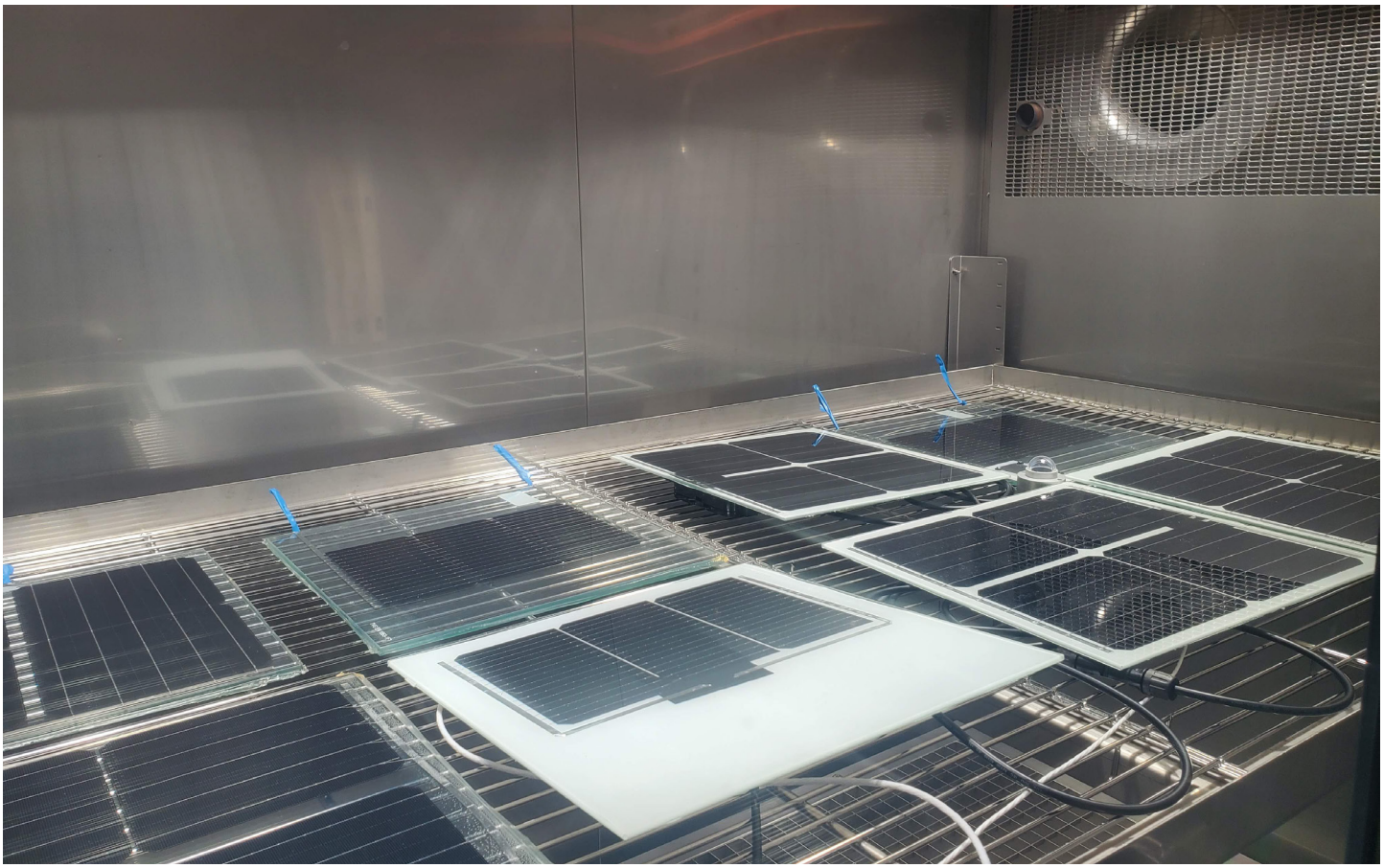
DES MODULES PV CONÇUS POUR L'ESPACE ALPIN

Dans les Alpes, les panneaux photovoltaïques sont exposés, entre autres, à des températures basses et à d'importantes charges de neige. Une équipe de la Haute école spécialisée du Tessin (SUPSI) a mené, en collaboration avec des partenaires autrichiens, des recherches sur les caractéristiques que doivent présenter les panneaux solaires pour résister à ces contraintes particulières. À cette fin, les scientifiques ont mis au point des procédures d'essai spécifiques qui soumettent les modules photovoltaïques alpins à des contraintes plus importantes, ce qui permet parfois d'accélérer les essais.



