



Système composé de six filtres réfléchissant la composante verte du spectre solaire ainsi que les infrarouges vers le panneau photovoltaïque.

# Filtrage spectral pour l'agrivoltaïsme

**Concilier production photovoltaïque et culture de plantes héliophiles** | L'ombrage partiel qu'entraînent les panneaux agrivoltaïques conventionnels sur les cultures n'est pas envisageable pour les plantes qui ont besoin de beaucoup de lumière. Le concept de filtrage spectral comble cette lacune et permet de produire de l'électricité au-dessus de ces cultures sans réduire le rendement agronomique.

JANINA LÖFFLER, JONAS ROCH

**S**elon une étude récente, en Suisse, le potentiel de production photovoltaïque de l'ensemble des surfaces agricoles s'élève à 131 TWh/an [1]. L'agrivoltaïsme constitue donc un domaine particulièrement intéressant, dans lequel de nombreux travaux de recherche sont menés afin d'optimiser la production simultanée d'énergie solaire et de denrées alimentaires. Le concept promet des avantages pour les cultures – dont la protection contre la chaleur et la grêle – ainsi que pour les panneaux photovoltaïques, qui bénéficient d'une meilleure évacuation de la chaleur que lorsqu'ils sont montés en

toiture. Néanmoins, l'agrivoltaïsme doit impérativement permettre en premier lieu une augmentation du rendement agricole.

Pour les plantes héliophiles, comme les tomates et les poivrons, qui sont cultivées principalement sous serre, il n'est toutefois pas possible de déployer des modules photovoltaïques standard au-dessus des cultures sans réduire le rendement agricole. L'entreprise Voltiris a donc développé un système photovoltaïque incluant un filtrage spectral spécialement conçu pour les serres en verre, qui laisse passer toute la lumière nécessaire à la croissance des

plantes tout en produisant un maximum d'énergie. Celui-ci s'intègre à l'intérieur des serres, au-dessus des cultures et en dessous de la toiture de verre (**figure 1**). L'utilisation de ce système permet aux maraîchers de gagner en indépendance énergétique, tout en augmentant leur profitabilité et la durabilité de leurs opérations.

## Optimisation des filtres

Ce système est constitué de plusieurs filtres dichroïques par panneau photovoltaïque. Ceux-ci permettent de séparer les couleurs du rayonnement solaire de telle sorte que certaines plages de

longueurs d'onde soient transmises et que le reste soit réfléchi. Pour ce faire, les filtres dichroïques sont constitués de centaines de nanocouches de polymères laminés sur un substrat transparent (verre/plastique). Leurs épaisseurs peuvent être définies avec précision, permettant ainsi d'obtenir le spectre nécessaire à l'application.

Dans le dispositif de Voltiris, ces filtres sont placés de manière à ce que la partie réfléchie du rayonnement soit utilisée pour la production d'énergie et que le reste de la lumière soit transmis vers les plantes. Afin d'augmenter le rendement photovoltaïque, et ce, malgré la réduction du spectre lumineux atteignant les panneaux solaires, les filtres dichroïques sont conçus de sorte à concentrer la lumière non utilisée pour la croissance des plantes sur les panneaux photovoltaïques. De plus, le système est monté sur un moteur 2 axes qui suit le soleil (figure 2).

### Aucun impact sur le rendement agricole

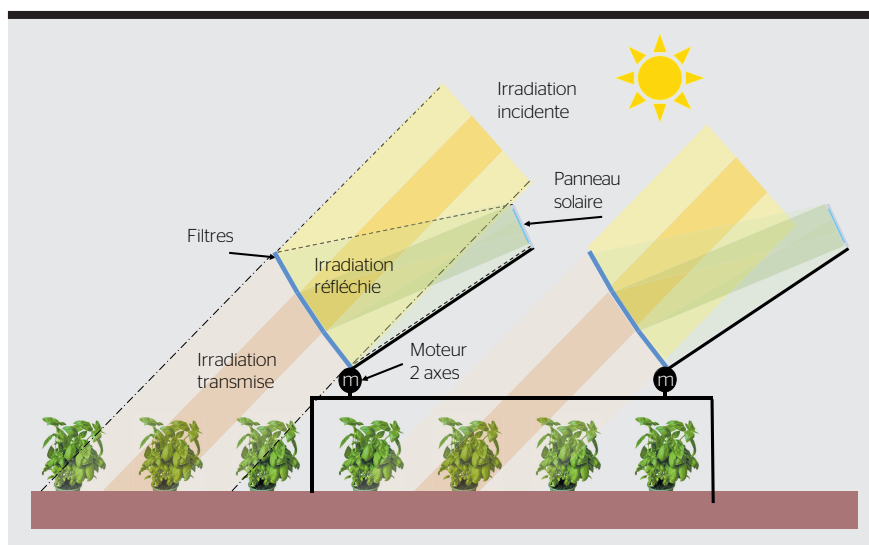
Une première installation pilote à Agroscope, à Conthey, a permis d'étudier l'effet du système sur les plantes ainsi que d'évaluer sa production énergétique.

