

## Rapport final sur le projet PV-Bench 2023-2024 à Mont-Soleil

### 1. Contexte

La centrale solaire de Mont-Soleil est en fonction depuis 1992. Malgré une perte de rendement de seulement 7,5 % au cours des 30 dernières années, il est nécessaire de penser à son renouvellement. Dès sa création, la Société Mont-Soleil a placé la recherche et la communication au cœur de ses activités, contribuant à améliorer les technologies et à partager des connaissances avec la communauté scientifique ainsi qu'avec le grand public. Ces aspects ont toujours guidé les réflexions concernant la manière dont la Société Mont-Soleil a dû et doit évoluer, notamment avec le groupe de travail Avenir SMS. Pour poursuivre dans cet esprit, le concept d'un banc de mesure permettant de comparer des panneaux du marché s'est imposée. Ainsi, au fil des années, ce comparatif pourrait remplacer progressivement les tables de la centrale existante. Cela présenterait le double avantage de permettre une sélection des panneaux les plus adaptés en cas de repowering, mais aussi d'offrir une base de comparaison scientifique et neutre entre les différents producteurs et modèles de panneaux PV. Bien que l'idée semble séduisante, il a semblé opportun de mener une expérience pilote sur deux ans afin d'en évaluer la pertinence.

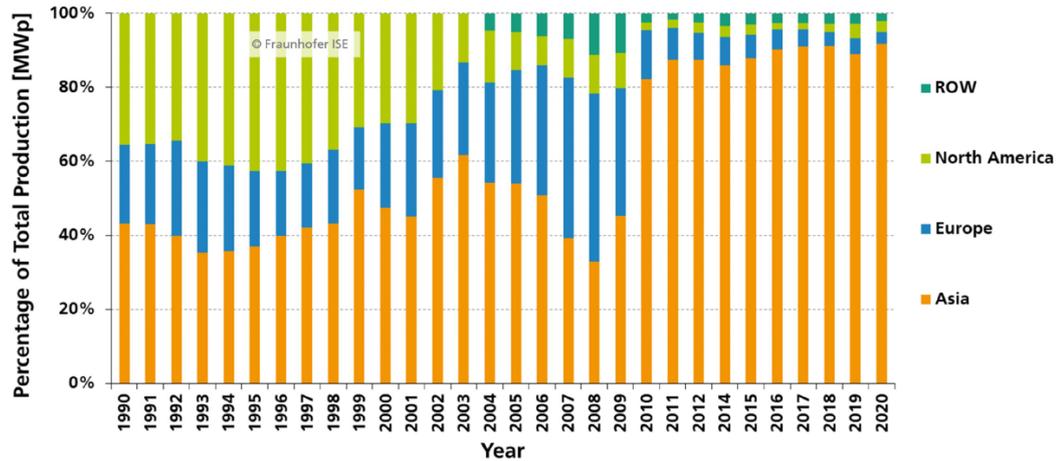
### 2. Vision PV Bench

Depuis trois décennies, la centrale photovoltaïque de Mont-Soleil prouve la fiabilité de l'énergie solaire et de la technologie photovoltaïque. À l'avenir, la centrale PV de Mont-Soleil pourrait encore plus être transformée en une centrale de référence internationale pour les modules photovoltaïques : les nouveaux types de modules photovoltaïques les plus pertinents pourraient être installés à Mont-Soleil et observés pendant toute leur durée de vie. Chaque année, les derniers produits commerciaux seraient ajoutés à la centrale de référence.

### 3. Situation / réflexions initiales

#### 3.1 Etat du marché, acteurs et tendances

Entre les années 1990 et 2020, le marché photovoltaïque a subi une transformation majeure en termes d'évolution sociale et politique. De plus en plus, l'accent a été mis sur la quantité plutôt que sur la qualité. La production s'est déplacée des États-Unis et de l'Europe vers l'Asie de l'Est (voir graph. ci-dessous).



Data: Up to 2004 Strategies Unlimited; 2005 to 2009: Navigant Consulting; since 2010: IHS Markit. Graph: PSE Projects GmbH 2021

Cependant, au début des années 2020, le marché connaît une évolution remarquable. Des producteurs américains et européens de renom se retirent de plus en plus de l'Asie et se concentrent sur le développement qualitatif de leurs produits et sur la (re)mise en place d'une production dans leur pays d'origine. La production de cellules est de plus en plus délocalisée en Europe. Le contenu local fait l'objet d'une attention accrue et d'un soutien politique massif <sup>1</sup>. PV Magazine titrait alors : "European Union Solar Manufacturing – The Time is Now".

### 3.2 Aujourd'hui

Ce retour d'une production en occident n'a pas eu lieu ; plus de 90 % de la production de cellules PV et de modules provient de la Chine, un résultat direct des stratégies de promotion étatique et de l'industrialisation à grande échelle. Ce basculement vers l'Asie a permis de réduire les coûts de production, mais il a aussi soulevé des questions sur la qualité et la durabilité des modules produits à grande échelle.

