant les modules ont été installés une année plus tard. Le tableau 4 ci-dessous montre de manière synthétique leur répartition selon les différentes modalités de l'expérience. La figure 8 schématise le plan de l'expérience et la figure 9 l'illustre par une photographie.

Tableau 4 : répartition des modules - Alvéole n°3

Type de Module	Orientation	Epaisseur substrat	Nbre de modules
Standard	Ouest +90°	80mm	3
		120mm	3
	Est -90°	80mm	3
		120mm	3
Bifacial	Ouest +90°	80mm	3
		120mm	3
	Est -90°	80mm	3
		120mm	3

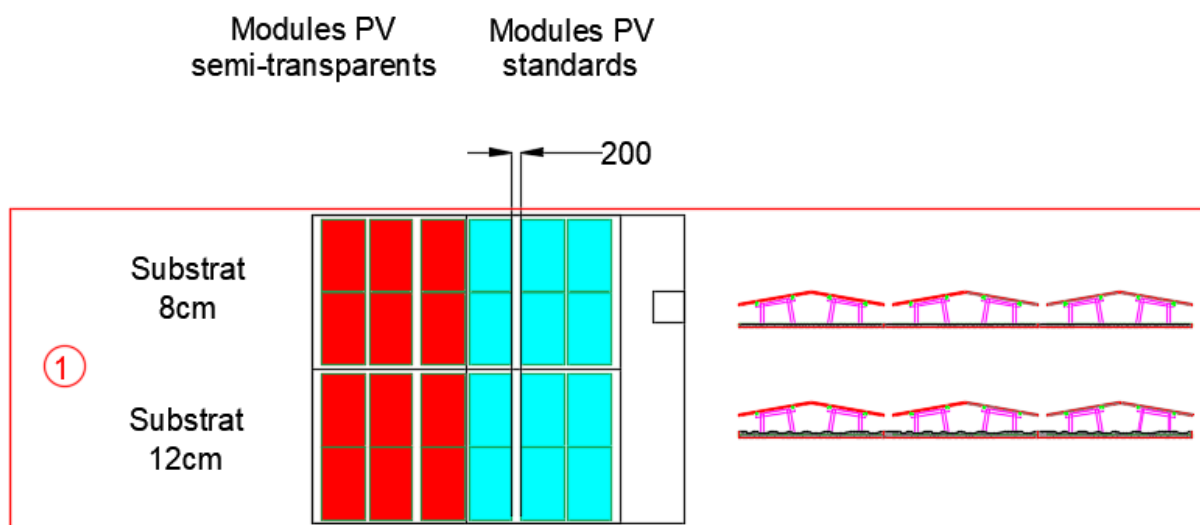


Figure 8 : calepinage et coupe de l'alvéole n°3



Figure 9 : Illustration des panneaux en dômes surélevés (posés à n+1) de l'alvéole n°3 © P. Prunier.

3.3.3.4 Alvéole N°4

L'alvéole n°4 servira d'étalon afin de disposer de données de base pour établir les comparaisons avec les 3 autres installations. Sur cette partie ont été installés à la fois des modules en dôme orientés est-ouest et à la fois en monopan orientés vers le sud, mais sans qu'il n'y ait de substrat donc directement sur le béton de la toiture. Le tableau 5 ci-dessous montre de manière synthétique la répartition des modules selon les différentes modalités de l'expérience. La figure 10 schématise le plan de l'expérience et la figure 11 l'illustre par une photographie.

Tableau 5 : Répartition des modules - Alvéole n°4

Type de Module	Orientation	Epaisseur substrat	Nbre de modules
Standard	Ouest +90°	0mm	2
	Est -90°		4
	Sud 0°		4
Bifacial	Ouest +90°	0mm	4
	Est -90°		2
	Sud 0°		3
Insolight	Sud 0°	0mm	1



Figure 10 : calepinage et coupe de l'alvéole n°4



Figure 11 : Illustration des parcelles « témoins » sans substrat ni végétation de l'alvéole n°4 © P. Prunier.

3.3.4 Onduleurs et raccordement

Chaque module est relié à un micro-onduleur Enphase (voir « Fiche technique onduleur.pdf » en document annexé). Les modules PV sont raccordés en string suivant le schéma de principe (voir « Schema de principe.pdf » en document annexé).

3.3.5 Introduction, comptage et injection AC

3.3.5.1 *Introduction et cheminement des câbles*

Les câbles AC cheminent depuis la toiture jusqu'au tableau électrique « jus de pomme » du local AF5 situé au niveau inférieur.

3.3.5.2 *Alimentation, comptage et injection*

L'injection et comptage de l'installation se situe sur le tableau électrique « jus de pomme ». Des travaux d'adaptation sur le tableau existant avaient permis la création et mise en place de 4 alimentations supplémentaires et équipements Enphase nécessaires à l'alimentation et bon fonctionnement de l'installation (voir « Schema de principe.pdf » en document annexé).

3.3.6 Monitoring

La centrale est gérée par un système de monitoring propre au fabricant des micro-onduleurs (system Envoy d'Enphase). Celui-ci permet l'analyse de la production de chaque module PV, consultable sur la plateforme du fabricant « Enlighten ».

4 Volet Végétation

Par Julie Steffen, Patrice Prunier, Fabienne Mörch, Lucas Villard, Alexandra Christin

4.1 Problématique – Volet végétation

Afin de répondre aux objectifs du projet, ce volet vise à répondre aux questions suivantes :

- Le recouvrement de la végétation vasculaire est-il plus élevé dans une configuration monopan ou dôme ? Y a-t-il une différence de recouvrement entre et sous les panneaux ? Et selon l'épaisseur du substrat ?
- Le nombre d'espèces est-il différent dans une configuration monopan ou dôme ? Y a-t-il une différence entre et sous les panneaux ?
- Quel est la part de la colonisation végétale spontanée dans ces différentes configurations ?
- Les mousses s'implantent-elles rapidement ?

4.2 Matériel & Méthode – Volet végétation

4.2.1 Paramètres testés

Les paramètres suivants ont été testés :

- Le positionnement des panneaux : en dôme surélevé, avec un espacement faible de 18 cm et une hauteur de 42 cm, et de type monopan surélevé, avec un espacement plus important de 50 cm et également une hauteur de 42 cm ;
- L'épaisseur de substrat : 8 et 12 cm ;
- La position de la végétation par rapport aux panneaux : entre les panneaux et sous les panneaux ;
- La période de semis : avant la mise en place des panneaux (semis différé) ou synchrone (semis non différé).

Le paramètre type de panneaux : semi-transparent *versus* transparent n'a pas été testé. Son influence sur la végétation étant considérée comme nulle suite à des observations préliminaires.

4.2.2 Indicateurs

Les indicateurs suivants ont été pris en compte pour l'analyse de données :

- les recouvrements vasculaire et muscinal ;
- la contribution au recouvrement des espèces semées ;
- la richesse spécifique ou nombre d'espèces ;
- le recouvrement des bryophytes (mousses).

4.2.3 Relevés quantitatifs et qualitatifs

Afin d'estimer le recouvrement des espèces vasculaires et de la strate muscinale, la méthode des points-quadrats a été employée (Daget & Poissonnet, 1971). Elle consiste à tendre une cheville le long d'un transect (Figure 12) et à noter la/les espèce(s) ou le substrat en contact avec une baïonnette sur des points équidistants (10 cm en général).

Les transects ont été répétés aux mêmes emplacements à chaque période de suivi. Des schémas ont ainsi été réalisés pour chacune des toitures afin de garantir la qualité des répliques (Annexe 2 : schéma des transects de végétation).

En complément, des relevés exhaustifs ont été effectués sur chacune des surfaces test afin d'estimer l'expression des mélanges par rapport au substrat et à son épaisseur. Un recouvrement de 0,5 % leur est arbitrairement attribué.

Ainsi, sur les trois cases expérimentales, pour chacun des modalités, deux transects de 66 points ont été réalisés au printemps et à l'automne durant les 3 ans de suivi (2021, 2022 et 2023).



Figure 12 : Chevillière tendue pour la méthode points-quadrat.

4.2.4 Analyses statistiques

Les relevés de végétations ont été analysés avec le logiciel R (R Core Team, 2023). Des tests statistiques Kruskal-Wallis ont été réalisés pour tester l'influence des paramètres en fonction des indicateurs sélectionnés.

4.3 Résultats & discussion -- Volet végétation

4.3.1 Recouvrement vasculaire total

En comparant les deux cases à semis non différé (Figure 13), le recouvrement vasculaire est légèrement plus élevé sur la case avec les panneaux en dôme (orientation Est-Ouest, médiane 82 %) que sur la case avec les panneaux monopans (orientation Nord-Sud, médiane 77 %). Cette différence n'est cependant pas significative ($P = 0.12$).

La position par rapport aux panneaux (entre panneaux *versus* sous panneaux) n'influence pas non plus le recouvrement de la végétation de manière significative ($P = 0.655$). Le recouvrement est néanmoins légèrement plus élevé entre les panneaux (médiane à 81 %) que sous les panneaux (médiane à 78 %).

Enfin, dans ce cas, aucune différence significative n'est observée par rapport au facteur épaisseur de substrat ($P = 0.28$). Le recouvrement est légèrement plus élevé à 12 cm (87 %), qu'à 8 cm (77 %).

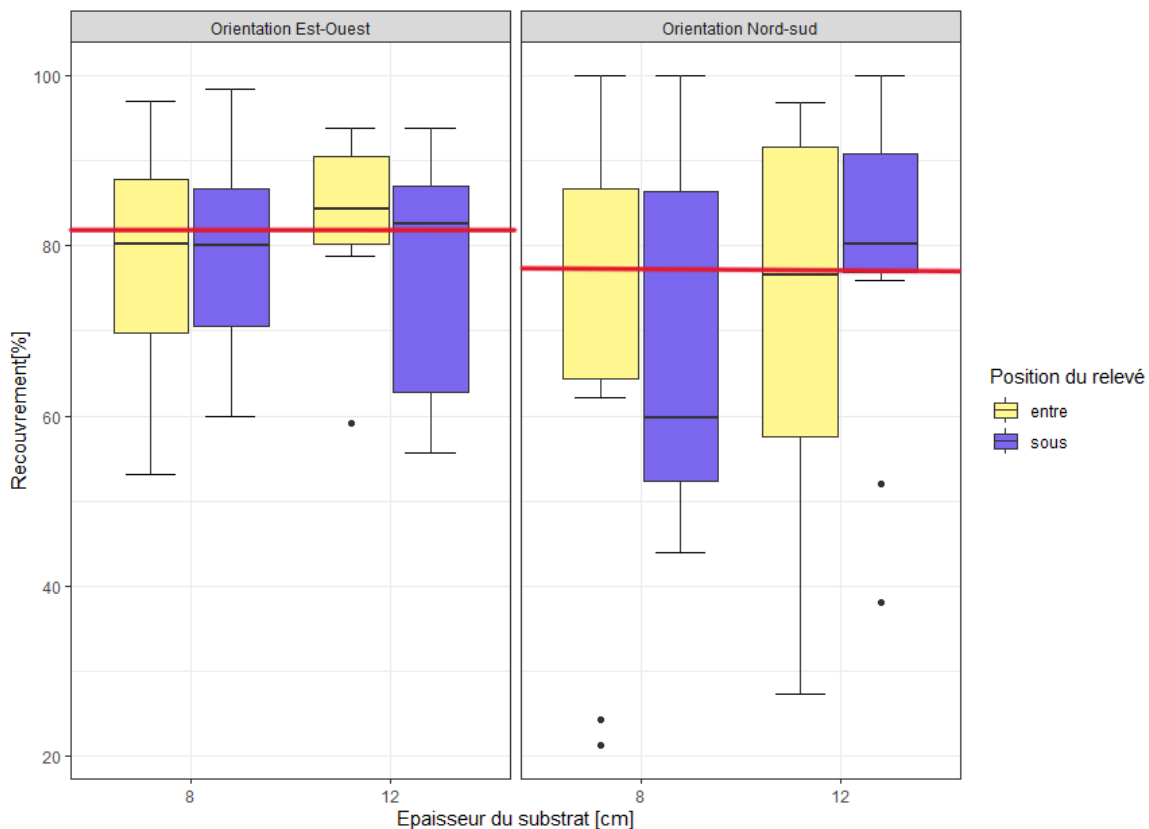


Figure 13: Recouvrement de la végétation sur les cases à panneaux en dôme (à gauche, orientation E-O) et sur les cases à panneaux monopans (à droite, orientation N-S).

4.3.2 Contribution au recouvrement des espèces semées et expression du mélange

Trois ans après le semis, 68 % des espèces du mélange se sont exprimées sur l'ensemble des cases ensemencées.

La contribution des espèces semées au recouvrement est significativement plus élevée sous les panneaux qu'entre les panneaux ($P = 0.001$), ce qui signifie qu'il y a davantage de colonisation spontanée entre les panneaux, en raison de la plus grande facilité de dépôt des graines, que sous les panneaux, où se sont surtout les espèces semées qui s'expriment. On observe en effet une médiane à 92 % en termes de contribution des espèces semées dans le relevé sous les panneaux solaires, contre 77 % entre les panneaux (Figure 14).

La pose différée de panneaux semble plus favorable aux espèces semées situées entre les panneaux, qu'à celles poussant sous les panneaux (Figure 14).

La biomasse des espèces semées est ainsi favorisée avec une configuration des panneaux en dôme (vs monopan) dans la mesure où leur densité d'implantation est plus importante.

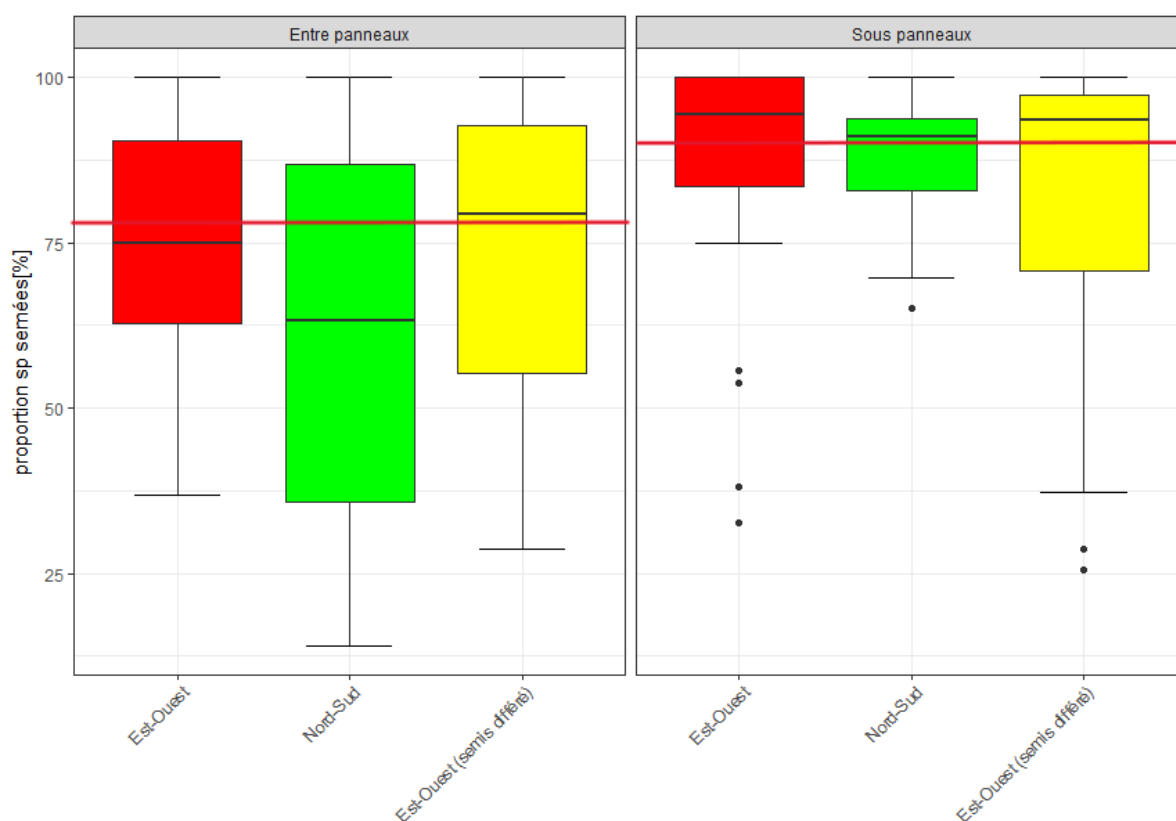


Figure 14 : Proportion d'espèces végétales semées entre les panneaux (à gauche) et sous les panneaux (à droite).

4.3.3 Richesse spécifique vasculaire

En comparant les deux cases à semis non différé (Figure 15), la richesse spécifique est significativement plus élevée ($P = 0.002$) sur la case avec les panneaux monopans (orientation N-S, médiane 17 sp) que sur la case avec les panneaux en dôme (orientation E-O médiane 12,5 sp).

Sur cet essai, il n'y a pas de différence significative du nombre d'espèces recensées ($P = 0.055$) selon la position par rapport aux panneaux (entre panneaux *versus* sous panneaux), néanmoins la richesse spécifique est légèrement plus élevée entre les panneaux (17 sp) que sous les panneaux (14 sp), quel que soit l'épaisseur du substrat pour les panneaux monopans.

Enfin, aucune différence significative n'est observée par rapport à l'épaisseur de substrat ($P = 0.59$).