L'élément innovant du système concerne la manière dont le filtre spectral est utilisé. Au cours de cette étude, deux types de filtres ont été testés, qui laissent passer différentes parties du spectre solaire et différentes proportions du rayonnement (figure 3). Afin de couvrir les besoins minimaux des plantes, 27% de l'énergie solaire doit être transmise. Les filtres 1 et 2 laissent passer respectivement 47% et 40% de l'énergie solaire. Dans les deux cas, la lumière transmise correspond aux bandes d'absorption des chlorophylles afin de répondre aux besoins de la photosynthèse.

L'étude agronomique a été effectuée sur plusieurs cycles de plantations au cours de l'année 2022. Résultat: aucune réduction du rendement agricole n'a été constatée pour les cultures du basilic, des tomates et des poivrons par rapport à une surface de référence sans filtre. De plus, l'étude agronomique effectuée avec les filtres de type 1, c'est-à-dire sans transmission de la partie verte du spectre (longueurs d'onde comprises entre 500 et 600 nm), a montré que celle-ci n'était pas indispensable à la photosynthèse des cultures testées.



**Figure 1** Schéma d'installation d'un système Voltiris X6 à six filtres par panneau solaire. Les réflecteurs se montent à l'intérieur de la serre, au-dessus des cultures.



**Figure 2** Schéma du filtrage spectral pour les systèmes incluant trois filtres par panneau solaire. Ces systèmes sont montés sur un moteur 2 axes qui permet de les orienter vers le soleil. L'irradiance transmise par les filtres est utilisée pour la photosynthèse des cultures, tandis que l'irradiance réfléchie est concentrée sur le panneau photovoltaïque.

### Des premiers résultats énergétiques encourageants

Les filtres 1 et 2 réfléchissent respectivement 53% et 60% du spectre en direction des panneaux solaires, dont la majeure partie des infrarouges, la partie du spectre où l'efficacité de photoconversion d'un panneau solaire standard à base de silicium monocristallin [3] est maximale.

Deux configurations de concentration ont été analysées dans cette étude: un système à concentration avec un facteur 3 par panneau solaire (X3), composé de trois filtres à 47% de transmission (filtres 1), et un autre système à concentration avec un facteur 6 par panneau solaire (X6), composé de six filtres à 40% de transmission (filtres 2). Dans le système X3, les filtres sont montés les uns au-dessus des autres et sont tous focalisés sur un seul et même panneau photovoltaïque