Des modules photovoltaïques soumis à un test aux UV visant à déterminer dans quelle mesure ils sont endommagés par le rayonnement ultraviolet. Foto : OFI/Gassner

Article spécialisé concernant les connaissances acquises lors d'un projet de recherche dans le domaine du photovoltaïque soutenu financièrement par l'Office fédéral de l'énergie. L'article a été publié, entre autres, sur la plateforme en ligne ee-news.ch (édition août 2026).

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'énergie OFEN

Une grande partie de l'Autriche et de la Suisse se situe dans les Alpes. Il en résulte des enjeux similaires pour les deux pays en matière d'utilisation du photovoltaïque (PV). L'Autriche souhaite produire davantage d'électricité renouvelable en altitude afin d'alimenter, par exemple, les zones touristiques. Dans le domaine skiable de Sölden (Tyrol), une installation solaire alpine composée de 800 « arbres solaires » sera mise en place cette année. Chacun de ces arbres est doté de quatre ailes composées de modules photovoltaïques montés verticalement, lesquels produisent de l'électricité des deux côtés. Une fois les travaux d'achèvement, prévus pour octobre, terminés, la centrale devrait fournir une puissance pouvant atteindre 6,3 MW.

La Suisse va encore plus loin dans le développement du photovoltaïque dans l'espace alpin en accélérant ce processus grâce à une loi fédérale d'urgence (« Solarexpress »). C'est grâce à cet instrument de soutien que les premières grandes installations alpines de MadrisaSolar (11 MW, Grisons) et de Sidenplangg (8 MW, Uri) ont vu le jour; depuis l'automne 2025, elles fournissent notamment de l'électricité hivernale très prisée. Ces deux installations sont encore en cours d'aménagement. D'autres grandes installations sont actuellement en cours de construction dans les Alpes grisonnes, à savoir SedrunSolar (20 MW) et NalpSolar (8 MW). Afin de lancer de nouveaux projets, le « Winterbonus », qui succède au « Solarexpress », est désormais en vigueur.

Charges élevées, basses températures

Dans les Alpes, les grandes installations solaires sont encore rares. Cependant, comme la production d'électricité au-dessus de la limite du brouillard recèle un fort potentiel, notamment pour l'approvisionnement en électricité en hiver, ce domaine fait l'objet de recherches intensives. Les modules photovoltaïques destinés à une utilisation en altitude sont soumis à des exigences particulières : elles doivent résister à des charges de neige et de vent importantes, ainsi qu'à des températures basses et à un rayonnement ultraviolet accru. Un projet helvético-autrichien baptisé PV-DETECT a cherché à déterminer quels modules répondaient à ces conditions. Pour cette étude, la Haute école spécialisée tessinoise SUPSI a collaboré avec l'Institut autrichien de recherche en chimie

PROCÉDURE D'ESSAI

Afin que la production d'électricité photovoltaïque (PV) soit sûre et fiable, les fabricants doivent soumettre les modules récemment développés à une série de tests. En voici une sélection :
Les tests UV permettent de déterminer dans quelle mesure le rayonnement ultraviolet (UV) endommage les modules photovoltaïques. Le rayonnement UV fait partie de la lumière solaire, avec une longueur d'onde plus courte que celle de la lumière visible.
Les essais de cycles thermiques permettent de déterminer dans quelle mesure les modules photovoltaïques sont affectés par les variations de température. Les variations de température, par ex. entre le jour et la nuit, entraînent des dilatations différentes des matériaux, ce qui peut provoquer la rupture des soudures ou le décollement des couches du module (délaminage).
Les tests d'humidité permettent d'évaluer les effets néfastes d'une humidité élevée sur les modules photovoltaïques.
Les essais de résistance mécanique permettent de s'assurer que les modules photovoltaïques résistent aux charges statiques dues à la neige et aux charges dynamiques dues au vent.
Les tests de points chauds (hot spots) permettent d'étudier la formation de ce que l'on appelle des points chauds, c'est-à-dire des zones de surchauffe localisées dans le module. Des dommages surviennent généralement lorsque certaines parties d'un module sont temporairement ombragées, par ex. par des cheminées ou des arbres, ce qui entraîne une surchauffe de certaines cellules solaires ou de certaines zones de cellules car ces cellules ombragées consomment l›énergie du module au lieu de la transmettre à l'onduleur. Dans le cas des modules installés en altitude, l'ombrage est parfois causé par d'autres modules lorsque ceux-ci sont montés à une inclinaison relativement forte afin d'obtenir des rendements élevés en hiver (ombrage rangée par rangée).
Les tests des diodes de dérivation permettent de vérifier la capacité des diodes de dérivation à supporter des courants et des températures élevées. Les diodes de dérivation sont un élément de sécurité intégré aux modules photovoltaïques qui empêche le courant de circuler à travers les cellules solaires ombragées. La dérivation du courant permet d'éviter les dommages causés par une surchauffe.