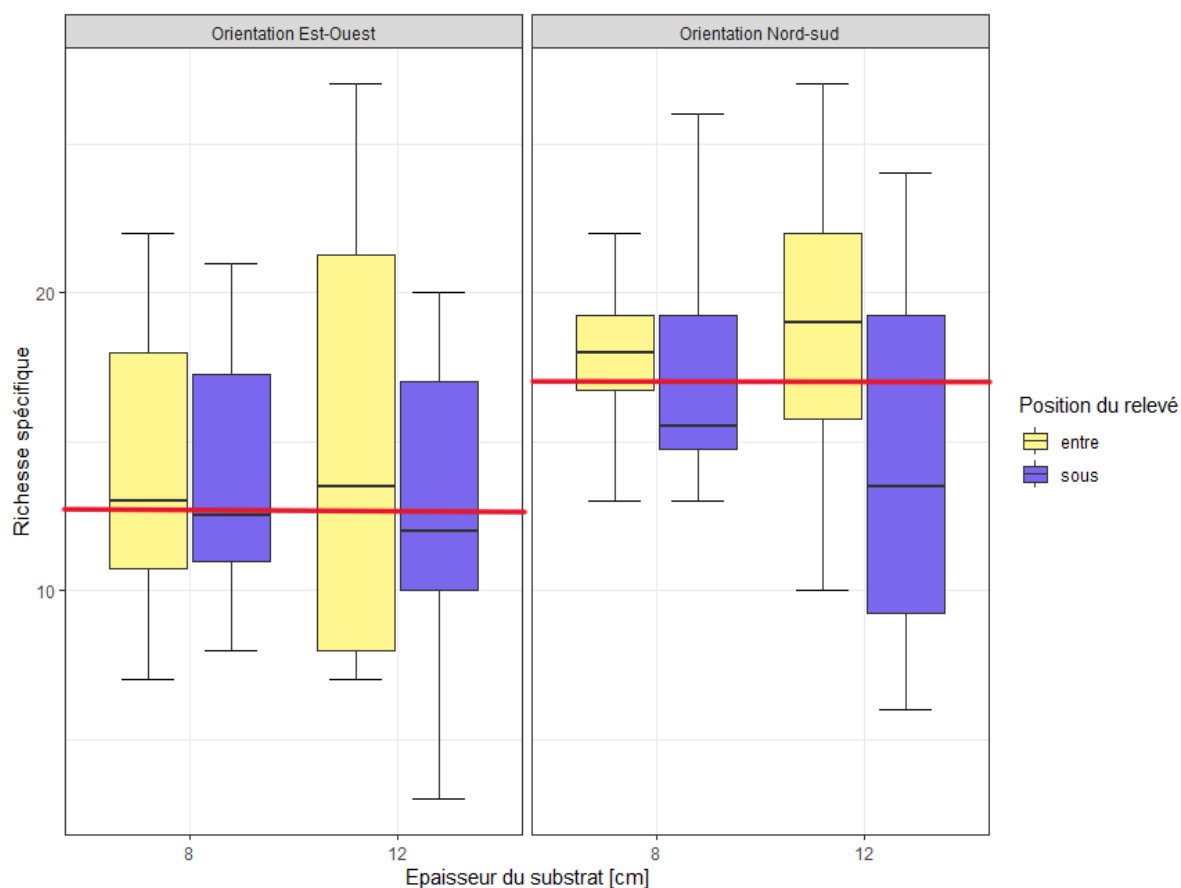


Figure 15 : Diversité spécifique de la végétation sur les cases à panneaux en dôme (à gauche, orientation E-O) et sur les cases à panneaux monopans (à droite, orientation N-S).

4.3.4 Recouvrement des bryophytes (mousses)

En mai 2022, soit 1,5 ans après installation du substrat, les premières bryophytes sont détectées sur la case à panneaux monopans orientés Nord/Sud (Figure 16). Un an plus tard, elles colonisent l'ensemble des cases. Si le recouvrement de la strate muscinale est globalement très faible, de l'ordre de 1-2 %, la case présentant le recouvrement le plus élevé est la case à panneaux monopans. Le recouvrement atteint sur cette dernière presque 4 % en septembre 2023. Avec des recouvrements aussi faibles, il n'est à ce stade pas possible de percevoir des différences significatives entre les cases.

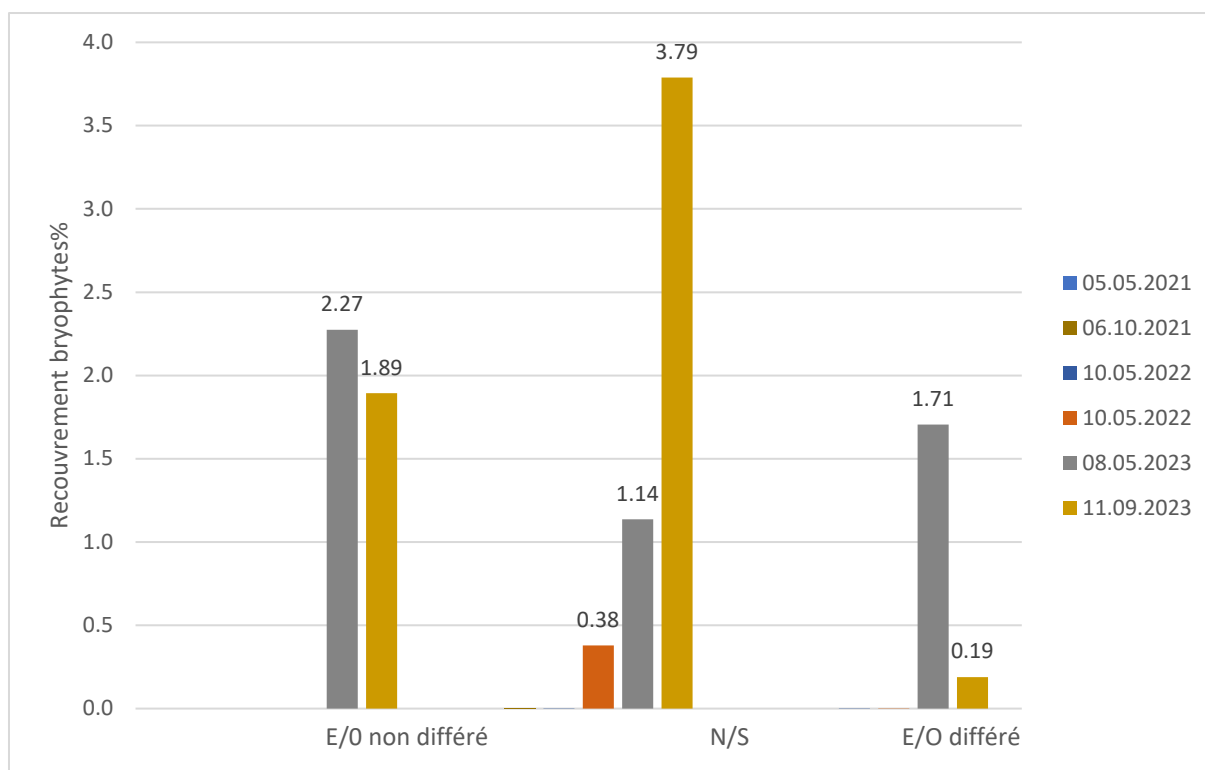


Figure 16 : Evolution du taux de recouvrement des bryophytes sur les trois cases d'expérimentation avec substrat.

4.4 Synthèse & conclusions - Volet végétation

En synthèse, nous répondrons succinctement aux questions posées.

Le recouvrement de la végétation vasculaire est-il plus élevé dans une configuration monopan ou dôme ? Y a-t-il une différence de recouvrement entre et sous les panneaux ? Et selon l'épaisseur du substrat ?

- Globalement, à l'échelle de la placette d'étude le recouvrement est un peu plus élevé dans une configuration en dôme que monopan. Ce constat peut être expliqué par les conditions globalement plus ombragées et moins extrêmes dans le premier cas.
- Néanmoins, les conditions microclimatiques sous les panneaux solaires ne sont dans l'ensemble pas favorables aux végétaux. Le recouvrement tend à baisser sous les panneaux solaires par rapport à une situation entre panneaux ou de pleine lumière. Par contre, les conditions mésophiles qu'offrent les situations en bordure des panneaux semblent être propices à certaines espèces vasculaires et aux bryophytes. Ceci n'a pas encore été testé.
- Enfin, le recouvrement tend à augmenter avec l'épaisseur de substrat. Si ce test n'est pas significatif, ceci a pu être démontré dans d'autres projets menés à HEPIA (Prunier et al., 2018).

Le nombre d'espèces est-il différent dans une configuration monopan ou dôme ? Y a-t-il une différence entre et sous les panneaux ?

- La richesse spécifique est significativement plus élevée dans une configuration monopan que dôme. Ce constat est expliqué par l'espacement des modules qui facilite l'accès aux graines, offre plus d'espaces et des conditions plus contrastées pour le développement des plantes.

Quelle est la part de la colonisation spontanée dans ces différentes configurations ?

- La contribution des espèces semées au recouvrement est significativement plus élevée sous les panneaux qu'entre les panneaux, ce qui signifie qu'il y a davantage de colonisation spontanée entre les panneaux (en raison de la facilité de dépôt des graines).
- Le semis différé ne présente pas d'effet significatif sur ce point.
- Globalement, deux tiers des espèces du mélange semé se sont exprimées. Il est donc pleinement adapté.

Les mousses s'implantent-elles rapidement ?

- Le recouvrement muscinal augmente avec le temps. Néanmoins, trois ans après la mise en place du substrat, les taux de recouvrement de bryophytes sont trop faibles pour évaluer l'influence de la position des panneaux sur la strate muscinale.

Enfin, à titre illustratif, les figures ci-dessous présentent un aspect annuel (essentiellement printanier) du développement de la végétation pour une configuration monopan (Figure 17) et en dômes surélevés (Figure 18). Si la première année a été marquée par un développement spectaculaire des coquelicots, c'est ensuite le trèfle champêtre qui s'est imposé dans le tapis végétal.



Figure 17 : Evolution de la végétation entre 2021 et 2024 en configuration de panneaux monopans exposés au sud.

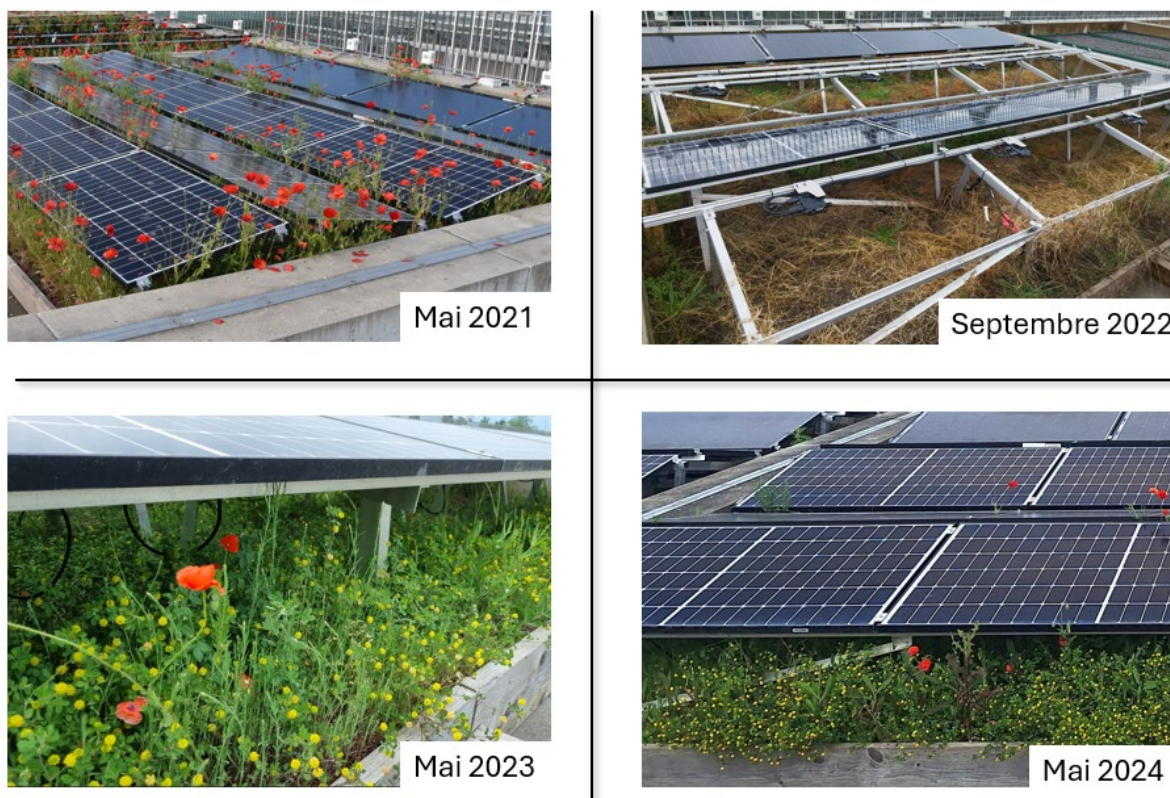


Figure 18 : Evolution de la végétation entre 2021 et 2024 en configuration de panneaux dômes surélevés exposés est-ouest.

5 Volet Entomofaune

Par Charlène Heiniger, Patrice Prunier

5.1 Problématique – Volet entomofaune

Ce volet vise à répondre aux questions suivantes :

- Les invertébrés notamment les collemboles (proies) se développent-ils rapidement et différemment selon la configuration de la toiture (dôme *versus* monopan) ?
- Les carabes (prédateurs) présents sont-ils liés à l'importance du stock de proies disponibles ?

5.2 Matériel & Méthode - Volet entomologique

Le suivi de l'entomofaune sur l'espace expérimental de Lullier a été effectué à l'aide de pièges Barber. Ces pièges non-sélectifs sont les plus efficaces pour capturer la faune dite « épigée », c'est-à-dire, qui se déplace à la surface du sol.

Trois sessions d'échantillonnage ont été effectuées (mai et juin 2021 et juin 2022). Pour chaque épaisseur de substrat (8 ou 12 cm) et disposition des panneaux (dôme ou monopan), un piège Barber a été disposé durant une semaine en 2021. Au vu du faible nombre de captures en 2021, nous avons décidé d'intensifier l'échantillonnage. C'est pourquoi, nous avons disposé trois pièges Barber par modalité durant une semaine en 2022. Au total, nous avons donc récolté 20 échantillons (1 piège x 2 dates x 4 modalités en 2021 (n=8) et 3 pièges x 1 date x 4 modalités en 2022 (n=12)).

Tous les groupes d'invertébrés ainsi piégés ont été répertoriés et dénombrés. La famille des Carabidés a fait l'objet d'identification de tous les spécimens au niveau de l'espèce. Le groupe des Collemboles a été choisi pour servir d'indicateur du stock de proies à disposition des prédateurs.

5.3 Résultats & discussion - Volet entomologique

Au total, seulement 7 individus de la famille des Carabidés ont été capturés durant les trois sessions d'échantillonnage et 5 espèces ont été identifiées. Un seul individu a été capturé durant les deux sessions d'échantillonnage en 2021. Cet individu appartient à l'espèce *Brachinus crepitans* (Figure 19). Il a été piégé en juin 2021 sous les panneaux en dôme avec 12 cm d'épaisseur de substrat.

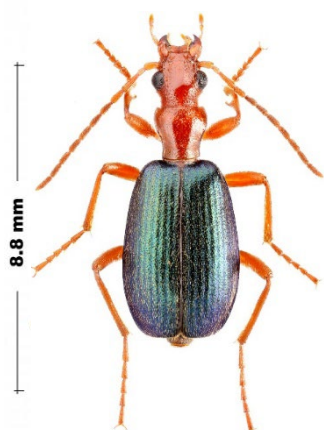


Figure 19: Illustration de l'unique espèce de Carabidé capturé en 2021 : *Brachinus crepitans*.

Six individus de la famille des Carabidés ont été capturés en 2022 et quatre espèces ont été identifiées : un individu de l'espèce *Bembidion latinum* a été capturée sous les panneaux monopans avec 8 cm d'épaisseur de substrat ; un individu de l'espèce *Tachyra parvula* a été capturée sous les panneaux monopans avec 12 cm d'épaisseur de substrat ; un individu de l'espèce *Harpalus affinis* a été capturée sous les panneaux en dôme avec 12 cm d'épaisseur de substrat et enfin, 3 individus de l'espèces *Microlestes minutulus* ont été capturés : respectivement un individu sous les panneaux en dôme avec une épaisseur de substrat de 12 et 8 cm et un individu sous les panneaux monopans avec une épaisseur de substrat de 8cm (Figure 20).



Figure 20: Illustrations des quatre espèces de Carabidé capturés en 2022. De gauche à droite : *Bembidion latinum*, *Tachyra parvula*, *Microlestes minutulus* et *Harpalus affinis*.

Concernant les stocks de proies, au total, nous avons récolté plus de 20'000 individus de la Classe des Collemboles, majoritairement en 2021 (Figure 21). En 2022, l'abondance des Collemboles présente des valeurs plus faibles, avec au total un peu moins d'une centaine d'individus récoltés sur l'ensemble des échantillons (n = 12).