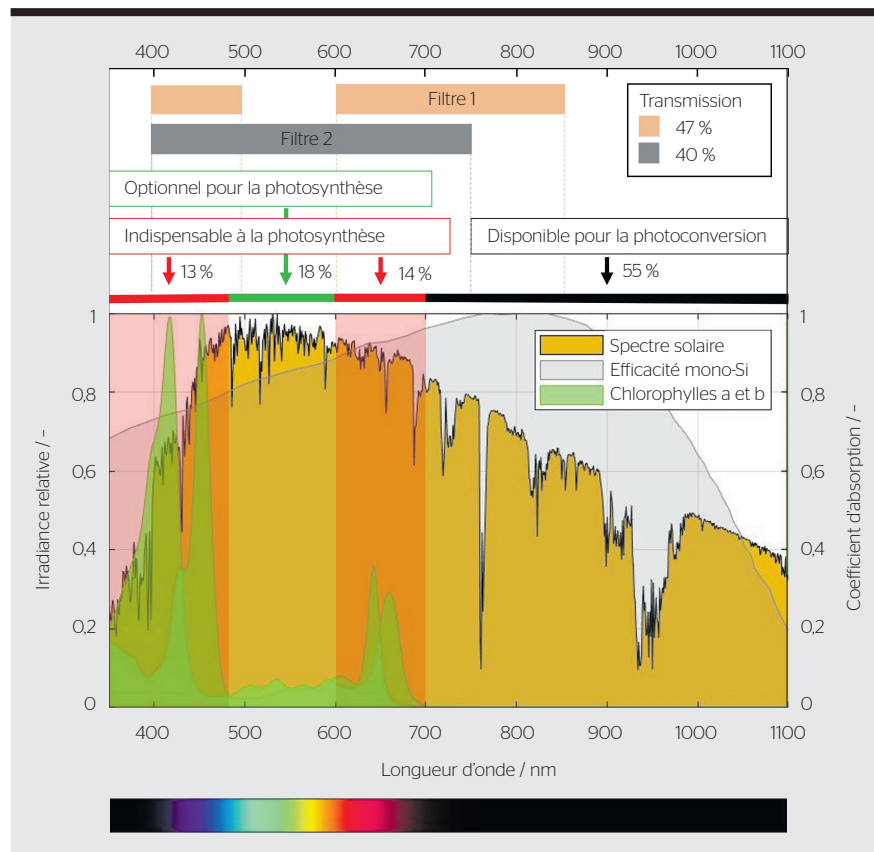
d'une surface de 0,19 m<sup>2</sup>, tandis que dans le système X6, deux rangées de trois filtres sont montées l'une à côté de l'autre, et les six filtres sont focalisés sur un seul module solaire (figure 1) d'une surface de 0,16 m<sup>2</sup>. L'avantage principal du système X6 à concentration plus élevée réside dans une réduction de la taille du panneau, et donc de l'ombrage effectif des cultures. Un autre avantage, surtout visuel, consiste dans le fait que le filtre 2 est transparent et incolore pour l'œil humain puisque seuls les infrarouges sont réfléchis.

Tous les résultats sont résumés dans le **tableau 1**. Les mesures réalisées en utilisant le système X3 ont montré que, grâce à la concentration du rayonnement réfléchi sur le module solaire d'une surface de 0,19 m<sup>2</sup>, ce dernier affichait une puissance de 39 W – avec une irradiance globale normale (GNI)

de 815 W/m<sup>2</sup> à ce moment-là –, soit 130 % de sa puissance nominale (30 W dans des conditions de test standard, avec une irradiance globale normale de 1000 W/m<sup>2</sup>). Ces 39 W de production pour une surface totale occupée par le système complet (filtres et module PV) de 3 m<sup>2</sup> correspondent à une production de 13 W/m<sup>2</sup>. Ceci équivaut à un rendement photovoltaïque effectif de 1,6 % (par rapport aux 815 W/m<sup>2</sup> d'irradiance globale normale au moment des mesures). Si, toutefois, seule la surface du panneau photovoltaïque est considérée pour le rendement (39 W pour une surface de 0,19 m<sup>2</sup>, soit 206 W/m<sup>2</sup>), celui-ci atteint alors une valeur de 25,3 %.

Des calculs similaires ont été réalisés avec l'irradiance directe normale (DNI): celle-ci était de 652 W/m<sup>2</sup> au moment des mesures avec le système X3. Pour rappel, l'irradiance globale normale (GNI) est l'irradiance totale du soleil à la surface de la Terre en un lieu donné sur un élément de surface perpendiculaire au soleil, incluant le rayonnement solaire direct et diffus; l'irradiance normale directe (DNI), elle, n'inclut pas le rayonnement solaire diffus (rayonnement diffusé ou réfléchi par les composants atmosphériques).

