



Rapport final du 19 mai 2023

Greenhouse Infrared Filter (GIF)

Production, installation et vieillissement d'un écran de serre transparent à faible émissivité



Source: Infrascreeen



Date: 19 mai 2023

Lieu: Bern

Prestataire de subventions :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancement :

Fondation Suisse pour le Climat
Case postale 2832, 8022 Zurich
www.klimastiftung.ch

Bénéficiaires de la subvention :

Infrascreen SA
Rue de la Pierre-à-Mazel 39
2000 Neuchatel
www.infrascreen.com

Agroscope
Groupe de recherche Culture sous serre
Route des Eterpys 18, 1964 Contthey
www.agroscope.admin.ch

CSEM - Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA
Rue Jaquet-Droz 1
2002 Neuchâtel
www.csem.ch

Auteurs :

Benoît de Combaud, Infrascreen, benoit@infrascreen.com

Suivi de projet à l'OFEN :

Dr. Karin Söderström, Karin.söderström@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/502393-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.

Zusammenfassung

Landwirtschaftliche Gewächshäuser, die in kalten Klimazonen eingesetzt werden, haben einen hohen Energieverbrauch. Fast alle diese Gewächshäuser sind mit Energiesparschirmen ausgestattet, einer dynamischen, transparenten Abdeckung, die den Wärmeverlust durch Konvektion begrenzt. Dieser Bericht stellt die Ergebnisse eines Forschungsprojekts von Infrascreeen vor, in dessen Rahmen ein innovativer Energiesparschirm für Gewächshäuser entwickelt und getestet wurde, der eine Low-E-Eigenschaft aufweist, um den Wärmeverlust durch Strahlung zu begrenzen. Der Schirm wurde in zwei verschiedenen Gewächshauskontexten getestet, einem Orchideen- und einem Tomatengewächshaus.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Verwendung des Infrascreeens in beiden Kontexten zu erheblichen Energieeinsparungen im Vergleich zu den derzeit auf dem Markt erhältlichen Schirmen führte. Im Orchideengewächshaus betrug die Energieeinsparung 10 %, im Tomatengewächshaus 15 %.

Es wurde jedoch festgestellt, dass sich der Infrascreeen im Laufe der Zeit verschlechtert, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß in den einzelnen Experimenten. Das Unternehmen arbeitet derzeit an Verbesserungen, um dieses Problem zu beheben.

Eine wirtschaftliche Analyse der Tomaten- und Orchideenkulturen auf der Grundlage der Ergebnisse der Pilotprojekte hat gezeigt, dass die Investition in den Infrascreeen zu jährlichen Einsparungen bei den Energiekosten für gasbeheizte Gewächshäuser zwischen 11,7 CHF/m² und 13,5 CHF/m² führen kann. Die zusätzlichen Verkaufskosten für den Low-E-Teil des Schirmes sollten also bei etwa 5 CHF/m² liegen, damit die Marktchancen als gut angesehen werden können. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Infrascreeen ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung der Energieeffizienz in Gewächshäusern aufweist. Allerdings sind weitere Verbesserungen erforderlich, um seine langfristige Nachhaltigkeit zu gewährleisten. Die Firma Infrascreeen plant, das Produkt weiter zu verbessern und es zu industrialisieren, um die Produktionskosten für die Anwendung auf dem Markt wettbewerbsfähig zu machen.

Résumé

Les serres agricoles utilisées dans les climats froids sont hautement consommatrice en énergie. Ces serres sont quasi-toutes équipées d'écrans d'économies d'énergie, une couverture transparente dynamique limitant les pertes de chaleur par convection. Ce rapport présente les résultats d'un projet de recherche mené par la société Infrascreeen visant à développer et tester un écran d'économie d'énergie innovant pour les serres, qui intègre une propriété low-e de façon à limiter les pertes thermiques radiatives. L'écran a été testé dans deux contextes de serre différents, une serre d'orchidées et une serre de tomates.

Les résultats ont montré que l'utilisation de l'écran Infrascreeen a permis de réaliser des économies d'énergie significatives par rapport aux écrans actuels du marché dans les deux contextes. Dans le cas de la serre d'orchidées, l'économie d'énergie a été de 10%, tandis que dans le cas de la serre de tomates, elle a été de 15%.

Toutefois, il a été observé une dégradation de l'écran Infrascreeen au fil du temps, dans des proportions néanmoins différentes sur chacune des expérimentations. La société travaille actuellement sur des améliorations pour résoudre ce problème.

Enfin, sur la base des résultats issus des pilotes une analyse économique des cultures de tomates et d'orchidée a montré que l'investissement dans l'écran Infrascreeen peut amener à des économies annuelles en dépenses énergétiques pour des serres chauffées au gaz comprises entre 11.7 CHF/m² et 13.5 CHF/m². Les coûts de vente additionnels liés à la partie low e de l'écran devraient ainsi se situer autour de 5 CHF/m² pour que les chances sur le marché puissent être considérées comme bonnes.

En conclusion, l'écran Infrascreeen présente un potentiel significatif pour l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les serres. Cependant, des améliorations sont nécessaires pour assurer sa durabilité



à long terme. La société Infrascreen prévoit ainsi de continuer à améliorer le produit et à l'industrialiser pour amener les coûts de production compétitifs pour une application sur le marché.

Summary

Agricultural greenhouses used in cold climates are highly energy intensive. Almost all of these greenhouses are equipped with energy saving screens, a dynamic transparent cover that limits convective heat loss. This report presents the results of a research project conducted by Infrascreen to develop and test an innovative energy saving screen for greenhouses, which incorporates a low-e property to limit radiative heat loss. The screen was tested in two different greenhouse contexts, an orchid greenhouse and a tomato greenhouse.

The results showed that the use of the Infrascreen resulted in significant energy savings compared to current screens on the market in both settings. In the case of the orchid greenhouse, the energy saving was 10%, while in the case of the tomato greenhouse it was 15%.

However, degradation of the Infrascreen over time has been observed, albeit to different extents in each experiment. The company is currently working on improvements to address this issue.

Finally, based on the results of the pilots, an economic analysis of tomato and orchid crops showed that investment in the Infrascreen could lead to annual savings in energy costs for gas-heated greenhouses of between CHF 11.7/m² and CHF 13.5/m². The additional selling costs associated with the low-e part of the screen should therefore be around 5 CHF/m² for the market chances to be considered good. In conclusion, the Infrascreen has significant potential to improve energy efficiency in greenhouses. However, improvements are required to ensure its long-term sustainability. Infrascreen thus plans to continue to improve the product and industrialize it to make production costs competitive for market application.

Take-home messages

- Un écran d'économie d'énergie pour serre, fabriqué à l'aide d'un film transparent à faible émissivité (low-e), a démontré simultanément au cours de deux expérimentations indépendantes une réduction significative de la consommation énergétique d'une serre par rapport à un écran d'économie d'énergie standard du marché.
 - o Au cours de la période de test, dans une première expérimentation réalisée dans un compartiment de production de tomates équipé d'un système double-écran, nous avons constaté une réduction de la consommation énergétique de plus de 14,7%. Cependant, il est important de noter que le compartiment testé était plus chaud et plus sec que le compartiment de référence, ce qui signifie que l'économie d'énergie réelle est probablement supérieure à 15%, même si une valeur précise ne peut être déterminée.
 - o Dans une seconde expérimentation simultanément menée dans un compartiment de production d'orchidées équipé d'un triple écran, la réduction de consommation énergétique a dépassé les 10%.
 - o Il convient de préciser que dans les deux cas, ces valeurs ont été obtenues pendant une période de test limitée (décembre à février), néanmoins représentative de la période hivernale, sur laquelle la majeure partie de la consommation énergétique annuelle de la serre est réalisée.

- Enfin, nous avons observé qualitativement que cette réduction n'affecte ni la productivité ni la qualité de la production, bien que des détails supplémentaires sur cette observation soient nécessaires pour une compréhension complète.
- Nous avons montré qu'il est possible de produire un écran d'économie d'énergie basé sur un film low-e à l'échelle industrielle, capable de couvrir plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés. Toutefois, la durabilité de cet écran n'est pas encore satisfaisante. Des observations de dégradation sensiblement différentes ont été observées entre les deux essais, que nous attribuons à la différence de process de fabrication de l'écran utilisé et/ou à un problème de production (dépose du top coat). L'écran tissé montre une durabilité satisfaisante à cette étape de son développement alors que l'écran tricoté est apparu fortement dégradé à l'issue des tests conduits. De fait, dans les deux cas, une protection supplémentaire est nécessaire pour garantir sa résistance à long terme dans l'environnement d'une serre.



Table des matières

1	Introduction.....	8
1.1	Contexte et arrière-plan.....	8
1.2	Justification du projet.....	10
1.3	Objectifs du projet.....	11
2	Description des installations.....	11
2.1	Preuve de concept de 120 m ² sur une culture de tomate	11
2.2	Projets pilotes	12
2.2.1	Pilote de 2 x 10'000 m ² sur une culture de jeunes plants d'orchidée.....	12
2.2.1	Pilote de 2 x 800 m ² sur une culture de tomates.....	17
3	Procédure et méthode.....	20
3.1	Production du film à faible émissivité	20
3.2	Transformation du film à faible émissivité en écran de serre.....	21
3.2.1	Écran produit par tricotage	21
3.2.2	Écran produit par tissage.....	21
3.3	Tests de vieillissement et contrôle qualité	22
3.3.1	Résistance au feu et Norme NTA 8825.....	22
3.3.2	Test de vieillissement accéléré à la chaleur humide	22
3.3.3	Test aux ultra-violets	23
3.3.4	Test au brouillard salin	23
3.3.5	Test au soufre.....	25
3.3.6	Test de pliage / dépliage	25
3.3.7	Observation au microscope optique.....	26
3.3.8	Observation au microscope électronique à balayage	29
3.4	Mesure de la consommation énergétique et du microclimat.....	29
3.4.1	Serre de Conthey	29
3.4.2	Serre du producteur 1 et Agrotopia	29
3.4.2.1	Instrumentation de la serre du producteur 1	30
3.4.2.2	Instrumentation de la serre Agrotopia	32
3.5	Mesure de la productivité	33
4	Résultats et commentaire.....	33
4.1	Production du film.....	33
4.1.1	Dépose de l'empilement DMD pour la preuve de concept à l'agroscope de Conthey.....	33
4.1.2	Dépose de l'empilement DMD pour les pilotes du producteur 1 et Agrotopia	33
4.1.3	Dépose de la couche de protection.....	33
4.2	Test de vieillissement accéléré sur le film	34
4.2.1	Test au brouillard salin	34

4.2.2	Test au soufre.....	36
4.2.3	Autres tests.....	36
4.3	Production de l'écran.....	37
4.3.1	Pour la preuve de concept de Conthey.....	37
4.3.2	Pour le pilote Agrotopia.....	38
4.3.3	Pour le pilote chez le producteur 1.....	39
4.4	Test de vieillissement accéléré par pliage / dépliage.....	40
4.5	Observations et enseignements apportée lors de la preuve de concept de Conthey.....	43
4.5.1	Influence sur le climat et validation du potentiel d'économie d'énergie.....	43
4.5.2	Dégradation de l'écran.....	46
4.6	Observation Pilote producteur 1.....	46
4.6.1	Économie d'énergie sur la période considérée.....	46
4.6.1.1.	Comparaison des consommations d'énergies totales.....	46
4.6.1.1.	Analyse détaillée des consommations d'énergies.....	48
4.6.2	Productivité sur la période considérée.....	61
4.6.3	Mesure de la température du couvert végétal.....	61
4.6.4	Dégradation de l'écran.....	61
4.7	Observation pilote Agrotopia.....	67
4.7.1	Économie d'énergie sur la période considérée.....	68
4.7.2	Productivité sur la période considérée.....	72
4.7.3	Mesure de la température du couvert végétal.....	73
4.7.4	Dégradation de l'écran.....	73
4.8	Étude économique des résultats obtenus.....	77
5	Conclusions et résumé.....	78
6	Aperçu et mise en œuvre prochaine.....	78



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan

Contexte – Les écrans d'économie d'énergie sont un équipement commun pour limiter les pertes de chaleur par convection dans les serres agricoles en climat froid

Le développement des serres agricoles en climat froid

Depuis les années 50, les serres sont utilisées dans les climats froids (nord de l'Europe, Amérique du nord) pour produire des légumes frais. Ce marché, dont le berceau se trouve aux Pays-Bas, connaît une croissance soutenue portée par des vagues d'innovations technologiques¹, soutenant l'amélioration de la productivité et des marges², entraînant le passage sous serre d'un nombre toujours plus grand de cultures³.

Les serres de haute technologies déployées dans les climats froids représentent aujourd'hui 50,000 hectares, soit 500 millions de m². Elles produisent une partie significative des légumes frais (tomates, concombres, poivrons, aubergines) mais aussi des fraises et des baies, et de certaines fleurs (orchidées, gerbera, etc.).

Les écrans d'économie d'énergie

A la suite du choc pétrolier de 73, les serres chauffées des climats froids, connaissent une crise liée à l'augmentation des coûts de l'énergie. C'est à cette occasion que les écrans d'économie d'énergie deviennent un équipement standard de la serre.

Un écran d'économie d'énergie est une couverture vertical transparente fixée dans la serre en hauteur, juste en dessous du toit. L'écran est posé sur des tringles, ce qui permet à l'ordinateur climatique de le déployer, ou le replier à la demande. L'écran permet, lorsqu'il est déployé, de garder l'air chaud au niveau des plantes, assurant ainsi une limitation des pertes de chaleur par convection. On estime qu'en moyenne l'utilisation d'un écran permet à une serre d'économiser 20% d'énergie sur une année.

¹ Les vagues successives d'apport technologique sont la généralisation du chauffage dans les années 60/70, les écrans et ordinateurs climatiques dans les années 80, l'enrichissement CO₂ dans les années 2000, l'éclairage artificiel dans les années 2010. Actuellement, des technologies centrées autour de l'intelligence artificielle et de la robotique émergent.

² Les tomates furent les premières à passer sous serre dans les années 60. A l'époque, les serres fournissent un rendement approchant d'environ 20 kg/m². Aujourd'hui, une serre high-tech dans le nord de l'Europe produit 80 kg/m², et les producteurs les plus avancés montent à 120 kg/m²

³ La culture sous serre a débuté dans les années 50 avec la tomate, puis le concombre dans les années 70, le poivron dans les années 90, l'aubergine et les baies dans les années 2000, la fraise dans les années 2010. Aujourd'hui, une partie significative de la production de salade passe sous serre.

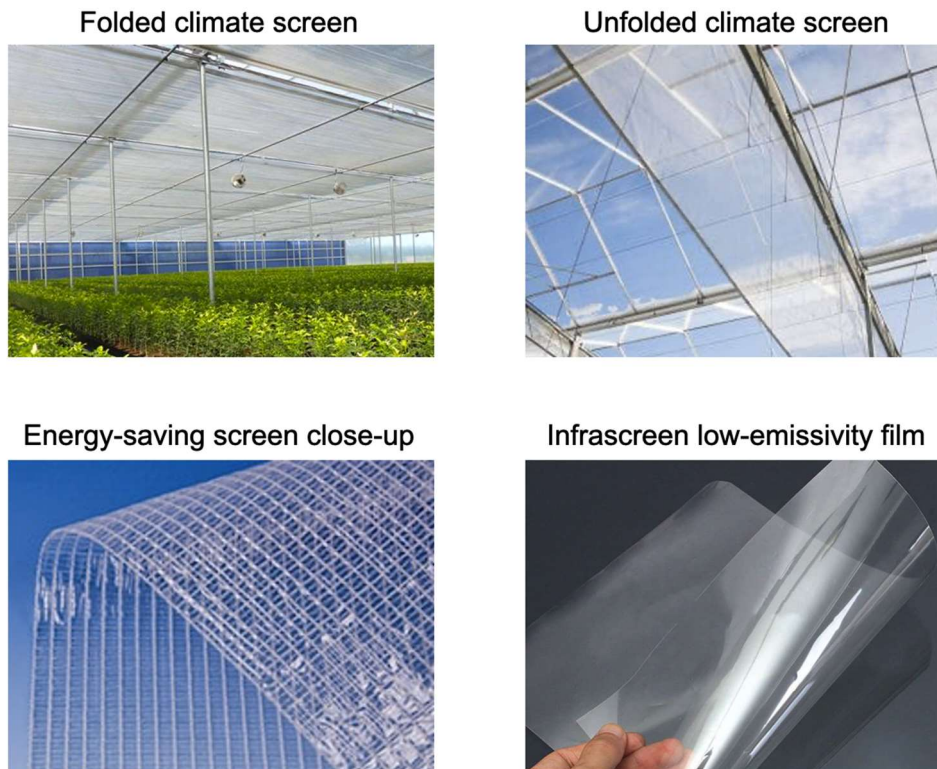


Figure 1 – Deux vues d'un écran dans une serre (haut), une vue gros plan d'un écran de serre (bas gauche), une vue gros plan du film infrascreen utilisé pour fabriquer les écrans (bas droite)

Le marché des écrans fait environ 100 millions de m2 annuels :

- Les écrans se dégradent dans les serres, et sont remplacées en moyenne tous les 7 ans (entre 5 et 10 ans). Le marché de remplacement représente environ 70 millions de m2
- La croissance du marché des serres représente environ 30 millions de m2 de nouvelles installations chaque année, qui s'équipent d'écrans.

Le Projet - Infrascreen apporte le low-e aux écrans d'économie d'énergie

Infrascreen est une start-up suisse établie en 2019 à Neuchâtel, spécialisée dans la conception de films transparents à faible émissivité (low-e) pour les serres agricoles chauffées. L'entreprise se consacre à la production de ces films innovants et à leur commercialisation auprès des fabricants d'écrans pour serres.

Un écran low-e pour serre doit combiner une bonne transmission directe et hémisphérique du PAR et du NIR (>70% en direct et >60% en hémisphérique), à une excellente émissivité (<0.3).

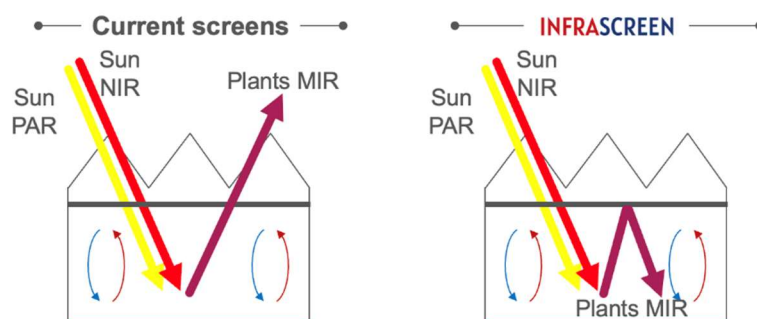


Figure 2 – Schéma de fonctionnement d'un écran standard du marché (gauche) et d'un écran infrascreeen (droite)

Selon des études de l'Université de Wageningen, l'emploi de films à faible émissivité pourrait faire grimper ce gain énergétique à environ 35%, soit une amélioration de c. 20% par rapport aux écrans actuels dans le marché. Cela présenterait deux avantages pour les producteurs sous serre :

- Une diminution de leur consommation énergétique dans des proportions significatives
- Une réduction de leurs émissions de CO₂ de 100 kg par m² par an, soit un potentiel de réduction de 50 millions de tonnes d'émissions de CO₂ à l'échelle du marché

La difficulté de la production d'un tel écran réside dans l'impossibilité d'utiliser les films du marché (ceux produits pour le bâtiment par exemple) afin de produire un écran de serre : ils ne présentent pas les spécifications requises, et ne résistent pas dans l'environnement agressif de la serre (UV, humidité importante, présence de produits chimiques corrosifs).

Pour relever le défi de la production d'un film adapté aux écrans de serre, Infrascreeen a dû surmonter plusieurs obstacles techniques, tels que le vieillissement dû aux UV, la résistance à la chaleur humide, la gestion du stress mécanique lié au pliage/dépliage et l'adaptation du film pour la fabrication d'écran destiné à être installés dans une serre. Ce travail a principalement été fait au travers de tests de vieillissement accélérés, puis par une production sur une ligne pilote capable de produire des films en quantité suffisante pour envisager leur conversion en écrans de serre.

1.2 Justification du projet

L'objectif principal de ce projet est de valider (i) la faisabilité de la production d'un film low-e et de sa transformation en écran, et (ii) sa performance comparativement aux écrans standard de marché dans des serres à une échelle pré-commerciale représentative.

Le projet s'est divisé en deux étapes clés.

1. La première étape a consisté en la production et l'installation d'un écran de 120 m² dans une serre expérimentale à l'Agroscope de Conthey. Cette phase a permis d'évaluer les performances du film dans un environnement contrôlé.
2. La seconde étape s'est appuyée sur la production de 20 000 m² de film pour la réalisation de deux écrans destinés à des projets comparatifs en Belgique et en Allemagne. Ces projets ont eu pour but de réaliser une étude de performance comparative, notamment en isolant les deux méthodes de fabrication d'écran disponibles sur le marché :

- a. Dans le premier projet, un écran fabriqué par tissage (le tissage représente environ 25% du marché) est comparé à un écran standard dans deux compartiments de 800 m² chacun, au sein d'une serre expérimentale cultivant des tomates.
- b. Le second projet, quant à lui, concerne la production d'un écran par tricotage (75% du marché). Il est comparé à un modèle de référence du marché dans deux compartiments de plus de 10 000 m² situés dans une serre commerciale dédiée à la production d'orchidées.

1.3 Objectifs du projet

Trois jalons importants ont été identifié :

1. Valider la production et la transformation en écran d'un film Infrascreeen à une échelle compatible avec un lancement commercial (plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés).
2. Valider et quantifier les économies d'énergie d'une serre équipé d'un écran infrascreeen
3. Valider la tenue dans le temps de l'écran Infrascreeen en conditions opérationnelles

2 Description des installations

Trois projets ont été déployés, dans trois sites et configurations différentes.

2.1 Preuve de concept de 120 m² sur une culture de tomate

L'Agroscope est un centre de recherche agronomique de référence en Suisse, et le site de Conthey a une spécialisation sur l'horticulture.

Deux serres identiques : une serre de test et une serre témoin ont été utilisé. Les deux serres indépendantes, présentent les caractéristiques suivantes :

1. Serre en verre, munie d'une aération faitière et de deux aérations latérales continues.
2. Un seul compartiment
3. Surface : 117 m²
4. Longueur : 14,65 m²
5. Largeur : 8 m²
6. Divisions en 4 sections (trois de 28,8 m² et une de 30,8 m²).

On notera que ce type de serre ne permet pas une comparaison quantitative des économies d'énergie lié à l'utilisation d'un écran Infrascreeen. Elles sont trop petites et les surfaces latérales non isolées significatives par rapport à la surface des écrans. Pour cette raison nous ne détaillerons pas ses spécificités techniques.

La serre témoin était équipée d'un écran d'économie d'énergie standard. Une seule des 4 sections de la serre de test était équipée d'un écran Infrascreeen. Cet écran a été tissé par société Texinov à partir de trois variantes de film Infrascreeen (Figure 3).

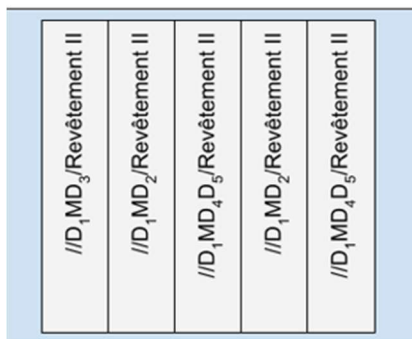


Figure 3 – Variantes du film infrascreeen utilisées dans la fabrication de l'écran déployé à Conthey

Le critère de variation est la couche diélectrique située entre la couche d'argent et le revêtement II (top coat). L'épaisseur de cette couche diélectrique a été ajustée pour avoir des propriétés de transmission dans le spectre photosynthétique comparables pour chacune des variantes. Les propriétés de réflexion, de transmission et d'absorption dans l'infrarouge thermique (5'000 – 50'000 nm) sont identiques.