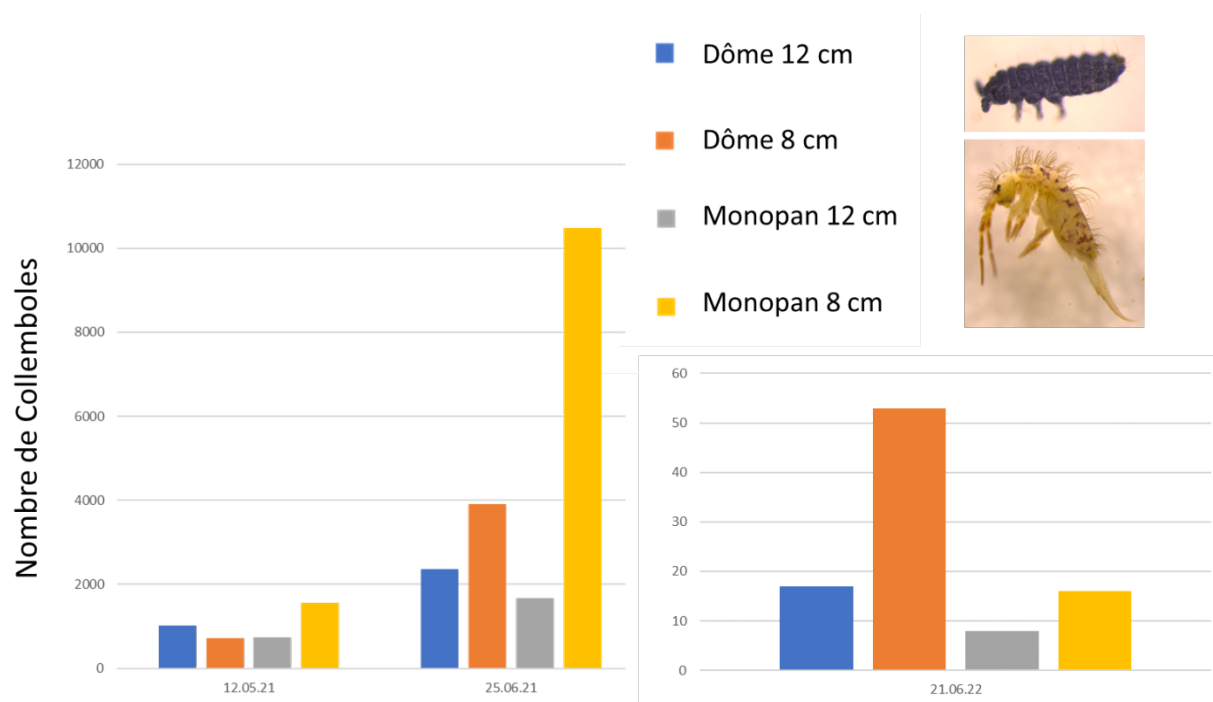


Figure 21 : Abondance totale des Collemboles pour les trois sessions d'échantillonnage, en fonction de la disposition des panneaux (dôme ou monopan) et de l'épaisseur du substrat (8 ou 12 cm).

Malgré un stock de proies important dès l'implantation des espaces expérimentaux, les prédateurs n'ont pas disposé de suffisamment de temps pour coloniser pleinement les espaces disponibles. Cet important stock de proies à la mise en place des parcelles est probablement dû à un environnement favorable lors du stockage du substrat, ainsi qu'à une pluviométrie favorable en 2021. Le rapide déclin des populations de Collemboles dès la deuxième année, probablement lié à une sécheresse estivale marquée, montre que les conditions environnementales (humidité et température) fluctuantes en toitures ne permettent pas de maintenir un haut niveau d'abondance des populations. L'abondance des Carabes est globalement faible. Il est donc délicat de tirer des conclusions quant à l'influence de nos paramètres sur la diversité et l'abondance des macroinvertébrés épigés. La période de suivi après l'installation des toitures expérimentales est trop courte pour pouvoir tirer des conclusions sur la préférence des carabes pour l'épaisseur de substrat ou la disposition des panneaux photovoltaïque. Cependant, nous constatons que les premières espèces pionnières ont tout de même réussi à coloniser les parcelles. Le stock de proies étant important dès la première année de suivi, il apparaît donc que le facteur limitant la présence de ce groupe d'espèces prédatrices est bien le manque de temps utile à la dispersion de ces espèces et pas la ressource trophique.

5.4 Synthèse & conclusions - Volet entomologique

- La quantité importante de collemboles dès la première année est probablement dû aux conditions de température et d'humidité favorables lors du stockage des matériaux et de la première saison.
- Les Carabes ayant besoin de deux éléments essentiels pour s'établir : 1) des proies et 2) du temps, le stock de proies important dès l'installation des parcelles montre que le facteur limitant pour l'établissement des populations de Carabes est bien le temps.
- La période entre l'installation des parcelles et les suivis entomologiques est trop courte pour parvenir à tirer des conclusions quant à la préférence des Carabes pour l'épaisseur de substrat ou la disposition des panneaux photovoltaïque.

6 Volet Microclimat

Par Fabienne Mörch, Patrice Prunier, Jane O'Rourke, David Hartlieb

6.1 Problématique

L'objectif de ce volet est de détecter les éventuelles différences de températures à une échelle microclimatique selon les modalités testées afin de répondre aux questions suivantes :

- L'ombrage apporté par des panneaux solaires permet-il de diminuer significativement la température par rapport à une situation de pleine lumière ?
- La présence d'un substrat végétalisé diminue-t-elle la température par rapport à une situation de revêtement en béton brut ?
- Existe-t-il une différence de microclimat sous des panneaux configurés en dômes surélevés à orientation est-ouest et des panneaux configurés en monopans à orientation vers le sud ?
- La température est-elle différente entre une situation d'ombrage sous les panneaux monopans et une situation de pénombre entre ces mêmes panneaux ?

6.2 Matériel & Méthode - Volet microclimatique

6.2.1 Matériel et paramètres testés

Les paramètres suivants ont été testés par des stations météo HOB0 de la société ONSET : température sur le sol, température à 10 cm du sol sous abris, humidité relative, point de rosée, radiation solaire, rayonnement photosynthétiquement actif, teneur en eau du sol, vent et rafale de vent. Des enregistreurs alimentés par des panneaux solaires ont mesuré chacun de ces paramètres toutes les 30 minutes à partir du mois de janvier 2021 jusqu'à la fin de l'année 2023.

En janvier 2021, ces stations ont été disposées sur 17 points de mesures selon les modalités suivantes (voir plan expérimental - Figure 22 à gauche) :

- sous les différents types de panneaux (panneaux standards, panneaux semi-transparents (équivalent à « bifaciaux »)) ;
- pour les différentes orientations de panneaux (dômes et monopans) ;
- pour chaque type de revêtement de sol (substrat d'épaisseur 8 cm, substrat d'épaisseur 12 cm, partie sans substrat « BETON ») ;
- un témoin « pleine lumière (LU) » indépendant de l'influence des panneaux a été installé sur une dalle à proximité pour comparaison.

Les premières observations floristiques ayant montré des différences de comportement de la végétation sous (situation d'ombre) et entre les panneaux monopans (situation de pénombre), il a été décidé de modifier le plan expérimental initial en décembre 2022 pour comparer le microclimat de ces deux positions (SP pour « sous panneaux » et EP pour « entre panneaux » - Figure 22 à droite). Les mesures pour cette configuration ont été effectuées entre décembre 2022 et octobre 2023.

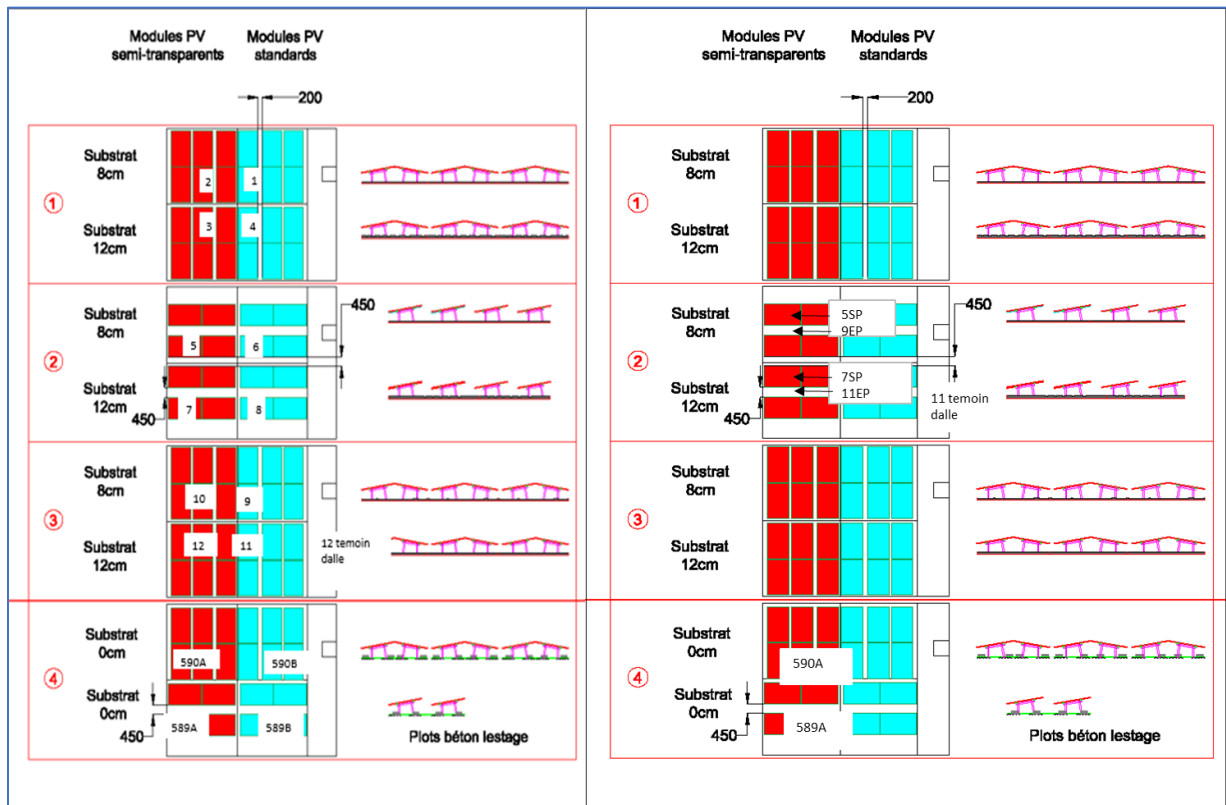


Figure 22 : A gauche, positionnement des stations de mesures pour comparer le microclimat sous les différents types de panneaux et pour les différents revêtements de sol. A droite, deuxième phase de test pour comparer le microclimat sous les panneaux monopans (SP) avec une situation de pénombre entre les panneaux monopans (EP).

6.2.2 Traitement de données

Parmi les paramètres mesurés, c'est la température sur le sol qui a été choisie pour l'analyse. Le rayonnement solaire a été pris en compte afin d'appuyer les différences de températures observées.

Une fois rapatriées, les données ont été vérifiées et les valeurs aberrantes ont été soustraites. Les valeurs mesurées la nuit ont également été retranchées, afin de correspondre à l'horaire auquel la production d'électricité est active.

L'analyse a ensuite été réalisée avec le logiciel R. Les données ont été regroupées par mois et des tests de comparaison (Kruskal Wallis et Dunn) ont permis de mettre en évidence les différences significatives.

6.3 Résultats & discussion – Volet microclimatique

6.3.1 Les températures sous les dômes surélevés

La Figure 23 ci-dessous montre le regroupement mensuel des mesures de température sous les dômes entre février 2021 et janvier 2022. Des problèmes techniques sur nos sondes nous ont malheureusement contraint à ne pas utiliser les données mesurées entre février et décembre 2022.

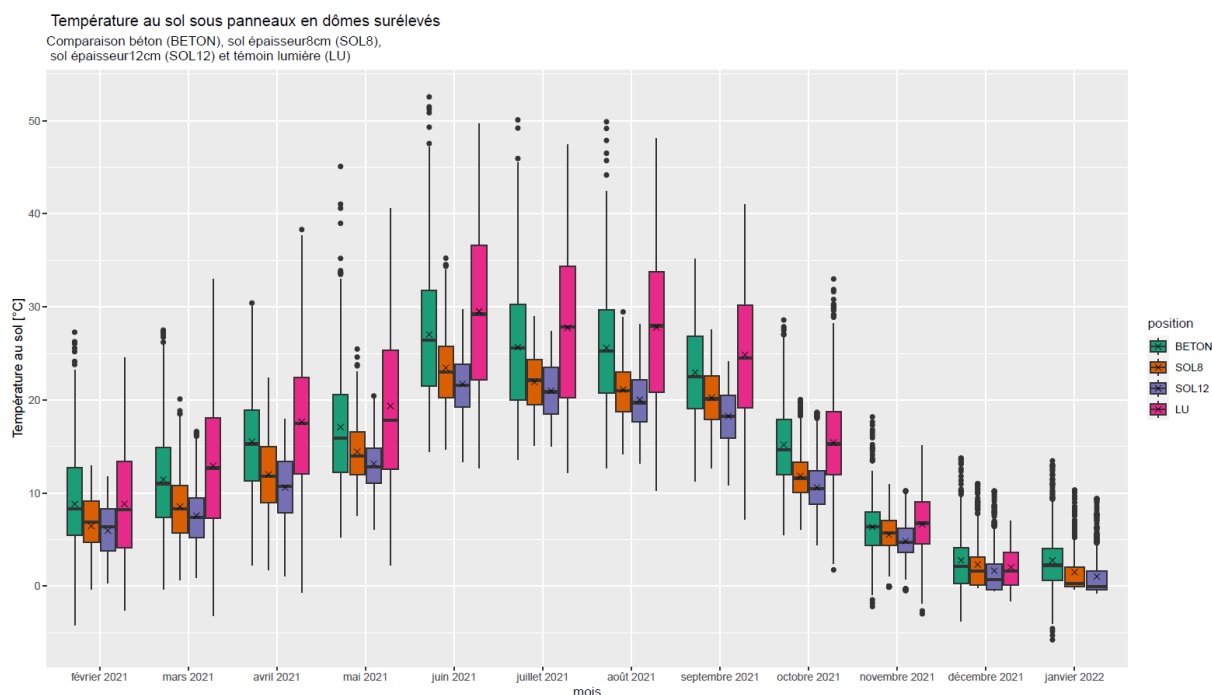


Figure 23 : Regroupement mensuel des mesures de température effectuées sous les panneaux en dômes surélevés sur les épaisseurs de substrat 8 cm (SOL8) et 12 cm (SOL12), sur la partie sans substrat (BETON) et pour le témoin indépendant des panneaux solaires (LU).

L'ombre procurée par les panneaux en dômes surélevés apporte une diminution significative de la température sur le sol, et ceci pour toute l'année (Figure 24).

La comparaison entre le témoin indépendant des panneaux (LU) et la partie sans végétation (BETON) montre une diminution significative de la température par effet d'ombrage des panneaux pour les mois de mars à octobre 2021, avec un écart pouvant varier de 0,3°C (octobre 2021) jusqu'à 2,5 °C (juin 2021).

La comparaison entre la partie « BETON » et le substrat de 8 cm d'épaisseur montre des écarts de température significatifs presque toute l'année (exception en décembre 2021) s'étalant de 0,8°C (novembre 2021) à 4,5°C (août 2021). Ceci indique que la présence d'un substrat végétalisé diminue la température par rapport à une installation sans substrat, notamment en période estivale.

L'atténuation de ces pics thermiques est encore plus prononcée entre la partie « BETON » et le substrat de 12 cm d'épaisseur avec des valeurs significatives toute l'année, s'étalant de 1,1°C (décembre 2021) à 5,8°C (août 2021) ; ce qui indique que l'épaisseur du substrat a un rôle dans l'abaissement de la température.

Ce dernier point est confirmé par la comparaison de la température au sol entre un substrat de 12 cm d'épaisseur et un substrat de 8 cm d'épaisseur, avec des différences significatives pour toute l'année s'étalant de 0,5°C (février 2021 et 2022) à 2°C (septembre 2021).

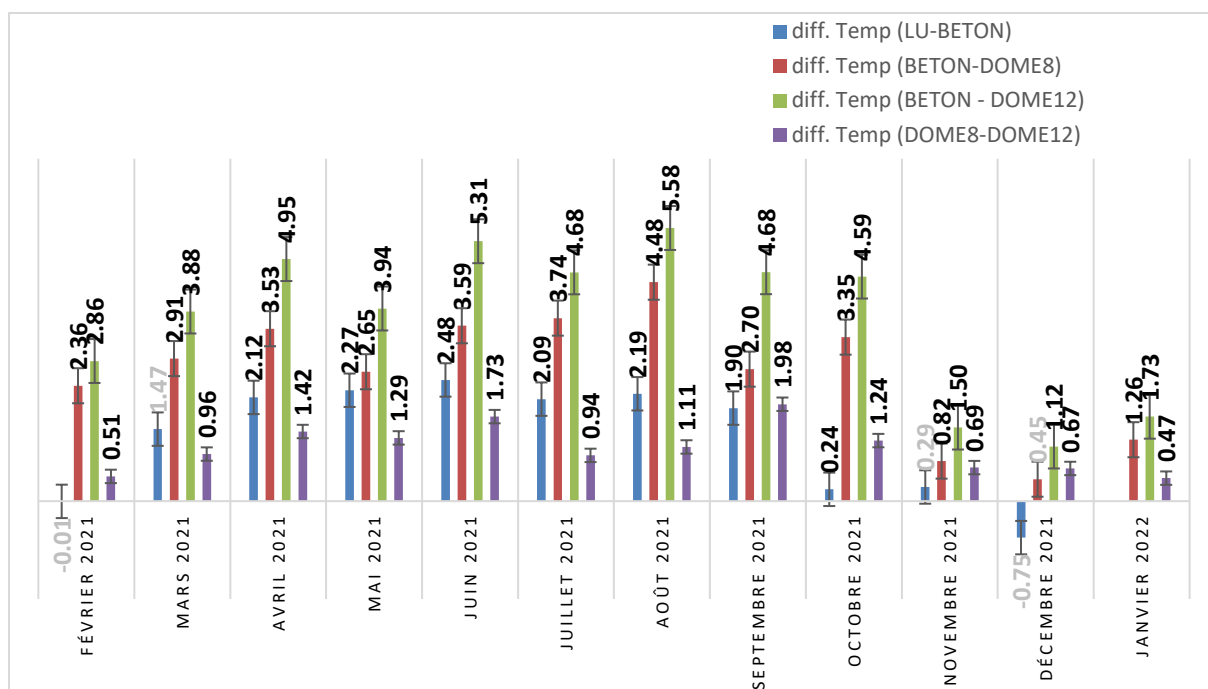


Figure 24 : Différence de températures entre les quatre modalités pour les panneaux en dômes surélevés : témoin indépendant des panneaux solaire « LU », la partie sans substrat « BETON », la partie avec le substrat de 8 cm d'épaisseur « DOME8 » et la partie avec le substrat de 12 cm d'épaisseur (DOME12). Les différences de température en écriture noire sont significatives et en écriture grise non significatives.