Dans le système X6, le panneau solaire (d'une surface de 0,16 m<sup>2</sup>) génère 34,2 W – avec une irradiance globale normale (GNI) de seulement 469 W/m<sup>2</sup> au moment des mesures –, soit 136 % de sa puissance nominale (25,1 W dans des conditions de test standard). Le rendement photovoltaïque pour l'empreinte au sol totale du système est de 2,4 %. Si seule la surface du panneau photovoltaïque est considérée pour le rendement (une production de 34,2 W sur 0,16 m<sup>2</sup>, soit 214 W/m<sup>2</sup>, et ce, avec une irradiance GNI de 469 W/m<sup>2</sup>), celui-ci atteint alors une valeur de 45,3 %, soit près de 3 fois le rendement du même panneau sans filtre ni concentration (15,6 %) ou plus de 2 fois le rendement d'un panneau en silicium monocristallin standard (environ 20 %). Autrement dit, à production PV égale et avec le même panneau, le système permet de réduire l'ombrage sur les cultures d'un facteur 3 (15 % d'ombrage pour le panneau utilisé sans filtrage ni concentration contre 5 % pour le système complet) et permet ainsi de n'exercer



**Figure 3** Spectre solaire AM1,5, parties du spectre utilisées par les chlorophylles des plantes [2] et bandes de transmission des deux types de filtres testés. Au-dessus de 700 nm, l'énergie solaire n'est pas utilisée par les chlorophylles et est donc disponible pour la photoconversion dans les panneaux solaires. L'efficacité de conversion photovoltaïque du silicium monocristallin [3] montre l'importance des infrarouges pour la production énergétique.

aucun impact sur le rendement agricole. En considérant un rayonnement solaire annuel moyen en Suisse de 1200 kWh/m<sup>2</sup>, avec le rendement mentionné plus haut de 2,4 %, on obtient un potentiel annuel de 29 kWh par m<sup>2</sup> de surface de serre pour cette installation pilote.

### Futurs développements

Le système de Voltiris a été construit pour être utilisé à l'intérieur des serres, entre la toiture de verre et les plantes. Par conséquent, la rentabilité du système dépend largement de la transmission lumineuse de la serre. Celle de la serre expérimentale de Conthey était très faible, avec une moyenne inférieure à 30 % et des écarts allant jusqu'à ±20 %. Ceci est dû en grande partie à la structure métallique importante de la serre, tandis que la transmission mesurée du verre de la serre était de 90 %. Les serres industrielles, avec une transmission lumineuse

de 70 % rendent l'utilisation du système Voltiris en intérieur économiquement rentable.

La production d'énergie électrique démontrée dans le cadre de ce projet pilote présente un potentiel d'amélioration significatif:

- Le spectre transmis peut être mieux ajusté à l'absorption des chlorophylles en coupant la transmission du filtre entre 480 nm et 600 nm ainsi qu'à partir de 700 nm. En conséquence, un maximum de 73 % de l'irradiance pourrait être mis à disposition pour la photoconversion.
- Des panneaux solaires bénéficiant d'un meilleur design peuvent aussi être utilisés pour améliorer le gain photovoltaïque d'un facteur 1,5.
- Il est en outre possible de réduire les pertes géométriques (la proportion de la lumière réfléchie n'atteignant pas le module PV) de manière à augmenter encore la production d'un facteur 1,2.

Configuration	Panneau solaire du système X3 (STC)	Système X3 3 filtres de type 1 (valeurs mesurées)	Système X3 par filtre (valeurs déduites)	Panneau solaire du système X6 (STC)	Système X6 6 filtres de type 2 (valeurs mesurées)	Système X6 par filtre (valeurs déduites)
Puissance photovoltaïque / W	30	39	13	25,1	34,2	5,7
Puissance relative par rapport aux conditions de test standardisées (STC) / %	100	130	43	100	136	23
Irradiance globale normale (GNI) / W/m <sup>2</sup>	1000	815	815	1000	469	469
Irradiance directe normale (DNI) / W/m <sup>2</sup>	-	652	652	-	353	353
Rendement (GNI) par m <sup>2</sup> de panneau / %	15,9	25,3	8,4	15,7	45,3	7,6
Rendement (DNI) par m <sup>2</sup> de panneau / %	-	31,6	10,5	-	60,2	10
Rendement (GNI) par m <sup>2</sup> d'empreinte au sol / %	15,9	1,6	-	15,7	2,4	-
Rendement (DNI) par m <sup>2</sup> d'empreinte au sol / %	-	2,0	-	-	3,2	-

**Tableau 1** Puissance électrique générée par les panneaux solaires des systèmes à concentration X3 et X6.

L'ensemble de ces améliorations permettrait de multiplier le rendement obtenu avec cette installation pilote par un facteur 2,6. Celui-ci atteindrait ainsi plus de 6%, et ce, toujours avec un ombrage partiel sur les cultures de seulement 5%. À titre de comparaison, une installation photovoltaïque réalisée avec des panneaux standard (rendement de 20%) avec un ombrage partiel égal (des panneaux installés uniquement sur 5% ou 1/20 de la surface de la serre) produirait 6 fois moins d'électricité.