2.2 Projets pilotes

2.2.1 Pilote de 2 x 10'000 m² sur une culture de jeunes plants d'orchidée

Le producteur 1 est une entreprise basée aux Pays-Bas. Elle est un des plus importants obtenteurs d'orchidées au monde. S'appuyant sur un savoir-faire en sélection variétale, l'obteneur d'orchidées produit des jeunes plants, en partant de la boutures in-vitro. Les jeunes plants sont ensuite vendus à des producteurs d'orchidées, qui portent les plantes à maturité.

Le producteur 1 possède plusieurs serres en Europe. Une des plus importantes se trouve en Allemagne, à la frontière avec les Pays-Bas. Cette serre permet de reproduire un climat tropical, en maintenant la culture à 28°C toute l'année à une humidité de 35%. Pour ce faire, le besoin de chauffage, très important, est estimé autour de 55 m³ de gaz/an/m². C'est une serre en verre de type Venlo avec une hauteur sous chéneau de 4,50 m et une surface de 110'000 m². Elle est divisée en 27 compartiments dont 21 sont dédiés à la culture, le reste étant lié aux installations techniques et autres infrastructures.

Deux compartiments identiques et indépendant ont été sélectionné pour faire un test comparatif. Le compartiment 6 a été sélectionné comme compartiment de référence et le compartiment 9 comme compartiment de test de l'écran Infrascreeen. Tous les deux ont bénéficié de la même régulation climatique, avec un équipement similaire (éclairage, écran, chauffage, système de culture). Ces deux compartiments sont chacun constitués de 7 allées (chapelles) de 9,60 m de large. Dans la longueur, chacune de ces chapelles est composée de 32 sections de 4,80 m. Chacun de ces compartiments fait donc 7 x 32 m x 9,60 m x 4,80 m = 10'321 m².

Les compartiments 6 et 9 sont équipés de trois étages d'écran. Par convention, l'étage 1 se trouve juste en dessous du toit, l'étage 2 est au milieu et l'étage 3 fait face à la culture.

Tableau 1 – Description de la configuration des écrans chez le producteur 1 entre le compartiment Référence et le compartiment Test

Étage	But	Compartiment 6 [Référence]	Compartiment 9 [Test]
1	Économie d'énergie, ombrage et occultation	Tempa 6562 by Svensson	Tempa 6562 by Svensson
2	Économie d'énergie et diffusion de la lumière	Harmony 2047 (diffuse) by Svensson	Harmony 2047 (diffuse) by Svensson
3	Économie d'énergie	LS 1347 by Svensson	Infrascreen

Les écrans peuvent être ouverts ou fermés indépendamment. On parle d'écran fermé quand l'écran est déployé et recouvre les cultures. Un écran ouvert est replié. En hiver, la stratégie typique d'économie d'énergie consiste à fermer les trois écrans de nuit, et ne fermer que l'écran d'économie d'énergie (étage 3) de jour.



Figure 4 – Photo prise dans la serre du producteur 1 entre les étages 2 et 3 du compartiment 9

A l'étage 1, l'écran Tempa 6562, vendu par la société Ludvig Svensson, est un écran dit d'ombrage. Il a pour fonction principale l'ombrage en été. Bien que ce ne soit pas sa fonction principale, il est également déployé de nuit pour favoriser les économies d'énergie.

Il est constitué, de façon alternative, de bandelettes en aluminium et de bandelettes en polyester.

Les bandelettes en aluminium ont deux effets : (i) elles réverbèrent le soleil en été et (ii) elles réfléchissent l'infrarouge thermique.

L'alternance avec des bandelettes transparentes en polyester permet de fermer l'écran tout en laissant passer un minimum de radiations solaires.



Figure 5 – Photo de l'écran d'ombrage Tempa 6562 D

A l'étage 2, l'écran Harmony 2047, vendu par la société Ludvig Svensson, est un écran dit diffusant. Il a pour fonction d'assurer une bonne diffusion de la lumière.

Bien que ce ne soit pas sa fonction principale, il est également utilisé pour les économies d'énergie la nuit.

Il est constitué de bandelettes diffusant la lumière à l'intérieur de la serre.



Figure 2 – Photo de l'écran diffusant Harmony 2047

A l'étage 3, l'écran LS 1347 vendu par Svensson est un écran dit d'économie d'énergie. Sa fonction principale est d'économiser l'énergie de jour comme de nuit.

Il est constitué de bandelettes transparentes en polyester (PET). Il réfléchit 21% des radiations thermiques et en absorbe 44%. Il en réémet donc 22% de part et d'autre de l'écran. Hiver comme en été, cet écran est principalement maintenu en position fermée. C'est l'écran contre lequel est comparé l'écran Infrascreeen.



Figure 6 – Photo de l'écran d'économie d'énergie LS 1347

L'écran Infrascreeen fabriqué par Infrascreeen est un écran constitué de bandelettes avec un revêtement optimisé pour être transparent à la lumière photosynthétique et réfléchissant aux infrarouge thermique.

2.2.1 Pilote de 2 x 800 m² sur une culture de tomates

Située en Belgique, à Roulers, Agrotopia est une serre de recherche qui appartient à Inagro. Inagro est une structure de recherche dans les secteurs agricoles et agro-alimentaires financée par la région de Flandre occidentale, qui possède un riche tissu horticole.

La serre Agrotopia a la particularité d'avoir été montée sur un toit. Elle est entrée en fonction en 2021.



Figure 7 – Photo prise à l'extérieur de la serre Agrotopia

Cette serre possède 10 compartiments de tests pour les légumes feuilles (salade) et “high wires” (tomates, concombre, ...). Ces compartiments sont cloisonnés entre eux et le climat de chaque compartiment peut être contrôlé de manière indépendante.

Une étude comparative a été réalisée sur les compartiments 21 et 22 sur une culture de tomate. Ces deux compartiments mitoyens ont la même surface (764 m^2). Le compartiment 22 est le compartiment de référence et le compartiment 21 est le compartiment de test de l'écran Infrascreeen. Tous les deux ont la même régulation climatique et sont équipés à l'identique (éclairage, écran, chauffage, système de culture).

On notera que contrairement aux compartiments chez le producteur 1 où les effets de bords peuvent être négligés, la surface des murs est significative et représente environ 30% de la surface cultivée : $247,5 \text{ m}^2$ de surface de mur contre 764 m^2 de surface des compartiments. Le climat sur les compartiments mitoyens et les allées logistiques suit le climat des compartiments 21 et 22 ce qui simule une serre infinie.

La culture de tomate a démarré le 17 Octobre 2022.

Les compartiments 21 et 22 sont équipés de deux écrans :

Tableau 2 – Description de la configuration des écrans chez Agrotopia entre le compartiment Référence et le compartiment Test

Étage	But	Compartiment 22 [Référence]	Compartiment 21 [Test]
1	Économie d'énergie et occultation	Noctis by Phormium	Noctis by Phormium
2	Économie d'énergie	PhormiTex Crystal by Phormium	Infrascreen

L'écran Noctis est constitué de bandelettes occultantes. Il a pour fonction d'occulter la pollution lumineuse de l'environnement extérieur de la serre liée à l'utilisation de l'éclairage artificiel pendant la nuit. Cet écran est uniquement utilisé de nuit, quand l'éclairage artificiel est actif. En journée, il est ouvert afin de ne pas obérer la transmission de la lumière. C'est un écran tissé (cf. 3.2).

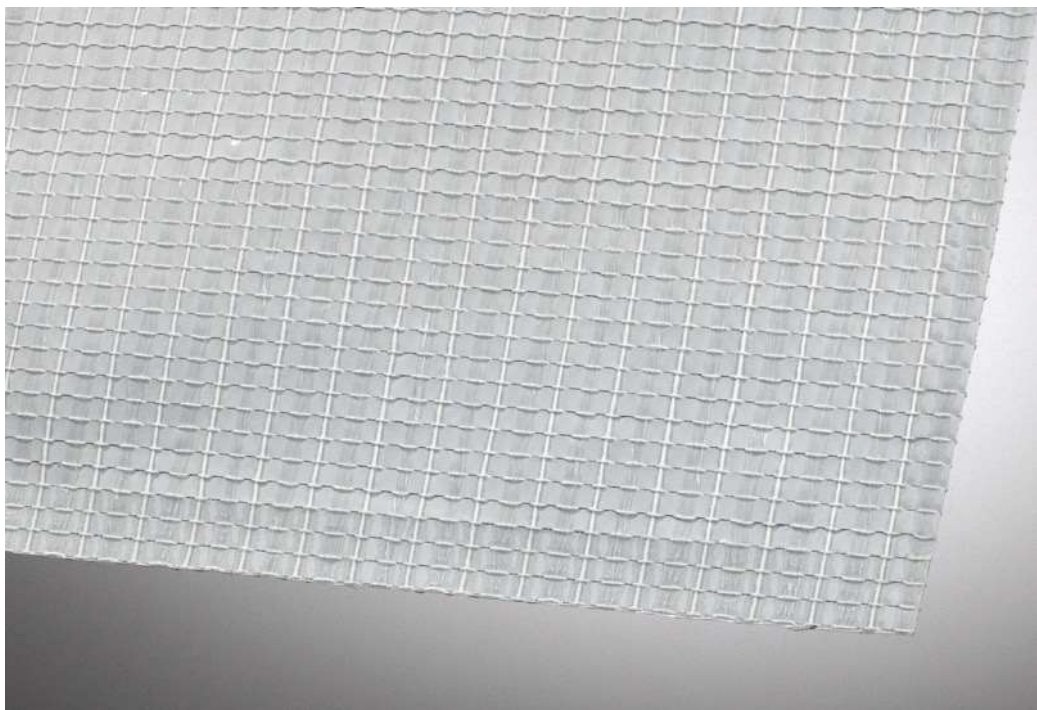


Figure 8 – Photo de l'écran d'occultation Noctis

L'écran PhormiTex Crystal est un écran d'économie d'énergie transparent, constitué de bandelettes transparentes en PET. C'est un écran tricoté (cf. 3.2).

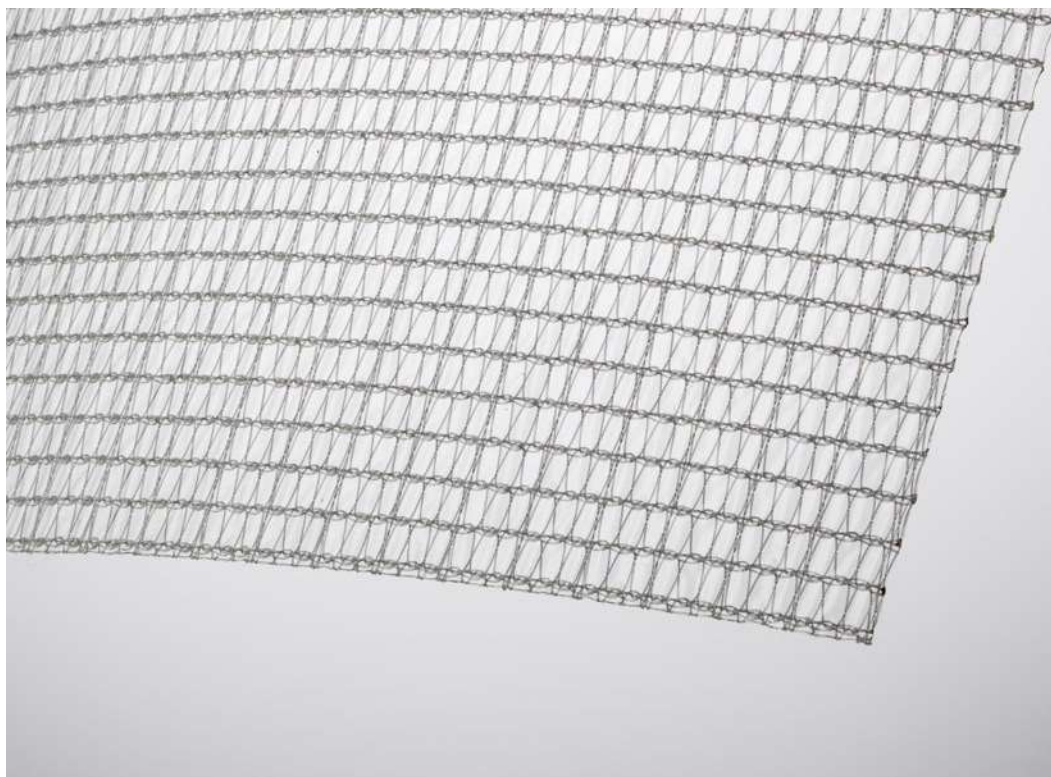


Figure 9 – Photo de l'écran d'économie d'énergie PhormiTex Crystal

On a utilisé le même film Infrascreeen pour les productions respectives de l'écran déployé chez le producteur 1 et de l'écran déployé chez Agrotopia.

3 Procédure et méthode

3.1 Production du film à faible émissivité

La production du film se fait en deux étapes : dans un premier temps un premier empilement de couches minces est déposé par pulvérisation cathodique, puis une couche de protection est déposée. Ces deux déposes se font sur des machines distinctes.

Le premier empilement de couches minces consiste en une couche fonctionnelle d'alliage d'argent entouré de deux couches de diélectriques. Une couche d'argent à faible épaisseur (< 20 nm) laisse passer le spectre photosynthétique [400 - 700 nm] mais reflète l'infrarouge thermique $> 5'000$ nm. Pour améliorer la transmission du spectre photosynthétique, on entoure la couche d'argent de couches à haut indice de réfraction (idéalement $> 1,9$ à 550 nm). Ces couches servent également de couche barrière afin d'empêcher l'oxydation de la couche d'argent. On peut également utiliser ces couches pour absorber certaines radiations indésirables (par exemple les UV).

Cet empilement est déposé en ligne sur un film en polyester compris en 20 et 25 microns d'épaisseur pour permettre par la suite d'être transformé en écran.

Après la dépose de cet empilement, une couche organique de protection d'environ 10 nm est déposée par-dessus en utilisant un second process et une seconde machine.

3.2 Transformation du film à faible émissivité en écran de serre

3.2.1 Écran produit par tricotage

Un écran de serre réalisé par tricotage est constitué de bandelettes de film Infrascreeen (numéro 11 sur Figure 10). Ces bandelettes font entre 4 et 6 mm de large et sont généralement découpé en ligne avant d'être inséré dans le maillage textile (numéros 12 et 13.a et 13.b sur Figure 10). Le fil utilisé est généralement en polyester.

Environ 80% des écrans du marché sont fabriqué selon ce procédé. Les société Ludvig Svensson et Ridder sont les principaux producteurs d'écrans tricotés.

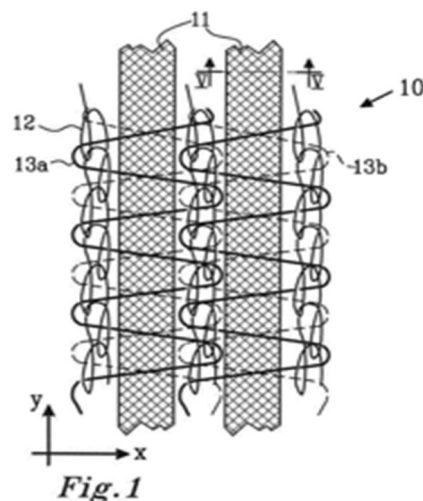


Figure 10 – Un écran tricoté est constitué de bandelettes de film en PET, PE avec ou sans revêtement (11) et de fils (12, 13a et 13b).

3.2.2 Écran produit par tissage

Dans le cas d'un écran produit par tissage, des bandelettes (numéro 11 sur Figure 11) en polyéthylène transparent aux radiations photosynthétiques et infrarouges viennent recouvrir les bandelettes (numéro 11 sur Figure 11) de film Infrascreeen de 4 à 6 mm de large pour les maintenir entre elles. En général, les bandelettes sont prédécoupées avant la fabrication de l'écran mais dans le cas de l'écran Infrascreeen, elles ont été découpées en ligne.

Comme pour un écran tricoté, du fil (numéros 18 et 19 sur Figure 11) permet de transférer l'humidité (vapeur d'eau) de part et d'autre de l'écran de serre. Le fil joue également un rôle dans la résistance au feu. Le fil utilisé dans un écran tissé est usuellement plus fin que le fil utilisé dans un écran tricoté, ce qui en diminue la perméabilité.

Enfin, contrairement aux écrans tricotés, le fil est accessoire pour assurer la rigidité de l'écran. Il est ainsi possible de tisser des écrans sans fil.

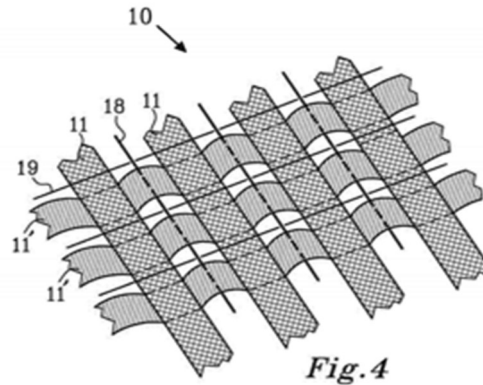


Figure 11 - Représentation schématique d'un écran réalisé par tissage. Des bandelettes du film Infrascreeen (11') sont recouvertes de bandelette en polyéthylène (11). Un fil textile (18) permet de transférer l'humidité de part et d'autre de l'écran.

Par rapport à un écran produit par tricotage, un écran tissé est généralement perçu comme plus solide, mais moins transparent.

3.3 Tests de vieillissement et contrôle qualité

Plusieurs observations au microscope sur des échantillons aléatoires ont été réalisées pour vérifier que l'écran produit étant sans rayures et/ou fissures.

3.3.1 Résistance au feu et Norme NTA 8825

Pour être installé dans une serre, les sociétés d'assurance exige que l'écran passe une norme spécifique pour évaluer sa propension à propager le feu en cas d'incendie. Cette norme (« NTA 8825 ») définit un protocole de test qui permet de classer les écrans en 4 classes. La classe 1 est exigée pour les serres avec un éclairage artificielle (risque plus important de départ d'incendie). Tant les caractéristiques intrinsèques du fil et du film utilisés, que la réaction propre de leur combinaison, influence l'inflammabilité de l'écran et le passage de cette norme.

3.3.2 Test de vieillissement accéléré à la chaleur humide

La serre est un environnement qui est souvent chaud et humide. L'humidité relative proche de l'écran avoisine souvent 90%.

Il est donc important de voir comment le film et le revêtement se comportent dans un environnement humide.

Le test à la chaleur humide est un test classique pour étudier le vieillissement accéléré d'un écran de serre. Il consiste à étudier le vieillissement d'un film dans une enceinte dans laquelle la température et humidité relative sont figées. Augmenter la température permet d'accélérer la vitesse de dégradation (Loi d'Arrhenius)

Les producteurs de films recommandent une température de 65°C et une humidité de 85%. Néanmoins, pour des raisons de mutualisation des chambres de tests au CSEM, nous avons effectué nos tests à 85°C et 85% d'humidité.

En pratique, le film est sorti à intervalles réguliers et une mesure de la transmission / réflexion dans le spectre solaire [400 - 2'500 nm] est réalisée. Ces mesures ont été réalisées au CSEM qui possède un

spectrophotomètre muni d'une sphère intégratrice permettant de prendre en compte le rayonnement diffus dans la mesure de la transmission et de la réflexion.

Un "tape test" normalisé (ISO2409) permet de confirmer l'adhésion de l'empilement Infrascreeen sur le film. En cas de délamination, une mesure XRF permet de comprendre la couche qui est partie.

3.3.3 Test aux ultra-violets

Des simulations réalisées par l'Université de Wageningen indiquent que l'économie d'énergie est plus importante lorsque le revêtement fait face au soleil. Dès lors il est important que l'adhésion du revêtement Infrascreeen reste bonne en présence d'UV. Précédemment à ce projet, plusieurs substrats ont été évalués par rapport à ce critère, qui s'est révélé très discriminant.

En exposition continue et directe (à l'extérieur), un écran est exposé à 100-160 kLy ou 1000-1600 kWh/m²/an. Cela correspond à 2000 - 3000 heures de test accéléré à 40W/m² par année d'exposition. Dans la pratique un écran n'étant pas toujours déployé, il n'est donc exposé qu'une partie de l'année, généralement uniquement en hiver et lors de journées moins ensoleillées. En outre l'écran n'est pas exposé directement mais sous un toit de verre. On considère par convention que la durabilité des écrans est validée avec 2000h de test accéléré à 40W/m² soit 1400h de test accéléré à 60W/m². Pour autant, nous avons testé film et écran sur des durées plus importantes pour nous donner une marge de sécurité.

Le test suit la norme EN ISO 4892-2:2013. L'échantillon de film ou d'écran à tester est fixé sur un porte échantillon noir dont la température est contrôlé (63 +/- 3°C) et reçoit 60 +/- 2 W/m² d'une lampe émettant dans le spectre ultra-violet entre 300 et 400 nm avec 0,51 W/(m².nm) de radiation à 340 nm. Pendant 102 minutes, l'atmosphère est sèche puis pendant 18 minutes l'atmosphère est humide. On répète les cycles jusqu'à atteindre le nombre d'heures que l'on s'est fixé.

Tableau 3 – Extrait des caractéristiques de la norme EN ISO 4892-2:2013

Cycle No.	Exposure period	Irradiance ^a		Black-panel temperature °C	Chamber temperature °C	Relative humidity %
		Broadband (300 nm to 400 nm) W/m ²	Narrowband (340 nm) W/(m ² .nm)			
4	102 min dry	60 ± 2	0,51 ± 0,02	63 ± 3	38 ± 3	50 ± 10 ^b
	18 min water spray	60 ± 2	0,51 ± 0,02	—	—	—

Nous utilisons la même caractérisation que pour le test à la chaleur humide.

3.3.4 Test au brouillard salin

De nombreuses serres horticoles sont situées sur des zones côtières dans le but de bénéficier d'une plus forte luminosité (le vent balaie les nuages) et d'une meilleure aération (en particulier en été). L'air marin est agressif (jusqu'à environ 30 Km des côtes) à cause du sel qu'il peut contenir. Les ions chlorures peuvent en effet attaquer la couche active M si elle est mal protégée ou attaquer la protection D au-dessus de la couche active M.

La norme exacte pour décrire le test est ISO 9227:2017.

Tableau 4 – Spécifications du test au brouillard salin selon la norme ISO 9227 :2017



Concentration de chlorure de sodium dans la solution à brumiser	50 ± 5 g/l
Température de la solution à brumiser	35°C +/-2°C
Humidité relative de l'enceinte	100%

Ce test a été sous-traité au laboratoire Dubois à la Chaux-de-Fonds qui dispose d'une enceinte Erichsen 608-1 avec une chambre de 400 litres (Figure 12).



Figure 12 – Photo du modèle 608-1 d'Erichsen

Nous avons testé nos films et écran sur des durées de 24, 48, 72 et 104 heures. Ce test est à chaque fois répété sur plusieurs échantillons.

Après avoir séjourné dans l'enceinte de brouillard salin, les échantillons sont rincés à l'eau distillée puis la corrosion est mesurée à l'œil nu selon l'échelle détaillée au Tableau 5.

Tableau 5 – Échelle de mesure de la corrosion à l'œil nu

1	Pas de corrosion
2	Trace de corrosion
3	Peu de corrosion
4	Corrosion modérée
5	Très corrodé

Pour chaque échantillon, cinq mesures d'émissivité sont également réalisées avant / après le test au brouillard salin en utilisant un émissiomètre « TIR 100 » proposé par la société Inglas. Les moyennes sont comparées.

3.3.5 Test au soufre

Dans beaucoup de serres, du soufre est brûlé quotidiennement pendant la nuit pour réduire le risque de développement fongique. Le soufre étant très corrosif pour l'argent, nous utilisons la combinaison d'un alliage d'argent en partie résistant à la corrosion au soufre, et d'une couche barrière recouvrant cet alliage d'argent.

Un échantillon de film est placé dans une solution de Sulfure de Sodium à 1% dont le PH est ajusté, soit à 7 (neutre), soit à 12 (basique).