6.3.2 Les températures sous les panneaux monopans

La Figure 25 ci-dessous montre le regroupement mensuel des mesures de température sous les panneaux monopans entre février 2021 et janvier 2022. Comme pour les dômes, des problèmes techniques sur les sondes nous ont malheureusement contraint à ne pas utiliser les données mesurées entre février et décembre 2022.

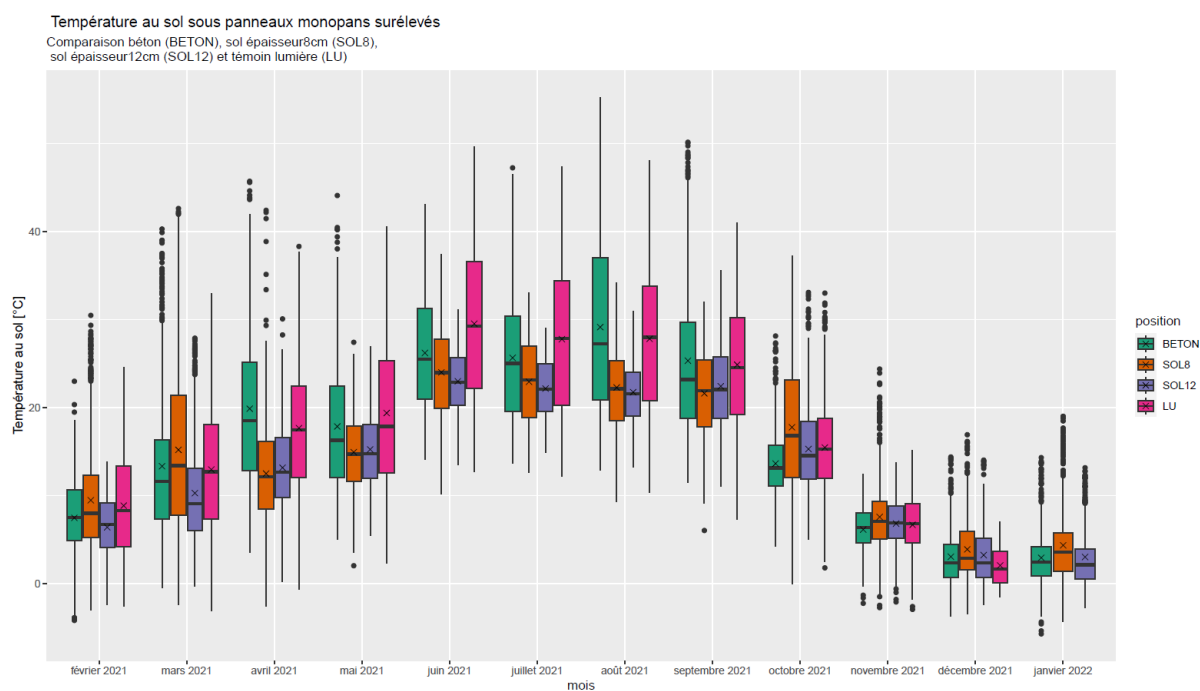


Figure 25 : Regroupement mensuel des mesures de température effectuées sous les panneaux monopans sur les épaisseurs de substrat 8 cm (SOL8) et 12 cm (SOL12), sur la partie sans substrat (BETON) et pour le témoin indépendant des panneaux solaires (LU).

La différence de température sous les panneaux monopans est plus contrastée selon les périodes de l'année que pour les dômes (Figure 26). En effet, les mêmes tendances d'atténuation des pics thermiques sont observées que pour les dômes, mais uniquement pour le printemps et l'été. Une inversion de cette tendance est constatée en automne et en hiver.

L'effet de « rafraîchissement » procuré par l'ombrage des panneaux est mesuré par la comparaison des températures entre le témoin « pleine lumière » LU et la partie de panneaux monopans montés sur béton. Il est avéré, mais uniquement pour les mois de mai (- 1,5°C), juin (- 3,3°C), juillet (-2,1°C) et octobre 2021 (- 1,8°C). On observe une inversion de cette tendance pour les mois de mars, avril, août, septembre et décembre 2021, avec une température plus élevée sous les panneaux monopans montés sur béton, que par rapport au témoin en « pleine lumière » LU (tendance significative uniquement pour avril 2021 avec + 2,2°C).

Deuxièmement, l'effet rafraîchissant d'un substrat végétalisé de 8 cm d'épaisseur en regard d'une situation de béton brut se vérifie également l'été (d'avril à septembre 2021) avec une différence de température atteignant - 7,4°C en avril sur le substrat végétalisé, mais non le reste de l'année où la situation s'inverse avec une différence allant jusqu'à + 4,1°C (octobre 2021). On observe la même tendance pour un substrat de 12 cm d'épaisseur avec une température de 7,4°C moins élevée sur le substrat que sur le béton en août 2021, et une température de 1,7°C plus élevée en octobre 2021.

La comparaison de la température entre les deux épaisseurs de substrat, quant à elle, ne montre aucune différence significative entre avril et septembre 2021. C'est plutôt en février, mars, octobre novembre, décembre 2021 et janvier 2022 (donc en période hivernale) que l'épaisseur de 12 cm a une température plus basse, allant d'un écart de 4,9°C en mars 2021 jusqu'à 0,7°C en décembre 2021.

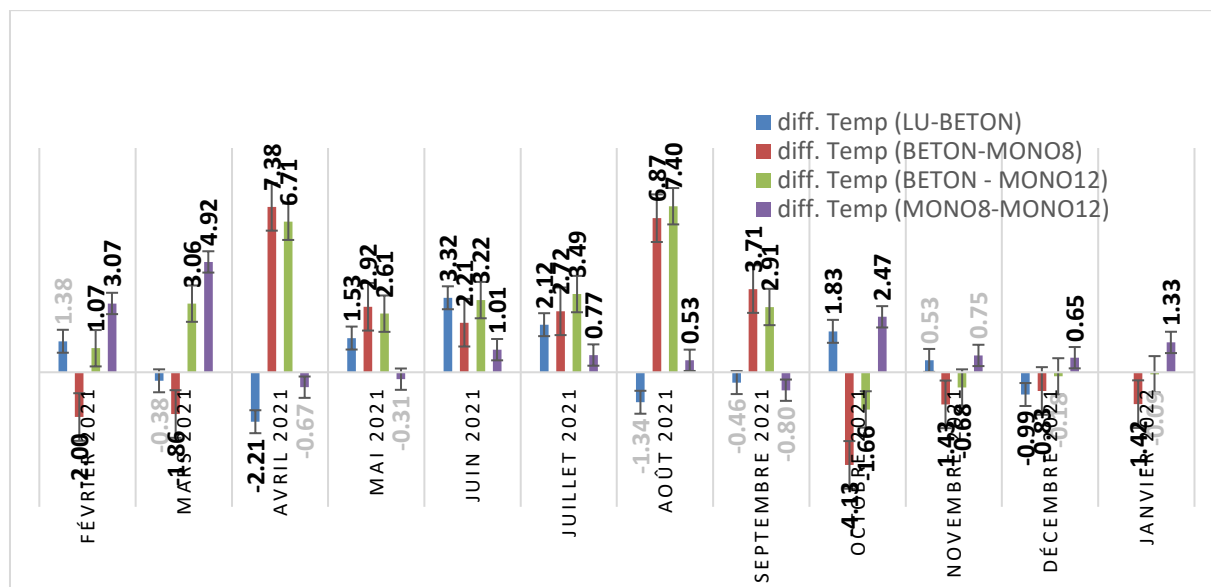


Figure 26 : Différence de températures entre les quatre modalités pour les panneaux monopans : témoin indépendant des panneaux solaires « LU », la partie sans substrat « BETON », la partie avec le substrat de 8 cm d'épaisseur « MONO8 » et la partie avec le substrat de 12 cm d'épaisseur (MONO12). Les différences de températures en écriture noire sont significatives et en écriture grise non significatives.

Nous avons présumé que cet effet de saisonnalité était lié à la variation d'intensité lumineuse au sol. En effet, les modules monopans sont plus espacés entre eux que les modules en dômes, ce qui permet au rayonnement solaire d'atteindre le sol sous les panneaux en jours courts. Par ailleurs, les panneaux monopans étant orientés au sud, ils sont ensoleillés sur une plus longue période journalière que les

dômes orientés est-ouest. Cette hypothèse a été confirmée par l'analyse de l'intensité du rayonnement solaire qui montre une différence d'insolation significative entre les situations de dômes et de monopans, et cela pour les différents revêtements de sol (Figure 27).

Les panneaux monopans, plus espacés entre eux, permettent donc une diminution de la température par effet d'ombrage l'été, lorsque le soleil est au zénith. En revanche, l'effet combiné de l'orientation des panneaux au sud et de l'espacement entre les modules laisse passer une part plus importante de rayonnement solaire sous les panneaux lorsque le soleil est bas à l'horizon, ce qui a pour effet de réchauffer le sol sous les panneaux en période hivernale. Il y a donc un effet contrasté selon la période de l'année.

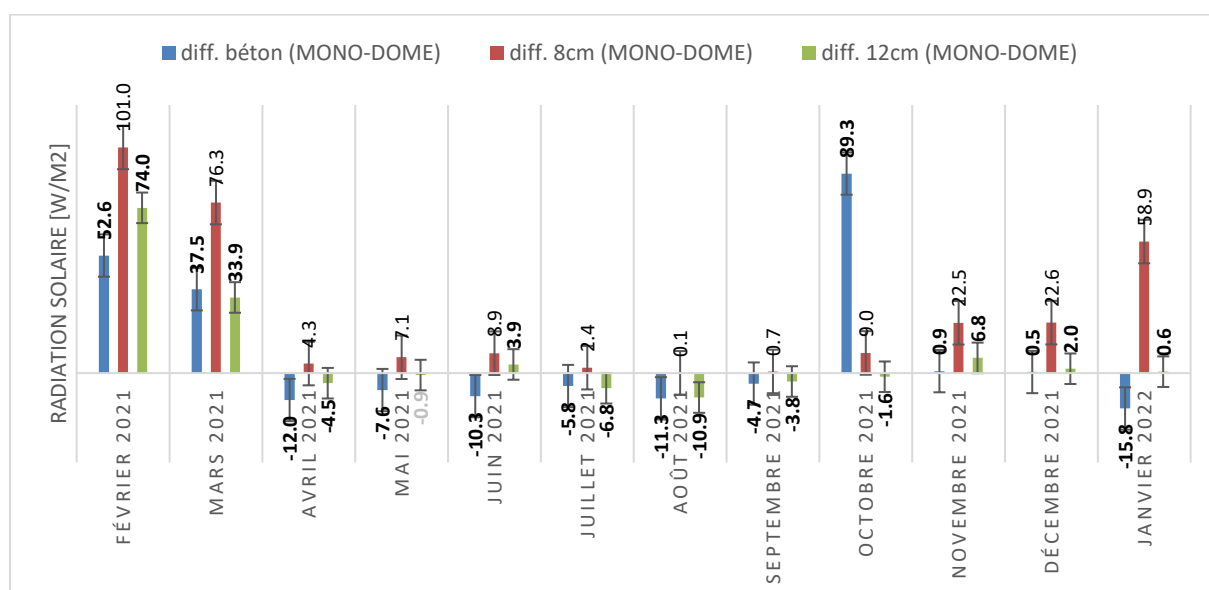


Figure 27 : Différences d'intensités de la radiation solaire sous les panneaux monopans et dômes selon de type de revêtement au sol. Les différences en écriture noire sont significatives et en écriture grise non significatives.

6.3.3 Comparaison entre les températures sous panneaux en dômes et monopans

La comparaison des températures sous les panneaux monopans et sous les dômes montre que les températures sont plus élevées sous les panneaux monopans (Figure 28). Ce constat est valable pour les deux épaisseurs de substrat toute l'année avec des différences significatives de températures (Figure 29). Les différences de température varient entre + 0,5 et + 6,6°C pour un substrat de 8 cm d'épaisseur, et entre + 0,4 et + 4,7°C, pour une épaisseur de 12 cm. Cette différence provient de l'ensoleillement plus important sous les panneaux monopans (cf. Figure 27 ci-dessus).

Sur la Figure 29, on observe également que les différences de températures sont plus marquées en périodes hivernale et automnale qu'en période estivale, ce qui confirme l'hypothèse de l'influence de l'insolation incidente qui atteint et réchauffe le substrat sous les panneaux monopans, qui « retiennent » la chaleur. Cependant, la température sous les panneaux monopans demeure tout même plus élevée lors de la période estivale avec une différence significativement plus élevée de 0,5 à 2°C.

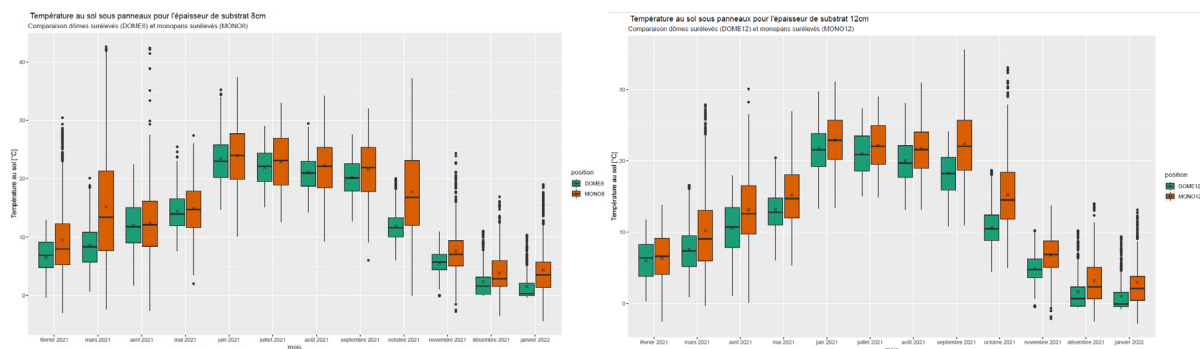


Figure 28 : Comparaison des températures sous les panneaux en dômes (couleur verte) et sous les panneaux monopans (couleur orange) pour une épaisseur de substrat de 8 cm (à gauche) et de 12 cm (à droite).

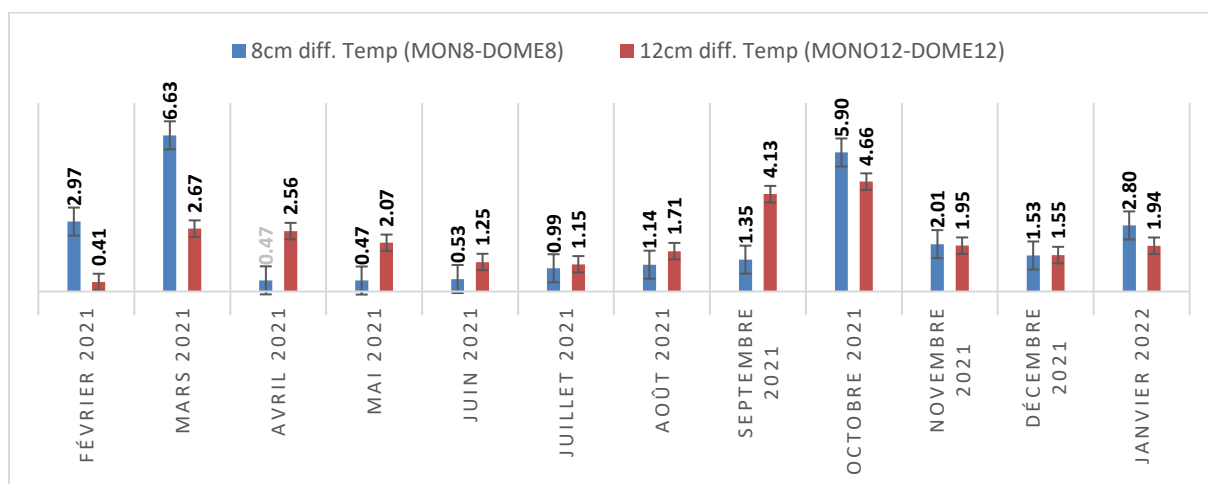


Figure 29 : Différences de températures sous panneaux dômes et monopans pour le béton brut et les deux épaisseurs de substrat. Les différences en noir sont significatives et en gris non significatives.

6.3.4 Comparaison des températures sous panneaux et entre panneaux monopans sur substrat végétalisé de 8 cm d'épaisseur

La comparaison des températures sous (SP) et entre les panneaux (EP) monopans repose sur des mesures effectuées entre janvier et octobre 2023 (Figure 30). Un problème technique survenu en début d'année sur les sondes positionnées sur le substrat de 12 cm ne nous permet pas d'analyser les données pour cette épaisseur.

L'analyse des données indiquent le même phénomène de saisonnalité observé précédemment avec l'effet d'ombrage du panneau qui diminue significativement la température sous les panneaux (SP) monopans lors des mois de mai (- 6,2°C) et de juillet (- 4,7°C), par rapport à la situation entre panneaux (EP). A l'inverse, on observe des températures plus élevées sous les panneaux pour les autres mois (+ 0,4°C en janvier et + 9,3°C en moyenne en septembre) par rapport à la situation de mi-ombre entre les modules (Figure 31). Lors de cette période, le rayonnement incident réchauffe le sol sous les panneaux et la chaleur ainsi dégagée n'est pas diffusée dans l'atmosphère, mais retenue par les panneaux. Il y a ainsi une modification de microclimat pour la végétation : un ombrage en période chaude et un échauffement en période hivernale, avec une diminution de périodes de gel. Ce double « bénéfice » pour la végétation a pu être observé et mesuré en avril 2021 par une différence de développement très importante des coquelicots sous les panneaux et entre les panneaux lors de la première saison de végétation (voir paragraphe 8.2). Il serait pertinent de tester ce double effet avec d'autres expériences, afin d'identifier si l'effet de retenue de chaleur peut évoluer selon la distance d'espacement entre les modules.

