



Démonstrateur de PV bifacial vertical balançant avec haubanage.

Libérer le potentiel du PV bifacial vertical

Panneaux photovoltaïques verticaux balançants | La start-up Lightswing Solar a développé une solution permettant de profiter des avantages du photovoltaïque bifacial vertical tout en palliant l'inconvénient de la prise au vent : celle-ci est réduite drastiquement grâce à un balancement amorti des panneaux en cas de tempête, autorisant ainsi l'utilisation d'une structure porteuse plus légère et moins ancrée.

JORIS VAUCHER

Lessor du photovoltaïque (PV) est accompagné de défis techniques et financiers croissants : baisse des prix de l'électricité sur le marché spot, stockage de la production photovoltaïque, manque de production hivernale, gestion foncière, ou encore compatibilité avec d'autres usages d'une même surface. Dans ce contexte, la technologie du photovoltaïque bifacial vertical représente une solution prometteuse. Toutefois, son implantation reste marginale en raison d'une contrainte structurelle majeure : la prise au vent. La start-up Lightswing Solar s'attaque à cette limitation avec

un concept innovant : un support permettant un balancement amorti des panneaux PV, alliant intelligence mécanique, durabilité et viabilité économique.

Les atouts du PV bifacial vertical

La technologie Lightswing est le fruit de longues réflexions sur un casse-tête : comment réaliser une solution « low-tech » et économique qui réponde, à elle seule, à plusieurs des défis contemporains du photovoltaïque tels que le manque de production hivernale, la dévalorisation du prix de l'électricité à la mi-journée ou la conciliation d'usages ?

Le photovoltaïque bifacial vertical a vite constitué une piste prometteuse, et ce, pour diverses raisons. D'une part, une orientation est-ouest (E-O) des panneaux verticaux permet de produire de l'électricité essentiellement en début et en fin de journée, contrairement au PV incliné conventionnel dont la production est maximale à la mi-journée (**figure 1**). D'autre part, la verticalité est également efficace pour la production hivernale (**figure 2**), notamment en altitude où la neige n'obstrue pas les cellules et où l'albédo booste la production.

Ensuite, si les productibles annuels du PV bifacial vertical et du PV incliné conventionnel sont plus ou moins égaux, leurs courbes de production peuvent être très complémentaires (figures 1 et 2). Le bifacial vertical peut produire dans les moments de la journée ou de l'année où la demande et le prix d'achat sont généralement plus élevés. Les diverses orientations du bifacial vertical présentent néanmoins toutes des avantages et des inconvénients. Il est donc nécessaire de tenir compte à la fois des courbes de productions journalières et annuelles pour choisir l'option et l'orientation la mieux adaptée aux besoins spécifiques d'un projet. Par exemple, un parfait vertical est-ouest aura l'avantage de bien produire en début et en fin de journée, mais l'inconvénient de produire relativement peu en hiver. Les orientations verticales sud-est (S-E) ou sud-ouest (S-O) constituent, quant à elles, un bon compromis pour éviter le pic de production de la mi-journée tout en obtenant un productible hivernal élevé.

Enfin, le bifacial vertical est optimal pour les conciliations d'usages dans les zones à enneigement prolongé, mais aussi avec l'agriculture, grâce à une bonne répartition de la pluie et du soleil, une ombre protectrice mais pas trop occultante, et l'absence d'effet de serre, qui peut être préférable pour certaines cultures.