L'impédance électrochimique (dénommée EIS) peut être déterminée à différentes fréquences et la mesure peut être répétée en fonction du temps étant donné la perturbation minimale de l'interface solide-liquide. L'avantage de la méthode est d'obtenir de multiples informations en fonction de la fréquence appliquée et considérée. On peut ainsi déterminer les propriétés électriques de la solution/électrodes à haute fréquence (kHz), les propriétés des diélectriques à des fréquences intermédiaires (Hz) et la résistance à la corrosion dans les basse fréquence (mHz). La versatilité de la technique nécessite cependant une expertise importante concernant l'interprétation des résultats d'impédance en fonction du temps et de la fréquence. Une analyse détaillée permet cependant de comprendre les mécanismes de corrosion en œuvre, mais on retiendra comme information importante qu'un film ayant une impédance élevée mesurée à basse fréquence possède une bonne protection à la corrosion.

3.3.6 Test de pliage / dépliage

Au cours de sa vie, un écran est régulièrement plié et déplié afin d'optimiser le climat dans la serre. On estime qu'un écran a une durée de vie de 7 ans et qu'il est plié / déplié quotidiennement. Il en résulte une estimation 2'800 cycles de pliage / dépliage sur la durée de vie d'un écran. Chaque cycle de pliage / dépliage peut potentiellement endommager le revêtement en créant des rayures ou des craques. Il est donc nécessaire de vérifier que l'écran fabriqué à partir du film Infrascreeen supporte ces cycles de pliages / dépliages répétés.

Nous avons répliqué à l'échelle 1:1 un mécanisme de pliage / dépliage d'écran de serre commandé par un automate afin de pouvoir multiplier les cycles (Figure 13).



Figure 13 – Photo du banc de test installé dans la serre de Conthey

En moyenne 420 cycles de pliage / dépliage sont effectués tous les jours. En 6 jours, le banc de test réalise autant de cycles de pliage / dépliage qu'un écran en connaîtra durant toute sa durée de vie.

A l'issue d'une suite de cycles de pliage / dépliage nous avons également réalisé des tests au brouillard salin (cf. supra) dans le but de révéler de potentiels défauts.

Une observation visuelle permet de se rendre compte des premiers dommages. Une analyse microscopique (focale) permet d'aller plus loin. Enfin, des mesures d'émissivité avant / après les cycles de pliage ont pu être réalisées.

3.3.7 Observation au microscope optique

La Figure 12 illustre la typologie des principaux défauts pouvant survenir sur le film. Hormis les "pinholes" dues à la qualité et à la propreté du substrat, tous les autres défauts sont induits par le processus de tissage et de tricotage. Les défauts les plus visibles sont des rayures ou "scratches" dont la taille est de l'ordre de quelques dizaines de micromètres. Elles sont visibles à l'œil nu et proviennent la plupart du temps de rouleaux bloqués en rotation. S'assurer d'avoir un processus fluide (machines en fonctionnement nominal et correctement entretenues) et un environnement propre (éviter les grosses poussières ou particules métalliques) permet d'en supprimer la plus grande part.

Certains défauts sont caractéristiques du procédé car ils sont périodiques. Le tissage et le tricotage sont des processus périodiques où le matériau de l'écran avance sur la chaîne de production et où des étapes séquentielles sont appliquées à plusieurs reprises. La période des défauts peut généralement être liée à la source du problème et permettre de l'identifier. Par exemple, nous avons

constaté une pliure qui apparaissait périodiquement sur les bords des bandelettes : “periodic side bends + cracking” qui était lié à un mouvement oscillant d'un élément du métier à tisser.

Les craques transversales ou « cross directional cracks » sont généralement induites par une tension élevée. Il s'agit d'un type de défaut bien établi qui est également utilisé pour caractériser les propriétés des couches minces. Ces craques apparaissent à environ 1 % d'étirement. Cela correspond à une tension dans le matériau au-delà de la pratique. Ce type de défaut est facilement éliminable.

Les vaguelettes ou wavelets sont causées par la chaleur, ce qui les rends spécifiques au process de fabrication par tricotage. En effet, l'écran est chauffé en fin de process pour fixer les nœuds des fils et éviter une future déformation induite par la chaleur pendant la durée de vie de l'écran. Il a été observé qu'un chauffage au-dessus de 75°C pendant une durée de plusieurs minutes provoque ce type de défauts. Baisser la température a résolu ce problème.

Enfin, des fissures peuvent être créées lorsque le matériau est plié au cours du processus (« major cracks from bending »). Il a été constaté que la formation de ces fissures se produit avec un rayon de courbure plus petit et plus fréquemment si le revêtement se trouve sur le côté concave du film lorsqu'il est plié. Le réglage de divers paramètres et le soin particulier apporté à la configuration du métier à tisser résolvent ce problème.

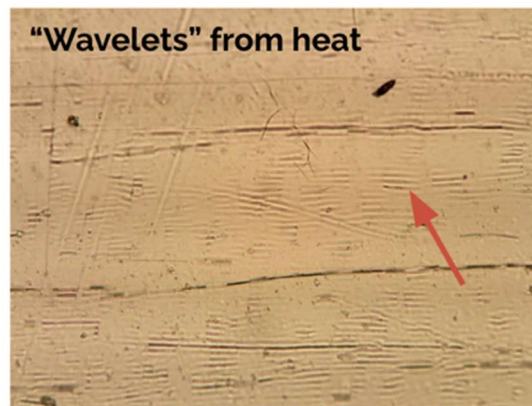
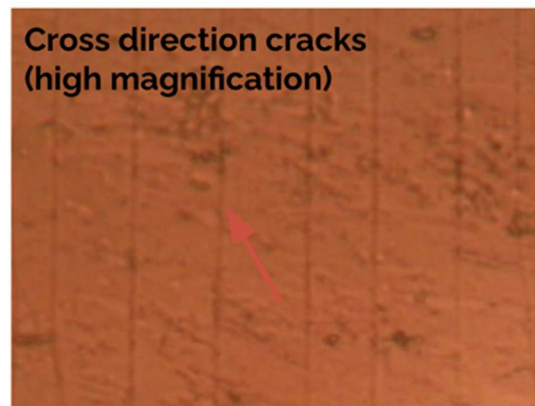
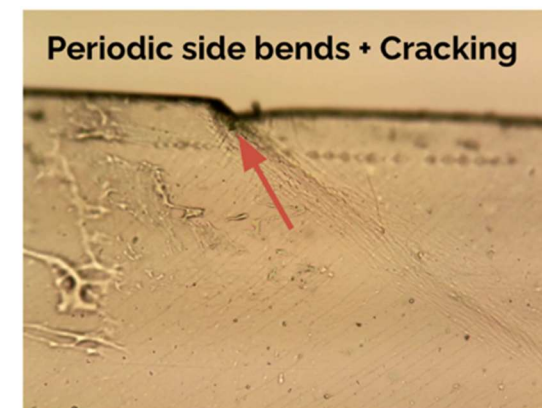
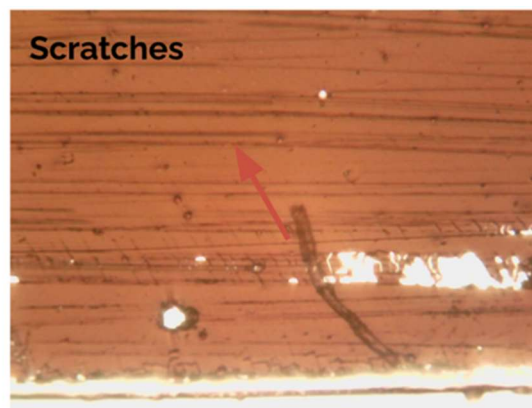
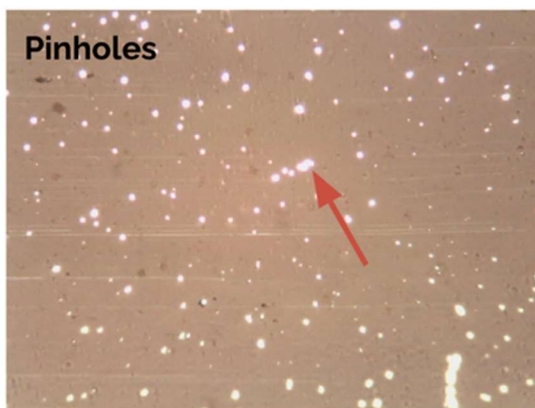


Figure 14- Défauts possibles survenant au cours du processus de transformation du film en écran

3.3.8 Observation au microscope électronique à balayage

Exceptionnellement, nous avons eu recours au microscope électronique afin de visualiser des craques indétectables au microscope optique. Une analyse EDX nous a également permis de caractériser les couches après des craques ou des suspicions de corrosion.

3.4 Mesure de la consommation énergétique et du microclimat

3.4.1 Serre de Conthey

Le suivi de culture et du climat de la serre a été mené par les équipes de l'Agroscope.

Afin de suivre l'effet des écrans sur la température des plantes (ou de la serre) aussi bien de jour que de nuit, des caméras IR ont été placées sous les écrans et en direction de la végétation (Figure 15).

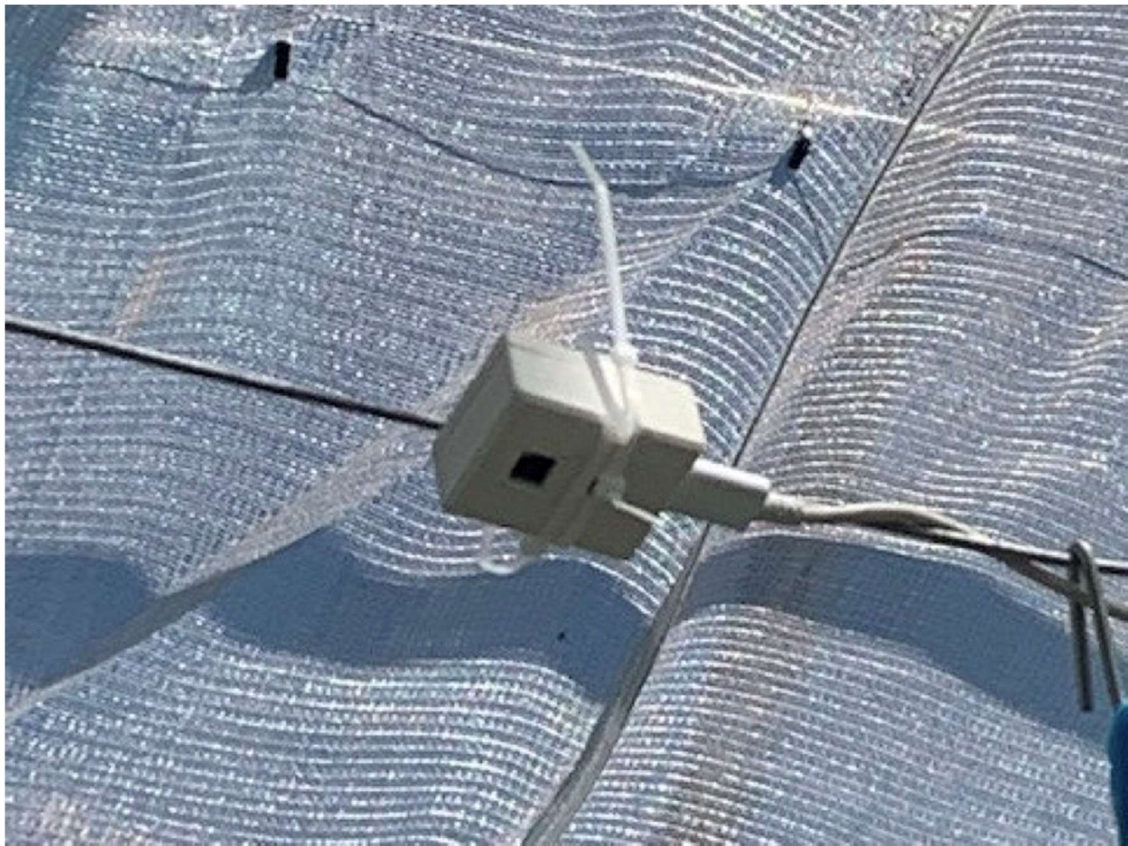


Figure 15 – Caméra IR installé dans la serre de Conthey

Par ailleurs, des capteurs de température, d'humidité relative et de transmission du visible permettent de mesurer (et de piloter) le climat dans la serre.

3.4.2 Serre du producteur 1 et Agrotopia

La supervision des tests conduits chez le producteur 1 et Agrotopia a été confiée à un consultant extérieur, le Dr. Peter Van Weel. Le Dr. Peter Van Weel est un spécialiste reconnu du contrôle climatique sous serre. Après une carrière de 35 années à l'université de Wageningen, il a co-écrit le livre « Plant Empowerment, the basic principles », une publication de référence dans le monde des serres, qui a amené à la création de la Plant Empowerment Foundation et Plant Empowerment Academy, pour laquelle le Dr. Peter Van Weel réalise de façon régulière des interventions (colloques, master classes, etc.).



La température moyenne dans chaque niveau de tuyau est calculée par l'ordinateur climatique toutes les 5 minutes pour chacun des deux compartiments (Référence et Infrascreeen). A partir de ces températures, il est possible de calculer une consommation d'énergie en se reportant aux caractéristiques des tuyaux (diamètres, nombres, émissivité) et à la température de l'air de la serre.

3.4.2.1. Instrumentation de la serre du producteur 1

Pour mieux comprendre l'impact de notre écran sur l'économie énergétique et sur la culture nous avons installé des capteurs pour mesurer et comparer :

7. La température foliaire (Figure 16)
8. La température de l'air (Figure 16)
9. L'humidité (Figure 16)
10. Les radiations thermiques entrantes / sortantes (Figure 17 – Pyrnometer)
11. Les radiations solaires entrante / sortante (Figure 17 – Pyrometer) en dessous de la culture
12. La température de chacun des écrans (Figure 18)
13. L'humidité relative et la température au-dessus de chaque niveau d'écrans (Figure 19).



Figure 16 – Photo du capteur de mesure de la température foliaire / de la température de l'air et de l'humidité relative.



Figure 17 – Photo du capteur de mesure des radiations thermiques / solaires entrantes / sortantes

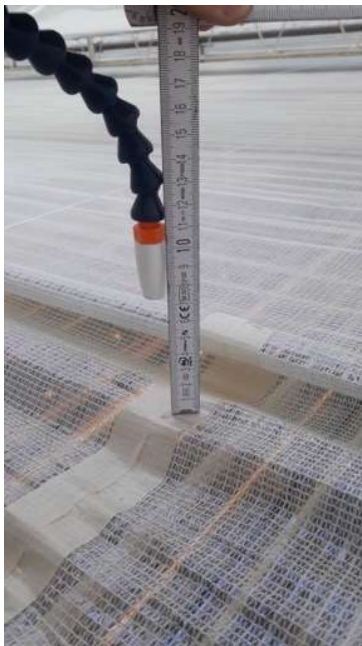


Figure 18 – Photo du capteur de mesure de la température de l'écran Infrascreeen



Figure 19 – Photo du capteur de mesure de la température / humidité / radiations au-dessus de l'écran Infrascreeen



Ces capteurs achetés aux sociétés Sigrow et Kipp and Zonen transmettent en temps réel leurs mesures à la plateforme Sigrow.

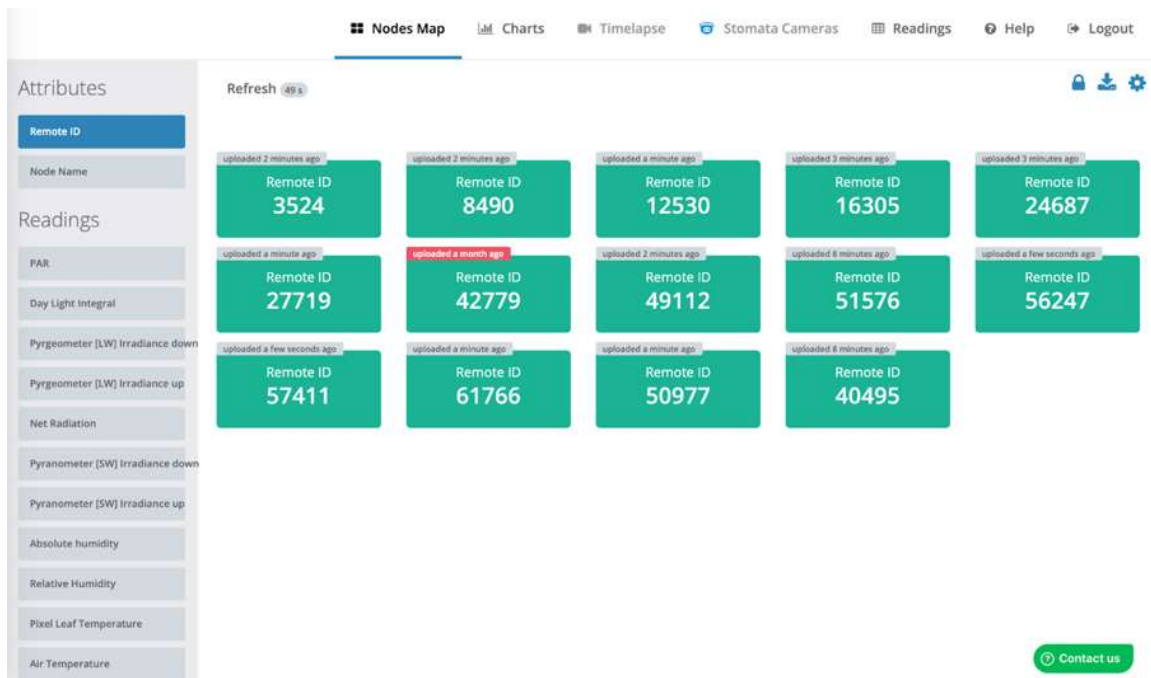


Figure 20 – Capture d'écran de la plateforme Sigrow

3.4.2.2. Instrumentation de la serre Agrotopia

Une instrumentation similaire à la serre du producteur 1 a été mise en place dans la serre Agrotopia. En plus des mesures décrites ci-dessus, nous avons également mesuré la température et la conductivité de la zone racinaire.



Figure 21 – Photo du capteur de mesure de la température foliaire



Figure 22 – Photo du capteur de mesure de la température de l'écran 2 dans le compartiment 21



Figure 23 – Photo du capteur de mesure de la température de l'écran 1 dans le compartiment 21



Figure 24 – Photo du capteur de mesure des radiations thermiques / solaires entrantes / sortantes

3.5 Mesure de la productivité

Dans la serre Agrotopia, une récolte de tomate était effectuée chaque semaine dans chaque compartiment (21 et 22). Le poids de la récolte était systématiquement mesuré.

Pour les orchidées, nous avons demandé aux équipes du producteur 1 une appréciation qualitative de la productivité et de la qualité, en ligne avec les spécificités de la culture d'orchidées.

4 Résultats et commentaire

4.1 Production du film

4.1.1 Dépose de l'empilement DMD pour la preuve de concept à l'agroscope de Conthey

L'empilement DMD a été déposé entre le 4 et le 11 mai 2022. Nous avons utilisé une machine de pulvérisation cathodique pilote avec des vitesses de déposition inférieure à 0.50 m/min, sur une largeur de 650 mm. Cela rend le coût économique de la déposition prohibitive pour une implémentation à large échelle mais permet la production de film produit pour la production de l'écran utilisé pour la preuve de concept à l'agroscope de Conthey. Pour cet essai, trois variantes de couches recouvrant la couche d'argent ont été évaluées.

4.1.2 Dépose de l'empilement DMD pour les pilotes du producteur 1 et Agrotopia

L'empilement DMD a été déposé entre le 24 octobre et le 18 novembre 2023. Nous avons changé de machine pour la dépose du premier empilement de couche et avons travaillé avec une société industrielle possédant une ligne de production plus large : 1'500 mm Vs 650 mm et plus rapide : nous réussit à monter la vitesse à plus de 2.80 m/min. L'augmentation de la vitesse par un facteur 13 ($2.8/0.5 \times 1'500/650$) sur la vitesse de déposition a permis de réduire très significativement le coût au mètre carré de la pulvérisation cathodique, malgré le surcoût horaire de l'utilisation d'une machine industrielle.

4.1.3 Dépose de la couche de protection

Pour la dépose de la couche de protection (« revêtement II »), la même machine a été utilisée pour la preuve de concept et les pilotes. Cette machine est une machine prototype qui accepte uniquement des rouleaux de 500 mm de large, obligeant à une opération de conversion du film obtenu à l'étape précédente. En revanche, pour les pilotes Agrotopia et plus encore chez le producteur 1, plusieurs



problèmes lors de la dépose de la couche de protection ont impacté significativement la qualité du film avec des sections de +/- 5.0m tous les 40 m qui ont été très endommagés.

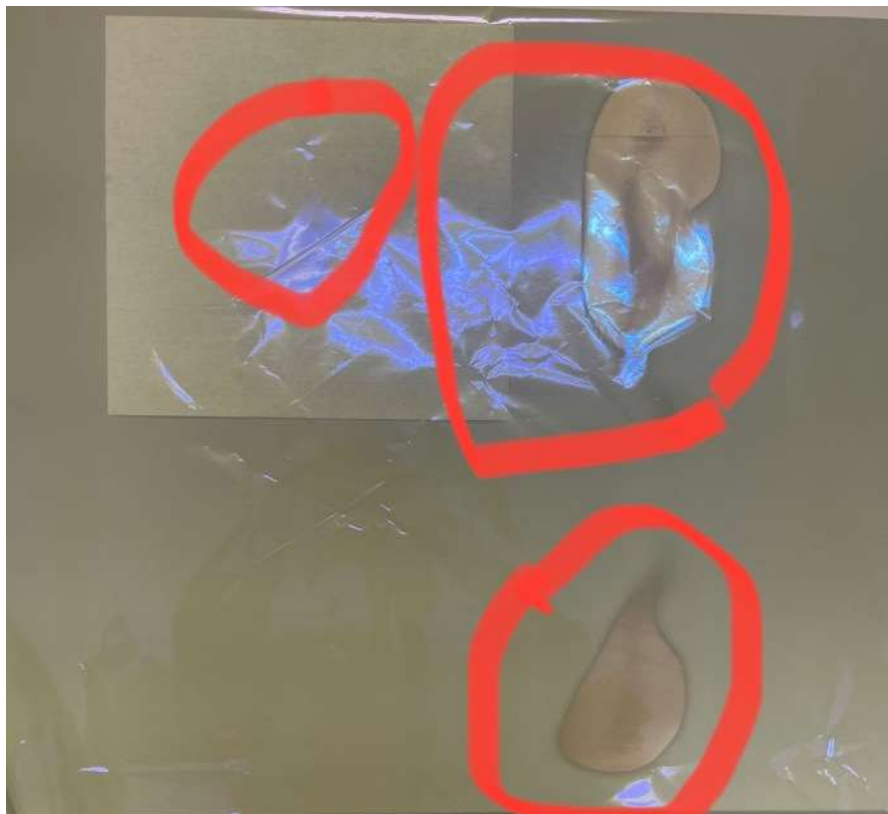


Figure 25 – Section du film endommagé lors de la dépose de la couche de protection

Par ailleurs nous nous sommes rendu compte à postériori (après la production de l'écran et son installation dans les différents pilotes) que la machine avait une fuite qui a eu un impact sur la qualité de la couche déposée.

4.2 Test de vieillissement accéléré sur le film

4.2.1 Test au brouillard salin

Le test au brouillard salin permet d'évaluer rapidement et à moindre coût l'efficacité de la protection apportée par la couche de protection. Sans couche de protection et quel que soit le diélectrique recouvrant la couche fonctionnelle, on observe un niveau de corrosion égale à 5 en moins de 3h.

Tableau 6 – Exemple de mesure issu du test au brouillard salin

Date	Durée	Emissivité moyenne avant le test	Emissivité moyenne après le test	Niveau de corrosion après le test
28/10/2022	72h	0.098 +/- 0.02	0.108 +/- 0.02	2

Les photos ci-dessous montrent le résultat du test au sel avant/après l'optimisation des paramètres de dépôt de la couche de protection.