Bien que des progrès aient été récemment réalisés en matière de rendement des cellules solaires avec l'hétérojonction, le PERC et le TOPCON, les développements révolutionnaires du photovoltaïque au cours de la dernière décennie n'ont pas eu lieu sur le plan technologique, mais sur celui de l'industrialisation et de la production de masse du photovoltaïque.

La qualité et la longévité des produits deviennent alors des facteurs critiques. Que les modules PV aient une durée de vie de 20 ou 35 ans, que la dégradation soit de 0,1 % ou de 1 % par an, sera à plus long terme un paramètre décisif pour la viabilité du système d'approvisionnement en électricité.

En Suisse, de la gauche à la droite, un consensus rare règne : le photovoltaïque jouera un rôle complémentaire central dans notre avenir énergétique. Les modules solaires installés aujourd'hui sur les toits suisses constituent un pilier de l'approvisionnement énergétique du pays pour les décennies à venir.

<sup>1</sup> (<https://www.parlament.ch/fr/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20213870>) et (<https://www.pv-magazine.com/2022/03/12/the-weekend-read-eu-solar-manufacturing-the-time-is-now/>)

### *Introduire une réflexion*

- *concernant l'urgence suisse d'augmenter la production hivernale de courant électrique*
- *en soulignant que la contribution du PV dans ce contexte ne se fera pas majoritairement dans les régions du Mittelland et des grandes villes*
- *mais sur des sites en altitude comme p.e. à Mont-Soleil avec des panneaux spéciaux avec une inclinaison d'au moins 60° et l'orientation plein sud*

Bien que plus de 100 millions de francs soient actuellement dépensés chaque année en Suisse pour des modules photovoltaïques (volume de marché d'environ 600 MWp, état 2021), on ne sait que peu de choses sur la qualité de ces modules. En particulier, les modules nouvellement disponibles sur le marché sont évalués uniquement sur la base des déclarations du fabricant dans les fiches techniques.

Des études indépendantes sur la qualité et les performances ne sont pratiquement pas disponibles pour les clients finaux, et les données de base pour la comparaison économique et écologique des modules PV font généralement défaut.

## 4. Le projet PV-Bench

Face à cette situation, la Société Mont-Soleil a pris l'initiative de lancer un projet de Benchmark visant à faire de son installation un lieu de référence pour comparer globalement, objectivement et scientifiquement les modules PV. Ce projet s'inscrit dans une tendance mondiale où la demande pour des sources d'énergie renouvelables fiables et de qualité augmente, en particulier dans un contexte où les objectifs climatiques imposent une réduction drastique des émissions de CO<sub>2</sub>.

Le projet PV-Bench a pour but de :

- **Évaluer les modules PV** disponibles sur le marché en termes de rendement, durabilité et impact environnemental.
- **Fournir des données neutres et transparentes** aux décideurs politiques, investisseurs, et entreprises de planification pour les guider dans leurs choix technologiques.
- **Etablir un système d'alerte précoce**, identifier les problèmes le plus rapidement possible et non pas seulement lorsque des dizaines de mégawatts sont déjà installés sur les toits
- **Assurer une utilisation optimale des surfaces disponibles**, en maximisant la production d'énergie solaire tout en minimisant l'impact environnemental.
- **Renforcer le rôle de Mont-Soleil** comme centre de référence international dans le domaine des énergies renouvelables.

La méthode proposée est basée sur :

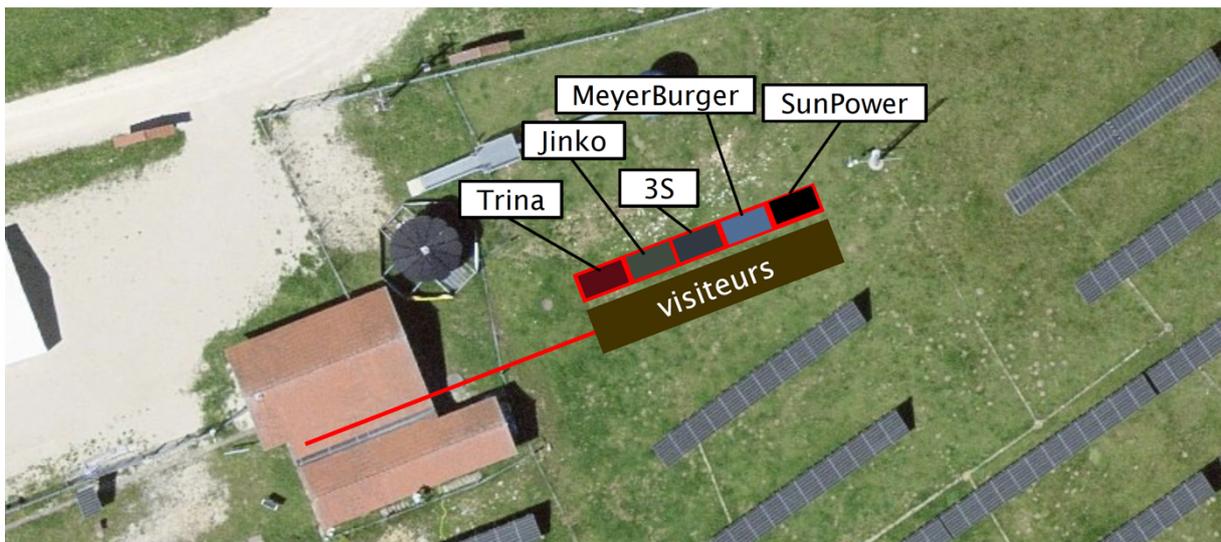
- **Indépendance** - achat anonyme des panneaux
- **Adhésion à PV Camper** (qualité de mesures élevées et standardisées)
- **Collaboration avec des partenaires scientifiques (SUPSI, EPFL)**