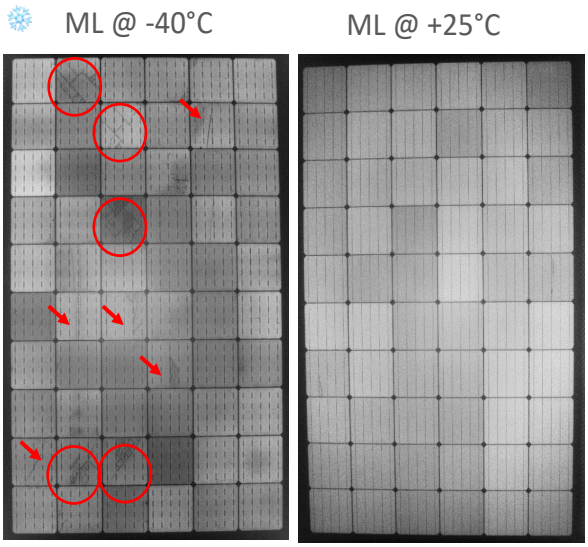
et technologie (OFI) de Vienne. Ce projet, qui s'inscrit dans le cadre du réseau de recherche européen SOLAR-ERA.NET, a été soutenu, du côté suisse, par l'Office fédéral de l'énergie.

Grâce à PV-DETECT, les chercheurs ont pu se faire une idée précise de ce à quoi devrait ressembler un module photovoltaïque destiné à des applications alpines : ils recommandent l'utilisation de modules à double vitrage encadrés, les deux vitres devant avoir une épaisseur d'au moins 3 mm. Les polyoléfines constituent la principale catégorie de matériaux d'encapsulation. « Les élastomères de polyoléfine (POE) restent élastiques même à basse température et protègent mieux les cellules contre les contraintes mécaniques que l'éthylène-acétate de vinyle (EVA), couramment utilisé dans les modules standard », explique Anika Gassner, qui a rédigé sa thèse de doctorat sur ce sujet à l'OFI.

Ajustement des conditions d'essai

À l'heure actuelle, les fabricants de modules photovoltaïques doivent effectuer des essais de certification avant de pouvoir commercialiser de nouveaux modules. Ces derniers visent à garantir la sécurité et la robustesse des installations PV. Les essais appliqués (voir encadré p.2) répondent aux normes de la Commission électrotechnique internationale (CEI). Les normes d'essai CEI sont adaptées aux applications photovoltaïques classiques destinées aux toitures résidentielles ou aux installations au sol. « En revanche, lorsque les modules sont utilisés pour des applications ‹ non conventionnelles › dans des stations alpines ou sur des façades et des toits (photovoltaïque intégré au bâtiment/BIPV), les essais ne sont pas optimaux », explique Ebrar Özkalay, chercheur à la SUPSI.

Dans le cadre du projet PV-DETECT, les procédures d'essai ont été adaptées afin de répondre aux conditions d'utilisation spécifiques des modules alpins et des modules intégrés aux bâtiments. Les modules BIPV ont tendance à dégager davantage de chaleur, car ils ne parviennent pas à la dissiper aussi efficacement par l'arrière que les modules classiques montés sur support. Afin de tenir compte de l'augmentation de la production de chaleur, les températures d'essai ont été relevées dans le PV-DETECT ; par exemple, pour les essais aux UV, elles sont passées de 60°C (conformément à la norme CEI) à 110°C (PV-DETECT). Les conditions d'essai pour les modules alpins ont également été adaptées de manière ciblée: afin de reproduire les conditions hivernales, les chercheurs de l'OFI ont réalisé des essais de résistance mécanique statique dans une chambre climatique à des températures pouvant atteindre -40°C (et non à 25°C comme le prévoit la norme CEI). C'est ainsi que les scientifiques impliqués sont notamment parvenus à la conclusion – comme mentionné plus haut – que, pour la région alpine, le matériau d'encapsulation POE est plus adapté que l'EVA.