Le point faible

Malgré les atouts susmentionnés, le potentiel du bifacial vertical est encore peu valorisé en raison d'un inconvénient majeur : l'importante prise au vent des panneaux verticaux. Cette particularité rend les installations chères et chargées en énergie grise (acier, béton, lest) puisque ces dernières doivent être dimensionnées de manière à pouvoir résister à des conditions de vent extrêmes. Ce problème limite la hauteur des installations bifaciales verticales, et par conséquent le potentiel en matière de conciliations d'usages. Il peut même aller jusqu'à rendre les installations sur trackers solaires – les trackers ajustent l'orientation et l'inclinaison des panneaux de sorte à maximiser en tout temps l'irradiation solaire sur la surface des modules PV – plus intéressantes dans certains cas de figure, et ce, malgré leur aspect high-tech : en cas de

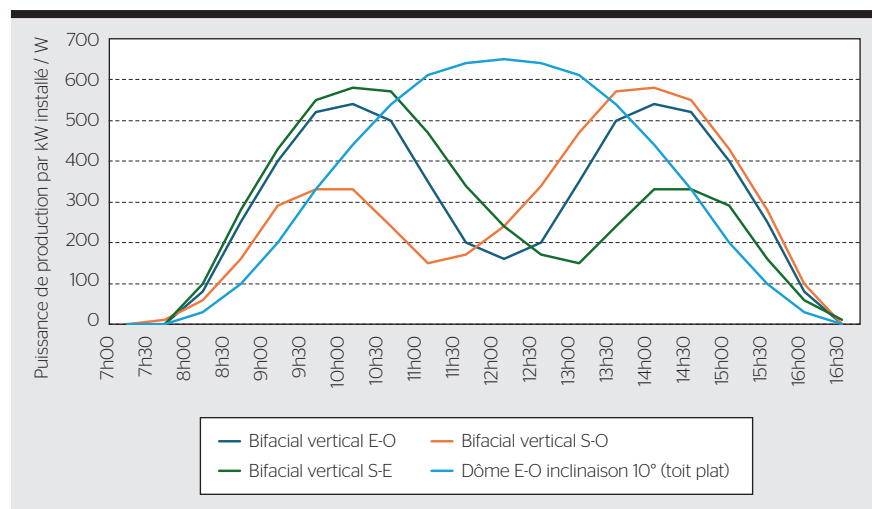


Figure 1 Puissance relative de production journalière pour différentes orientations et inclinaisons des panneaux photovoltaïques. Les courbes peuvent être influencées par des facteurs tels que l'albédo, l'ombre portée des panneaux voisins ou le relief environnant.

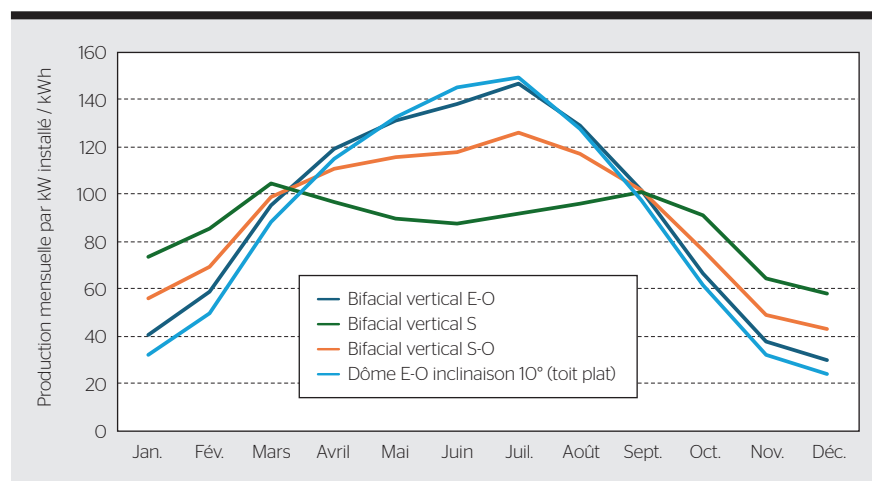


Figure 2 Courbes de production sur une année par kW installé pour différentes orientations et inclinaisons des panneaux photovoltaïques.

fort vent, les trackers font en effet pivoter les panneaux photovoltaïques en position de sécurité horizontale.

Le PV vertical bifacial « balançant »

N'y aurait-il pas une solution plus simple et moins onéreuse au problème lié à la prise au vent des panneaux PV verticaux ? Pourquoi ne pas laisser les panneaux se balancer en cas de tempête, de telle sorte qu'ils puissent se dérober au vent et réduire ainsi les efforts sur la structure, comme on peut parfois l'observer sur de petits panneaux publicitaires ?