## 5. Projet Pilote 2023 – 2024

Afin d'établir la faisabilité d'un projet Benchmark ambitieux et de grande envergure répondant aux objectifs ci-dessus, un projet pilote a été défini.

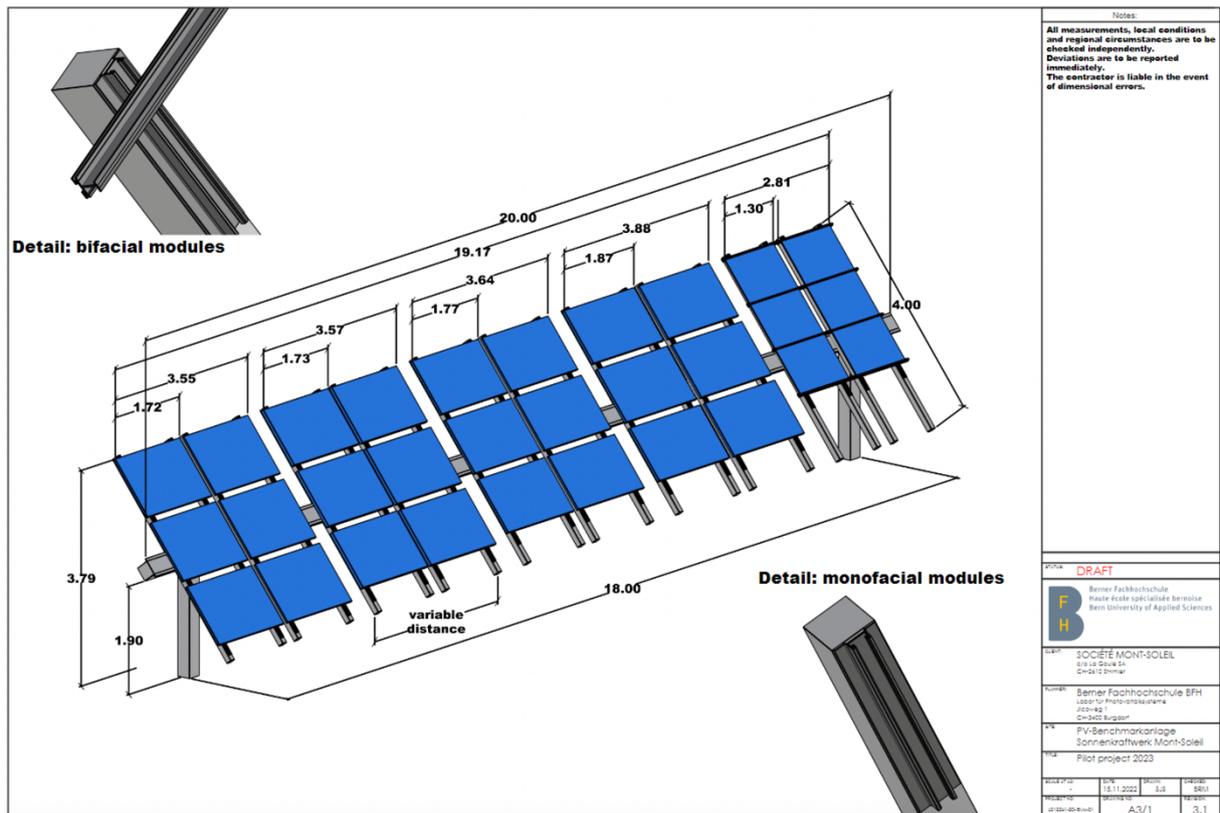
Le rôle de ce dernier est de :

1. Vérifier l'acceptation / l'intérêt (interne et externe)
2. Développer/établir une méthode de mesure
3. Stockage / transmission / présentation des données
4. « Mont-Soleil 2.0 » : Augmentation immédiate de l'attractivité de Mont-Soleil
5. Définition des questions de recherche



### Mise en place de l'infrastructure pilote

Le projet PV-Bench a été conçu pour être un laboratoire à ciel ouvert, permettant de tester et de comparer plusieurs types de modules PV dans des conditions climatiques rigoureuses. La phase pilote, mise en œuvre en 2023 pour une période de 2 ans, a nécessité la construction d'une nouvelle table, pouvant accueillir 30 modules photovoltaïques de cinq fabricants différents, répartis sur trois rangées.