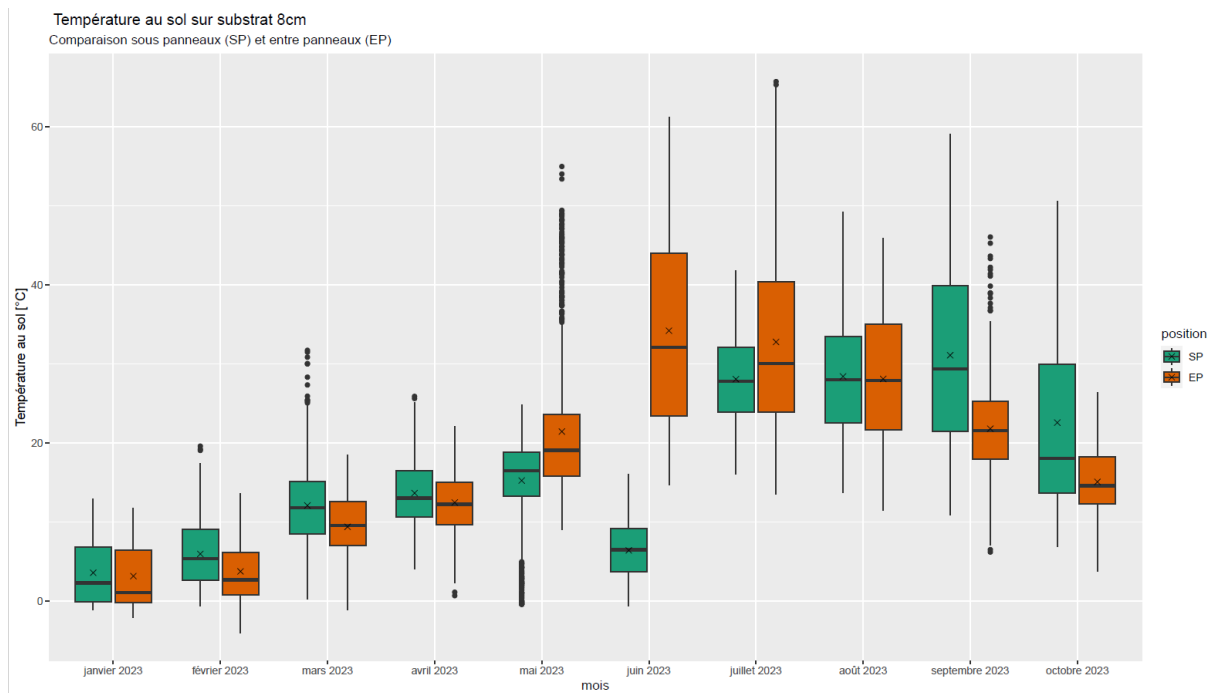


Figure 30 : Comparaison des températures sous panneaux (couleur verte) et entre panneaux (couleur orange) sur un substrat de 8 cm d'épaisseur

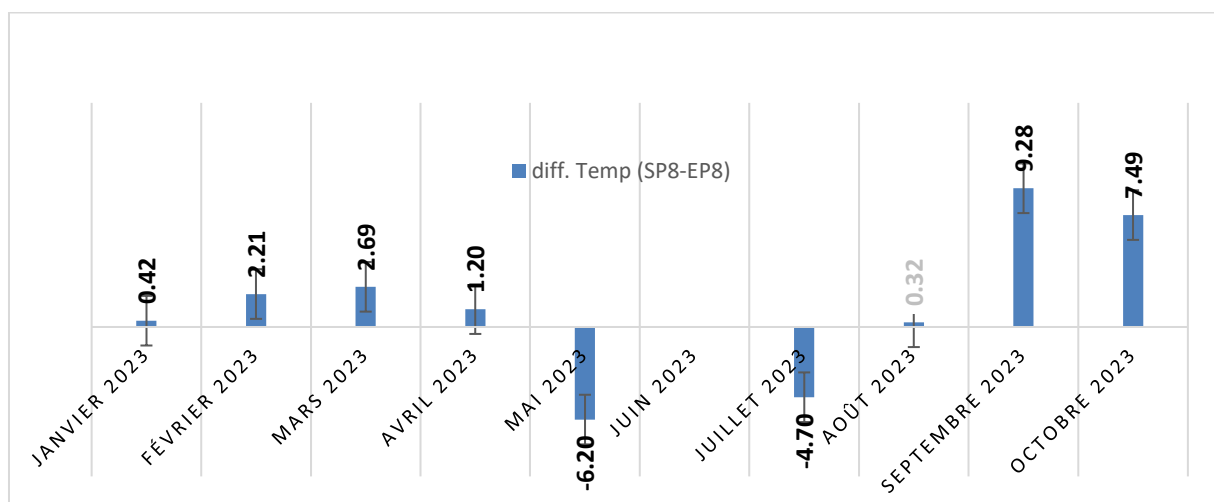


Figure 31: Différence de températures entre les positions « sous panneaux » (SP) et « entre panneaux » (EP) pour les panneaux monopans sur un substrat de 8 cm d'épaisseur. Les différences en noir sont significatives et en gris non significatives

6.4 Synthèse & conclusions – Volet microclimatique

Il est ainsi possible de répondre aux questions initialement posées.

L'ombrage apporté par des panneaux solaires permet-il de diminuer significativement la température par rapport à une situation de pleine lumière ? La présence d'un substrat végétalisé diminue-t-elle la température par rapport à une situation de revêtement brut en béton ?

Pour les panneaux en dômes surélevés orientés est-ouest, dont les modules sont très peu espacés (18 cm), la température est plus élevée sur le témoin en pleine lumière et décroît ensuite selon le gradient suivant : secteur sans substrat (béton), substrat de 8 cm d'épaisseur et enfin substrat de 12 cm d'épaisseur où la température est la moins élevée. Trois enseignements peuvent être tirés de ces résultats :

- Les panneaux en dômes permettent une diminution de la température par effet d'ombrage (soit entre le témoin en « pleine lumière » et la partie ombragée des dômes sur béton brut).
- La présence d'un substrat végétalisé permet d'abaisser la température par rapport à une situation de béton brut sous des dômes, soit à ombrage équivalent.
- Une épaisseur de substrat plus importante, soit de 12 cm, permet encore d'atténuer les pics thermiques par rapport à une épaisseur de 8 cm.

Pour les panneaux monopans plus espacés entre eux (50 cm) et orientés vers les sud, l'effet de l'ombrage diffère selon la période de l'année par rapport à l'angle d'incidence du rayonnement solaire. En effet, l'orientation et l'espacement des panneaux joue ici un rôle primordial car la configuration permet ou non, selon la saison, au rayonnement solaire d'atteindre et de réchauffer le substrat sous les panneaux. Les panneaux permettent ensuite de retenir le rayonnement thermique émis du sol réchauffé vers l'atmosphère, gardant ainsi la chaleur.

Nos observations, en période estivale avec un soleil au zénith, sont donc les suivantes :

- Les panneaux monopans permettent une diminution de la température par effet d'ombrage (comparaison entre le témoin « pleine lumière » (LU) et la partie des panneaux monopans montés sur béton brut (sans substrat)).
- La présence d'un substrat végétalisé permet d'abaisser la température par rapport aux panneaux monopans montés sur béton brut.
- Contrairement aux dômes surélevés, une épaisseur de substrat plus importante de 12 cm ne permet pas de diminuer la température par rapport à une épaisseur de 8 cm.

Alors qu'en période hivernale avec un soleil bas sur l'horizon, nos observations sont les suivantes :

- Il n'y a pas d'abaissement significatif de la température sous les panneaux monopans montés sur béton brut par rapport au témoin de pleine lumière. Il y a même une tendance inverse avec une température plus élevée, mais significative uniquement en avril 2021.
- La présence du substrat végétalisé montre une température encore plus élevée que sur le béton.
- La comparaison entre les situations sur deux épaisseurs différentes de substrat indique une température moins élevée sur 12 cm, que 8 cm

Existe-t-il une différence de microclimat sous des panneaux configurés en dômes surélevés à orientation est-ouest et des panneaux configurés en monopans à orientation vers le sud ?

- Comme vu au point précédent, l'orientation et l'espacement des modules ont ici un rôle primordial en laissant plus ou moins passer le rayonnement solaire.
- Les dômes surélevés ont un effet d'atténuation des pics thermiques plus marqués que les monopans. La température sous les dômes surélevés (orientation est-ouest et faible espacement) est plus basse que la température sous les monopans (orientation sud et espacement important).

- Cette différence est très marquée en période hivernale et moins marquée en période estivale, mais reste significative toute l'année.

La température est-elle différente entre une situation d'ombrage sous les panneaux monopans et une situation de pénombre entre ces mêmes panneaux ?

- La comparaison de la température entre une position « sous panneaux » et une position « entre panneaux » monopans surélevés montre un abaissement de la température sous les panneaux par effet d'ombrage lors de la période estivale, ainsi qu'un effet de retenue de la chaleur émise par le substrat réchauffé lors des périodes hivernales et automnales, ce qui est favorable à la croissance végétale.

Ainsi, ces mesures ont permis d'effectuer plusieurs constats et hypothèses qui pourront être démontrées au fur à mesure de prochains projets. La première condition à prendre en compte est la multiplication des points de mesure par modalités afin de consolider les données. Une expérience allant dans ce sens est actuellement menée sur la toiture de la STEP d'Aire. Par ailleurs, il serait pertinent de tester plusieurs espacements entre modules afin de déterminer jusqu'à quel point le double effet d'ombrage l'été et de retenue de chaleur l'hiver est observé.

7 Volet énergétique

Par Julien Winkelman

7.1 Problématique

L'objectif de ce volet est de quantifier les niveaux de production énergétiques par configuration d'implantation afin de répondre aux questions suivantes :

- Y a-t-il globalement un effet de la croissance végétale sur le productible des panneaux solaires selon la configuration considérée ?
- Si oui, cet effet varie-t-il selon l'exposition ? L'épaisseur du substrat ? Le type de panneaux ?
- Y a-t-il des périodes plus sensibles que d'autres durant l'année ?

7.2 Matériel & Méthode – Volet énergétique

Indicateurs et paramètres testés :

Les données analysées correspondent aux productions mensuelles des panneaux photovoltaïques pour la période d'octobre 2020 à novembre 2023 sur le site de Lullier. Les panneaux photovoltaïques Theia ont été exclus de l'analyse, d'une part à cause de dysfonctionnements qui n'ont pas permis l'accès à des données fiables durant cette période, d'autre part à cause du faible nombre de panneaux installés (3) ne permettant pas des analyses fiables.

Les données de productions de chaque panneau photovoltaïque ont été remontées mensuellement via la plateforme Enlighten.

Les tableaux ci-dessous (Figure 32) présentent la répartition des modules monocristallins et bifaciaux selon l'épaisseur de substrat :

Modules monocristallins				Modules bifaciaux			
	Est	Ouest	Sud		Est	Ouest	Sud
0 cm	4	4	3	0 cm	2	2	4
8 cm	8	4	4	8 cm	4	8	4
12 cm	8	4	3	12 cm	4	8	4

Figure 32: répartition des modules monocristallins et bifaciaux selon l'épaisseur de substrat

Les tableaux de contingence mettent en évidence la grande disparité dans le nombre de répétition pour chaque traitement, ainsi qu'une taille de l'échantillon relativement faible.

Les données analysées sont les moyennes mensuelles de production des panneaux photovoltaïques en kWh. Afin de rendre les analyses comparables, la production a été ramenée à l'équivalent d'un capteur de 1 m².

Les analyses ont été menées par type de panneaux photovoltaïques, ainsi que par orientation en fonction des différentes épaisseurs de substrat.

Les données de production des modules ont été analysées en utilisant le logiciel R (version 2024.4.2.764).

7.3 Résultats & discussion - Volet énergétique

7.3.1 Modules monocristallins orientation Est

La Figure 33 et le Tableau 6 mettent en évidence plusieurs phénomènes.

Lors de la première année, les traitements 8 et 12 cm montrent un productible inférieur au témoin « 0 cm » en période de végétation. Cet impact peut être expliqué par un effet de masque de la végétation qui s'est développée en avril-mai. Nous pouvons observer que plus l'épaisseur de substrat est élevée, plus l'effet de masque de la végétation est marqué. Cet effet peut s'expliquer par la croissance des coquelicots, qui, en tant qu'espèce pionnière se sont installés en abondance sur un substrat neuf (Figure 18).

La deuxième année, il y a un léger effet de masque de la végétation au printemps, dans un contexte global de chute de la production. Le productible annuel est plus faible en regard du témoin pour la variante substrat 8 cm (- 2,64 %), mais plus élevé (+ 5,89 %) pour la variante substrat 12 cm. L'effet d'atténuation des pics thermiques lors d'un été particulièrement chaud en est probablement l'explication.

La troisième année les productibles annuels sont quasiment identiques (+ 0,14 % pour la variante substrat 8 cm et - 0,38 % pour la variante substrat 12 cm en regard du témoin).

En synthèse, l'effet de masque de la première année s'amenuise fortement en deuxième année pour disparaître complètement en troisième année. Dans un premier temps, les plantes pionnières (coquelicots) colonisent rapidement l'espace avec un fort développement et ont donc un effet de masque sur les panneaux photovoltaïques, puis les communautés végétales à plus faible développement s'installent de façon pérenne sous les panneaux. Il n'a pas de tendance nette sur le productible annuel (Figure 18).

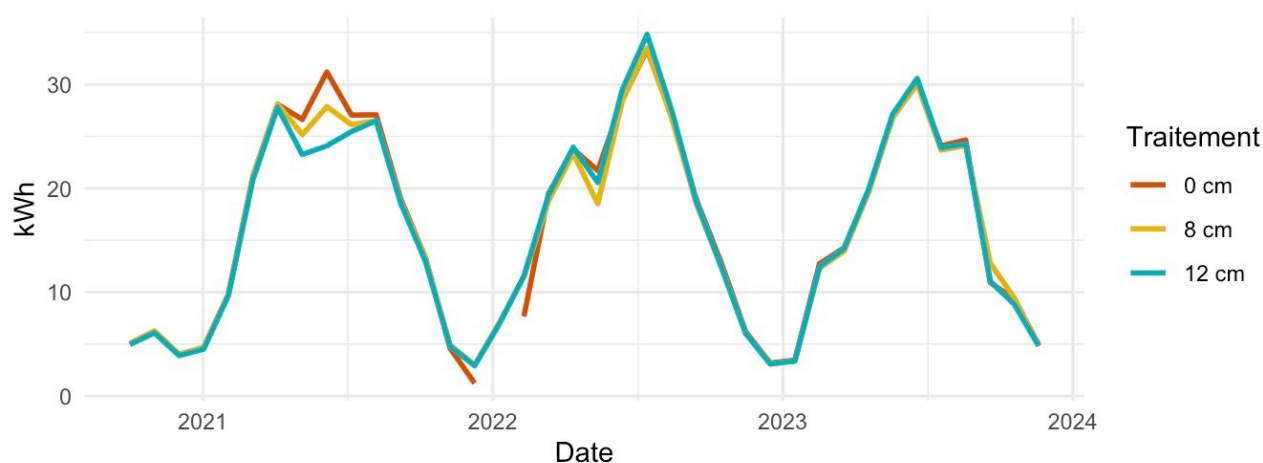


Figure 33 : Productible des modules monocristallins en orientation EST

7.3.2 Modules monocristallins orientation Ouest

La Figure 34 et le Tableau 6 ci-dessous, présentent des résultats relativement différents de l'orientation EST.

La première année, un effet de masque saisonnier est également observé à partir d'avril et durant les mois d'été avec une intensité plus élevée pour la variante 12 cm. Néanmoins, annuellement les productibles sont quasiment identiques la première année (+ 0,09 % pour la variante substrat 8 cm et

- 0,30 % pour la variante substrat 12 cm en regard du témoin), ce qui signifie que la production d'intersaison a été plus importante sur les placettes pourvue de substrat.

La deuxième année, il y a également un effet de masque printanier, mais le productible annuel est plus élevé de + 5,55 % pour la variante substrat 8 cm et + 2,75 %, comme pour la variante substrat 12 cm en regard du témoin.

Lors de la troisième année, l'effet de masque s'estompe complètement avec, cette fois, un productible significativement plus élevé durant l'été comme annuellement (+ 13,16 % pour la variante substrat 8 cm et + 11,18 % pour la variante substrat 12 cm en regard du témoin). Le productible estival plus élevé peut s'expliquer par un effet de refroidissement lié à l'évapotranspiration comme cela a été observé lors du suivi thermique en 2021 (cf. 6.3.1).

En synthèse, l'orientation Ouest semble davantage bénéficier de l'effet d'atténuation des pics thermiques par évapotranspiration que l'orientation Est, probablement à cause d'une exposition plus longue au soleil durant l'été. Si la première année, les productibles sont annuellement identiques, ils sont plus importants en année 2 (+ 2,8 % à + 5,6 %) et surtout en année 3 (+ 11,2 % à + 13,2 %).