Finalement, des panneaux bifaciaux pourraient encore augmenter le rendement photovoltaïque d'environ 5% [4].

Suite aux résultats positifs obtenus avec cette installation pilote, le système de Voltiris a pu être développé davantage en tenant compte des aspects identifiés. Il est actuellement testé dans des serres aux standards industriels, aux Pays-Bas, sur des plantations de tomates hors-sol.

#### Références

- [1] M. Jäger et al., « Machbarkeitsstudie Agri-Photovoltaik in der Schweizer Landwirtschaft », ZHAW, 2022. doi: 10.21256/zhaw-25624
- [2] L. P. Vernon, G. R. Seely, *The chlorophylls*, Academic Press, NY, 1966.
- [3] H. Wirth, « Chapter Three - Crystalline Silicon PV Module Technology », *Semiconductors and Semimetals*, Elsevier, Vol. 89, p. 135-197, 2013.

- [4] C. Deline et al., « Bifacial PV System Performance: Separating Fact from Fiction », 46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, IL, 2019.
- [5] P.-V. Broccard et al., « Photovoltaic Energy Production in Greenhouses with Spectral Splitting Solar Tracers », *AgriVoltaics2023 Conference Proceedings*.

#### Auteurs

D<sup>r</sup> **Janina Löffler** est professeure assistante à la HES-SO Valais.  
→ HES-SO Valais, 1950 Sion  
→ janina.loeffler@hevs.ch

D<sup>r</sup> **Jonas Roch** est CTO de Voltiris.  
→ Voltiris, 1010 Lausanne  
→ jonas.roch@voltiris.com

Ce projet d'innovation a été financé par Innosuisse (59709.1-IP-EE). Les résultats ont été publiés lors de la conférence internationale AgriVoltaics2023 [5].



## Spektrale Filterung für Agrivoltaik

Vereinbarkeit von PV-Produktion und Anbau von Sonnenpflanzen

Laut einer aktuellen Studie beträgt das Potenzial für die Solarstromerzeugung aller Agrarflächen in der Schweiz 131 TWh/Jahr. Allerdings würde die teilweise Beschattung von Sonnenpflanzen (z. B. Tomaten) durch herkömmliche Solarmodule den Ertrag stark reduzieren. Das Unternehmen Voltiris hat daher ein speziell für Gewächshäuser konzipiertes PV-System entwickelt.

Dieses System besteht aus mehreren dichroitischen Filtern und einem PV-Modul, die alle auf einem 2-Achsen-Motor montiert sind, der es ermöglicht, der Sonne zu folgen. Die Filter lassen alle spektralen Anteile durch, die die Pflanzen benötigen. Sie reflektieren die restliche Strahlung konzentriert auf das PV-Modul.

Eine erste Installation eines Prototyps bei Agroscope in Conthey ermöglichte es, sowohl die Wirkung des Systems

auf die Pflanzen als auch seine Energieproduktion zu untersuchen. Das Ergebnis: Verglichen mit einer Referenzfläche ohne Filter ist der landwirtschaftliche Ertrag nicht gesunken.

In der Energiestudie wurden zwei Konfigurationen analysiert: ein System mit einer dreifachen Konzentration und drei Filtern mit 47% Durchlässigkeit pro Solarpanel sowie eines mit einer sechsfachen Konzentration und sechs Filtern mit 40% Durchlässigkeit. In beiden Fällen erreichten die Solarpaneele trotz ungünstiger Bedingungen bezüglich der Lichtdurchlässigkeit des Gewächshauses und der Sonneneinstrahlung eine Produktionsleistung, die um 30 bis 40% über ihrer Nennleistung lag.