- Deux rangées ont été installées avec des plaques métalliques à l'arrière des modules pour simuler un environnement typique de toiture.
- La rangée supérieure ne comporte pas de plaque métalliques permettant de mesurer les performances des panneaux bifaciaux.

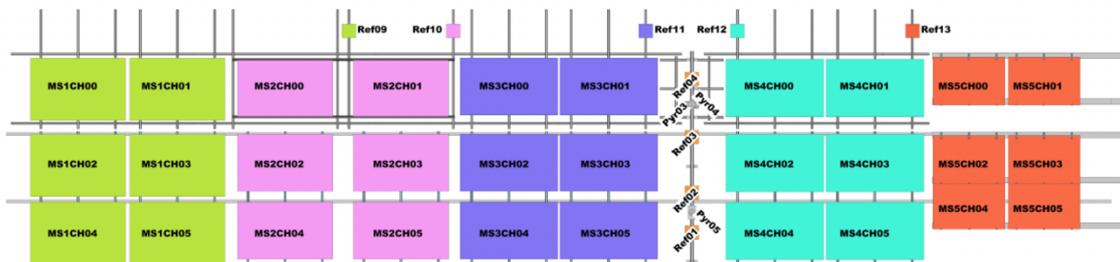
- Mise en place de l'infrastructure électrique (mesure HKN, raccordement sur le transformateur 100 KVA existant).
- Mise en place du système de mesure : 4 pyranomètres class A, station météo clairée, curve trace.
- Mise en place de la transmission des données, de la base de donnée et de l'affichage.
- Installation pour le public (signalétique, affichage de la puissance à partir de la base de donnée).

Les modules installés proviennent d'une diversité géographique et technologique :

- **2 modules chinois** : Jinko et JA Solar, deux leaders mondiaux de la production PV.
- **2 modules européens** : Meyer Burger (Suisse/Allemagne) avec des cellules HJT bifaciales.
- **1 module suisse** : 3S Swiss Solar Solutions, un exemple de technologie locale.

**Vorderseite Anlage  
(Sicht nach Norden)**

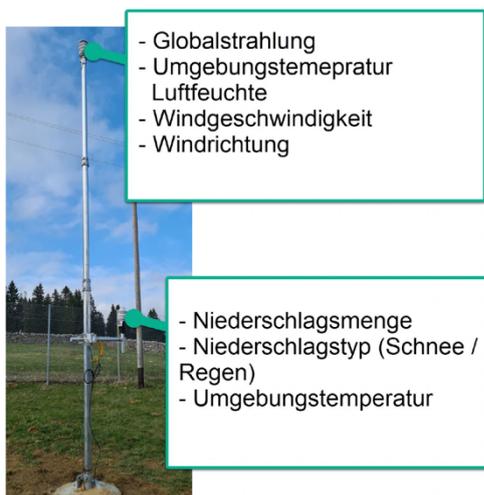
	IVCT 01:	IVCT 02:	IVCT 03:	IVCT 04:	IVCT 05:
<b>Hersteller:</b>	Jinko	Meyer Burger	Meyer Burger	JA Solar	3S
<b>Modultyp:</b>	Tiger Neo JKM430N-54HL4-V - (BF, R30, EVO2)	Glass 375 A.1 Bifacial-Doppelglas - (BF, R35, EVO2)	White 385 A.1 - (BF, R35, MC4)	JAM60S20-385/MR - (R30, MC4, KR)	MegaSlate II Black 6DL-195
<b>Herkunftsland:</b>	China	Deutschland	Deutschland	China	Schweiz
<b>Masse:</b>	1722mm x 1134mm	1722mm x 1041mm	1767mm x 1041mm	1769mm x 1052mm	1300mm x 875mm
<b>Gewicht:</b>	22kg	24.4kg	19.7kg	20.2kg	16.3kg
<b>Elektrische Daten</b>					
- <b>Nennleistung:</b>	430 Wp	375 Wp	385 Wp	385 Wp	195 Wp
- <b>Nennstrom:</b>	13.49 A	9.9 A	10.2 A	10.99 A	9.1 A
- <b>Nennspannung:</b>	31.88 V	38.0 V	37.6 V	35.04 V	21.9 V
- <b>Kurzschlussstrom:</b>	14.23 A	10.3 A	10.8 A	11.53 A	9.5 A
- <b>Leerlaufspannung:</b>	38.49 V	44.6 V	44.4 V	41.78 V	26.9 V



**Collecte et gestion des données**

Un système de collecte de données a été installé pour mesurer avec précision les performances des modules. Des mesures sont effectuées toutes les minutes, enregistrant environ 30 000 points de données par module et par minute. Ces données incluent :