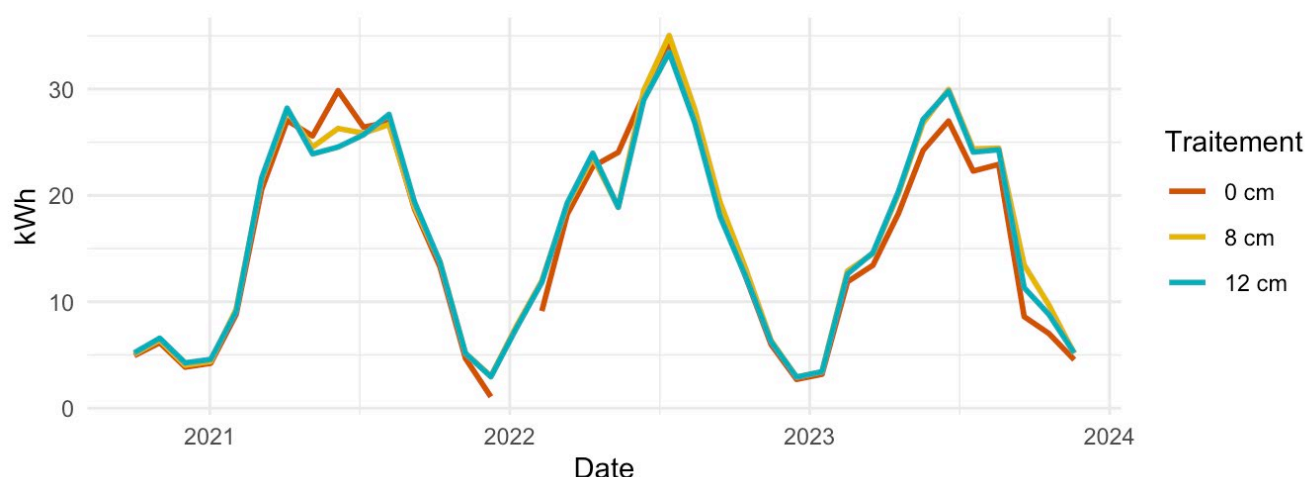


Figure 34 : Productible des modules monocristallins en orientation OUEST

Tableau 6 : Récapitulatif des productibles annuels pour les panneaux monocristallins

Modules monocristallins				
Année	2021	2022	2023	
Traitement				
Orientation EST				
0 cm [kWh]	213.71	202.66	181.22	
8 cm [kWh]	209.45	208.01	180.96	
8 cm - Comparaison	1.99%	-2.64%	0.14%	
12 cm [kWh]	201.36	214.60	180.54	
12 cm - Comparaison	-5.78%	5.89%	-0.38%	
Orientation OUEST				
0 cm [kWh]	207.12	204.65	163.39	
8 cm [kWh]	207.30	216.00	184.90	
8 cm - Comparaison	0.09%	5.55%	13.16%	
12 cm [kWh]	206.50	210.27	181.65	
12 cm - Comparaison	-0.30%	2.75%	11.18%	

Orientation SUD			
0 cm [kWh]	234.20	235.84	200.19
8 cm [kWh]	232.66	239.44	191.84
8 cm - Comparaison	-0.66%	1.52%	-4.17%
12 cm [kWh]	231.38	241.07	193.99
12 cm - Comparaison	-1.20%	2.21%	-3.10%

7.3.3 Modules monocristallins en orientation Sud

Le Tableau 6 et la Figure 35 et ci-dessous montre que l'orientation Sud est la moins touchée par les effets de masque solaire durant la première année pour laquelle les productibles sont annuellement quasiment identiques (- 0,7 % à 8 cm de substrat et -1,2 % à 12 cm en regard du témoin). Ce contraste avec la situation en dôme peut être expliqué par l'espacement entre les panneaux qui a moins favorisé la croissance des coquelicots (cf. 8.2 ; Figure 17).

Si l'année 2 présente des productibles légèrement plus élevés sur les placettes pourvues de substrat (+ 1,5 % à 8 cm de substrat et + 2,2 % à 12 cm en regard du témoin), l'année 3 présente des productibles légèrement plus faibles (- 4,1 % à 8 cm de substrat et - 3,1 % à 12 cm en regard du témoin), que nous ne sommes actuellement pas en mesure d'interpréter.

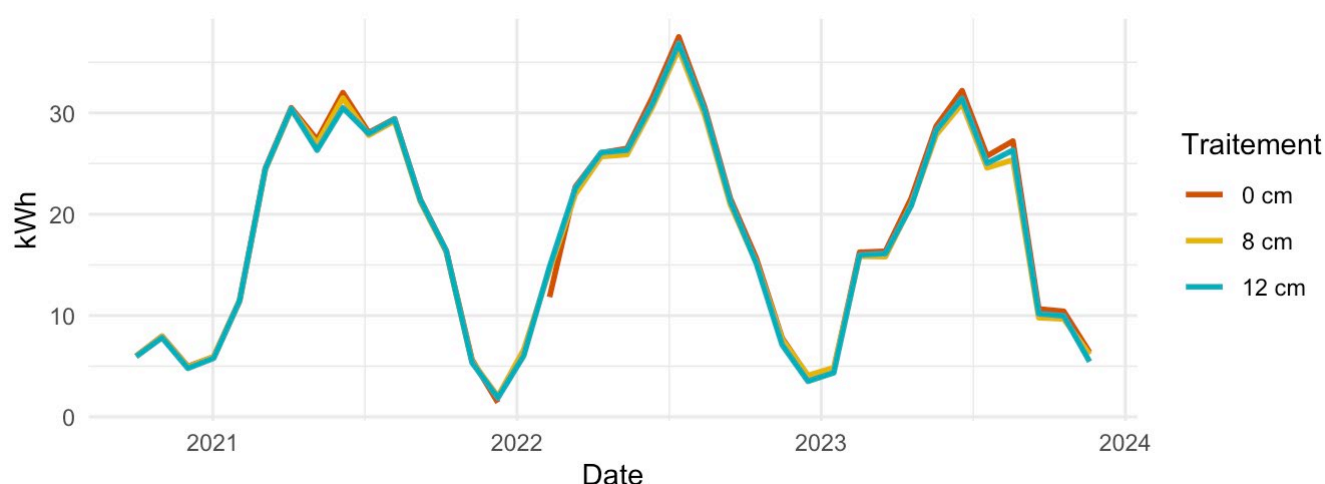


Figure 35 : Productible des modules monocristallins en orientation SUD

7.3.4 Modules bifaciaux orientation Est

La Figure 36 et le Tableau 7 ci-dessous montrent des effets légèrement différents en regard des panneaux monocristallins pour la même orientation.

Au-delà de l'effet de masque printanier, le productible annuel de la première année est quasiment identique au témoin pour la variante substrat 8 cm (+ 0,5 %) et légèrement plus faible (- 1,7 %) pour la variante substrat 12 cm.

La deuxième année, il y a également un léger effet de masque de la végétation au printemps. Le productible annuel est légèrement plus élevé en regard du témoin pour la variante substrat 8 cm (+ 1,9 %), mais plus élevé (+ 2,4 %) pour la variante substrat 12 cm.

La troisième année les productibles annuels plus élevés en présence de substrat (+ 7,4 % pour la variante substrat 8 cm et + 6,8 % pour la variante substrat 12 cm en regard du témoin).

En synthèse, en dépit de l'effet de masque printanier et d'une réduction annuelle de productible pour la variante substrat 12 cm en 2021, l'effet substrat est positif pour la modalité 8 cm dès 2021, ainsi que pour les 2 années ultérieures (+ 1,9 % à + 6,7 %).

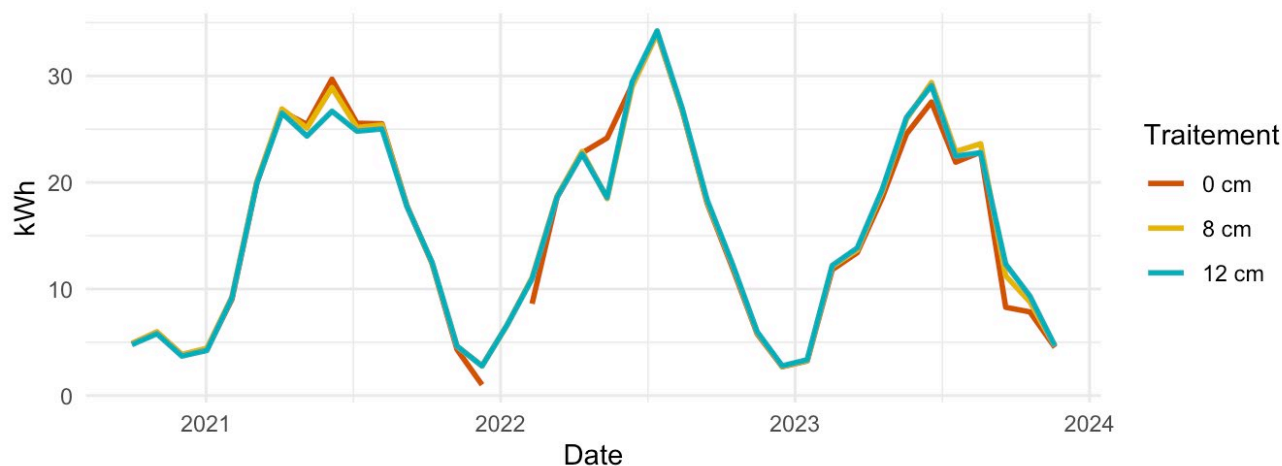


Figure 36: Productible des modules bifaciaux en orientation EST

7.3.5 Modules bifaciaux orientation Ouest

La Figure 37 et le Tableau 7 ci-dessous, présentent des résultats relativement similaires aux modules monocristallins en orientation Ouest.

Lors de la première année, un effet de masque est observé à partir d'avril et durant les mois d'été avec un effet de masque plus élevé pour la variante 12 cm. Néanmoins, annuellement le productible annuel est légèrement plus élevé pour un substrat de 8 cm (+ 4,1 %) et identique au témoin (- 0,01 %) pour la variante substrat 12 cm.

La deuxième année, il y a également un effet de masque printanier ponctuel, mais le productible estival est plus élevé sur les 2 placettes bénéficiant d'un substrat. Il s'ensuit que le productible annuel est significativement plus élevé (+ 7,9 % pour la variante substrat 8 cm et + 6,7 % pour la variante substrat 12 cm en regard du témoin).

La troisième année, l'effet de masque s'estompe complètement et le productible annuel est plus élevé sur les 2 placettes bénéficiant d'un substrat (+ 7,4 % pour la variante substrat 8 cm et + 7,8 % pour la variante substrat 12 cm en regard du témoin).

Ce productible estival plus élevé peut s'expliquer par l'atténuation des pics thermiques estivaux comme cela a été observé lors du suivi thermique en 2021 (cf. 6.3.1). Cette situation est identique à celle observée pour les modules monocristallins dans une configuration identique.

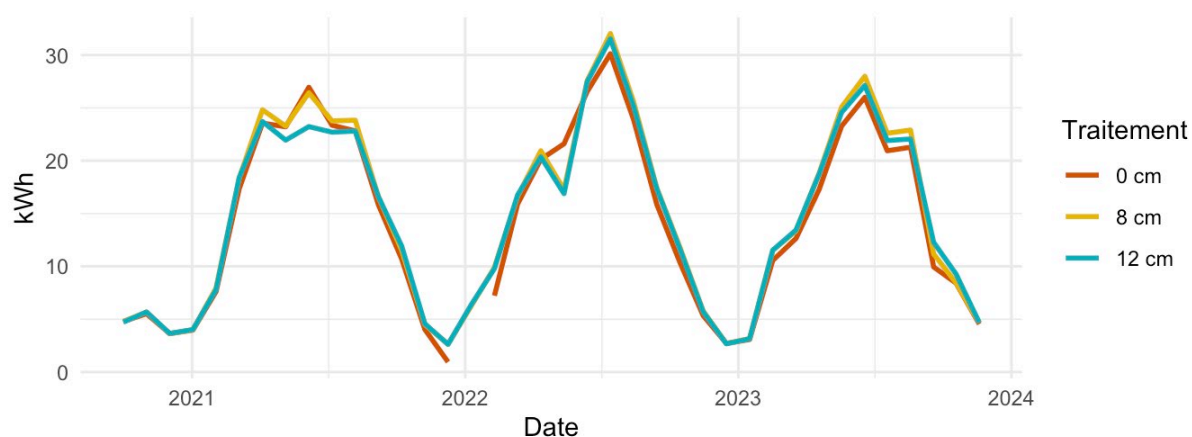


Figure 37 : Productible des modules bifaciaux en orientation OUEST

Tableau 7 : Récapitulatif des productibles annuels pour les panneaux bifaciaux

Modules semi-transparents bifaciaux			
Année	2021	2022	2023
Traitement			
Orientation EST			
0 cm [kWh]	201.81	202.74	164.53
8 cm [kWh]	202.88	206.66	174.72
8 cm - Comparaison	0.53%	1.94%	6.19%
12 cm [kWh]	198.39	207.61	175.57
12 cm - Comparaison	-1.70%	2.40%	6.71%
Orientation OUEST			
0 cm [kWh]	180.32	179.65	157.93
8 cm [kWh]	187.63	193.82	169.68
8 cm - Comparaison	4.06%	7.89%	7.44%
12 cm [kWh]	180.30	191.63	168.72
12 cm - Comparaison	-0.01%	6.67%	6.83%
Orientation SUD			
0 cm [kWh]	217.30	216.87	185.84
8 cm [kWh]	210.40	213.33	176.80
8 cm - Comparaison	-3.17%	-1.63%	-4.87%
12 cm [kWh]	208.65	213.12	171.75
12 cm - Comparaison	-3.98%	-1.73%	-7.58%

7.3.6 Modules bifaciaux orientation Sud

La Figure 38 et le Tableau 7 montrent les résultats de la variante Sud pour les modules bifaciaux.

Les résultats sont différents de ceux observés sur les traitements Est-Ouest et montrent une similarité à ceux de la configuration monocristalline. En effet, le productible des traitements « 8 cm » et « 12 cm » est systématiquement plus faible comparativement au traitement « 0 cm » (- 1,6 % à - 7,6 %) quel que soit les années. Les productibles de ces traitements « 8 cm » et « 12 cm » étant très similaires lors des trois années, il n'y a pas d'effet perceptible de l'épaisseur du substrat. Il n'y a actuellement pas d'explication sur le fait que le productible soit légèrement plus élevé en 2022 dans la configuration monocristalline et inversement plus faible dans la configuration bifaciale.

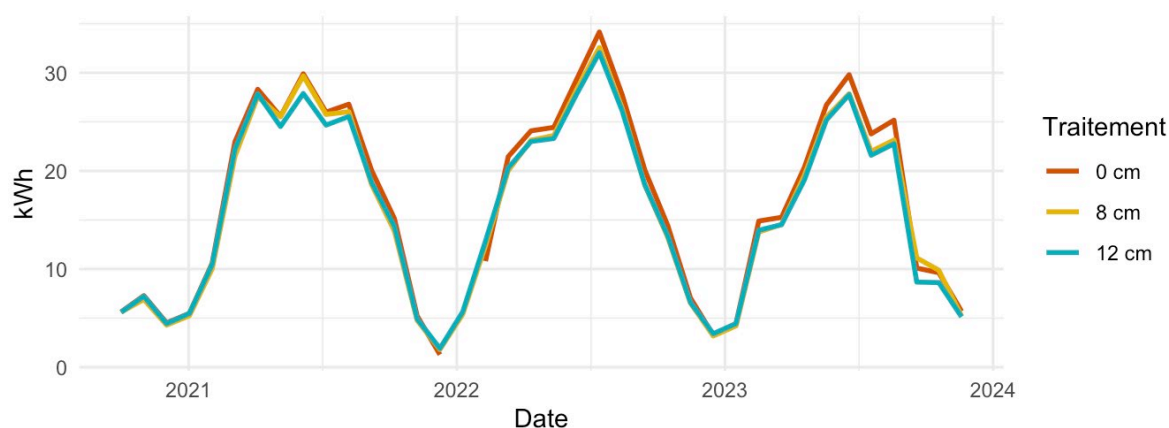


Figure 38 : Productible des modules bifaciaux en orientation SUD

7.4 Synthèse & conclusions – Volet énergétique

L'expérience menée en partenariat avec le Laboratoire des toitures végétalisées à Lullier a permis de mettre en évidence plusieurs problématiques et tendances sur les toitures biosolaires.

Y a-t-il globalement un effet de la croissance végétale sur le productible des panneaux solaires selon la configuration considérée ? Si oui, cet effet varie-t-il selon l'exposition ? L'épaisseur du substrat ? Le type de panneaux ?

Sur ce point, la réaction est contrastée entre les configurations Est-Ouest et Sud.

Pour l'orientation Est-Ouest, l'effet de la présence d'une végétation est globalement légèrement positif. Toutes modalités confondues et sur les 3 années, cet effet s'élève à + 3,4 %.

Cet effet est plus important pour les modules bifaciaux orientés à l'Ouest (+ 5,4 %), qu'à l'Est (+ 1,3 % à l'Est). Il y a donc bien un effet exposition ; l'exposition Ouest étant soumise à des échauffements plus marqués en fin de journée.

L'influence de l'épaisseur du sol quant à l'augmentation de la production semble en revanche faible : + 3,8 % pour un substrat de 8 cm et + 2,9 % pour un substrat de 12 cm durant les 3 années. En effet, si globalement l'épaisseur du sol favorise la croissance végétale, cela peut avoir une incidence négative (cas de l'effet de masque de la première année), mais également positive lors des pics thermiques estivaux. Les deux semblent plus ou moins s'équilibrer dans cette expérience.

Enfin, concernant l'influence du type de panneaux, les panneaux monocristallins produisent davantage, que les panneaux bifaciaux (+ 7,0 %), notamment ceux exposés à l'ouest (+ 10,5 %).

Pour l'orientation Sud, l'effet de la présence d'une végétation est globalement légèrement négatif en terme de productible. Toutes modalités confondues et sur les 3 années, cet effet s'élève à - 2,4 %.

Il n'y a pas d'effet de l'épaisseur du sol : - 2,2 % pour un substrat de 8 cm et - 2,6 % pour un substrat de 12 cm durant les 3 années.

Enfin, comme pour la configuration Est-Ouest les panneaux monocristallins produisent davantage, que les panneaux bifaciaux (+ 9,3 %).

Y a-t-il des périodes plus sensibles en terme de productions ?

Lors de la première année d'exploitation, et dans une moindre mesure lors de la seconde, un effet de masque solaire de la végétation a été observé. Il est d'autant plus important si le substrat est épais, donc la croissance végétale facilitée. Ainsi, une attention particulière doit être portée aux effets de masque durant les deux premières années d'exploitation. La période critique pour l'entretien de la toiture végétalisée est notamment en avril et mai (période propice à la croissance végétale). Il est également important de suivre ce phénomène en automne lors de possibles repousses. A partir de la troisième année, les végétaux pionniers de grandes tailles s'effacent, la végétation est dominée par des végétaux moins hauts, notamment le trèfle champêtre, l'effet de masque disparaît (Figures 17 et 18).