Les premières recherches réalisées par Lightswing Solar lors de la genèse du projet, en 2019, ont révélé qu'une telle solution avait déjà été envisagée

auparavant par quelques personnes ou entreprises, toutefois sans qu'aucune réalisation ne soit commercialisée. Deux raisons semblent expliquer cette absence sur le marché : d'une part, le contexte était à l'époque moins favorable au bifacial vertical qu'il ne l'est aujourd'hui – la part de PV dans le mix électrique était alors moins importante – et d'autre part, le développement ainsi que la certification d'un support balançant pour panneaux PV sont bien plus complexes qu'il n'y paraît au premier abord.

Un développement plus ardu que prévu

En dépit d'une apparente simplicité, le développement d'un système de support balançant pour panneaux photo-

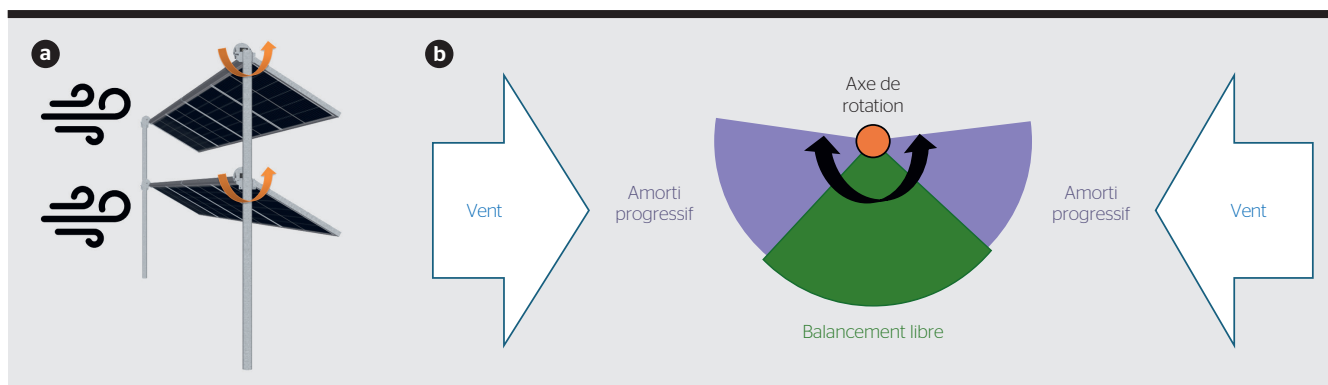


Figure 3 a) Le balancement des panneaux PV verticaux en cas de fort vent permet de réduire les contraintes sur les éléments de fixation. b) Amortissement progressif du balancement à partir d'un certain angle pour éviter le battement des panneaux PV.

voltaïques bifaciaux verticaux (figure 3a) s'est révélé particulièrement exigeant. Il aura fallu trois ans d'efforts pour que le développement réalisé par Lightswing Solar – en partenariat avec deux bureaux d'ingénieurs, les hautes écoles HEIG-VD et hepia, et le CSEM –, financé principalement par la Fondation suisse pour le climat et le Fonds Vitale Innovation de SIG, aboutisse à une solution finale. Deux démonstrateurs ont depuis été installés en octobre 2024, en partenariat avec le CSEM, sur un terrain de la raffinerie Varo à Cressier/NE, afin de tester et d'approuver la solution développée.