► **Wetterdaten**



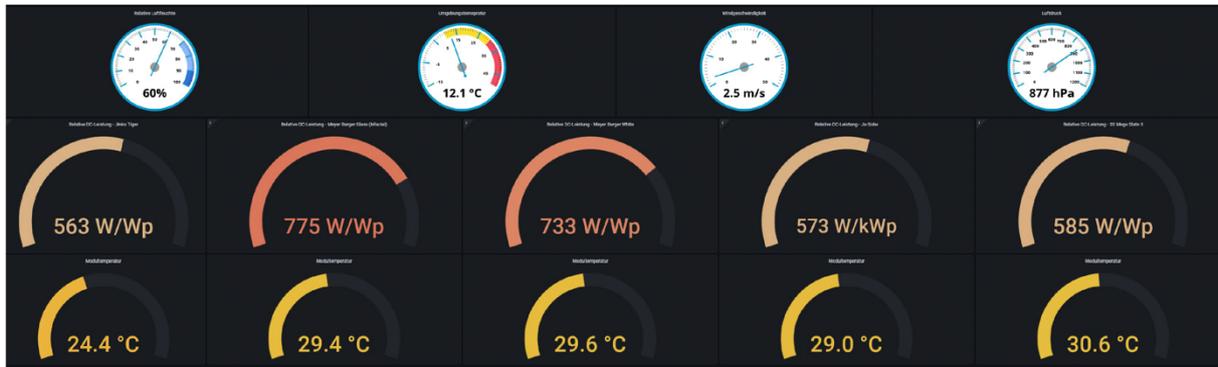
**Referenzdaten**



**Modulparameter**



- **Les données météorologiques** (ensoleillement, température, vitesse du vent, précipitations).
- **Les données électriques** (courant, tension, puissance, température des cellules).
- **Les conditions spécifiques à chaque module**, telles que la propreté des modules et les variations saisonnières.



Toutes ces données sont ensuite agrégées dans une base de données centrale à la Haute école spécialisée bernoise (BFH), où elles sont analysées en collaboration avec d'autres instituts de recherche tels que SUPSI et l'EPFL.



## 6. Les partenaires

Le succès du projet pilote PV-Bench repose sur un concept global et une collaboration étroite entre 3 acteurs aux compétences complémentaires. Chaque partenaire a joué un rôle clé dans la mise en œuvre et la gestion du projet :

- **Société Mont-Soleil (SMS)** : La SMS est le maître d'œuvre du projet, responsable de l'infrastructure et de la coordination générale. Avec 30 ans d'expérience dans l'exploitation d'une installation PV, la SMS apporte une expertise unique dans la gestion d'une installation en conditions réelles.
- **Haute école spécialisée de Berne (BFH)** : Responsable des aspects scientifiques et de la collecte des données, la BFH joue un rôle crucial dans l'analyse des performances des modules PV. Le laboratoire PV de Berthoud est reconnu pour son expertise dans la recherche appliquée sur les systèmes photovoltaïques.
- **Espace découverte Énergie (EdE)** : Organisation régionale chargée de la communication autour du projet, l'EdE assure que les résultats du projet soient accessibles à un public large, y compris les décideurs locaux et la population.

Le SUPSI a apporté un soutien technique important en testant les panneaux en laboratoire avant leur mise en place et après 1 année entière sur site.

[www.pv-bench.ch](http://www.pv-bench.ch)

Porteurs du projet pilote 23-24 • Träger des Pilotprojekts 23-24:  
 Société Mont-Soleil × Berner Fachhochschule × Espace découverte Énergie



- **Soutien financier** : Le projet a bénéficié de soutiens de l'Office fédéral de l'Énergie (OFEN), du canton de Berne et de la fondation culturelle GVB, reflétant l'intérêt national pour les projets d'énergie solaire de haute qualité.

## 7. Construction

La construction de l'infrastructure PV-Bench a été réalisée en deux phases :

- **Installation des modules** : Trente modules ont été installés sur trois rangées, avec une infrastructure permettant un suivi détaillé de chaque module. La disposition des modules a été soigneusement planifiée pour assurer des comparaisons précises entre différents types de cellules.