En conclusion

Ces résultats semblent orienter la mise en place de centrales biosolaires en configuration « Est-Ouest » afin de bénéficier au maximum de l'effet de refroidissement de la végétation. Un entretien réalisé au moment opportun lors des deux premières années permettrait de s'affranchir de la baisse de productible observée lors de cette expérimentation. Cette configuration a aussi l'avantage d'offrir une densité de panneaux photovoltaïques plus élevée et donc un productible par unité de surface plus élevé.

Il serait désormais intéressant d'optimiser cette configuration en intégrant davantage d'espacement entre les panneaux Est-Ouest pour prendre en compte les contraintes d'entretiens et la diversité des niches écologiques des végétaux afin d'identifier la densité optimale de panneaux photovoltaïques pour bénéficier au mieux de cette synergie.

8 Analyses complémentaires

Par Fabienne Mörch, Balthazar L'Hiver, Patrice Prunier

Les présentes analyses dites complémentaires n'étaient initialement pas planifiées. Au vu des données disponibles, elles sont apparues pertinentes pour confirmer les constats réalisés selon la démarche initialement prévues

8.1 Relation production énergie et recouvrement vasculaire

L'objectif de cette analyse complémentaire est d'identifier un éventuel lien direct entre la production et le recouvrement vasculaire par modalité testée.

8.1.1 Méthode

La valeur du recouvrement vasculaire calculée pour chacune des périodes de relevés floristiques (mai 2021, octobre 2021, mai 2022, septembre 2022, mai 2023 et septembre 2023) a été mis en comparaison avec la production moyenne mensuelle d'électricité pour ces mêmes périodes. Cette approche permet d'observer pour chacun des types de panneaux (monocristallins et bifaciaux), pour chacune des configurations (dômes et monopans) et enfin pour chacune des épaisseurs de substrat (8 cm et 12 cm), s'il y a une relation entre le recouvrement vasculaire et la production électrique.

8.1.2 Résultats pour les panneaux en dômes

8.1.2.1 Panneaux monocristallins

Pris globalement, les résultats ne montrent pas de lien (R^2 proche de 0) entre la production de panneaux monocristallins et le recouvrement, indépendamment de la saison considérée et de l'épaisseur du substrat (Figure 39).

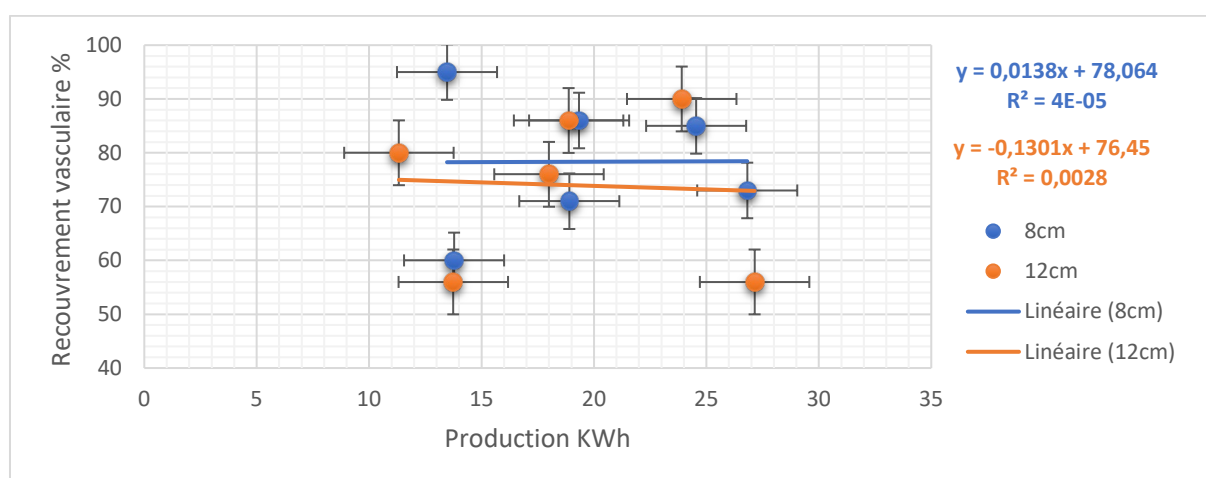


Figure 39 : Relation recouvrement vasculaire et productivité panneaux monocristallins orientés est-ouest (dômes).

8.1.2.2 Panneaux bifaciaux

Pris globalement, les résultats ne montrent pas de lien (R^2 proche de 0) entre la production de panneaux bifaciaux et le recouvrement, indépendamment de la saison considérée et de l'épaisseur du substrat (Figure 40).

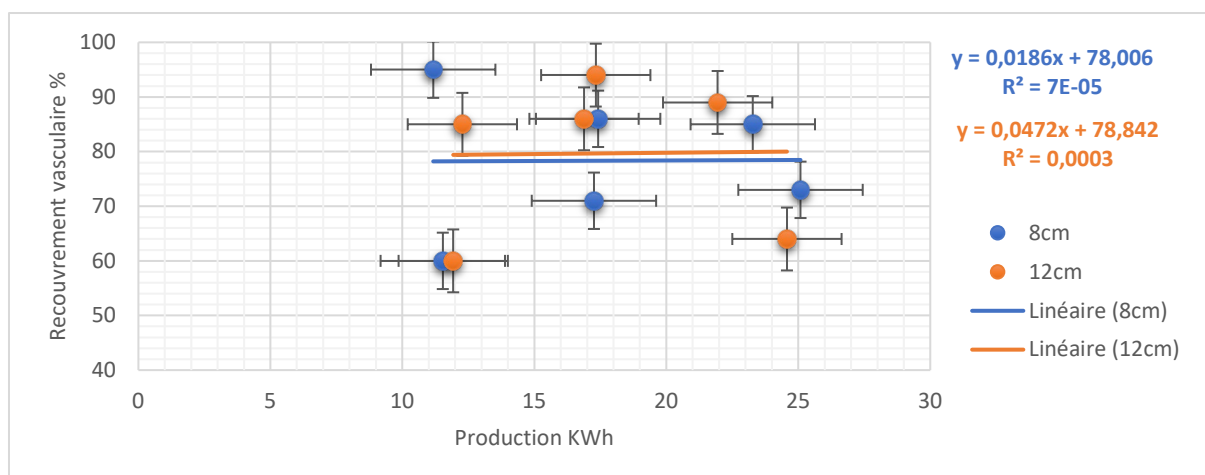


Figure 40: Relation recouvrement vasculaire et productivité panneaux bifaciaux orientés est-ouest (dômes)

8.1.3 Résultats monopans

8.1.3.1 Panneaux monocristallins

Pris globalement, les résultats ne montrent pas de lien ($R^2 \sim 0,25$) entre la production de panneaux monocristallins et le recouvrement, indépendamment de la saison considérée (Figure 41). Les niveaux de production sont identiques pour chacune des épaisseurs de substrat, seul le recouvrement change (voir valeurs moyennes du Tableau 8).

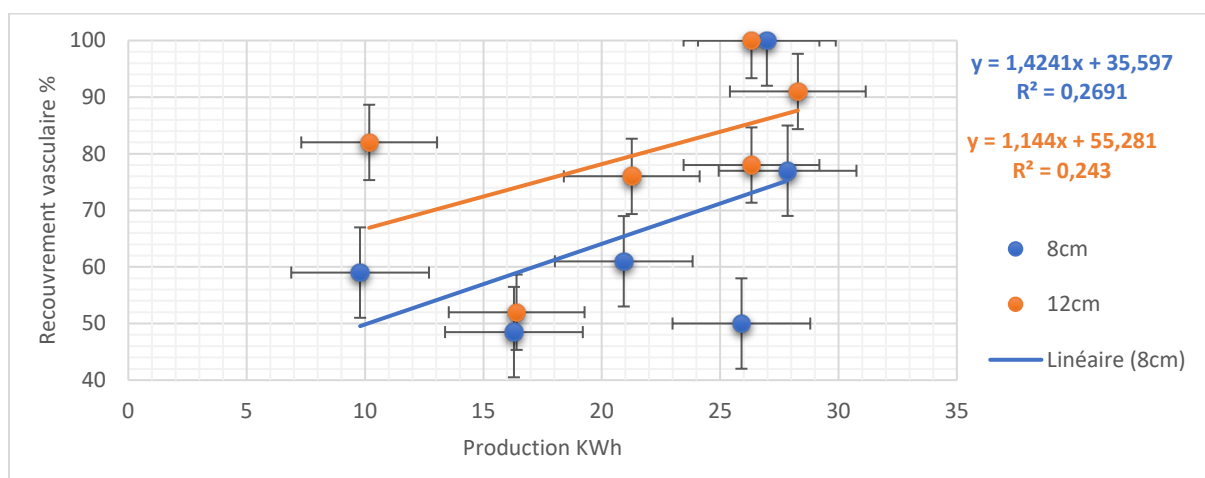


Figure 41 : Relation recouvrement vasculaire et productivité panneaux monocristallins orientés sud (monopans).

8.1.3.2 Panneaux bifaciaux

Pris globalement, les résultats ne montrent pas de lien ($R^2 \sim 0,1$ et $0,2$) entre la production de panneaux bifaciaux et le recouvrement, indépendamment de la saison considérée (Figure 42). Les niveaux de production sont identiques pour chacune des épaisseurs de substrat, seul le recouvrement change (voir valeurs moyennes du Tableau 8).

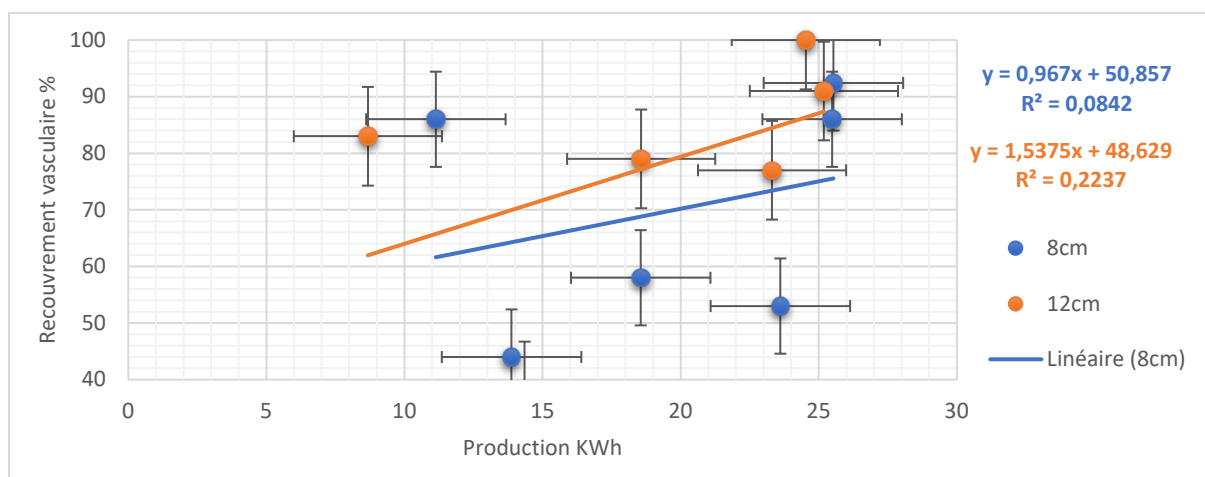


Figure 42 : Relation recouvrement vasculaire et productivité panneaux bifaciaux orientés sud (monopans).

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes de production et de recouvrement vasculaire pour les monopans.

Type panneau	Épaisseur substrat	Production [KWh]	Recouvrement vasculaire [%]
Monocristallin	8 cm	21	66
	12 cm	21	80
Bifaciaux	8 cm	20	70
	12 cm	19	78

8.1.4 Synthèse et conclusions

Globalement, ces résultats ne montrent pas de lien entre la production des panneaux et le recouvrement, indépendamment de leur type et de la saison considérée. L'épaisseur du substrat ne semble pas non plus augmenter le niveau de production. Cependant, nous disposons de données de recouvrement qui ont été prises ponctuellement lors des mois de mai et de septembre de chaque année. Il serait intéressant, lors d'un futur projet, de mesurer le recouvrement tous les mois et de mettre ces données en adéquation avec les moyennes mensuelles de production, et ceci tout en multipliant les répliques pour chacune des modalités. Ainsi, nous disposerions de plus de données sur une ligne temporelle plus complète, et pourrions vérifier plus précisément le lien entre production et recouvrement vasculaire.

8.2 Effet du microclimat généré par les panneaux monopans sur la croissance végétale

En avril 2021, nous avons observé une différence très marquée de la taille des coquelicots (*Papaver rhoeas*) entre la situation « sous panneaux » et « entre panneaux » (Figure 43) au niveau des monopans.



Figure 43 : Différence de croissance des Coquelicots (*Papaver rhoeas*) entre la situation "sous panneaux" et "entre panneaux" des monopans. Avril 2021 @Patrice Prunier.

Un protocole a été mis en place pour comparer la longueur des feuilles de coquelicot entre ces deux positions et également entre les deux épaisseurs de substrat, pour un total des 4 modalités suivantes :

- Entre panneaux, épaisseur de substrat 8 cm (EP8).
- Entre panneaux, épaisseur de substrat 12 cm (EP12).
- Sous panneaux, épaisseur de substrat 8 cm (SP8).
- Sous panneaux, épaisseur de substrat 12 cm (SP12).

Deux transects de 6 mètres par modalités ont été effectués avec une mesure de la taille de 3 feuilles de coquelicots tous les 50 centimètres. Ainsi, un échantillonnage de 72 mesures par modalité a été traité à l'aide du logiciel R pour réaliser des tests de comparaison de Wilcoxon.

Les résultats ainsi obtenus (Figure 44) montrent une différence significative de la taille des feuilles de coquelicots qui sont beaucoup plus grandes sous les panneaux qu'entre les panneaux, et ceci pour les deux épaisseurs de sol avec une différence moyenne de 25,6 cm pour l'épaisseur de 12 cm et 18,2 cm pour l'épaisseur de 8 cm. On constate également que les coquelicots se sont mieux développés sur le substrat de 12 cm que celui de 8 cm pour la position « sous panneaux » avec une différence moyenne de 7,6 cm. La comparaison des feuilles pour les deux épaisseurs de substrat pour la position « entre panneaux » ne montre cependant pas de différence significative avec 0,2 cm.

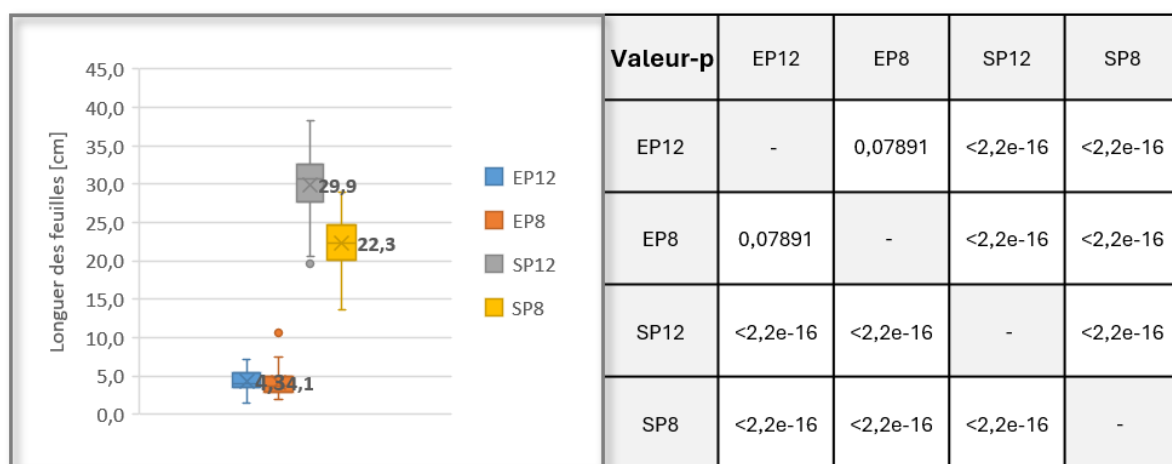


Figure 44 : Résultat de l'analyse des mesures des longueurs de feuille des coquelicots selon les modalités (à gauche). Tableau de récapitulation des valeurs-p obtenues par le test de comparaison de Wilcoxon (à droite).

9 Synthèse et conclusion générale

1) Concernant l'influence des différents types de modules solaires sur le développement de la biodiversité indigène, floristique (volet 1) et faunistique (volet 2)

En synthèse, à l'échelle de la placette d'étude le recouvrement des végétaux vasculaires est un peu plus élevé dans une configuration en dôme que monopan (R médian = 82 % *versus* 77 %) et tend à augmenter avec l'épaisseur de substrat. Même si ce test n'est en ce cas pas significatif, ce dernier point a pu être démontré dans d'autres projets. Ce constat peut être expliqué par les conditions globalement plus ombragées et moins extrêmes dans le premier cas. Néanmoins, le recouvrement tend à baisser légèrement sous les panneaux solaires par rapport à une situation entre panneaux ou de pleine lumière (R médian = 81 % *versus* 78 %).

La richesse spécifique est significativement plus élevée dans une configuration monopan que dôme surélevé en raison de l'espacement des modules, facilitant l'accès aux graines, offrant plus d'espaces et des conditions plus contrastées pour le développement des plantes.