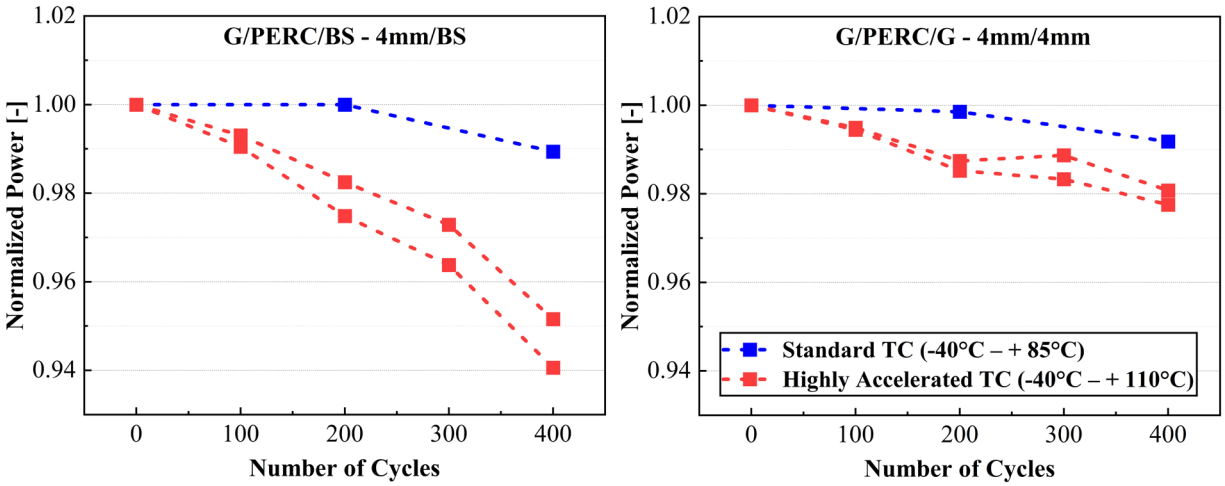
Module photovoltaïque après un test de résistance d'une heure à -40°C (à gauche) et à 25°C (à droite). À basse température, des dommages apparaissent, lesquels peuvent être détectés par électroluminescence (marquages rouges). Les dommages se situent dans les cellules solaires. Photo : OFI/Gassner, également utilisé dans l'article « Enhanced mechanical load testing of photovoltaic modules for cold and snowy climates » dans EES Solar (RSC Publishing)

Une durée réduite

L'équipe helvético-autrichienne a également suivi une deuxième piste: ici aussi, les essais ont été modifiés de manière à exposer les panneaux solaires à des contraintes particulièrement



Lors des essais de résistance mécanique réalisés à l'institut de recherche OFI à Vienne, les modules photovoltaïques ont été chargés de sacs de sable pendant une heure. Les essais ont été réalisés dans une chambre climatique où des températures pouvant atteindre -40°C. Photo : OFI/Gassner, également utilisé dans l'article « Enhanced mechanical load testing of photovoltaic modules for cold and snowy climates » dans EES Solar (RSC Publishing)



Chacun des deux graphiques montre la puissance normalisée d'un module photovoltaïque donné au début, au milieu et à la fin d'un essai de cycles thermiques (en bleu : essai standard; rouge : essais fortement accélérés). Lors des essais de cycles thermiques, dans les conditions d'essai « fortement accélérées », ces deux modules présentent une dégradation des performances plus rapide que lors de l'essai standard. Graphique : rapport final PV-DETECT

élevées, telles que des températures très hautes ou très basses. Au fil du processus, une réduction de la durée des essais pourrait être envisagée: il suffit alors d'effectuer un nombre réduit de cycles d'essai pour pouvoir, par exemple, identifier un type de dommage ou certaines manifestations d'usure. Une accélération est souhaitable, car les essais récemment développés pour les modules peuvent aujourd'hui prendre plusieurs mois. À ce sujet, le chercheur de la SUPSI Özkalay déclare: « Si nous parvenons à réduire la durée des différents essais, nous créons les conditions permettant aux fabricants de modules de commercialiser leurs produits plus rapidement. »