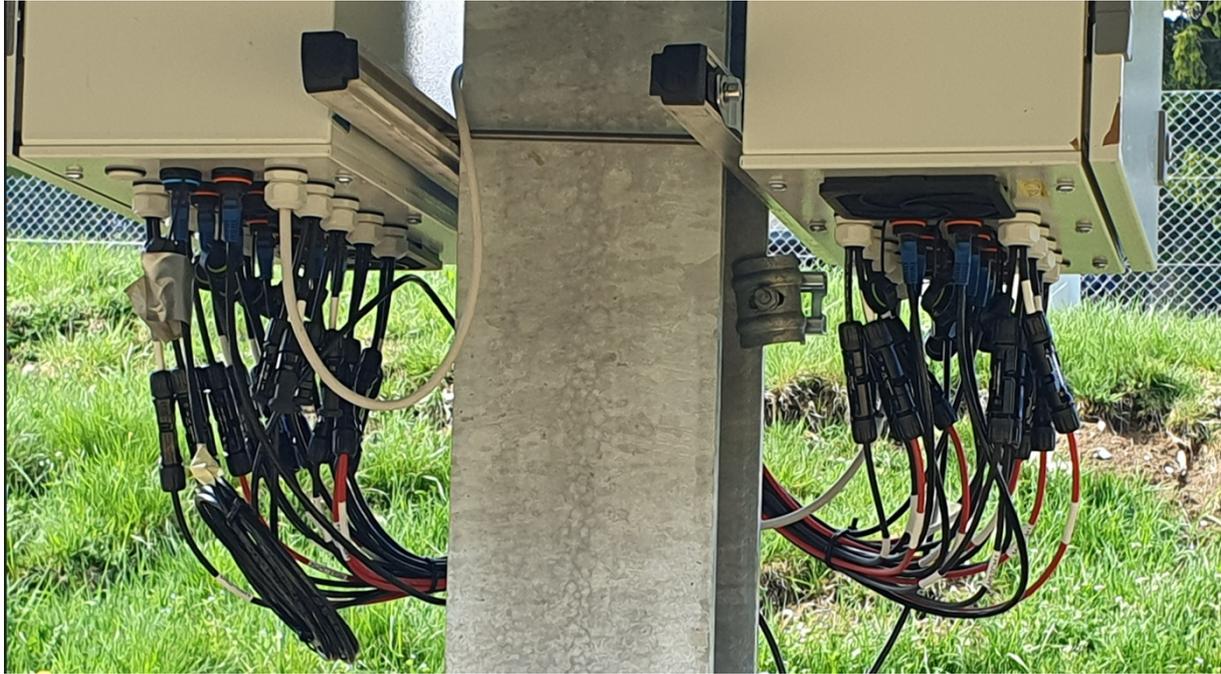






- **Système de mesure** : Un système de mesure précis a été développé spécifiquement par la BFh et mis en place pour collecter les données. Ce système permet de capturer les variations dans les performances des modules tout au long de la journée et dans différentes conditions météorologiques. Des pyranomètres et stations météorologiques ont été installés pour suivre en temps réel les conditions climatiques. Les données météorologiques ainsi que les données électriques des modules PV sont mesurées, de manière automatisée et individuellement par module PV chaque minute. Les données météorologiques comprennent l'ensoleillement, la température, la vitesse du vent, les précipitations et la pression atmosphérique. Les données des modules PV comprennent le courant, la tension et la puissance ainsi que la température des modules. Le rendement énergétique des modules est calculé à partir de ces données. Les 30'000 points de mesure enregistrés par module et par minute sont combinés en une courbe caractéristique qui présente l' « état de santé » de chaque module en temps réel pour la recherche, le marché et le public intéressé (via l'information en ligne sur Mont-Soleil ainsi que via Internet).



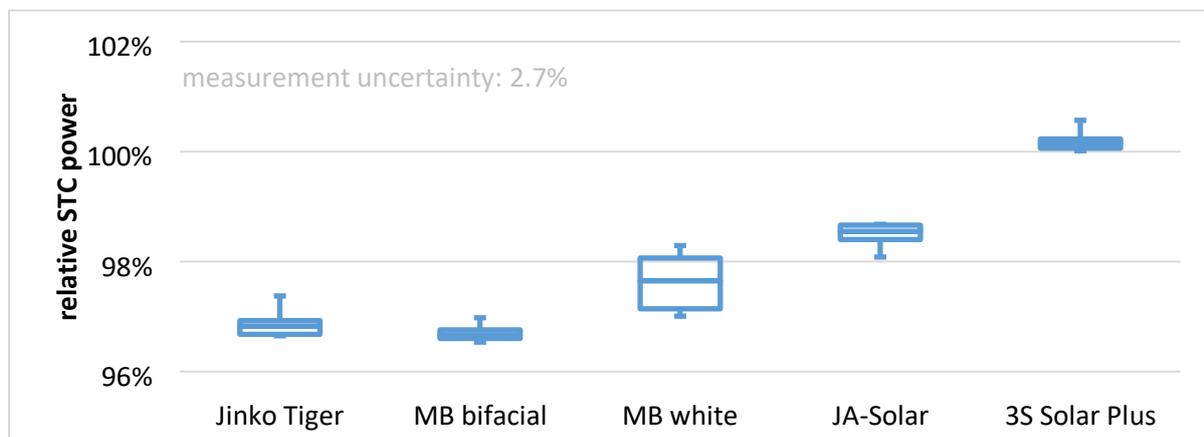


L'installation de cette infrastructure a représenté un défi technique important, notamment en raison de la nécessité de garantir l'exactitude des mesures tout en minimisant les interférences extérieures.

## 8. Exploitation et conclusions scientifiques

### Résultats préliminaires

Les tests réalisés sur les panneaux neufs dans le laboratoire du SUPSI ont montré que seul le module 3S Solar Plus atteint la puissance annoncée.