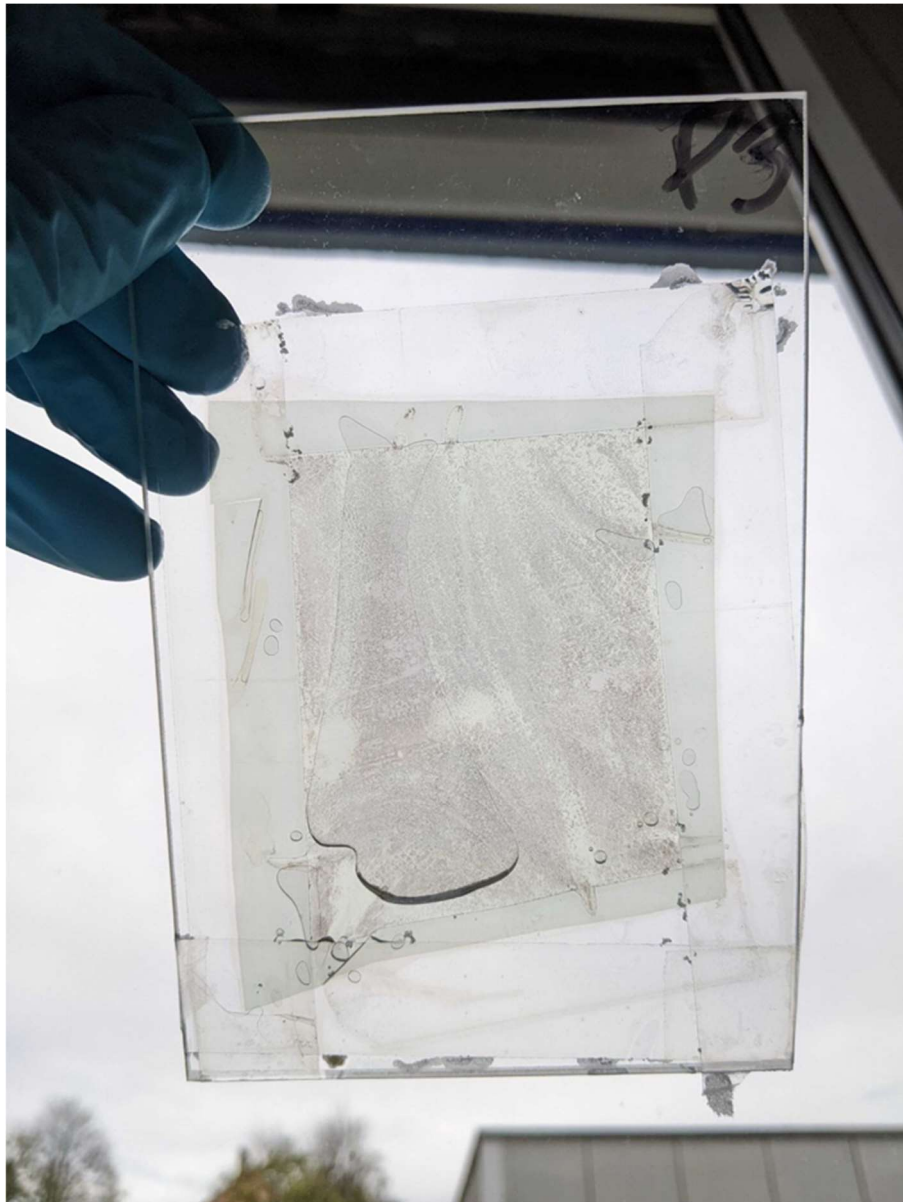


Figure 26 – Photo de résultat du test au brouillard salin – Paramètres non optimisés – Après 72h, le niveau de corrosion est de 4

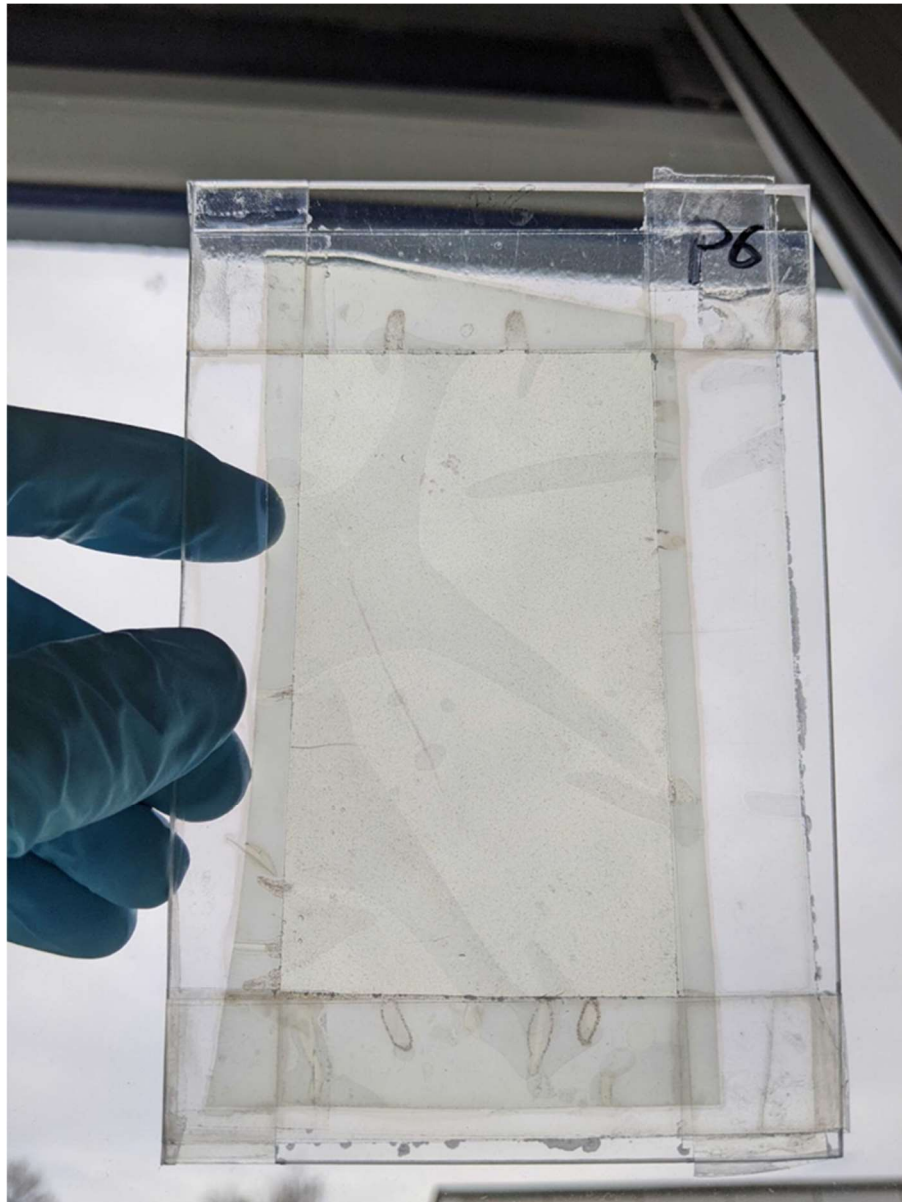


Figure 27 – Photo de de résultat du test au brouillard salin – Paramètres optimisés – Après 72h, le niveau de corrosion est de 2

4.2.2 Test au soufre

Le test au soufre nous a aidé à identifier la meilleure couche protectrice parmi les trois variantes déposées lors la preuve de concept. Il nous a par la suite aidé à optimiser les paramètres de déposition pour la variante retenue. Il nous a également permis d'optimiser la composition de l'alliage d'argent utilisé pour la couche fonctionnelle.

4.2.3 Autres tests

Des tests à la chaleur humide et au UV ont été réalisés sur les différentes variantes de film produites pour la preuve de concept. Ils ont confirmé les résultats donnés par les tests au soufre.

Pour le pilote, nous n'avons pas fait de test à la chaleur humide pour des questions de gestion des impératifs de calendrier.

4.3 Production de l'écran

4.3.1 Pour la preuve de concept de Conthey

Le tricotage de l'écran a eu lieu entre le 02 et le 06 mai 2022. L'écran produit pour la preuve de concept a été réalisé par la société Texinov. Texinov est un producteur généraliste de tissu technique tricotée possédant une expérience dans la production d'écran de serre.

Malgré un travail d'optimisation et des prétests, l'écran produit pour l'agroscope de Conthey était défectueux. Une observation à l'œil nu permet de se rendre compte que toutes les bandelettes ne sont pas orientées de manière identique. Après vérification, certaines ont le revêtement au-dessus, d'autres en dessous (environ 50% / 50%). Cela a relativement peu d'impact sur les performances de l'écran et il est effectivement classique que des bandelettes puissent se retourner pendant le processus de tricotage mais normalement on y remédie très vite. Sur les photos ci-dessous les bandelettes avec une flèche bleu ont le revêtement dans le même sens.



Figure 28 – Photo 1 de l'écran produit par Texinov

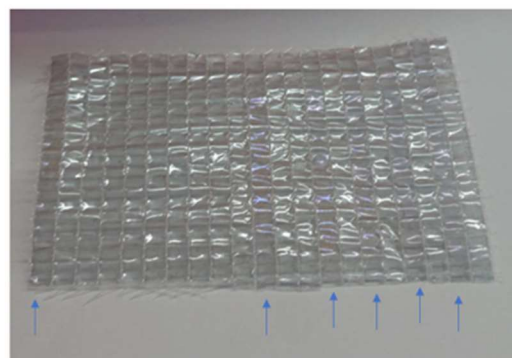


Figure 29 - Photo 2 de l'écran produit par Texinov

Par ailleurs, après analyse détaillées, des superpositions de deux bandes (cousues ensemble) ont été observées. Une observation au microscope optique a également permis d'observer de nombreuses rayures et craques au niveau du revêtement Infrascreeen. Une observation au microscope confocale et au microscope électronique au balayage (SEM) a enfin permis une caractérisation plus fine.

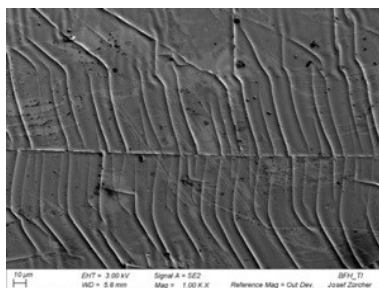


Figure 30 – Variante 1, grossissement 1000

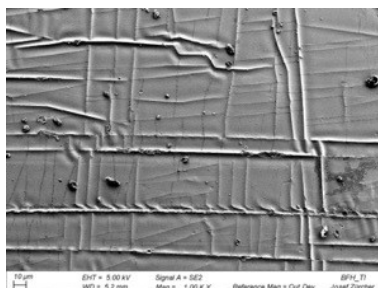


Figure 31 – Variante 2, grossissement 1000

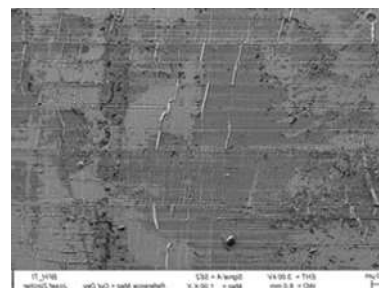


Figure 32 – Variante 3, grossissement 3



Si la variante 3 semble à priori au SEM la moins abîmée, c'est la variante 1 qui s'est avérée la plus robuste suivie par la variante 3 puis la variante 2. Voir plus bas la partie sur la dégradation de l'écran.

4.3.2 Pour le pilote Agrotopia

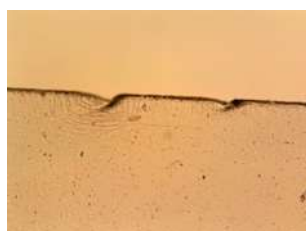
L'écran Agrotopia a été réalisé par la société IFG Cresco. IFG Cresco est une société leader dans la production d'écran de serre. Elle produit ses écrans par tissage (« weaving »).

Fort de l'expérience acquise sur la production de l'écran Texinov, un travail important a été effectué sur plusieurs itérations, pour identifier les origines du stress mécanique sur le film Infrascreeen lors de la production de l'écran et l'éliminer.

Itération I, suppression des fissures majeures périodiques dues à la flexion.



Itération II, suppression des flexions latérales périodiques, avec propagation des fissures



Itération III, seulement de rares flexions latérales, avec propagation mineure des fissures.



Figure 33 – Photos des analyses réalisées sur les films au cours des différentes itérations

Des modifications sur la machine ont été nécessaires et de nombreux paramètres ont dû être optimisés.

Un test au sel sur la dernière itération de l'écran tricoté a été réalisé pour confirmer que le tricotage n'a pas endommagé la protection de la couche active :

Tableau 7 – Résultat du test au sel réalisé sur la dernière itération de production de l'écran Agrotopia

Date	Durée	Emissivité moyenne avant le test	Emissivité moyenne après le test	Niveau de corrosion après le test
18/10/2022	24h	0.22 +/- 0.02	0.26 +/- 0.01	1

Sur le test de l'inflammabilité, l'écran pour le pilote Agrotopia n'a pas passé la classe 3. Pourtant, lors de tests préparatoires, des versions de travail passaient la Classe 1. Nous avons donc été tout à fait étonnés par ce résultat, qui reste à ce jour inexpliqué.

Néanmoins, cela n'a pas posé de problème pour l'installation, le centre de recherche Agrotopia ayant l'autorisation de ses assureurs, à des fins de recherche, d'installer des écrans qui n'ont pas passé les normes anti-feu.

L'écran Infrascreeen a une moins bonne transmission du spectre photosynthétique que l'écran de référence : < 65% Vs 72% mais une meilleure réflectivité dans l'infrarouge thermique : 80% Vs 21%.

Tableau 8 – Caractéristiques comparées de l'écran Infrascreeen et de l'écran de référence

	Transmission hemisphérique	Ombrage hemisphérique	Emissivité Réfexion moyen infrarouge
PhormiTex	~72%	~28%	~(44% 21%)
Infrascreeen	< 65%	?	20% 80%

L'écran a été installé chez Agrotopia entre le 10 et le 19 Janvier 2023. L'ordinateur climatique a été reprogrammé le 23 Janvier. Cette dernière date a été retenue pour le début de la comparaison énergétique.

4.3.3 Pour le pilote chez le producteur 1

L'écran pour le pilote chez le producteur 1 a été produit par un producteur d'écran de référence par tricotage (« Knitting ») entre le 14 Novembre et le 06 Décembre 2022. Il s'agit du même procédé de fabrication d'écran qu'utilisé par Texinov pour l'écran de Conthey. Comme pour l'écran Agrotopia, plusieurs itérations ont été nécessaire produire sans défauts apparents au microscope.

Un test au sel a été réalisé sur la dernière itération de l'écran tricoté pour confirmer que le tissage n'a pas endommagé la protection de la couche active :

Tableau 9 – Résultats du test au sel réalisé sur la dernière itération de l'écran tricoté

Date	Durée	Emissivité moyenne avant le test	Emissivité moyenne après le test	Niveau de corrosion après le test
28/10/2022	72h	0.30 +/- 0.05	0.37 +/- 0.04	2

Sur le test de l'inflammabilité, l'écran destiné au producteur 1 ne passait pas initialement la classe 2. En changeant de fil pour le tricotage, on a pu fabriquer un écran passant la classe 2. Cela s'est fait au détriment des caractéristiques de l'écran obtenu (transmission dans le visible, et propriétés de réflexion de l'infrarouge thermique), le fil étant davantage « chevelu ».

Une dérogation auprès de l'assureur du producteur 1 a été obtenue pour installer un écran classe 2 dans une serre avec un éclairage artificiel.

L'écran Infrascreeen est moins transparent au spectre photosynthétique que l'écran de référence LS 1347 : 72% Vs 56%. La face revêtement réfléchit à 70% les radiations thermiques Vs 21% pour un LS 1347.



Tableau 10 – Caractéristiques des différents écrans installés dans la serre du producteur 1

	Transmission hémisphérique (Méthodologie Svensson)	Ombrage (Méthodologie Svensson)	Emissivité Réflexion moyen infrarouge
LS 1347	72%	28%	44% 21%
Infrascreen	56%	44%	30% 70%

Comparé à l'écran Infrascreen produit pour le pilote Agrotopia, la transmission du spectre solaire et la réflexion dans l'infrarouge lointain est inférieure. Nous attribuons en partie cette différence au choix du fil utilisé par le producteur de l'écran tricoté qui a permis de passer la norme antifeu NTA 8825 Classe II. Des prétests avec un fil standard sur un écran tissé avait donné des propriétés dans l'infrarouge thermique comparable à l'écran Agrotopia.

L'écran Infrascreen a été installé entre le 12 et le 16 décembre 2022 chez le producteur 1

4.4 Test de vieillissement accéléré par pliage / dépliage

Les écrans réalisés par un procédé de tricotage et de tissage optimisé ont été installés sur le banc d'essai de pliage dépliage dans la serre de Conthey. Les bandes noires (Figure 34) sont placées pour découper des échantillons et les envoyer pour un test de sel de vieillissement accéléré après un nombre différent de cycles de pliage.

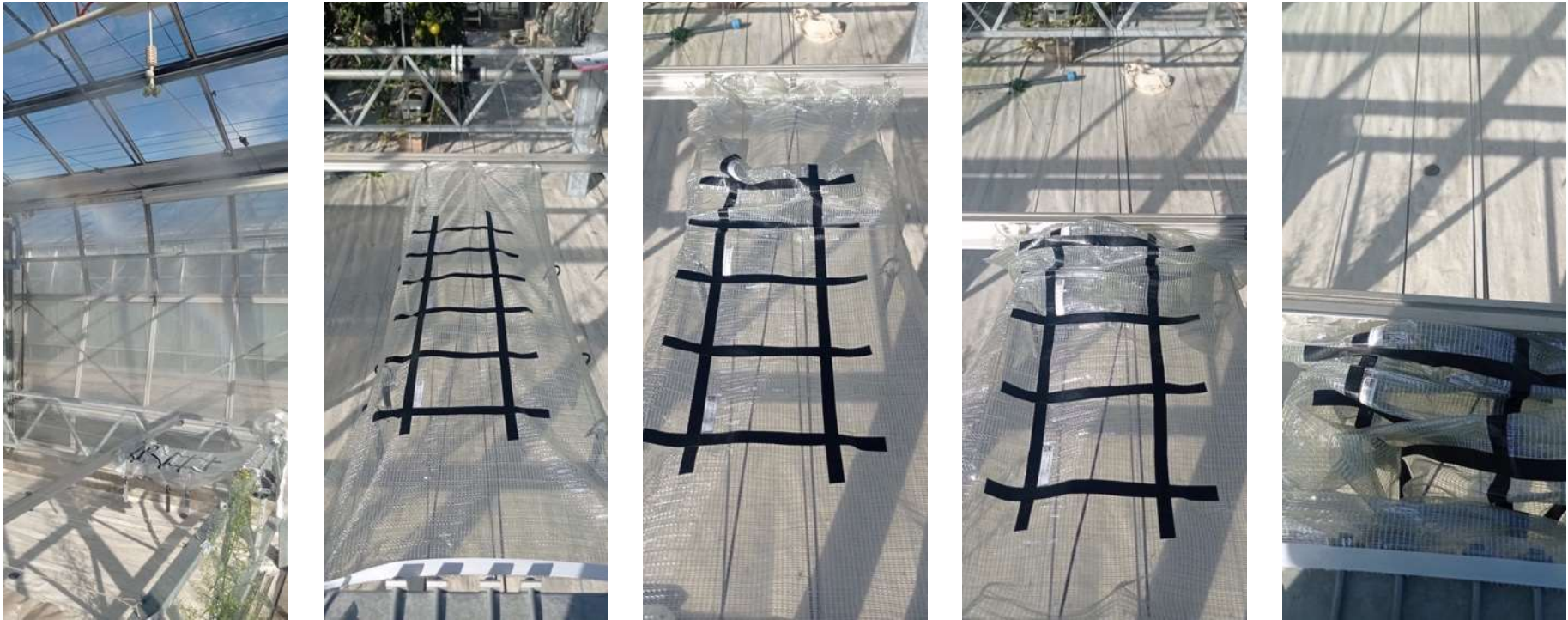


Figure 34 – Photos de l'écran tissé optimisé sur le banc de test



Des échantillons ont été prélevés après que l'écran ait été plié 50, 100 et 850 fois (un cycle de pliage dure environ 90 secondes). Pour rappel, en cours d'utilisation, un écran est généralement ouvert/fermé une fois par 24h. Soit environ 400 fois par an.

La microscopie des échantillons montre que dans certaines zones des fissures apparaissent à partir du pliage. Après 50 et 100 cycles, aucune apparition significative de fissures n'a été observée. A 850 cycles, un certain nombre de fissures apparaissent là où l'écran a tendance à se plier. L'emplacement de la flexion dépend des poids placés sur les bords de l'écran. On a pris soin de reproduire une flexion similaire sur la longueur de l'écran pour que chacun des échantillons prélevés soit comparable. Il n'est pas simple d'effectuer une mesure quantitative de l'apparition de fissures car l'emplacement des fissures est distribué de manière aléatoire.



Figure 35 – Apparition de pliures et de fissures associées lors des cycles de pliage (photo 1)



Figure 36 – Apparition de pliures et de fissures associées lors des cycles de pliage (photo 2)

Après 850 cycles de pliage / dépliage, un test au brouillard salin de 24h a été réalisé sur un écran dont le tissage a été optimisé et aucun changement d'émissivité significatif a été relevé.

Tableau 11– Liste des tests au brouillard salin après le test de pliage / dépliage

Date	Durée	Emissivité moyenne avant le test	Emissivité moyenne après le test	Niveau de corrosion après le test
11/11/2022	24h	0.32 +/- 0.03	0.33 +/- 0.02	1

Ce qui est confirmé par une observation au microscope, l'écran tissé et plié montre quelques défauts ponctuels mais pas de corrosion malgré le test au brouillard salin :

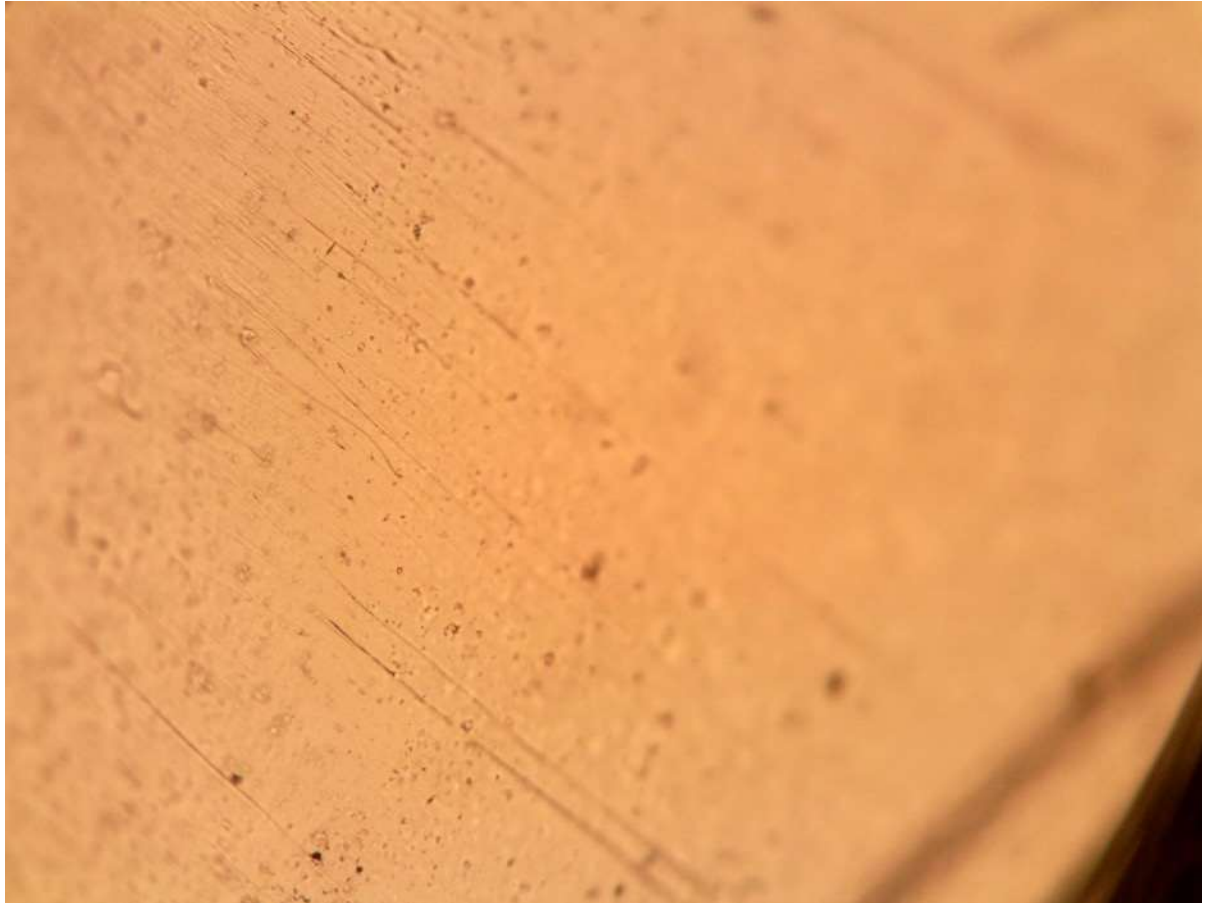


Figure 37 – Surface d'une bandelette après 850 cycles de pliage suivi de 24 heures de test au brouillard salin

4.5 Observations et enseignements apportée lors de la preuve de concept de Conthey

4.5.1 Influence sur le climat et validation du potentiel d'économie d'énergie

L'évolution des températures de la végétation des tomates de la serre a été mesurée en continu depuis le mois d'aout jusqu'au 25 novembre (Figure 38).