Le premier de ces démonstrateurs (figure de titre), prévu pour des applications avec ancrage au sol, a été dimensionné pour de plus grands panneaux PV que la version qui sera finale-

ment commercialisée. Contrairement à ce que l'on pourrait imaginer à l'évocation du concept, les panneaux ne bougent quasiment jamais: ce n'est qu'en cas de fort vent qu'ils commencent à s'incliner légèrement et à osciller, avec un impact insignifiant sur la production d'électricité. Le second démonstrateur (figure 4) correspond, quant à lui, à une solution pour toitures végétalisées: dans ce contexte, le PV vertical bifacial balançant présente l'avantage, par rapport à des panneaux solaires fixes, de nécessiter peu de lest, rendant ainsi possibles des projets de toitures biosolaires sur des bâtiments existants qui ne sont pas conçus pour accueillir de lourdes charges. Les structures sont lestées avec le substrat des plantes, et l'ombre partielle des panneaux rend la végétation plus résistante aux sécheresses et aux canicules.

Des défis à la fois techniques et économiques

Pourquoi cette solution a-t-elle été si complexe à développer? S'ils étaient pris dans une tempête centennale, les panneaux PV bi-verre balançants s'apparenteraient, malgré leur poids, à des drapeaux suspendus: ils dépasseraient l'horizontale en cas de rafales, deviendraient instables et « battraient » dans le vent. Ils risqueraient alors de voler en éclat, et les efforts au niveau de l'axe de rotation seraient si élevés qu'une telle installation ne présenterait plus aucun avantage par rapport à une solution avec des panneaux verticaux fixes. Il est donc nécessaire d'amortir la rotation des panneaux pour éviter ces instabilités, mais uniquement à partir d'un certain angle (figure 3b), car il est essentiel que les panneaux se mettent le plus vite possible dans l'axe du vent en cas de rafale. La mise au point d'un tel système a nécessité une approche itérative, combinant simulations numériques et tests empiriques.

Les défis étaient d'ordre non seulement technique, mais aussi économique: aucun produit standard ne répondait aux exigences, et une solution sur mesure ne devait pas être trop chère à fabriquer pour être commercialisable. La solution technico-économique retenue a été développée avec l'aide de deux spécialistes en systèmes d'amortissement de la Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD): elle est constituée de deux disques en inox légèrement pliés, qui pivotent l'un contre l'autre et se touchent à partir d'un certain angle pour dissiper l'énergie par le biais de la friction,



Figure 4 Solution pour toitures végétalisées.

aboutissant ainsi en un système robuste et fiable. Bien que cette solution soit relativement bon marché à fabriquer, quatre panneaux sont solidarisés sur une structure pour former de grands éléments balançants, de sorte à mutualiser les amortisseurs et les axes, mais aussi à limiter les supports et les ancrages au sol. Éviter tout risque d'oscillations instables (résonances) dans le plan de ces grands éléments balançants comporte néanmoins aussi quelques complications: leur fréquence d'oscillation propre doit être supérieure à celles du vent, ce qui a été rendu possible grâce à un léger haubanage (figure de titre).

De nouvelles simulations CFD dynamiques (figure 5) ont confirmé l'intérêt d'une telle structure: pour des conditions de vent extrêmes correspondant à des zones de charges de vent dynamiques de $1,1 \text{ kN/m}^2$, avec des rafales à 40 m/s (144 km/h), la prise au vent des panneaux PV verticaux balançants est réduite d'un facteur six par rapport à celle de panneaux fixes. Un tel gain en termes de prise au vent se traduit par des économies financières et d'énergie grise sur les structures et les ancrages.

Cette invention est aujourd'hui couverte par une demande de brevet en instance, qui a déjà reçu un avis favorable lors de l'examen international. Le brevet devrait être délivré mi-2026.