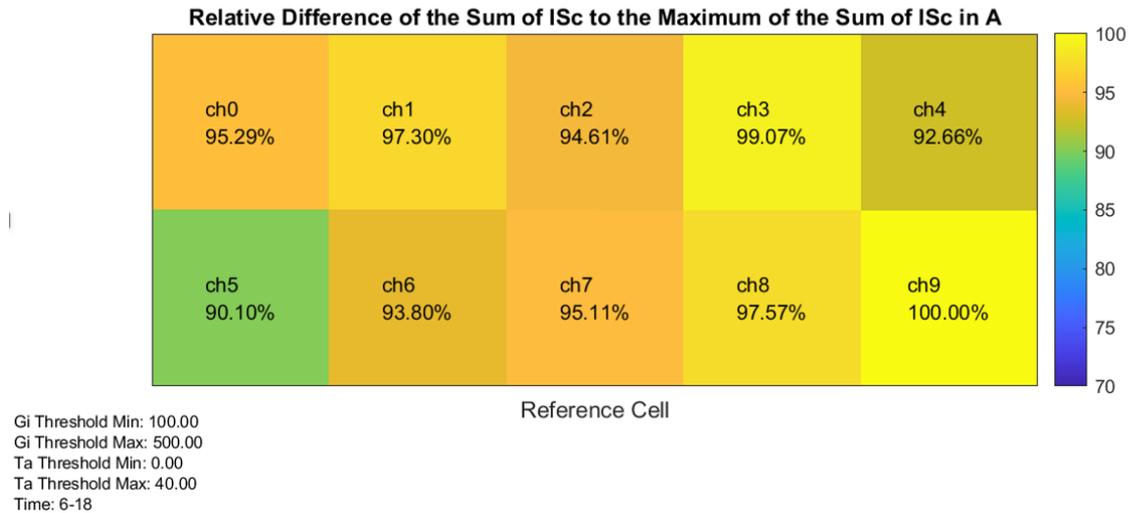


Mesures initiale du SUPSI

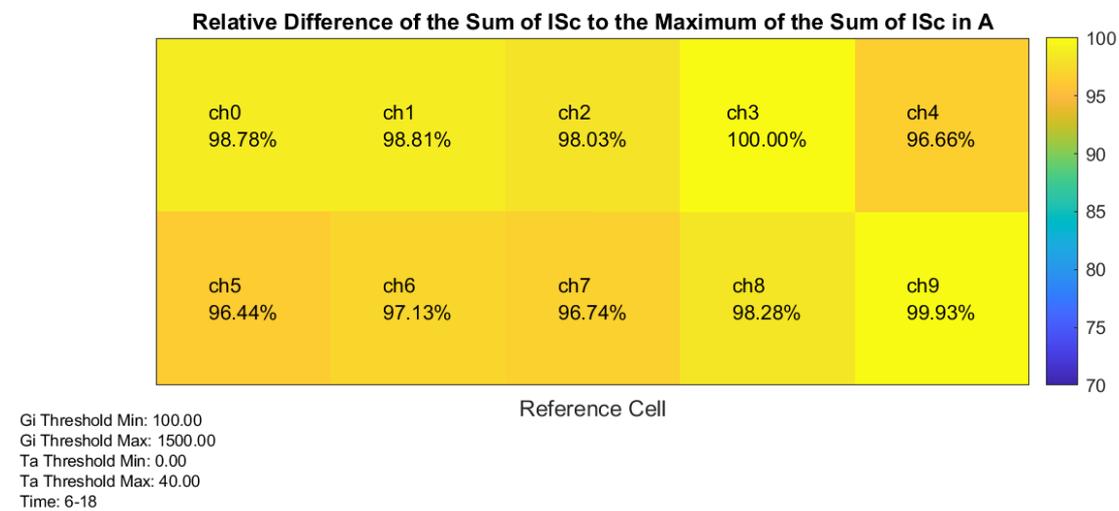
Après six mois de fonctionnement, plusieurs conclusions peuvent déjà être tirées du projet :

- **Stabilité du système** : Le système de montage et les équipements de mesure se sont avérés fiables et efficaces. Les différences de performance entre les modules installés avec des plaques métalliques à l'arrière et ceux ventilés ont été clairement observées et quantifiées.
- **Modules bifaciaux** : Les modules bifaciaux ont montré un rendement supérieur de 5 à 10 % par rapport aux modules monofaciaux dans certaines conditions, atteignant même des gains de 20 % dans des configurations spécifiques.

- **Homogénéité de l'ensoleillement** : Des variations de 1 à 2 % ont été observées entre les rangées supérieures et inférieures en raison des différences d'exposition au soleil. Ces variations sont prises en compte dans les analyses pour garantir la fiabilité des comparaisons.