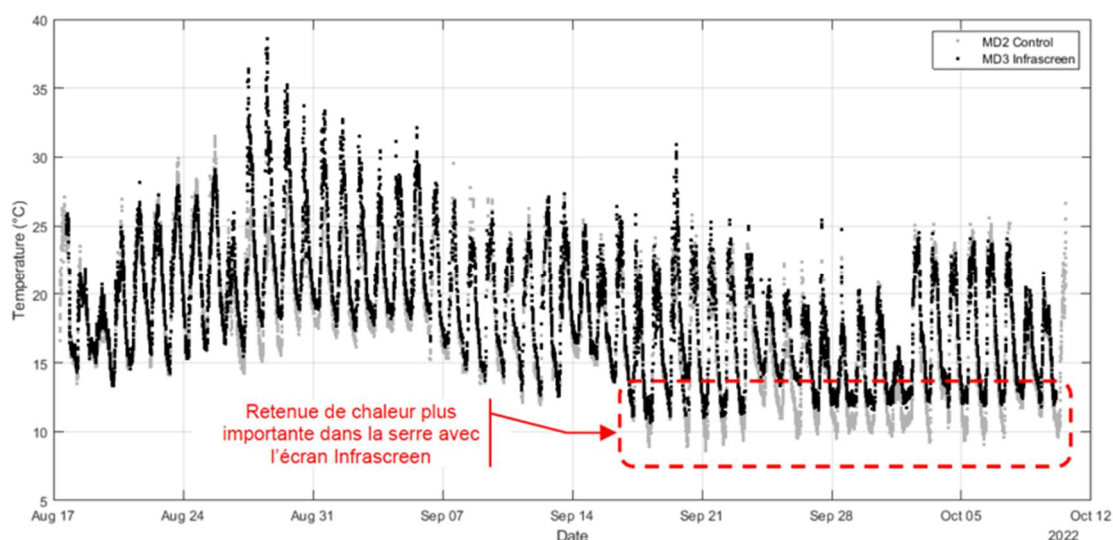


Figure 38 – Evolution de la température des tomates de la serre (Reference vs Infrascreeen)

Il est visuellement notable que les températures minimales (nocturnes) ont été plus élevées dans la serre avec l'écran développé par Infrascreeen (trait noir) comparées à celles relevées dans la serre comportant l'écran classique (trait gris).

Cette différence de température est particulièrement visible sur les graphiques des températures minimales et températures moyennes journalières (Figure 39). Les différences observées sont relativement modérées durant la période estivale et tendent à s'accroître dès les mois de septembre et octobre. Ces résultats confirment que la présence de l'écran développé Infrascreeen permet de retenir les infrarouges issues du sol et des plantes durant la nuit à l'intérieur de la serre, ce qui permet des économies d'énergie.

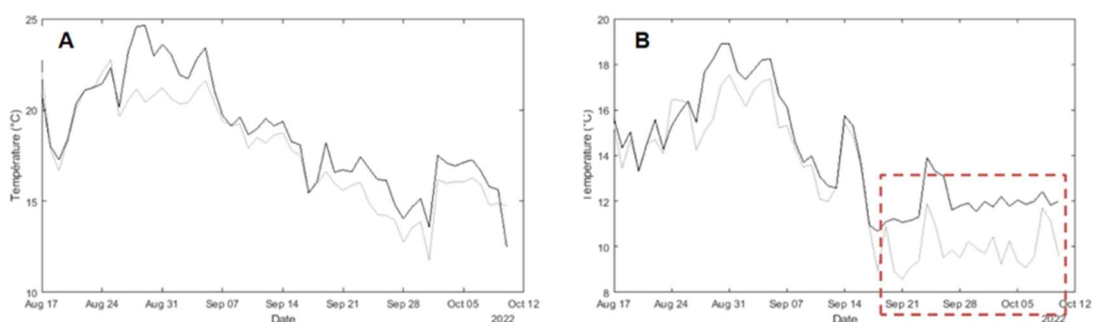


Figure 39 – Température moyennes journalières (A) et températures minimales journalières (B). Le cadre rouge en pointillé illustre la différence de températures minimales (nuit) durant la saison automnale.

Plus précisément, l'efficacité de l'écran s'accroît avec l'arrivée de la saison hivernale. Au mois d'août, la température minimale de nuit dans la serre avec l'écran Infrascreeen est de 0.7°C supérieure à la température minimale de nuit dans la serre équipée de l'écran conventionnel (Figure 40). En automne, au mois d'octobre, la différence s'élève à 2°C en faveur de la serre équipée de l'écran Infrascreeen.

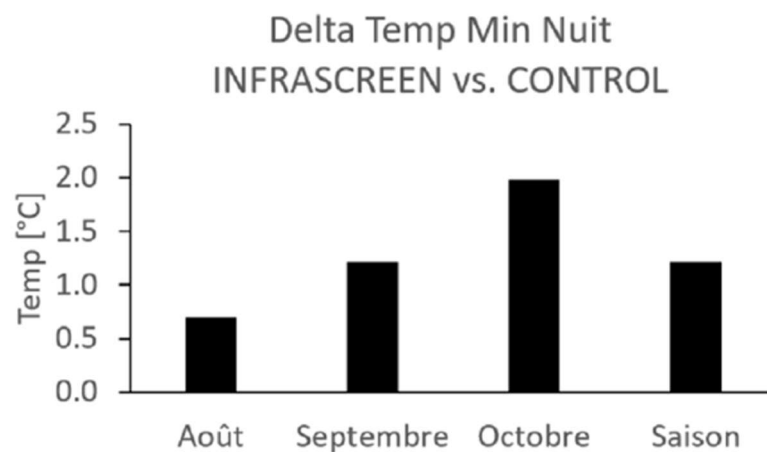


Figure 40 – Différence de température de nuit entre la serre équipée de l'écran Infrascreeen et celle équipée de l'écran classique.

En termes de production dans les deux serres, aucune différence significative n'a été mesurée. Toutefois, l'écran Infrascreeen ne recouvrant pas l'entièreté de la serre, les données de production ne peuvent être mesurées avec précision que dans une serre pilote entièrement équipée de l'écran.

Enfin, un suivi a été réalisé au niveau de l'environnement des plantes situées sous les deux types d'écran.

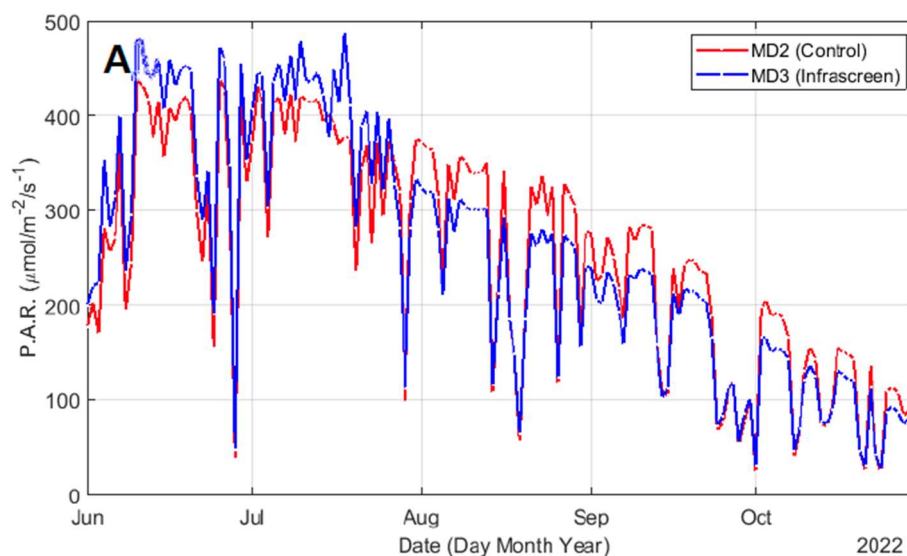


Figure 41 – Suivi des paramètres de PAR dans l'environnement direct des plantes en serre

L'essai en serre à Conthey a permis de montrer un impact significatif de l'écran Infrascreeen (par rapport à un écran standard) sur la température dans l'environnement des plantes, notamment la nuit



ou en période froides. Si la température moyenne journalière est sensiblement la même sous les 2 types d'écran, les températures minimales (nuit) ont clairement été plus élevées sous l'écran Infrascreeen que sous l'écran contrôle.

Un essai à large échelle dans une serre horticole professionnelle est nécessaire afin de valider ces premiers résultats et d'évaluer les économies d'énergie concrètement réalisables.

4.5.2 Dégradation de l'écran

De nombreuses rayures et craques apparaissent au microscope optique. Ce n'était pas le cas lors des pré-tests que nous avons fait avant ce projet sur la même machine de tricotage. Mais entre-temps, le métier à tricoter avait été déménagé et l'opérateur avait changé. Cela explique probablement les défauts observés. Nous pensons que ces changements ont participé à une dégradation du film pendant le tricotage de l'écran.

En fonction des différentes variations de la couche recouvrant la couche active, la dégradation de l'écran a été plus ou moins prononcée et l'efficacité de la couche protectrice était prédite par les tests aux souffres réalisés sur le film en amont de la fabrication de l'écran et son installation dans la serre.

4.6 Observation Pilote producteur 1

4.6.1 Économie d'énergie sur la période considérée.

4.6.1.1. Comparaison des consommations d'énergies totales

Du 17 décembre 2022 au 15 février 2023 :

62,6 kWh/m² avait été consommés dans le compartiment de référence (6)

56,3 kWh/m² dans le compartiment de test (9)

Soit une économie d'énergie légèrement supérieure à 10%.



Comparison cumulative energy consumption

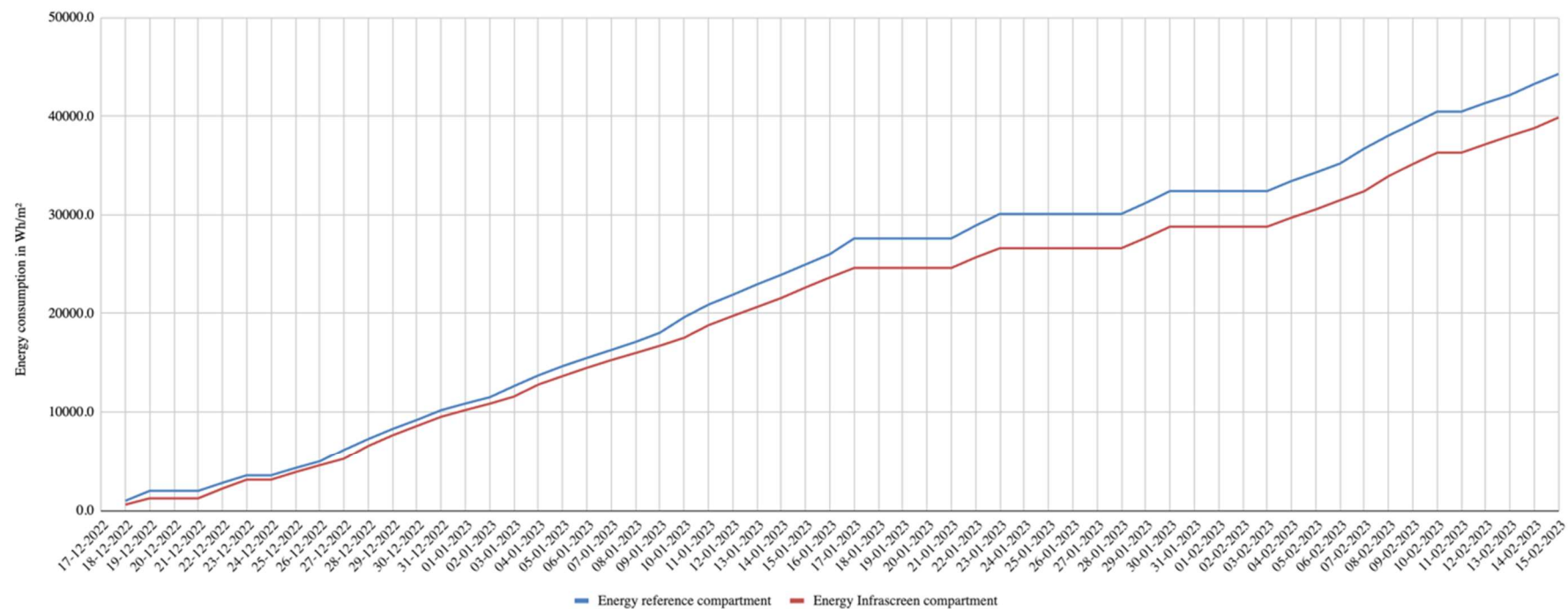


Figure 42 – Comparaison de la consommation d'énergie en Wh/m² entre le compartiment de test (9) et le compartiment de référence (6) sur la serre du producteur 1



La période retenue pour le calcul du différentiel de consommation totale entre les deux compartiments s'étend du 17 décembre 2022 au 15 février.

Il convient de noter que certaines dates sont exclues de la comparaison agrégée. En effet, des travaux ont été menés dans la serre, rendant toute comparaison impossible sur les journées suivantes :

Du 17 au 20 janvier

Du 23 au 27 janvier

Du 30 janvier au 2 février

Le 10 février

A partir de fin janvier, l'écran commence à se dégrader. A la mi-février, la dégradation est significative. Nous avons arbitrairement clos la comparaison au 15 février, considérant qu'à cette date il ne fait plus de sens de la continuer compte tenu du niveau important de dégradation (émissivité passée de 0,30 à 0,50). Des éléments sur cette dégradation sont présentés en section 4.6.4.

4.6.1.1. Analyse détaillée des consommations d'énergies

La comparaison détaillée des consommations des deux compartiments chez le producteur 1 est complexe du fait que :

1. L'irrigation des chacun des deux compartiments étant conduite en décalée (respectivement le Lundi et le Mardi), des disparités de climat en début de semaine sont observées entre les deux compartiments.
2. La présence récurrente de travaux conduits en décalé entre les compartiments fausse l'analyse en journée sur ces périodes (cf. supra).
3. La non-prise en compte de l'impact de l'humidité sur les matériaux à faible émissivité (aluminium et film Infrascreeen) a pu conduire à une gestion désordonnée des écrans et des ouvrants par l'ordinateur climatique
4. L'absence d'homogénéité entre les deux compartiments sur les variétés cultivées a pu amener des influences sensibles, bien que difficilement quantifiables, sur le climat de chacun des compartiments, créant des biais de comparabilité.

Les facteurs 1 et 2 (irrigation décalée et travaux) se produisant en journée, il a été procédé à une analyse des périodes nocturnes exclusivement. Bien que produisant une approche plus fine et représentative, elle se heurte néanmoins à des biais de comparabilités liés aux facteurs 3 et 4, qui jouent de jour comme de nuit.

Nous présentons le rapport de ces analyses dans les pages suivantes.

Enjeux de l'irrigation décalée pour la comparabilité des mesures :

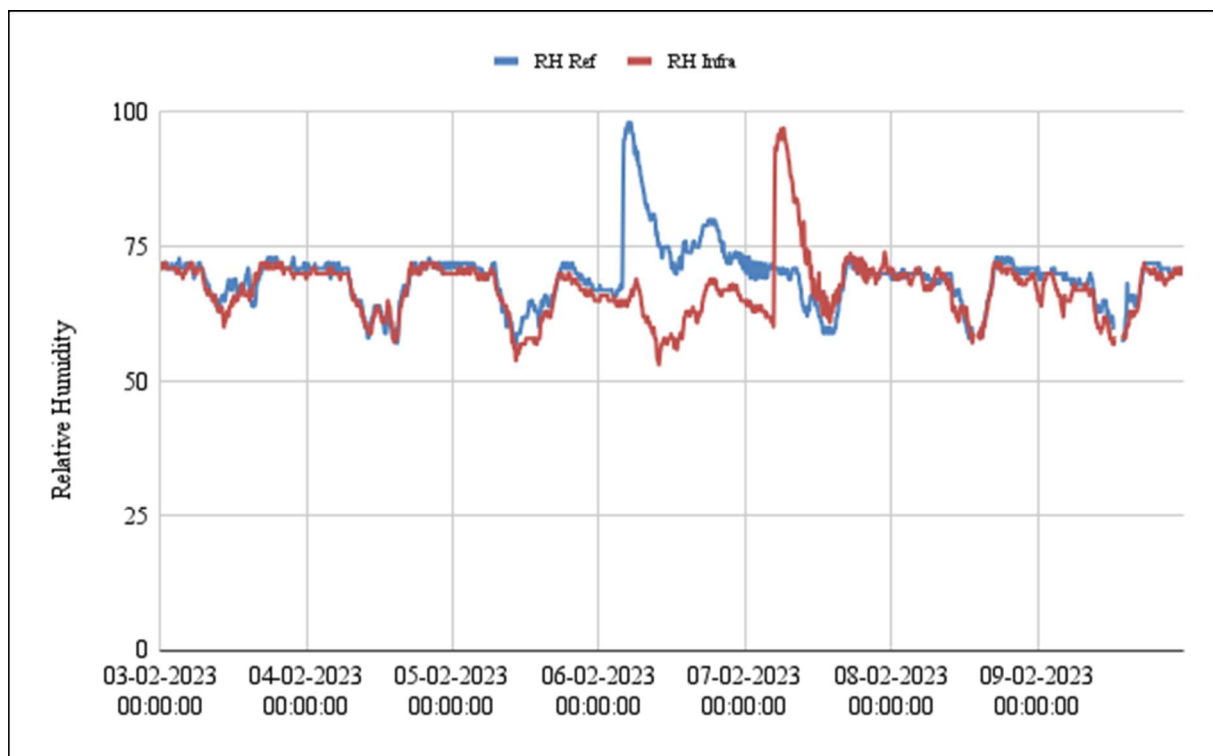


Figure 43 - Comparaison de l'humidité relative pour une semaine typique dans le compartiment de référence (bleu) et dans le compartiment de test (rouge)

L'irrigation avait lieu le Lundi dans le compartiment de référence et le Mardi dans le compartiment de test. Bien qu'identifiée rapidement, cette situation, correspondant à une réalité opérationnelle, n'a pas pu être modifiée.

L'irrigation décalée des compartiments fausse la comparabilité car une irrigation induit un changement climatique significatif du compartiment irrigué. La situation est néanmoins normalisée rapidement : la serre est ouverte afin de déshumidifier par ventilation ; un excès d'humidité relative pouvant favoriser le développement de pathogènes.

Enjeux des travaux pour la comparabilité des mesures :

Aux périodes citées ci-dessus, des travaux ont été conduits sur le système de déploiement des écrans. Les travaux ont été réalisés en journée exclusivement. Ils se sont déroulés en décalé entre les deux compartiments.

La Figure 44 représente la différence d'ouverture de chacun des types d'écran, entre les deux compartiments. Une différence de 1 ou -1 veut dire que l'écran d'un des compartiments est totalement ouvert alors que celui de l'autre est totalement fermé. Cette situation sur des périodes de plusieurs heures est typique de travaux.

On note ainsi une telle situation pour le vendredi 20 janvier, suivie par une pause de weekend le samedi 21 et le dimanche 22, puis une reprise des travaux le 23, 24 et 25 janvier.

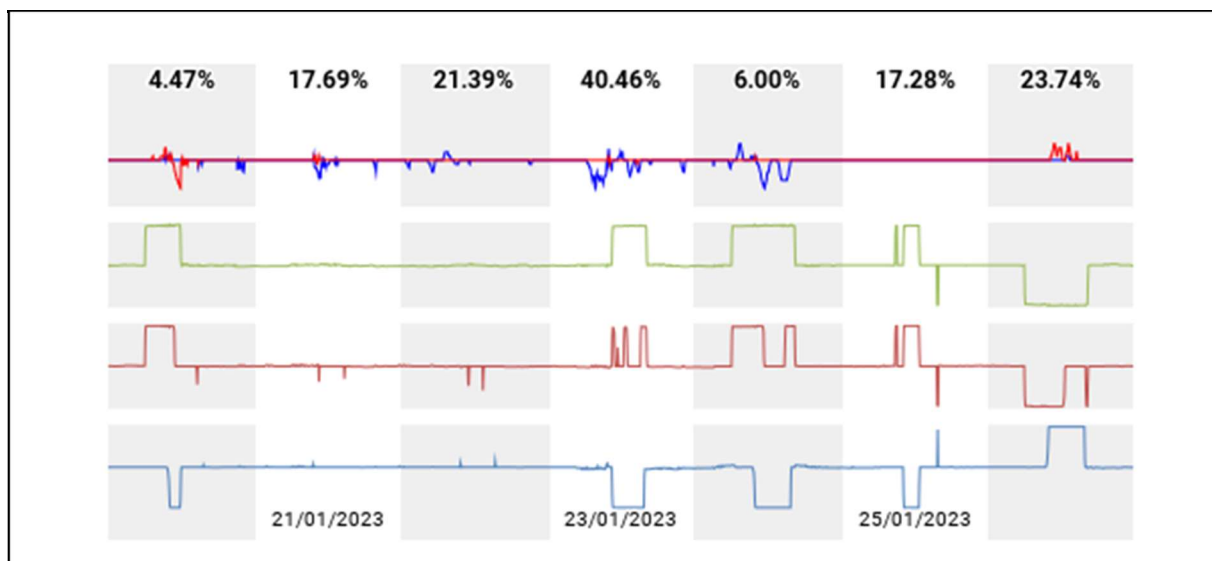


Figure 44 - Economie d'énergie, différence d'ouverture des fenêtres droites (rouge) et gauche (bleu), de l'écran d'ombrage à l'étage 3 (vert), diffusant à l'étage 2 (rouge orangé), d'énergie à l'étage 1 (bleu) entre les compartiments de référence

Etude focalisée sur les périodes nocturnes, en vue d'améliorer la comparabilité des mesures.

Un zoom pendant les nuits permet de supprimer les différences de pilotage de la serre exposées ci-dessus, c'est-à-dire :

- liées aux travaux - qui avait lieu pendant les horaires de travail (i.e. le jour)
- et lié aux cycles d'irrigation des Lundi/Mardi - l'humidité était stabilisée en fin de journée.

Nous retenons comme période nocturne le créneau de 19h30 à 05h00 du matin.

L'analyse agrégée des différences de consommation entre les deux compartiments sur les périodes nocturnes exclusivement est consistante avec une analyse journalière et montre un différentiel moyen de 10,08% en faveur du compartiment Infrascreeen.

Néanmoins, l'analyse nuit après nuit reflète toujours une certaine disparité, avec certaines nuits une surconsommation du compartiment Infrascreeen (Figure 45). Ces variations sont le fruit de différences importantes observées dans les ouvertures/fermetures des écrans et des fenêtres (Figure 45, Figure 46, Figure 47, Figure 48 et Figure 49).

L'analyse de ces résultats est contre-intuitive : on peut ainsi observer pendant les nuits du 20 décembre 2022 au 8 janvier 2023 des consommations énergétiques supérieures dans le compartiment Infrascreeen alors que les fenêtres et l'écran d'ombrage sont davantage fermés.

L'explication résiderait à notre sens dans le fait qu'en maintenant les fenêtres fermées, un excès d'humidité s'est formé au niveau de l'écran d'ombrage, avec une humidité relative de 100%. Or l'écran d'ombrage est aluminisé. Il a donc un effet low-e, qui disparaît lorsqu'il est recouvert d'eau, son émissivité rejoignant celle de l'eau, à +/- 1.