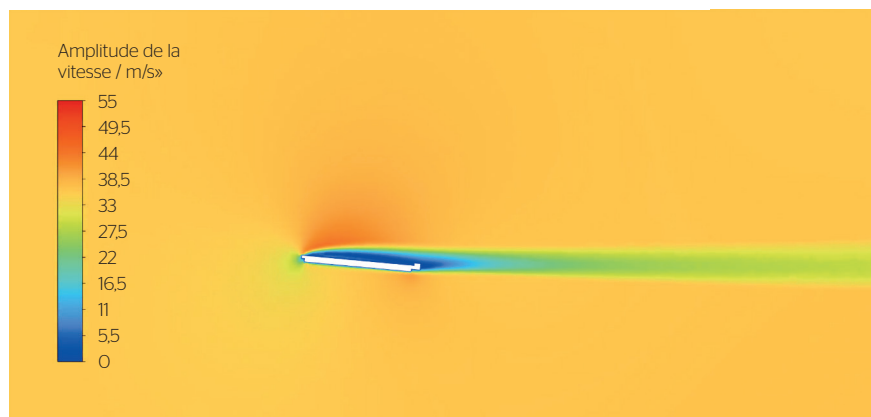


Figure 5 Simulation CFD pour des conditions de vent extrêmes.

Potentiel de la solution

Les éléments balançants, composés de quatre panneaux standard, d'une surface de $1762 \text{ mm} \times 1134 \text{ mm}$ et d'une puissance de 450 W chacun, peuvent être déployés sur diverses structures et dans différents contextes (figure 6). L'objectif premier consiste à pouvoir déployer du photovoltaïque dans des lieux où les autres solutions du marché ne conviennent pas ou moins bien, par exemple sur des parkings en altitude ou sur des vergers de pommiers en plaine. Grâce à sa prise au vent fortement réduite, cette solution est compétitive avec une installation composée de panneaux fixes. Et, plus généralement, elle devrait être avantageuse dès qu'on s'éloigne du sol, notamment dans le cas d'un montage avec deux ou trois bandes

de panneaux PV disposées les unes au-dessus des autres, une configuration qui pourrait par exemple permettre de valoriser des bandes de terrain étroites en zone industrielle.

Subventions exceptionnelles

En plus du montant alloué en fonction de la puissance installée, le PV bifacial vertical peut bénéficier de diverses subventions: il profite déjà du récent doublement du bonus d'angle de Pronovo, qui s'élève désormais à 200 CHF par kW de puissance installée. Celui-ci est en outre cumulable avec le bonus d'altitude (250 CHF par kW, pour une puissance installée supérieure ou égale à 150 kW à partir d'une altitude de 1500 m), ou avec le nouveau bonus pour les places de stationnement (250 CHF