Globalement, deux tiers des espèces du mélange semé se sont exprimées et la contribution des espèces semées au recouvrement est significativement plus élevée sous les panneaux qu'entre les panneaux, ce qui signifie qu'il y a davantage de colonisation spontanée entre les panneaux en raison de la facilité de dépôt des graines. Si le mélange semé est adapté à ce type de contexte, la présence du coquelicot, espèce attractive garante d'une floraison la première année, doit être reconsidérée. En effet, sa croissance est facilitée sous les panneaux par un microclimat automno-hivernal plus chaud qui augmente la taille des individus et peut ainsi présenter un effet de masque du panneau plus ou moins important selon l'épaisseur du substrat. Le semis différé ne présente pas d'effet significatif tant en terme de recouvrement que de richesse spécifique.

Enfin, le recouvrement muscinal augmente avec le temps. Néanmoins, trois ans après la mise en place du substrat, les taux de recouvrement de bryophytes sont trop faibles pour évaluer l'influence de la position des panneaux sur la strate muscinale.

2) l'influence combinée de la végétalisation et de la présence de modules solaires sur le microclimat local (volet 3)

Le suivi des températures effectué a permis de mettre en évidence que la présence de panneaux solaires en dômes surélevés a pour effet d'abaisser la température moyenne mensuelle au sol durant toute l'année. Cet abaissement varie selon les mois de -0,3°C en période automnale à -2,5°C en période estivale dans le cas d'une situation non végétalisée. L'implantation d'un tapis végétal extensif amplifie cette tendance avec une atténuation qui peut atteindre -5,8°C en moyenne en été pour un substrat de 12 cm comparativement à une situation de béton brut sous panneau.

Sous les panneaux monopans surélevés, l'atténuation de la température au sol sur béton brut est également observée en période estivale (variation de -1,5°C à -3,3°C en moyenne selon le mois) lorsque le soleil est au zénith. Néanmoins, en périodes hivernale et automnale il n'y a pas de différences de températures dans le cas d'une situation de béton brut, sous ou hors panneaux. Le phénomène est même inversé en présence d'un tapis végétal avec une température moyenne supérieure de +0,7°C à +4,1°C en moyenne d'octobre à mars sous les panneaux. Cette élévation est due à l'orientation sud et à l'espacement important entre les modules, qui permettent au rayonnement solaire rasant d'atteindre le substrat sous les panneaux, qui à leur tour retiennent le rayonnement thermique que le substrat chauffé émet vers l'atmosphère. Ce double effet

(atténuation thermique estivale et élévation thermique automno-hivernale) stimule le développement des plantes (cf. 8.2).

La comparaison des moyennes de températures au sol sous les panneaux en dômes surélevés et les panneaux monopans surélevés montre que la température est plus élevée sous les panneaux monopans plus espacés entre eux. Cette variation s'échelonne le plus souvent entre +0,4°C et +2°C en présence d'un substrat, mais peut atteindre +6,6°C en intersaison lorsque le rayonnement solaire est rasant. Ceci pourrait avoir un effet sur le recouvrement vasculaire étant donné qu'il est un peu moins important sous les panneaux monopans que sous les dômes surélevés. Cependant, cela permet à un nombre plus important d'espèces de s'exprimer et donc d'avoir une plus grande diversité.

3) l'influence de la végétalisation indigène sur l'efficacité de différents types de modules solaires en fonction de leur orientation (volet 4)

L'expérience menée en partenariat avec le Laboratoire des toitures végétalisées à Lullier a permis de mettre en évidence plusieurs problématiques et tendances sur les toitures biosolaires.

Pour l'orientation Est-Ouest, l'effet de la présence d'une végétation est globalement légèrement positif. Toutes modalités confondues et sur les 3 années, cet effet s'élève à + 3,4 %. Lors de la première année un effet légèrement négatif sur le productible est constaté, mais compensé par le gain de productible en deuxième et troisième année.

Cet effet est plus important pour les modules bifaciaux orientés à l'Ouest. Il y a donc bien un effet de l'exposition : l'exposition Ouest étant soumise à des échauffements plus marqués en fin de journée.

L'influence de l'épaisseur du sol quant à l'augmentation de la production semble en revanche faible : + 3,8 % pour un substrat de 8 cm et + 2,9 % pour un substrat de 12 cm durant les 3 années. En effet, si globalement l'épaisseur du sol favorise la croissance végétale, cela peut avoir une incidence négative (cas de l'effet de masque de la première année), mais également positive lors des pics thermiques estivaux. Les deux semblent plus ou moins s'équilibrer dans cette expérience.

Pour l'orientation Sud, l'effet de la présence d'une végétation est globalement légèrement négatif en terme de productible. Toutes modalités confondues et sur les 3 années, cet effet s'élève à - 2,4 %.

Il n'y a pas d'effet positif mesuré de l'épaisseur du substrat.

Lors de la première année d'exploitation, et dans une moindre mesure lors de la seconde, un effet de masque solaire de la végétation a été observé. Il est d'autant plus important si le substrat est épais, donc la croissance végétale facilitée. Ainsi, une attention particulière doit être portée aux effets de masque durant les deux premières années d'exploitation. La période critique pour l'entretien de la toiture végétalisée est notamment en avril et mai (période propice à la croissance végétale). Il est également important de suivre ce phénomène en automne lors de possibles repousses. A partir de la troisième année, les végétaux pionniers de grandes tailles s'effacent, la végétation est dominée par des végétaux moins hauts, notamment le trèfle champêtre, l'effet de masque disparaît (Figures 17 et 18).

Pour conclure, ces résultats semblent orienter la mise en place de centrales biosolaires en configuration « Est-Ouest » afin de bénéficier au maximum de l'effet de refroidissement de la végétalisation. Un entretien réalisé au moment opportun lors des deux premières années permettrait de s'affranchir de la baisse de productible observée lors de cette expérimentation. Cette configuration a aussi l'avantage d'offrir une densité de panneaux photovoltaïques plus élevée et donc un productible par unité de surface plus élevé.

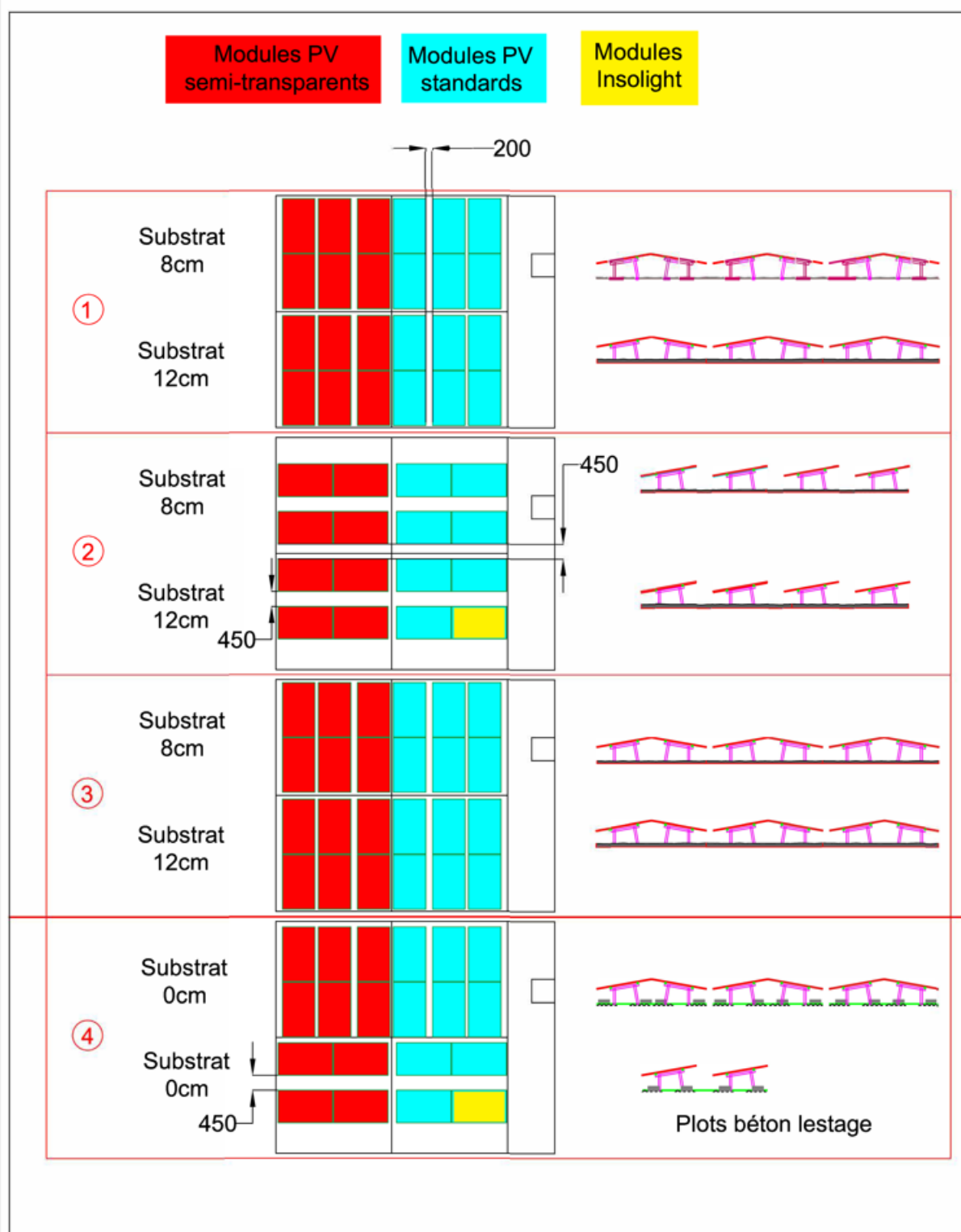
Il serait désormais intéressant d'optimiser cette configuration en intégrant l'espacement entre les panneaux Est-Ouest pour prendre en compte les contraintes d'entretiens et la diversité des niches écologiques des végétaux afin d'identifier la densité optimale de panneaux photovoltaïques pour bénéficier au mieux de cette synergie.

10 Bibliographie

- Baumann, N., Catalano, C. (2017)**, Biosolar Roofs: A Symbiosis between Biodiverse Green Roofs and Renewable Energy,
- Daget, P. & Poissonnet, J. (1971)**, « Une méthode d'analyse phytologique des prairies », *Annales Agronomiques*, vol. 22, n°1, pp. 5-41.
- Etat de Genève (2013), direction Générale de la Nature et du Paysage, *Programme Nature en ville*.
- Hasler, N., Evéquo, S. & Beuchat, S. (2013)**, « Programme Nature en ville », *Etat de Genève. Direction Générale de la Nature et du Paysage*, pp. 72.
- Köhler, M., Wiartalla, W., Feige, R. (2007)**, *Interaction between PV-Systems and extensive green roofs, Greening Rooftops for Sustainable Communities*,
- Krauter, S., Ochs, F. (2002)**, *An All-in-One Solar Home System. Proc. World Climate & Energy Event* Jan. 6-11: 101 – 107,
- Litschke, T. & Kuttler, W. (2008)**, « On the reduction of urban particle concentration by vegetation – a review », *Meteorol. Z.* Vol. 17, No. 3, 229-240.
- Office fédéral de l'énergie (2017), *Stratégie énergétique 2050*.
- Office fédéral de l'énergie 2019, *Le recensement du marché de l'énergie solaire en 2018, Extrait de la statistique suisse des énergies renouvelables*.
- Prunier, P., Steffen, J., Amos, E., Beauverd, M., Boivin, P., Buri, P., Frossard, P.-A., Guine, V., Jeanneret, C., Perroul, R., Pétremand, G., Renaud, E., Rochefort, S., Tremblet, S. & Verdan, B. (2018)**, « Rapport final du projet "SEminum on Edifices Downtown" (SEED) 2016-2018 », Hepia.
- Prunier, P. & Steffen, J. (2018)**, « Résumés des communications et programme de la journée », pp. 18.
- R Core Team (2023)**, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Vienna, Austria, Foundation for Statistical Computing.
- Rochefort, S., Prunier, P., Boivin, P., Camponovo, R., Consuegra, D., Fournier, M., Gallinelli, P., Guillot, V., Hédont, M., Margot, S., N'Gaidé Diouf, F., Pétremand, G., Queloz, P., Steffen, J. & Varesano, D. (2016)**, « Rapport final du projet "Toitures végétalisées" (TVEG) dans l'agglomération genevoise 2014-2016 », hepia.
- Schindler, B., Blank, L., Levy, S., Kadas, G. (2016)** *Integration of photovoltaic panels and green roofs: review and predictions of effects on electricity production and plant communities*.
- Ubertini, S., Desideri, U. (2003)**, *Performance estimation and experimental, measurements of a photovoltaic roof. Renewable Energy*, 28:1833-1850.

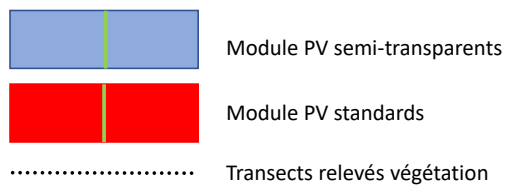
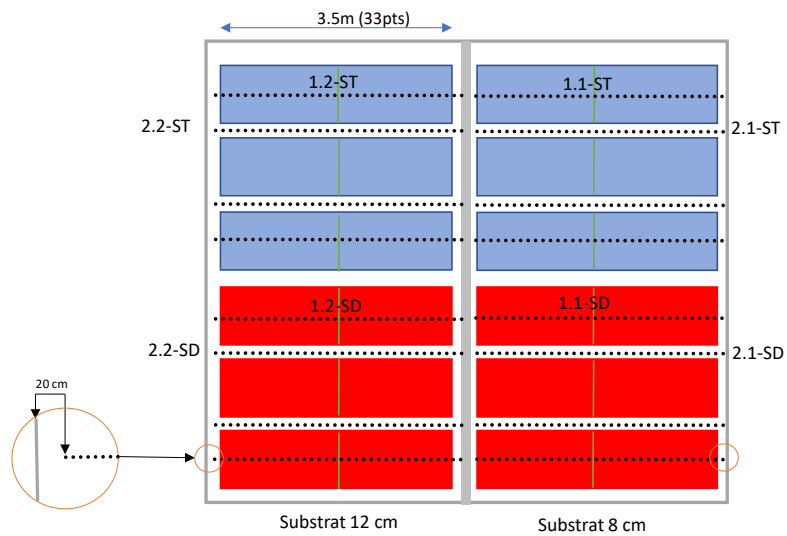
11 Annexes

11.1 Annexe1 : Schéma des placettes

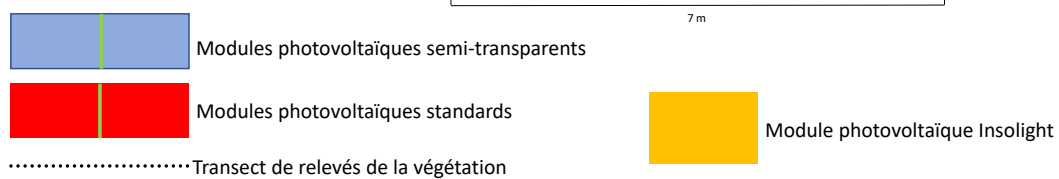
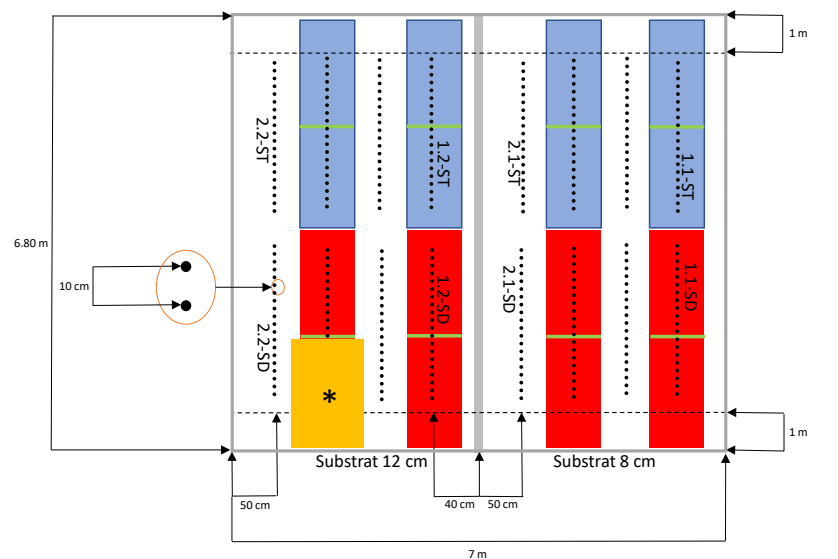


11.2 Annexe 2 : Schéma des transects de végétation

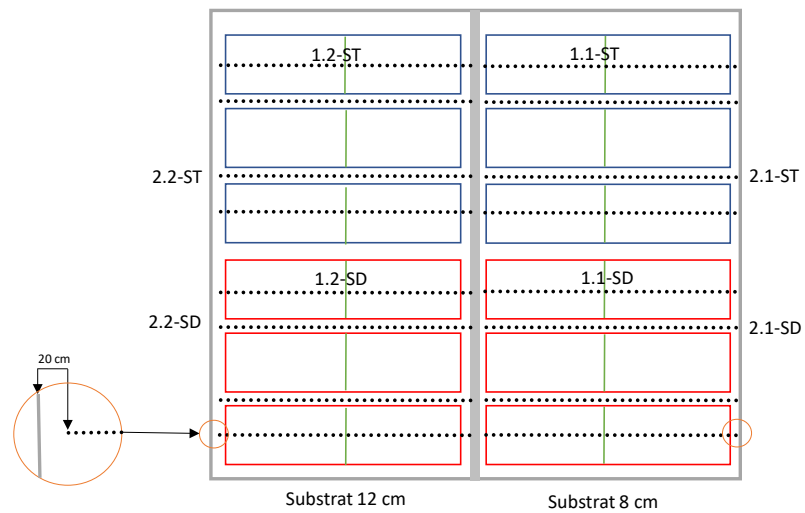
1- Orientation des panneaux : Est/Ouest



2-Orientation des panneaux : Nord / Sud



3-Orientation des panneaux : Est/Ouest - Panneaux absents printemps 2021



Futurs module PV semi-transparents



Futurs module PV standards



Transects relevés végétation