En revanche, dans le compartiment de référence, l'ouverture des fenêtres sur la même période a permis l'évacuation de l'excès d'humidité et la maintenance des performances low-e de l'écran d'ombrage aluminisé (Figure 50).

Inversement, alors que l'écran de test Infrascreeen était significativement dégradé à partir de fin janvier (cf. section 4.6.4), nous avons mesuré des économies d'énergie significatives dans le compartiment de test début Mars. C'est le phénomène inverse qui s'est produit, l'écran aluminisé dans le compartiment de test était sec significativement plus longtemps que dans le compartiment de référence.

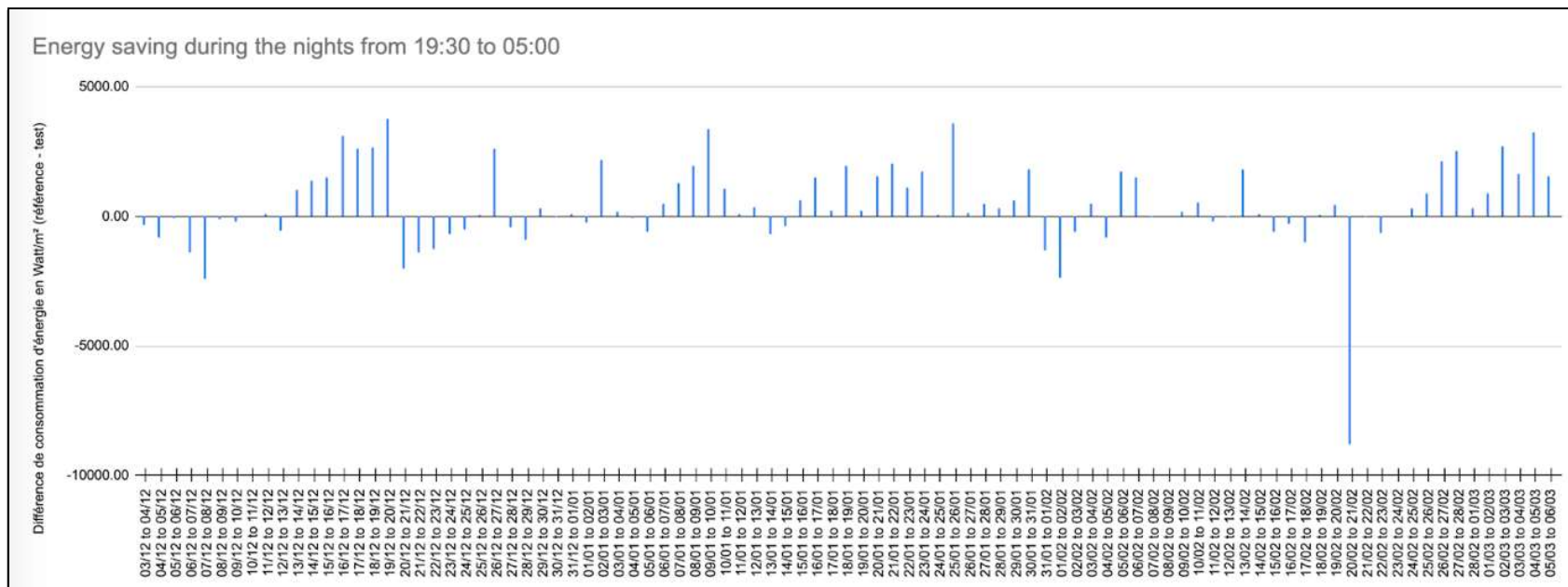


Figure 45 – Différence de consommation d'énergie entre le compartiment de référence (6) et le compartiment de test (9) entre 19h30 et 05h00 sur la période allant du 03 Décembre 2022 (avant l'installation de l'écran Infrascreeen) et le 05 Mars 2023. Un delta positif signifie que le compartiment de référence consomme plus d'énergie que le compartiment de test.

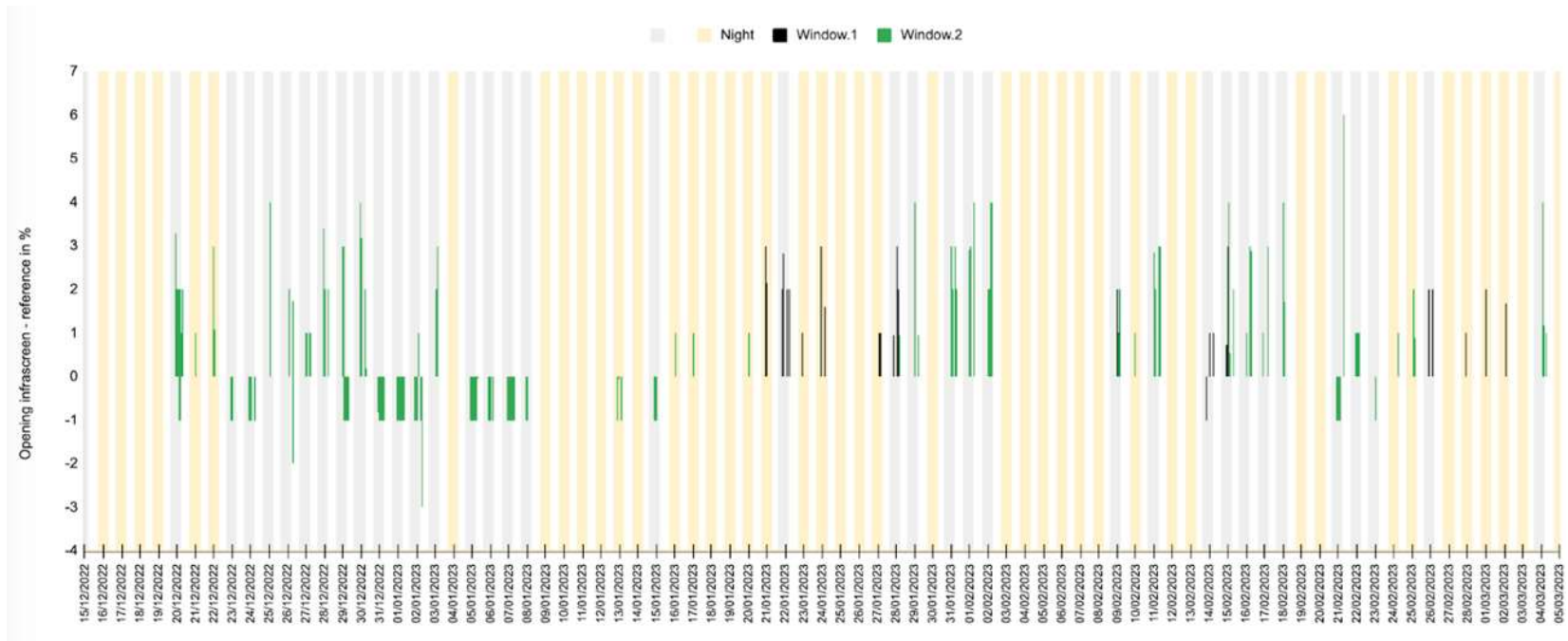


Figure 46 - Différence d'ouverture des fenêtres pendant les nuits de 19h30 à 05h00 du matin entre le compartiment de référence (6) et le compartiment de test (9) sur la période allant du 15 décembre 2022 au 05 Mars 2023. En noir la différence d'ouverture des fenêtres gauche et en vert la différence d'ouverture des fenêtres droites. Une différence positive signifie que les fenêtres sont plus ouvertes dans le compartiment de test, une différence négative que les fenêtres sont plus ouvertes dans le compartiment de référence. Nous avons surligné en jaune les nuits ou les différences d'ouvertures des fenêtres entre les deux compartiments n'étaient pas significatives.



Delta gaps between in % between Infrascreeen and reference at nights

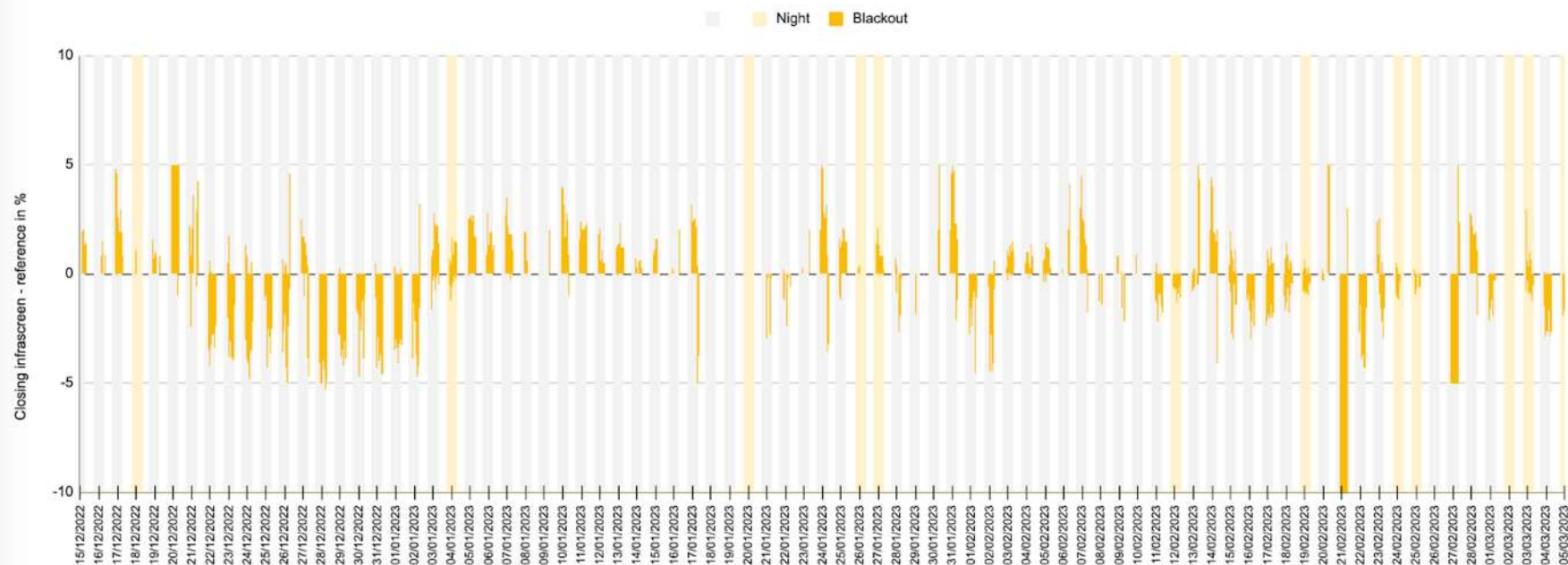


Figure 47 – Différence de fermeture des écrans d'ombrage à l'étage 3, pendant les nuits entre 19h30 et 05h00 du matin entre le compartiment de référence (6) et le compartiment de test (9) sur la période allant du 15 Décembre 2022 au 05 Mars 2023. Une différence positive signifie que l'écran est plus fermé dans le compartiment de référence, une différence négative que l'écran est plus fermé dans le compartiment de test. Nous avons surligné en jaune les nuits ou les différences d'ouvertures des fenêtres et d'écran d'ombrage entre les deux compartiments n'étaient pas significatives.

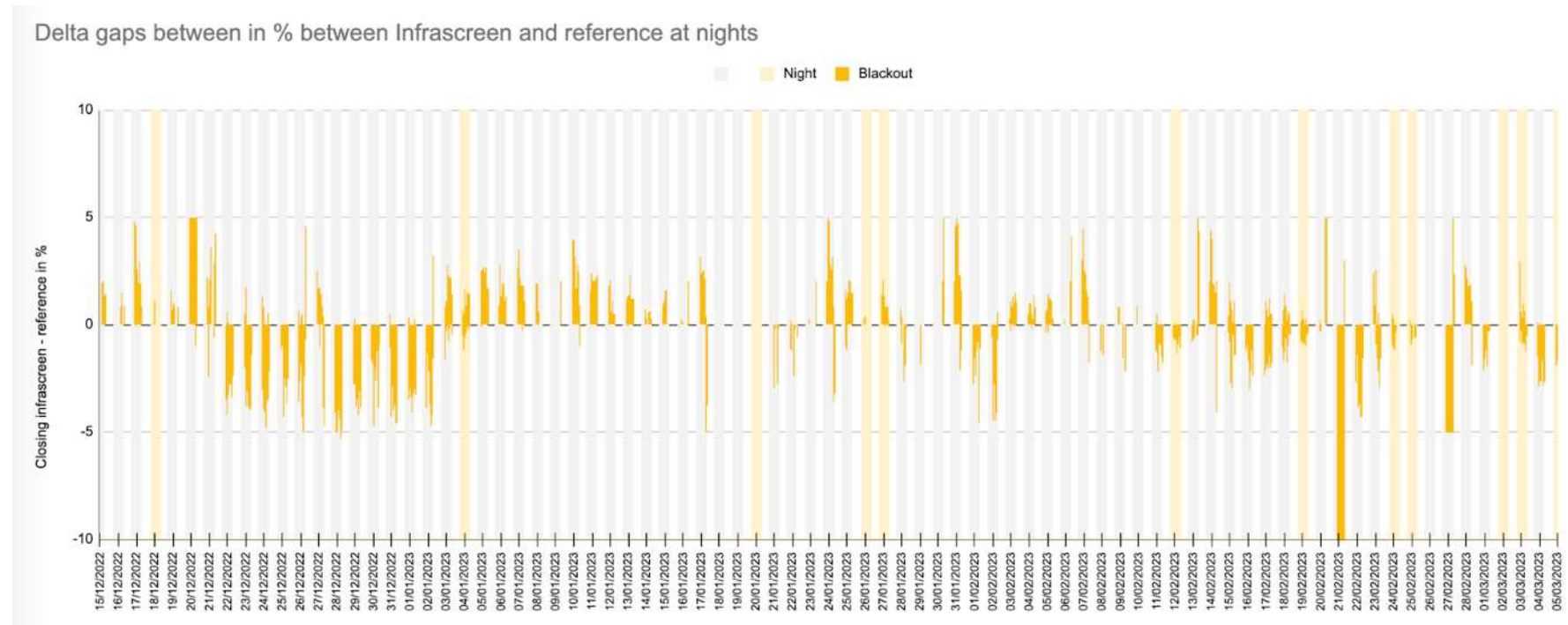


Figure 48 - Différence de fermeture des écrans de diffusion à l'étage 2, pendant les nuits entre 19h30 et 05h00 du matin entre le compartiment de référence (6) et le compartiment de test (9) sur la période allant du 15 Décembre 2022 au 05 Mars 2023. Une différence positive signifie que l'écran est plus fermé dans le compartiment de référence, une différence négative que l'écran est plus fermé dans le compartiment de test. Nous avons surligné en jaune les nuits ou les différences d'ouvertures des fenêtres et d'écran d'ombrage et de diffusion entre les deux compartiments n'étaient pas significatives.

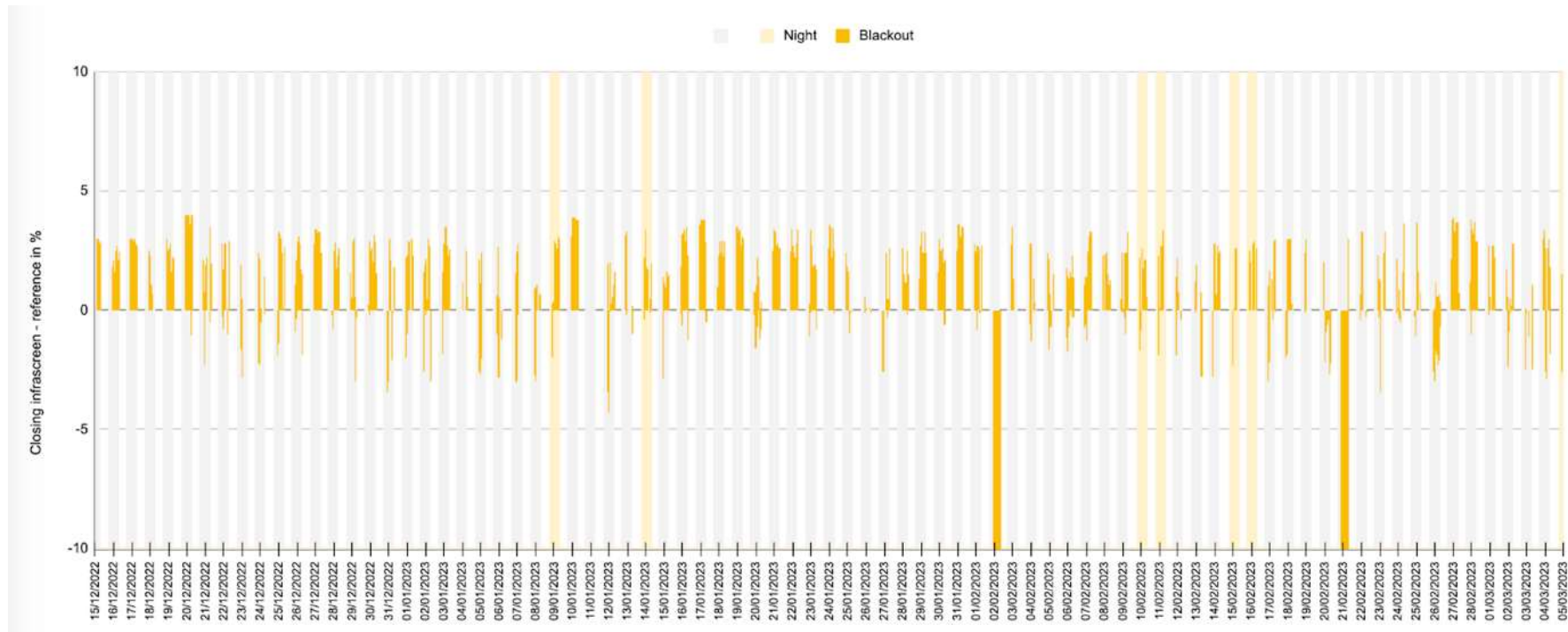


Figure 49 - Différence de fermeture des écrans d'énergie à l'étage 1, pendant les nuits entre 19h30 et 05h00 du matin entre le compartiment de référence (6) et le compartiment de test (9) sur la période allant du 15 Décembre 2022 au 05 Mars 2023. Une différence positive signifie que l'écran est plus fermé dans le compartiment de référence, une différence négative que l'écran est plus fermé dans le compartiment de test. Nous avons surligné en jaune les nuits ou les différences d'ouvertures des fenêtres et d'écran d'ombrage, de diffusion et d'énergie entre les deux compartiments n'étaient pas significatives.



Figure 50 - Humidité relative au-dessus de l'écran d'ombrage aluminisé entre le 02 Janvier 2023 (date d'installation du capteur) et le 05 Mars 2023. En rouge l'humidité relative au-dessus de l'écran 3 dans le compartiment de test (9) et en bleu dans le compartiment de référence (6).

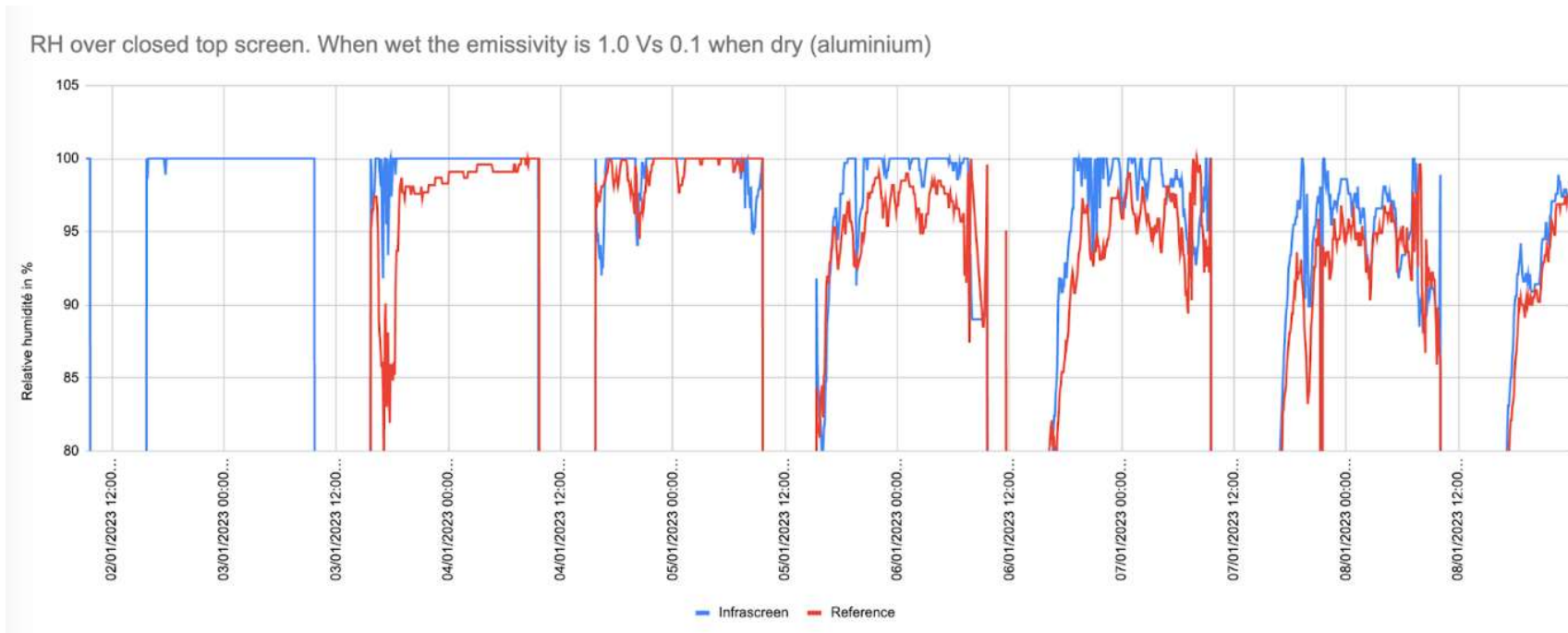


Figure 51 - Zoom sur l'humidité relative mesurée toutes les 5 minutes entre le 02 Janvier et le 08 Janvier 2023 au-dessus de l'écran d'ombrage aluminisé dans le compartiment de test (bleu) et dans le compartiment de référence (rouge).

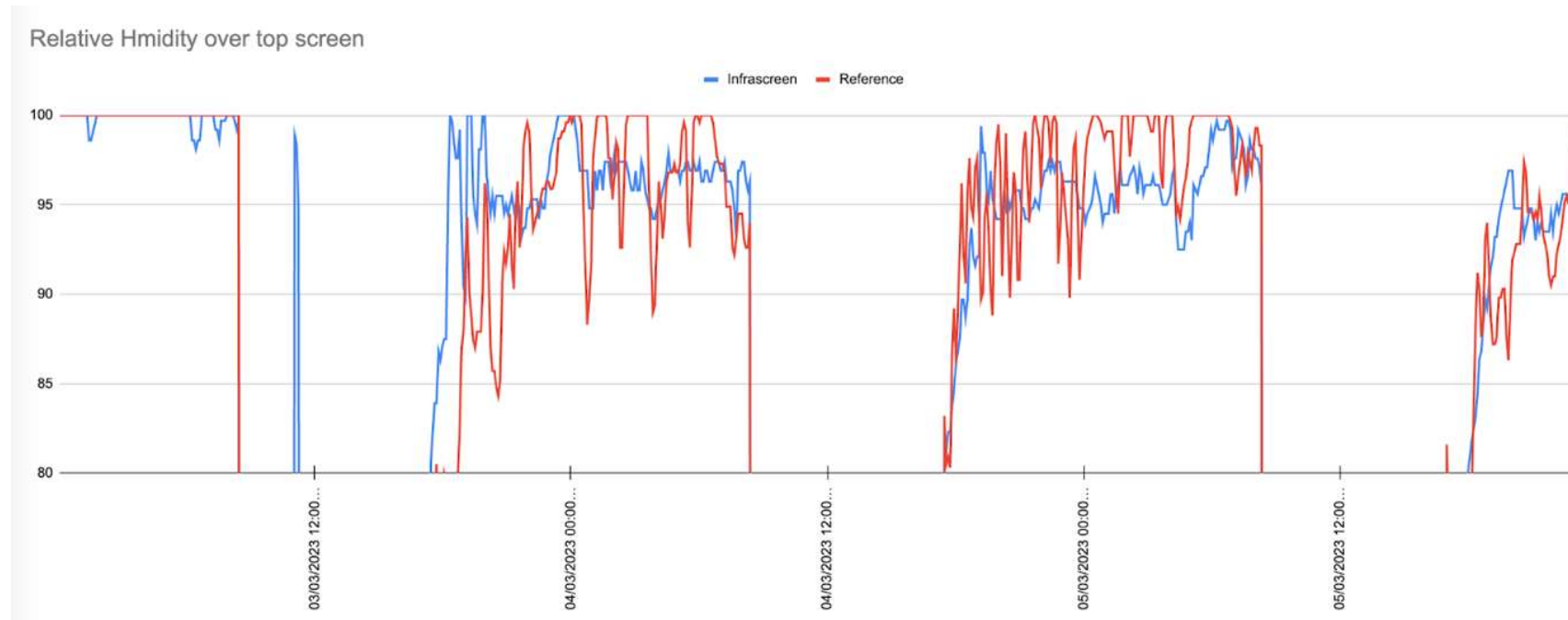


Figure 52 - Zoom sur l'humidité relative mesurée toutes les 5 minutes entre le 03 Mars et le 05 Mars 2023 au-dessus de l'écran d'ombrage aluminisé dans le compartiment de test (bleu) et dans le compartiment de référence (rouge).