DES INSTALLATIONS PV D'UNE DURÉE DE VIE SUPÉRIEURE À 30 ANS

Dans le cadre du projet PV-DETECT, les performances à long terme des installations photovoltaïques ont également été étudiées, en collaboration avec la Haute école spécialisée bernoise, le CSEM et l'Institut Helmholtz d'Erlangen-Nuremberg. Au centre de l'attention se trouvaient six installations photovoltaïques qui produisent de l'électricité solaire depuis la fin des années 1980 ou le début des années 1990 à l'aide de modules solaires AM55 et SM55 (Jungfraujoch, Birg, Mont-Soleil, Burgdorf-Fink, Burgdorf-Tiergarten, Möhlin). L'analyse des données disponibles a permis de déterminer la perte de puissance annuelle (taux de perte de puissance/PLR): Celui-ci s'élevait en moyenne à -0,24%/an, soit un niveau nettement inférieur à celui généralement retenu dans la littérature (-0,75 à -1%/an). Après 30 à 35 ans de fonctionnement, la plupart des modules présentaient encore au moins 80% de leur puissance nominale.

Les modules étudiés sont les précurseurs des modules photovoltaïques actuels. Les taux de perte de puissance calculés ne peuvent donc pas être directement transposés aux installations photovoltaïques plus récentes. Les modules modernes, tels qu'ils ont été perfectionnés depuis les années 1990, offrent un meilleur rendement, mais sont également plus complexes – et parfois moins fiables que les anciens modèles. « Les excellentes performances à long terme des anciens modules démontrent que le secteur solaire est capable de fabriquer des modules qui fonctionnent de manière très fiable, même dans les conditions difficiles des Alpes », déclare Ebrar Özkalay. « Elle soulignent en outre le rôle déterminant du choix des matériaux et de la qualité de fabrication pour garantir une longévité de plusieurs décennies. »

↗ Three decades, three climates : environmental and material impacts on the long-term reliability of photovoltaic modules. DOI 10.1039/D4EL00040D.



Pour évaluer les effets de l'ombrage, des masques d'ombrage sont fixés sur les modules photovoltaïques (les trois tôles métalliques longitudinales visibles sur la photo). Les essais ont lieu en plein air ou dans des laboratoire, où des simulateurs de lumière permettent de contrôler les conditions d'essai. Photo : Özkalay/SUPSI

L'accélération des essais dans le cadre du projet PV-DETECT a été particulièrement probante, notamment pour l'essai de cycles thermiques, qui permet d'analyser les effets des variations quotidiennes de température sur un module photovoltaïque. Dans le test standard de la CEI, les modules photovoltaïques sont soumis pendant 200 cycles à des variations de température comprises entre -40°C et 85°C. En portant la température de 85°C jusqu'à 110°C, la durée des essais a pu être réduite à un tiers. Le test de charge mécanique et le test de points chauds ont également pu être raccourcis. Pour d'autres essais, seule une accélération partielle, voire aucune, a pu être obtenue.

Des bénéfices pour les fabricants et les installateurs

Les résultats de PV-DETECT sont pertinents pour les entreprises qui fabriquent des modules photovoltaïques destinés à des applications alpines ou intégrées aux bâtiments. Ils sont également importants pour les installateurs qui souhaitent mettre en œuvre des modules photovoltaïques dans les Alpes: ils peuvent, grâce aux résultats du projet, mieux évaluer quels modules photovoltaïques sont adaptés aux environnements alpins. Ils bénéficient en outre des nouvelles procédures d'essai en pouvant, si nécessaire, réaliser eux-mêmes des essais afin de réduire les risques liés à l'installation des modules. À ce sujet, Ebrar Özkalay s'exprime en ces termes: « En milieu alpin, les coûts pour le photovoltaïque sont élevés. Dans ce contexte, il est important d'utiliser des modules de haute qualité afin de garantir une longue durée de vie et d'éviter ainsi des coûts ultérieurs liés à la maintenance, voire au remplacement. »

- Ici vous trouverez davantage d'informations concernant le projet de recherche « **PV-DETECT** – Accelerated product development for unconventional PV-applications through advanced reliability testing combined with early degradation detection ».
- Stefan Oberholzer, directeur du programme de recherche de l'OFEN Photovoltaïque, communique des **informations** sur le projet.
- Vous trouverez plus d'**articles spécialisés** concernant les projets pilotes, de démonstration et les projets phares dans le domaine du photovoltaïque.

Auteur : Benedikt Vogel, sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN)
Version : août 2026