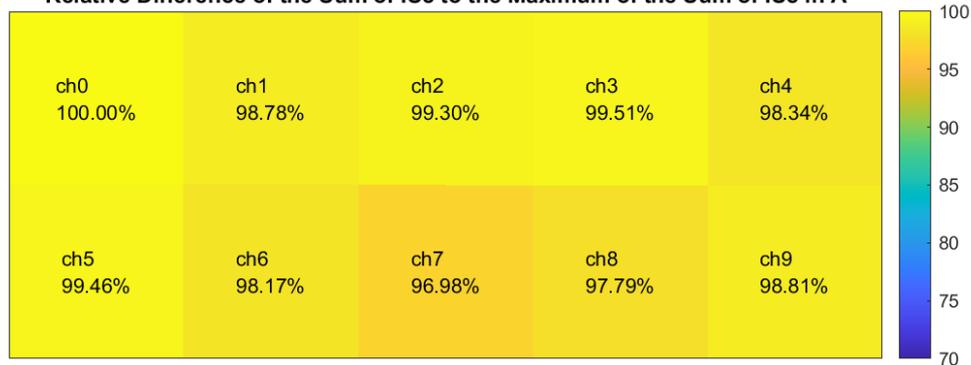


Une inhomogénéité importante apparaît lorsque le rayonnement est faible



L'inhomogénéité est réduite lorsque l'ensemble du rayonnement est pris en compte

Relative Difference of the Sum of ISc to the Maximum of the Sum of ISc in A



Reference Cell

Gi Threshold Min: 800.00  
Gi Threshold Max: 1500.00  
Ta Threshold Min: 0.00  
Ta Threshold Max: 40.00  
Time: 6-18

L'inhomogénéité nettement plus faible uniquement pour un rayonnement élevé et des conditions très homogènes sur les rangées supérieures.

### Perspectives des mesures à long terme

Le défi réside dans la détection des erreurs :

- Erreurs grossières (valeurs aberrantes)
  - Erreurs systématiques (mauvais étalonnage)
  - Bruit de mesure
  - données non pertinentes » (par exemple, irradiation très faible, influences dominantes d'effets secondaires)
- Influence des effets hors du champ d'application (dégradation)
  - La limitation de l'onduleur n'affecte pas la dégradation mais les données
  - Maintenance, fusibles déclenchés, etc.
- Méthode utilisée dans la recherche actuelle : filtrage des données

## 9. Enseignements

L'expérience a mis en évidence les difficultés à réaliser une comparaison scientifique extrêmement précise dans des conditions réelles. Les conditions environnementales ainsi que la faible variabilité des différents panneaux testés ont rendu complexe l'obtention de données rigoureusement comparables. La faible variabilité étant liée à la courte durée du projet pilote. Un protocole et des appareils de mesures particulièrement performants et présentant des marges d'erreurs très fine n'ont pas réussi à palier pleinement aux difficultés mais on permet de progresser et de développer des compétences et des savoir-faire.

### Bénéfices du pilote PV Bench 23 -24

- Mobilisation des parties prenantes et des partenaires : ce projet a permis de renforcer les liens entre les partenaires, les institutions académiques, ainsi que l'écosystème local.
- Accumulation de savoir-faire et de connaissances : les essais réalisés ont enrichi l'expertise technique et opérationnelle en matière de comparaison de panneaux solaires, de méthodologie et de performance de mesure.
- Visibilité scientifique : le projet a renforcé la présence de la centrale de Mont-Soleil dans le milieu académique, notamment à travers nos relations avec des institutions.
- Opportunités pour la PhD SummerSchool et les visites académiques : PV-Bench a suscité un fort intérêt dans le cadre de la PhD SummerSchool où les étudiants ont eu l'occasion de réfléchir et de proposer des manières de réaliser et de compléter ce type d'expérimentation.
- Visites du site : l'expérience a également offert des opportunités pour des visites du site, permettant de partager nos avancées avec le public et des experts. Un grand intérêt est à relever de la part du public.
- Gain d'image dans la région et auprès des médias : ce projet a eu un impact positif sur la visibilité du site de Mont-Soleil, à la fois au niveau régional et dans les médias.
- Renforcement de notre positionnement dans l'écosystème local : enfin, le projet PV-Bench a contribué à améliorer l'image et la crédibilité des travaux effectués auprès des partenaires locaux.

## 10. Conclusion

La position des acteurs principaux du marché a sensiblement changé. La relocalisation en Europe et aux Etats-unis n'a pas été observée. L'Asie et en particulier la Chine détient aujourd'hui pratiquement l'intégralité du marché. L'intérêt de mettre en place un comparatif équitable qui prendrait en considération les modules dans leur ensemble perd son intérêt lorsqu'il s'agit de comparer des panneaux provenant tous de la même région du monde, dont les conditions de production en terme d'impact environnemental et / ou social reste confidentielle.

Le futur de l'installation est liée au bouleversement importants qui vont avoir lieu dans le cadre de l'extension de la centrale existante (v. projet 'PV en cohabitation'). Une proposition concernant le futur de la table du projet pilote PV Bench sera proposé au cours de l'année 2025.