Une manière simple de voir si l'écran à l'étage 1 Infrascreeen permet d'économie de l'énergie comparativement à l'écran de référence est de regarder la différence de température entre les deux écrans grâce au capteur de température installé entre les écrans (voir section 3.5.1). Par exemple pendant la nuit du 9 au 10 Janvier, on a mesuré une économie d'énergie de 35,87% et effectivement on voit un écart très important de température entre l'écran de référence et l'écran Infrascreeen. Comme on le voit sur Figure 53 l'écran Infrascreeen est environ 5°C plus froid que l'écran de référence.

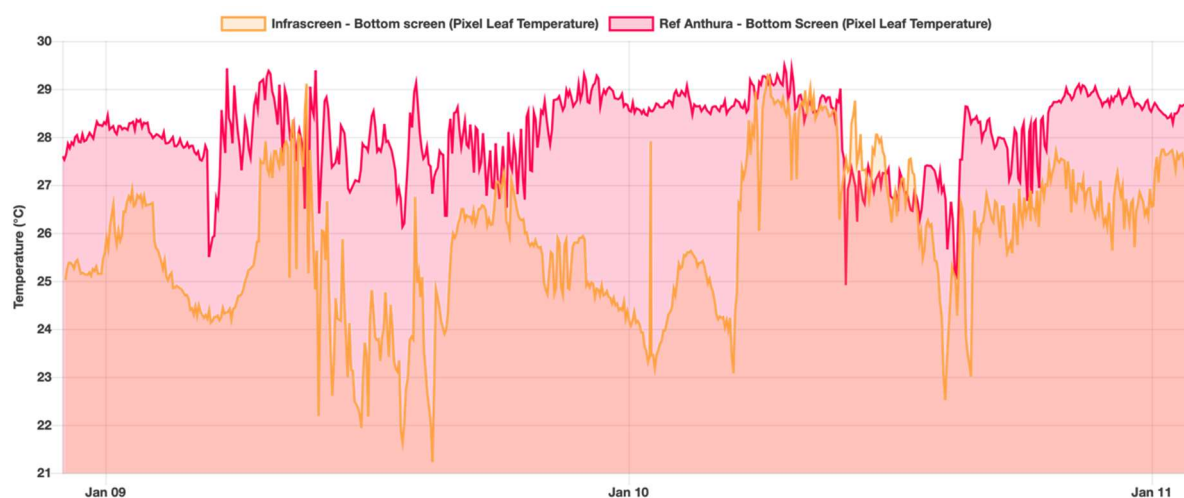


Figure 53 - Comparaison de la température des écrans entre le 9 et le 10 Janvier

Si on observe l'évolution de la température entre les deux écrans pendant la totalité de la durée de l'expérience Figure 54, on se rend compte que la température de l'écran Infrascreeen est, à de rares exceptions près que l'on peut souvent justifier, plus froid que la température de l'écran de référence

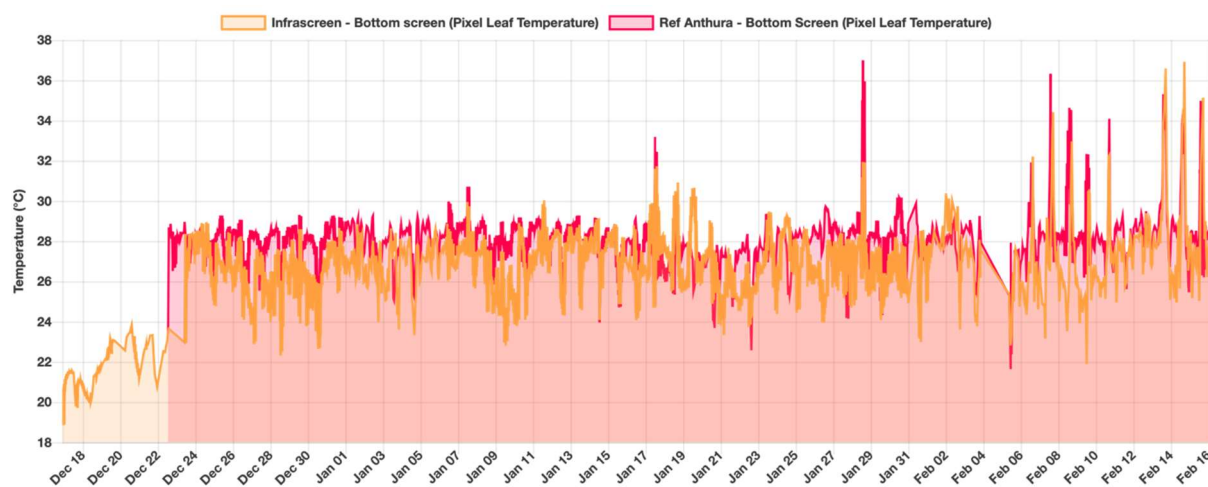


Figure 54 - Comparaison de la température des écrans entre le 24 Décembre et le 16 Février

La difficulté étant que dans une configuration à trois écrans et double ouvrant, les économies d'énergie apporté par l'écran Infrascreeen peuvent parfois être masqué par des interactions avec d'autres équipements écrans.

4.6.2 Productivité sur la période considérée

Aucune mesure de productivité a été réalisé sur la production de jeunes plants d'orchidée. En effet, les plants présents sous les écrans sont sur des tablettes mobiles et passent d'une zone à une autre en continu ce qui empêche une comparaison

4.6.3 Mesure de la température du couvert végétal

Comme expliqué en 3.4.2 des capteurs ont été installé pour mesurer la température des feuilles (pyrometer). Nous avons eu beaucoup de mal à exploiter les données de ces capteurs car :

- Nous avons eu deux capteurs défectueux qu'il a fallu renvoyer chez le fabricant et avons dû attendre 6 semaines avant leur remplacement.
- Les plants étaient sur des tables mobiles et il était très difficile de maintenir la tête du capteur au-dessus d'une feuille. Nous avons commandé des supports adaptés pour placer ces capteurs directement sur la table mobile mais ils sont arrivés une fois que l'écran était significativement dégradé (voir section suivante). Sur la Figure 55 on voit en jaune le relevé de la température dans le compartiment de référence, Vient ensuite en rouge, un second capteur qui a été déplacé le 10 Janvier du compartiment de test au compartiment de référence : on n'arrivait pas à bien le fixer dans le compartiment de test. A partir du 26 Février deux capteurs ont été installé dans le compartiment de test et les supports adaptés sont également arrivés.

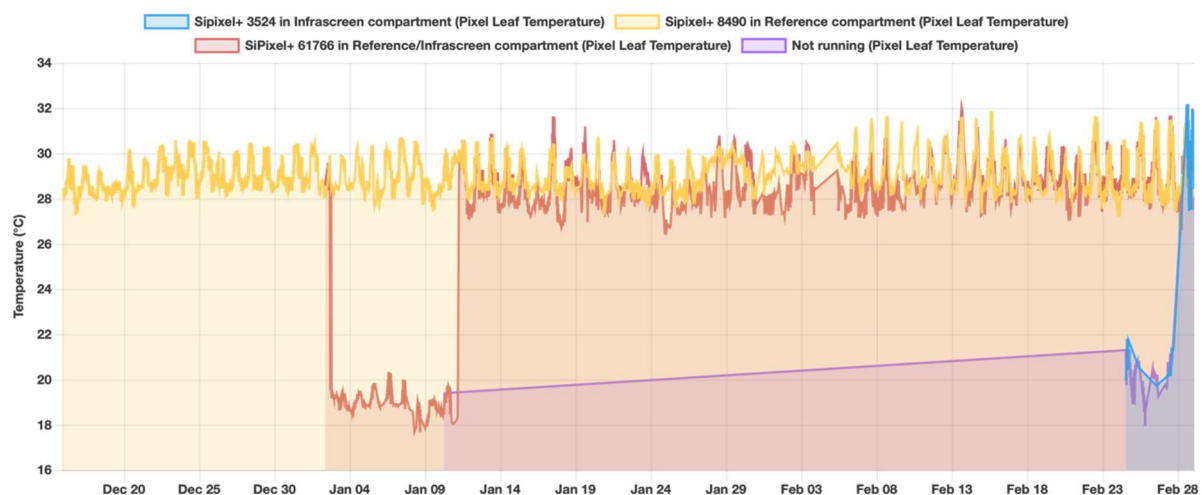


Figure 55 Comparaison de la température du couvert végétal

4.6.4 Dégradation de l'écran

Dès l'installation de l'écran Infrascreeen des "taches" importantes traduisant une protection détériorée étaient visibles. La présence de ces taches sur le film résultait de plusieurs problèmes (cf. section 4.1.3) liés à la dépose du top coat et nous nous attendions à une fragilité de l'écran à ce niveau.



Figure 56 - Photo prise le 19 Décembre 2022, des taches sont visibles sur l'écran Infrascreeen et correspondent à des défauts dans la déposition du top coat. Ces taches sont contingentées sur des largeurs de 500 mm et des longueurs de +/- 6,0 m ce qui correspond bien au problème rencontré lors de la dépose du top coat.

Entre le 17 Janvier et le 02 Février, les câbles de soutien des écrans ont été changés, ce qui a engendré de nombreux cycles de pliage / dépliage de l'écran (les 17, 18, 19, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 31 Janvier et 01, 02 et 10 Février 2023). Il est probable que ces cycles de pliage / dépliage aient été faits en mode manuel. Nous pensons que de ce fait, les compressions de pliages subies par l'écran ont été importantes (Figure 57), et significativement supérieures à ce que l'écran subit en conditions d'opérations normales.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des
transports, de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et Cleantech

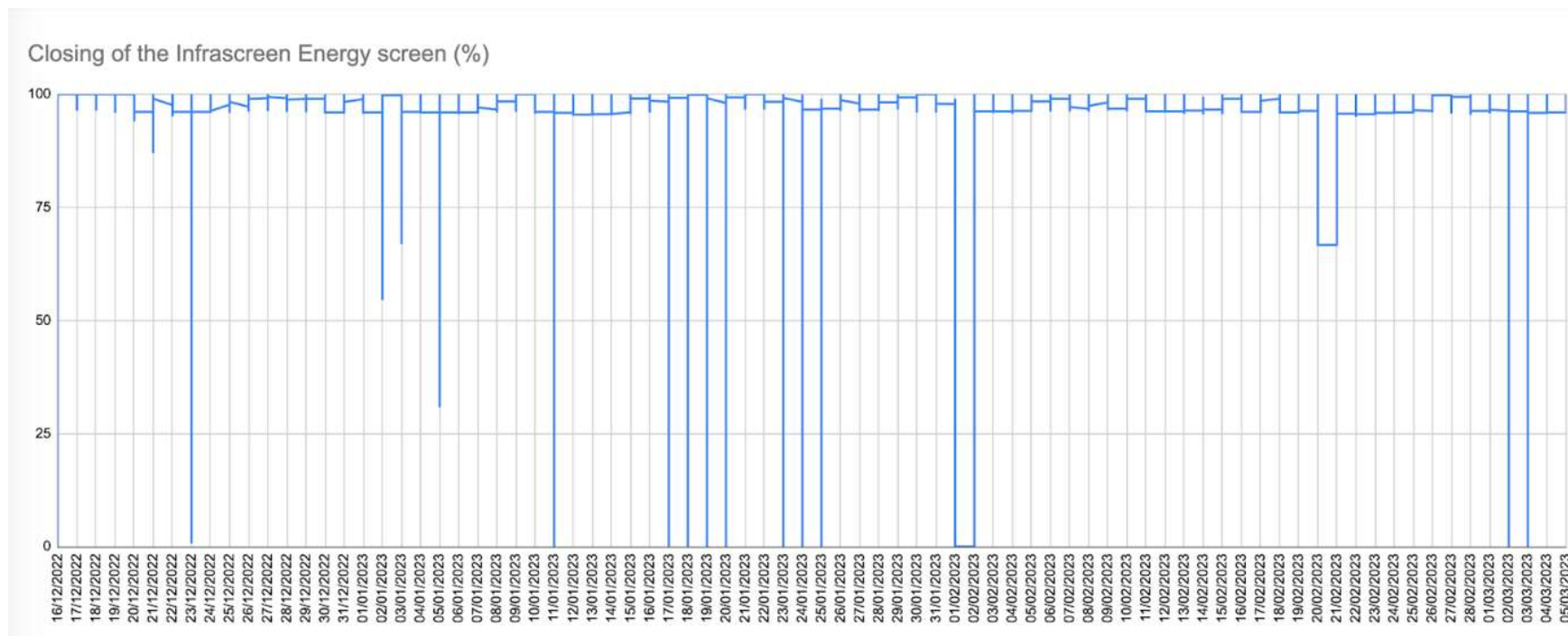


Figure 57 - Position de l'écran Infrascree, 0% signifie que l'écran est ouvert ou compressé



Figure 58 – Photo d'un écran plié, 5,20 m d'écran sont réduit en un "paquet" de 10 cm. On aperçoit également les câbles de soutien au-dessous et en-dessous de l'écran.



L'humidité au-dessus de l'écran était très importante (Figure 59)

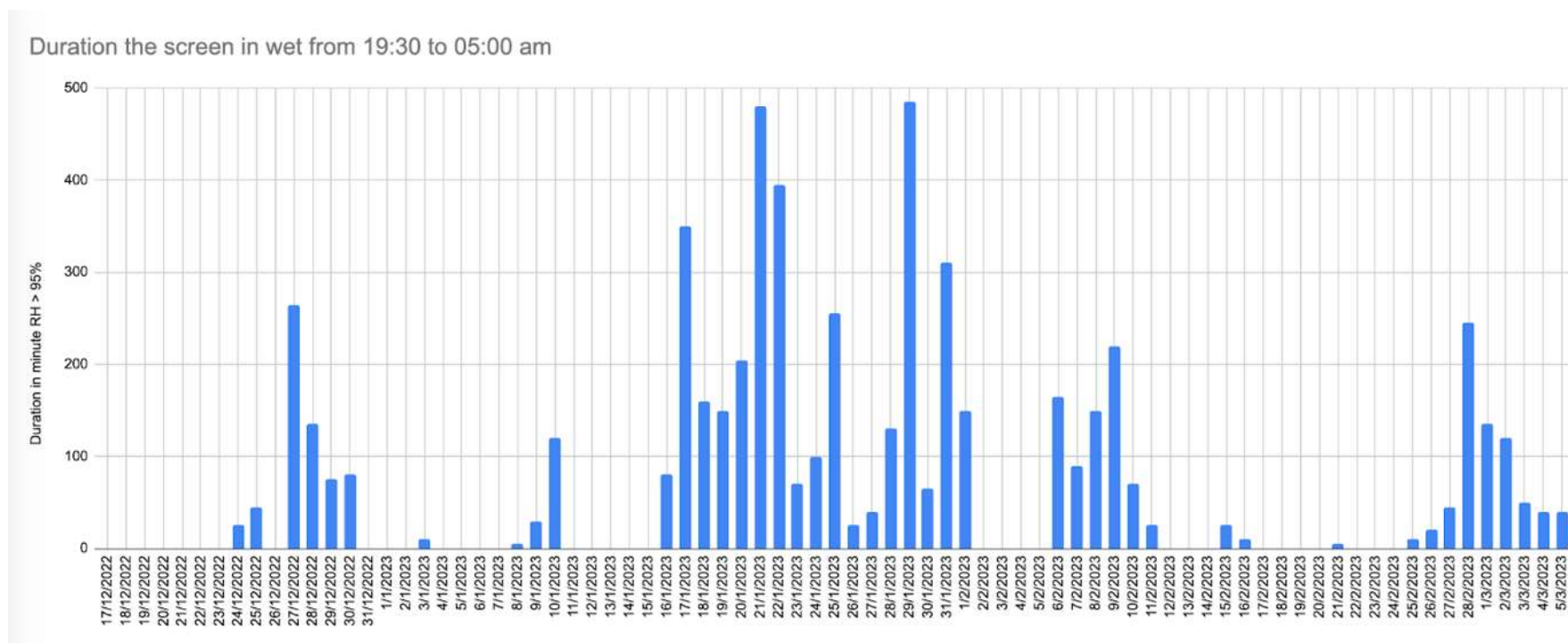


Figure 59 – Durée en minute pendant laquelle l'humidité au-dessus de l'écran thermique Infrascreeen (étage 3) dépasse 95% entre le 17/12/2022 et le 05/03/2022



Il est probable que l'écran a été saturé en eau pendant cette période. Après les travaux, l'écran a commencé à être moins transparent dans le spectre photosynthétique et les taches présentes à l'installation se sont agrandies :



Figure 60 – Photo de l'écran après travaux

Nous avons fait des prélèvements d'écran pour faire des analyses au microscope confocal ainsi que SEM / EDX et effectivement de nombreuses fissures étaient visibles (Figure 61)

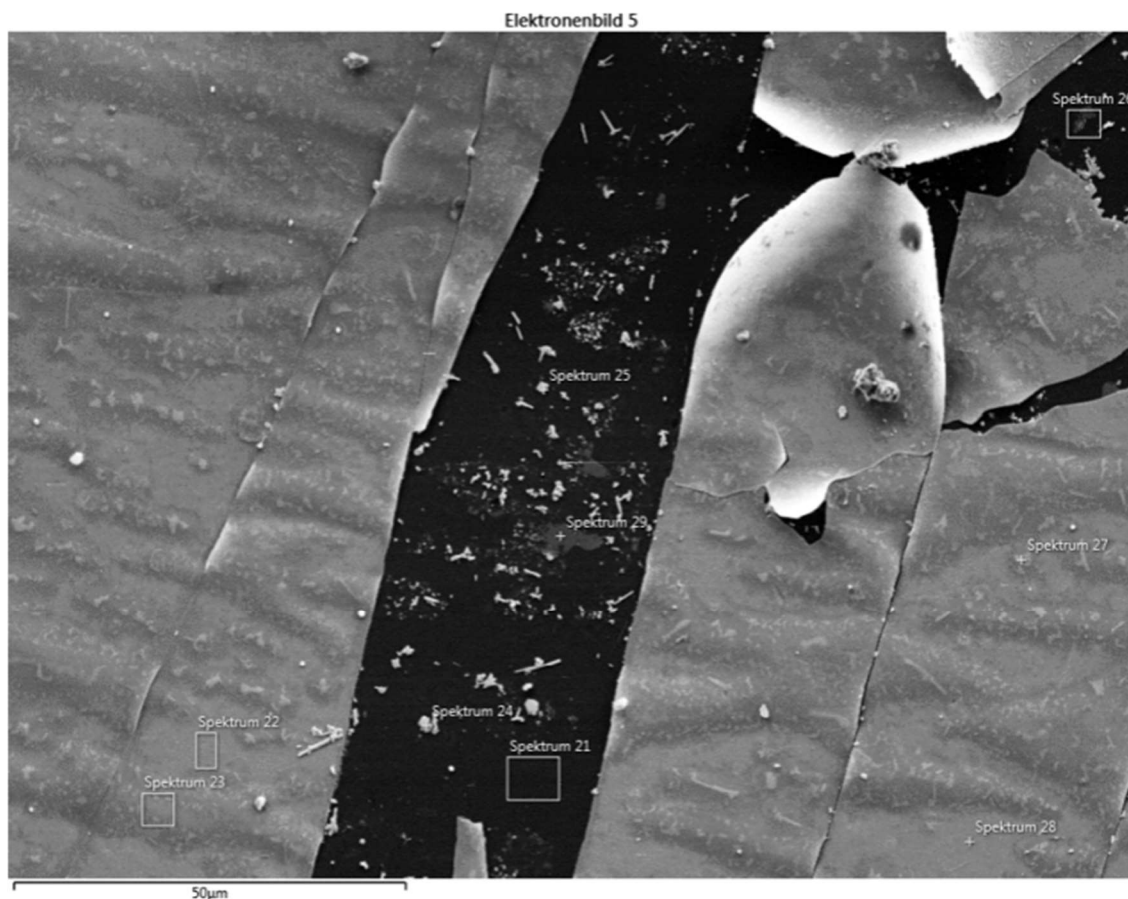


Figure 61 – Image SEM d'une bandelette prélevée

L'analyse EDX montre par ailleurs que le revêtement a été soumis à des forces de compression et qu'à certain endroit (zone 21) seule la première couche du stack est présente. Cela peut suggérer que la couche métallique a corrodé puis éclaté en faisant disparaître les couches qui la recouvraient.

Il est très vraisemblable que cette dégradation s'explique par le défaut de dépose du top coat conjugué à (i) une compression trop importante et non contrôlée (pliage manuel) de l'écran pendant les travaux et (ii) des quantités importantes d'eau de condensation.

L'émissivité est passée de 0,30 après l'installation à 0,50. Nous pensons qu'environ 40% de l'écran a été endommagé.

Il est prévu de remplacer deux sections d'écran par une évolution "durcie" de notre stack mi-Juin puis un remplacement complet de l'écran en Octobre / Novembre.

4.7 Observation pilote Agrotopia



4.7.1 Économie d'énergie sur la période considérée

Le 1er Mars 2023 :

78,6 kWh/m² avait été consommé dans le compartiment de référence

90,2 kWh/m² dans le compartiment de test

Soit une économie d'énergie légèrement supérieure à 14,5%.

On notera que, suivant la pratique de culture d'Agrotopia, la durée quotidienne d'utilisation de l'écran d'économie d'énergie était faible :

8 heures / jour entre le 23 janvier et le 23 février

14 heures / jour entre le 24 février et le 28 février

La pratique opérationnelle est d'utiliser davantage l'écran d'économie d'énergie. Cette faible utilisation tend à minorer l'effet d'économie d'énergie observé à Agrotopia.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des
transports, de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et Cleantech



Figure 62 – Comparaison de la consommation d'énergie en Wh/m² entre le compartiment de test (21) et le compartiment de référence (22) sur la serre Agrotopia



L'analyse détaillée, au jour le jour, des résultats (Figure 63) fait apparaître une relativement faible volatilité des résultats, qui sont consistants dans la durée.

Les variations d'économie d'énergie s'expliquent par :

Des variations de météo

A partir du 24 février, une durée d'utilisation de l'écran d'économie d'énergie accrue

On notera qu'à la différence du producteur 1, les écrans étaient ouverts et fermés strictement symétriquement entre les deux compartiments, ce qui favorise la comparaison.

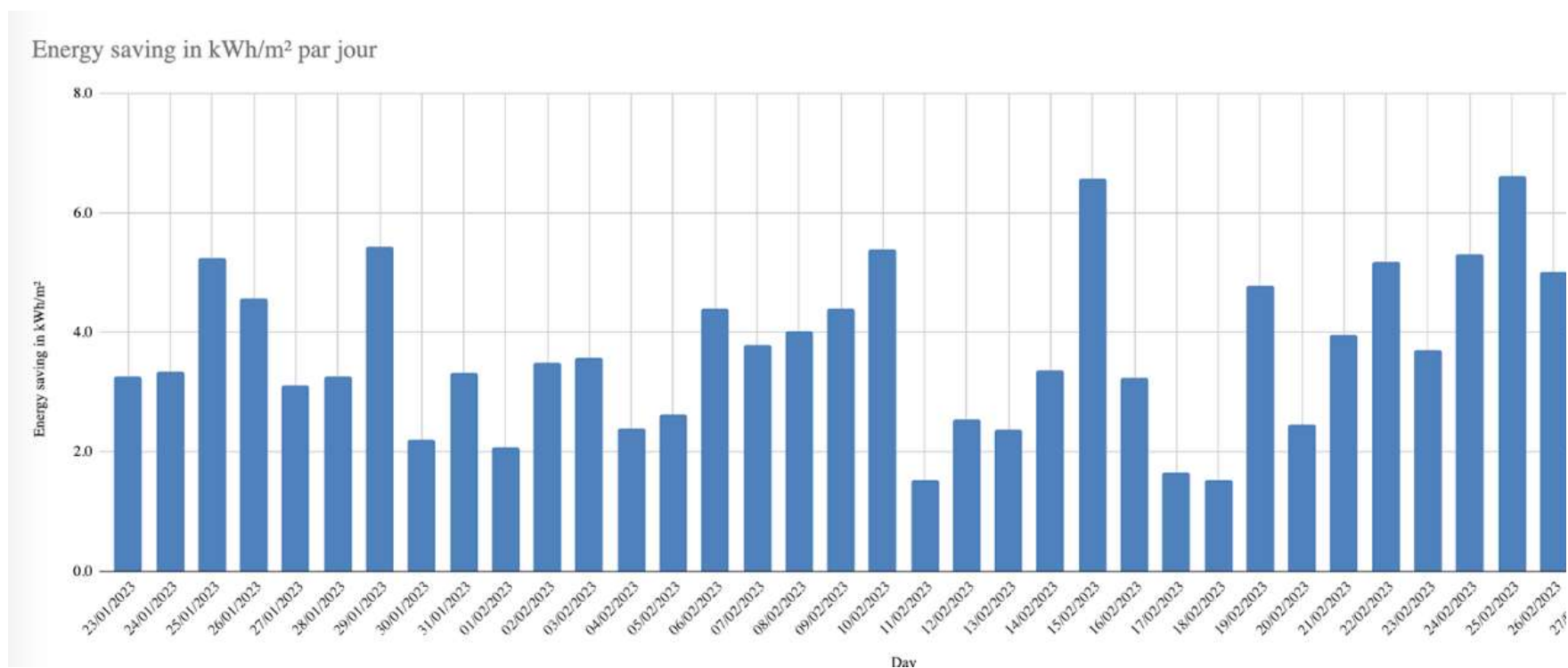


Figure 63 – Différence de consommation d'énergie entre le compartiment de référence (22) et le compartiment de test (21)



En rechange, les Figure 64 et Figure 65 montrent que le climat dans le compartiment de test était sensiblement plus énergivore que dans le compartiment de référence. La température de l'air était plus importante (19,2°C Vs 18,5°C en moyenne sur la durée du test) et l'humidité relative moins importante (68% Vs 73%) ce qui permet d'affirmer que l'économie d'énergie réalisée est supérieure à 14,70%. Une des raisons invoquées par Agrotopia pour justifier cette différence de climat est que l'installation de chauffage dans le compartiment de référence était sous dimensionnée pour suivre les consignes climatiques données par l'ordinateur climatique pendant les moments les plus critiques. En revanche dans le compartiment de test qui consommait moins d'énergie grâce à l'écran Infrascreeen, il était possible de mieux suivre les consignes de l'ordinateur climatique.

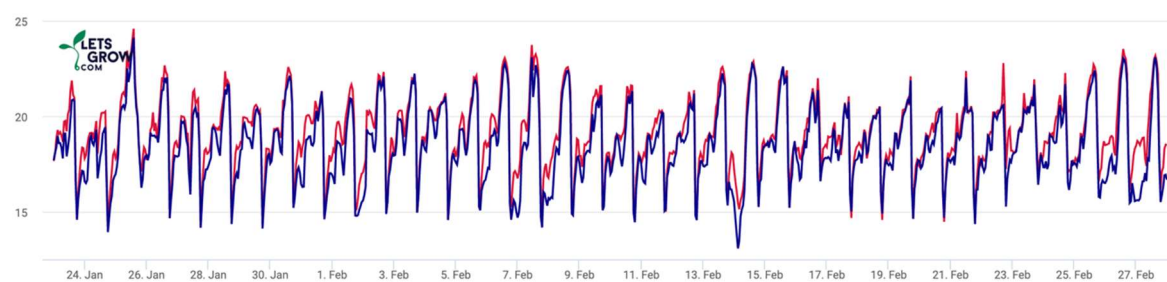


Figure 64 - Température dans le compartiment de test (rouge) et dans le compartiment de référence (bleu)

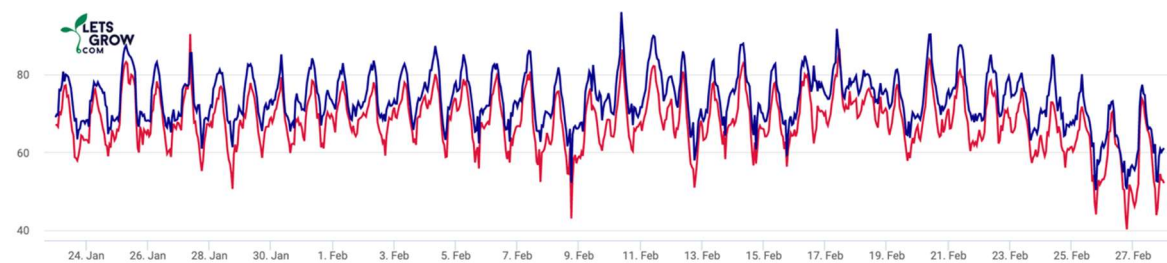


Figure 65 - Humidité dans le compartiment de test (rouge) et dans le compartiment de référence (bleu)

4.7.2 Productivité sur la période considérée

Dans l'ensemble, des tomates de bonne qualité ont été récoltées dans les deux compartiments. La production totale de tomates était très similaire entre les deux, avec une production légèrement supérieure de 0.19 kg/m² dans le compartiment avec le nouvel écran, mais cette différence n'est pas statistiquement significative. Dans ce compartiment, nous avons observé un plus grand nombre de grappes/m² avec une masse moyenne de fruits plus faible et moins de fruits/grappe. Seul le nombre de fruits/grappe était statistiquement différent. L'ajout de données d'un mois supplémentaire après la fin de l'essai n'a pas modifié la conclusion. Moins de 2,5% des fruits étaient hors calibre dans chaque compartiment. Les écrans n'ont pas affecté le début de la floraison et le succès de la pollinisation.

	Rendement (Kg/m ²) inc. tomates hors calibre	Rendement (Kg/m ²) excl. tomates hors calibre	Grappes/m ²	Tomates/Grappes	Masse moyen tokmate (g)
22/01 au 01/03					
Infrascreen	5.57 ± 0.12	5.43 ± 0.11	10.82 ± 0.17	4.83 ± 0.03	106.34 ± 2.07
Reference	5.38 ± 0.29	5.29 ± 0.28	9.68 ± 0.50	5.05 ± 0.06	109.78 ± 2.82
t-test p-value	0.58	0.65	0.07	0.02	0.36
22/01 au 30/03 (après le test)					
Infrascreen	11.72 ± 0.20	11.50 ± 0.19	20.54 ± 0.23	5.18 ± 0.03	109.62 ± 2.34
Reference	11.59 ± 0.39	11.29 ± 0.38	19.64 ± 0.61	5.26 ± 0.04	111.91 ± 3.03
t-test p-value	0.78	0.63	0.22	0.19	0.57

4.7.3 Mesure de la température du couvert végétal

Comme expliqué en 3.4.2 des capteurs ont été installés pour mesurer la température des feuilles (pyromètre). À la différence du pilote orchidée, les plantes de tomates sont fixes et la position de la tête de mesure au-dessus de la tête de la plante était régulièrement vérifiée. Comme expliqué plus haut, la température (de l'air) dans le compartiment de test est plus importante que dans le compartiment de référence et on retrouve cette tendance sur la température foliaire (Figure 66). On voit peu de différence entre la température foliaire et la température de référence et il est difficile de comprendre l'influence de l'écran sur cette température foliaire.

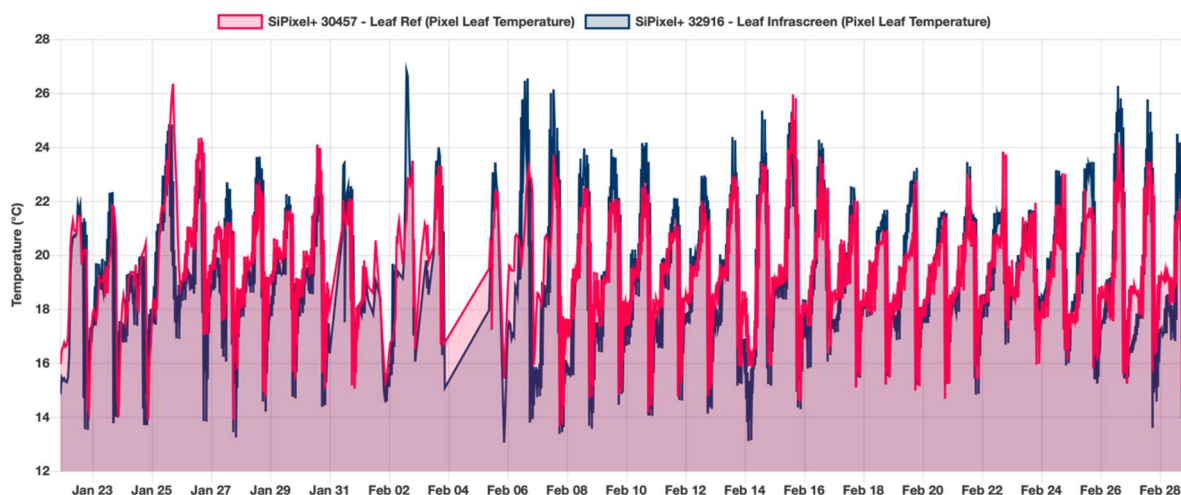


Figure 66 - Comparaison de la température foliaire entre les deux compartiments

4.7.4 Dégradation de l'écran

Des échantillons d'écran ont été prélevés et analysés à la fin du test :
Sur la partie de l'écran recouverte par une bandelette de PE, aucune dégradation n'a été détectée.



En revanche, sur la partie de l'écran non protégé, on a pu voir une légère dégradation.
L'émissivité est passé de 0,20 à 0,30.

On notera que la phase de dépose du top coat du film utilisé pour la fabrication de l'écran déployé chez Agrotopia a été moins problématique que celle du film utilisé dans la fabrication de l'écran déployé chez le producteur 1. On notera également que l'humidité chez Agrotopia était plus faible que chez le producteur 1, mais que le nombre de cycles d'ouverture / fermeture a été bien plus important.

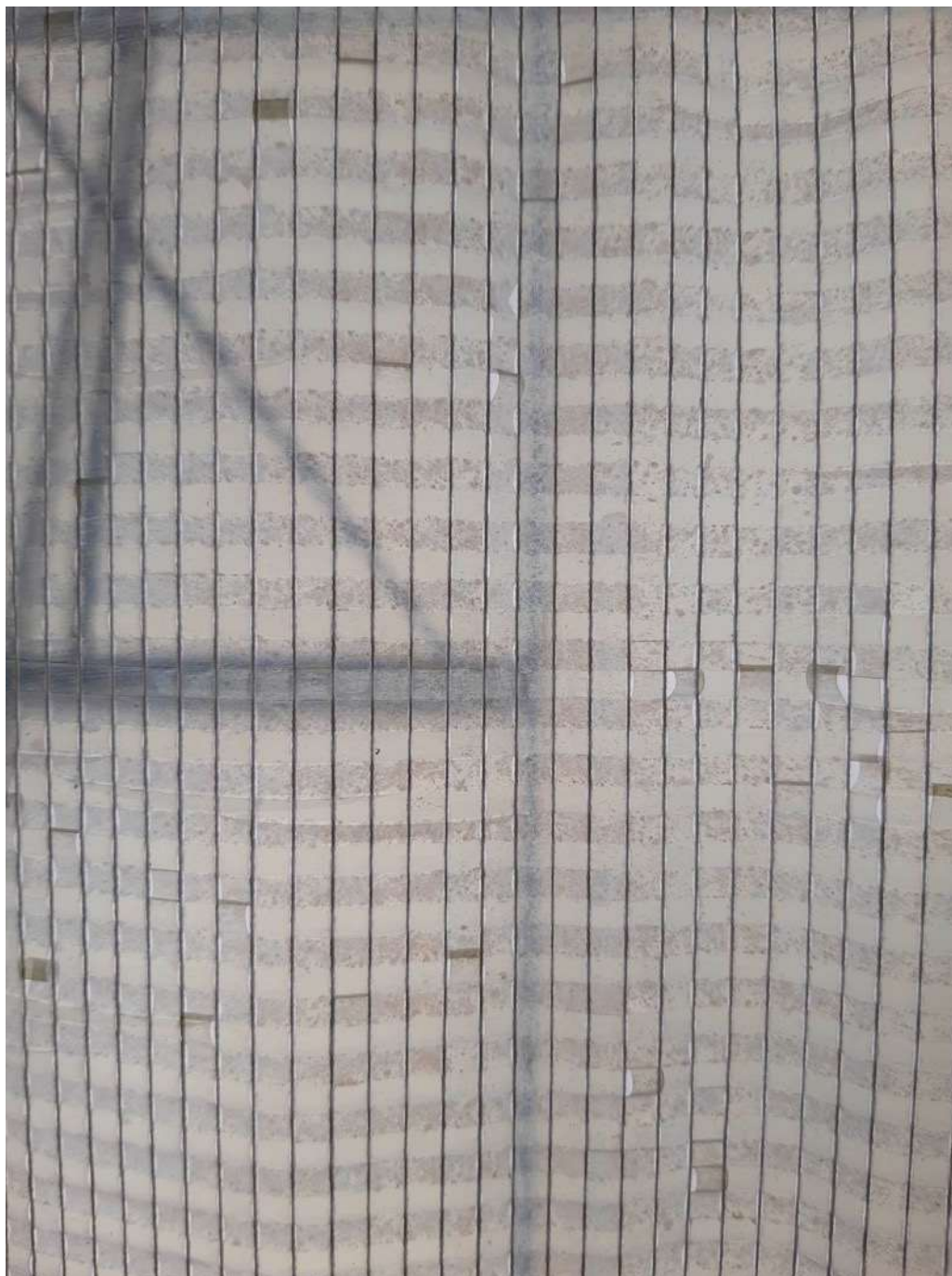


Figure 67 - Échantillon d'écran prélevé le 7 Avril, on voit clairement la partie de l'écran recouverte de la bandelette de PE sans aucune trace de dégradation et la partie de l'écran nue avec des traces de dégradation.

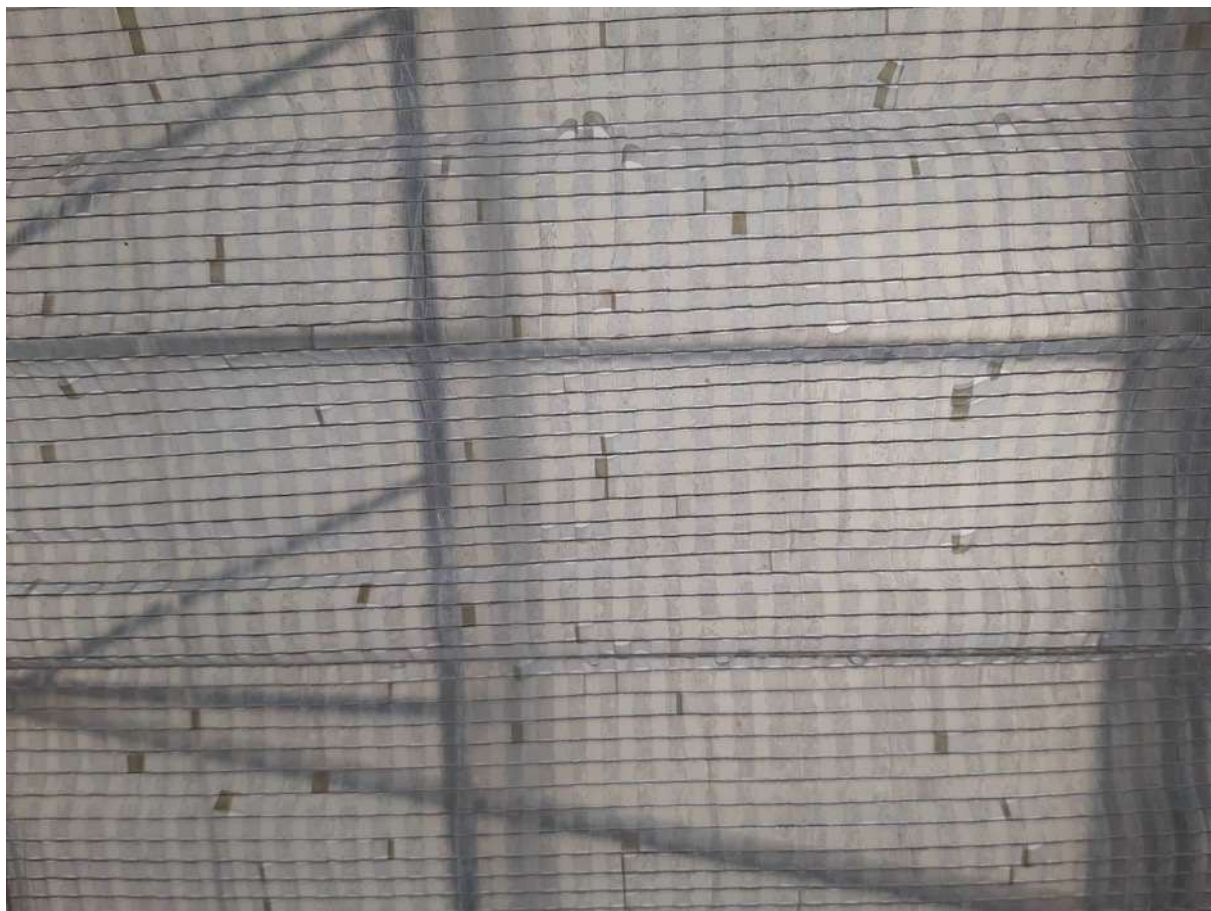


Figure 68 – Photo d'écran pris le 7 Avril (après les tests), les "tâches" noires correspondent à des ouvertures dans l'écran.

4.8 Étude économique des résultats obtenus

Le Tableau 12 présente une étude de rentabilité pour un producteur au vu de la performance de l'écran observée sur les deux expérimentations menées, et d'hypothèses clés (prix du gaz sur le long terme, prix de vente cible de l'écran).

Tableau 12 – Étude de retour sur investissement d'un producteur

	Orchidées	Tomates
Réduction de consommation d'énergie de l'écran Infrascreen par rapport à la référence de marché – %	10%	15%
Consommation moyenne annuelle d'énergie – Gaz naturel, en m ³ /m ² /an	55 m ³	26 m ³
Réduction de consommation d'énergie de l'écran Infrascreen par rapport à la référence de marché - Gaz naturel, en m ³ /m ² /an	5,5 m ³	3,9 m ³
Hypothèse de prix long terme du gaz naturel – en CHF/m ³	0,5 CHF/m ³	0,5 CHF/m ³
Économie de dépense énergétique annuelle – en CHF/m ² /an	2,25 CHF/m ²	1,95 CHF/m ²
Durée de vie moyenne de l'écran – en années	6 ans	6 ans
Économie de dépense énergétique sur la durée de vie de l'écran – CHF/m ²	13,5 CHF/m ²	11,7 CHF/m ²
Différence maximum de prix de vente admissible entre un écran du marché et l'écran Infrascreen – CHF/m ²	5 CHF/m ²	5 CHF/m ²

Ainsi, l'écran permet donc à un producteur d'économiser, sur sa durée de vie, en moyenne 12,6 CHF/m² de plus qu'un écran traditionnel.

Cela détermine de fait le surcroît de coût qu'un producteur pourra accepter de payer par rapport à un écran traditionnel. Or, une règle communément admise dans l'industrie des équipements agricoles est que le prix de vente d'un produit doit représenter 30 à 40% maximum de la valeur créée.

Le coût du substrat et le coût de production de l'écran étant sensiblement les mêmes entre un écran Infrascreen et un écran traditionnel, cela veut donc dire que la somme du coût de traitement du film low-e et la marge brute de la ou des entreprises réalisant la prestation doivent être inférieurs à 5 CHF/m².

Il convient de noter que, bien qu'ils aient été produits sur des machines industrielles, les coûts de production des écrans déployés chez le producteur 1 et Agrotopia sont non pertinents pour cette analyse, trop élevé d'un facteur environ 5 par rapport au prix cible. En effet, les écrans ont été produit sur des machines non encore optimisées, avec des chutes non-utilisées importantes, et à ce stade de développement des étapes de préparation et de conversions des rouleaux engendrant des surcoûts non négligeables ont été nécessaires. Les perspectives de coûts de production à l'échelle légèrement inférieurs à CHF 5m²/an discuté avec les partenaires industriels de la société pour une production stable et optimisée sont néanmoins compatibles avec un business model basé sur un prix cible tel que présenté dans le Tableau 12.



5 Conclusions et résumé

Nous avons appris à :

- Fabriquer un film low-e à une échelle industrielle même si la dépose de la couche de protection reste à améliorer
- Fabriquer un écran à partir d'un film low-e par tissage et par tricottage sans endommager le film low-e, ce qui comme l'a montré la preuve de concept est très critique pour éviter la dégradation de l'écran
- Mesurer une consommation énergétique dans une serre à partir des données des tubes de chauffages
- Comprendre certaines spécificités du pilotage de notre écran en particulier dans une configuration multi-écrans pour maximiser les économies d'énergie (gestion de l'humidité au-dessus des écrans)

Malheureusement compte tenu de la dégradation précoce sur le premier pilote et la durée limitée du pilote Anthura (location de la serre pour deux mois), il a été difficile de valider le comportement de l'écran sur une durée plus importante et également pendant les saisons de printemps et d'été.

La raison principale de la dégradation de l'écran du pilote 1 provient probablement d'un top-coat non optimal et des modifications sur les procédés de dépositions sont en cours. Des essais supplémentaires pratiques seront nécessaires pour s'assurer de la fiabilité des écrans optimisés.

Nous avons également pu constater que si les tests de vieillissement accéléré nous ont beaucoup aidé dans la prise de décisions des choix techniques, ils ne remplacent pas l'utilisation en condition réelle.

6 Aperçu et mise en œuvre prochaine

A l'issue de ce programme, la société Infrascreeen envisage les prochaines étapes suivantes dans le but de pouvoir à terme proposer une solution fonctionnelle au marché :

- Travailler à améliorer la protection du film Infrascreeen dans le but de proposer au marché des écrans possédant les caractéristiques requises en termes de durabilité : 6 à 8 ans de durée de vie sans dégradation de la transmission lumineuse dans le PAR et de la réflectivité dans le MIR
- Modification très substantielle de la machine utilisée pour la dépose de la couche de protection
- Probable augmentation de l'épaisseur de la couche de protection
- Mise en place d'un contrôle qualité plus poussé
- Probable modification du substrat pour passer les tests anti-feu et permettre une fabrication simplifiée en tricottage
- Évaluation puis recommandation sur le pliage maximum autorisé de l'écran
- Limiter les comparaisons énergétiques uniquement quand seuls les écrans d'énergie sont fermés et pendant la nuit

- Surveiller l'humidité au-dessus des écrans en particulier des écrans Infrascreeen ou aluminisé et empêcher toute condensation sur l'écran
- Intégrer l'expérience acquises dans la production sur machines industrielles du film dans le but de préparer une campagne de production à plus large échelle dans des conditions de coûts compatibles avec le prix cible envisagé pour l'écran sur le marché.
- Intégrer l'expérience acquises sur le pilotage de l'écran dans la serre dans le but d'élaborer des recommandations pour les producteurs permettant d'optimiser les performances d'économie d'énergie en se servant au mieux de cet équipement.