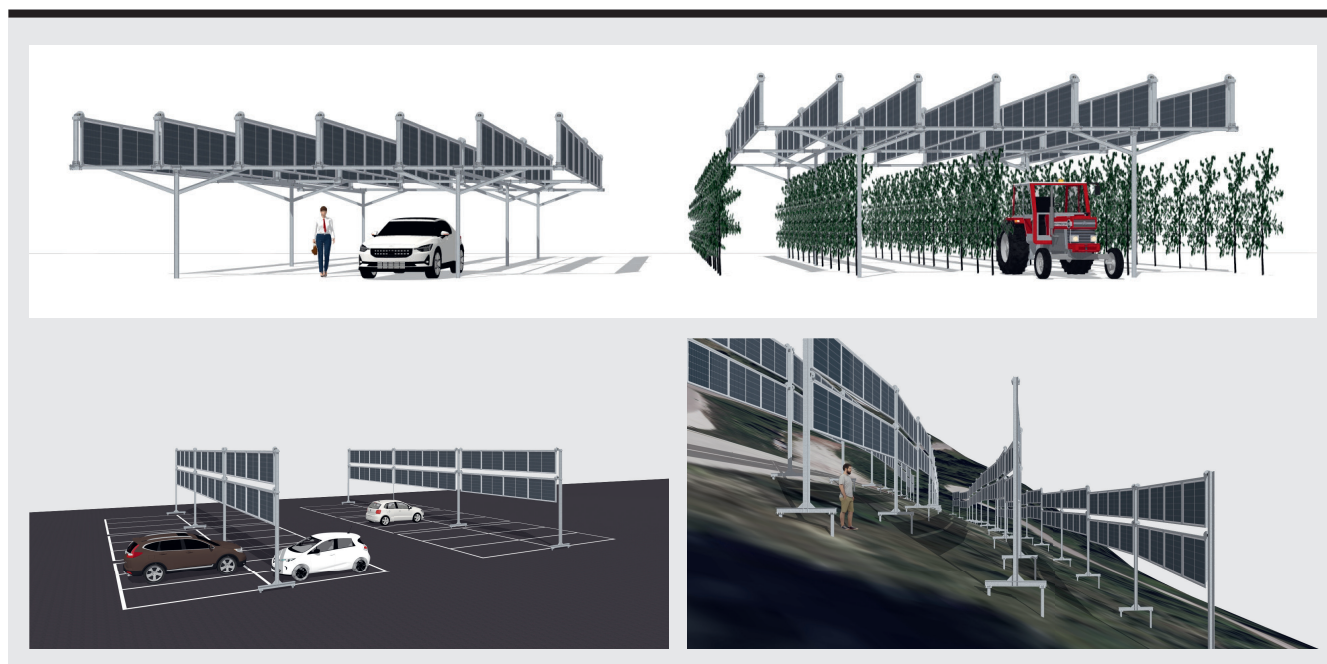


Figure 6 Exemples d'intégration du PV bifacial vertical balançant.

par kW, pour les centrales sur parking d'une puissance installée supérieure ou égale à 100 kW).

Pronovo a déjà confirmé que la solution Lightswing était éligible au bonus pour les places de stationnement. De plus, le PV bifacial vertical sur parking ne présente pas qu'un avantage en milieu alpin: contrairement aux ombrières PV, il n'engendre pas de complication au niveau de la gestion des eaux pour les parkings qui ne sont pas munis d'écoulements dans les eaux pluviales ou usées.

État d'avancement du projet

Le 15 juin dernier, les démonstrateurs installés à Cressier ont subi pour la première fois des rafales de vent mesurées à 114 km/h, et ce, sans subir le moindre dommage. Parmi ces démonstrateurs, une solution pour toits plats végétalisés (figure 4) qui devrait être commercialisable courant 2026.

Une superstructure conçue pour des usages autant dans le secteur agrivol-

taire que sur des parkings (partie supérieure de la figure 6) sera aussi testée sur une parcelle cultivée de la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (hepia), dans le canton de Genève, fin 2025 ou début 2026. Outre les aspects mécaniques et électriques du test, des ingénieurs agronomes d'hepia mesureront l'impact de l'ombrage des panneaux verticaux sur différentes plantes. Cette campagne de tests sera suivie d'un plus grand projet sur vergers de pommiers prévu dans le canton de Genève en 2026, en partenariat avec hepia et SIG. L'un des avantages du PV vertical bifacial par rapport à d'autres solutions déjà testées avec des pommiers réside dans le fait qu'il ne crée pas d'effet de serre. Or, la coloration des fruits, capitale pour la valeur marchande, est influencée par les écarts de température entre le jour et la nuit en saison de mûrissement, et les panneaux verticaux, en ne retenant pas le rayonnement infrarouge, permettent au terrain de se refroidir au cours de la nuit.

Enfin, d'autres projets de démonstrateurs sont actuellement à l'étude avec d'autres partenaires, notamment en haute altitude dans les Alpes.

Perspectives

La solution présentée dans cet article peut déjà être commercialisée pour des montages proches du sol. Si les tests réalisés dans différents contextes sont concluants, elle pourra se démarquer en ce qui concerne le prix ou la faisabilité dans plusieurs cas de figure, surtout pour les installations éloignées du sol, en milieux alpins, ou lorsque de grandes portées sont nécessaires – puisqu'il n'y a pas de charges de neige et peu de charges de vent. Les projets pilotes en cours et à venir joueront un rôle déterminant dans sa diffusion à grande échelle.



Auteur

Joris Vaucher est cofondateur et CEO de Lightswing Solar.
→ Lightswing Solar, 1207 Genève
→ jv@lightswingsolar.ch



Das Potenzial vertikaler bifazialer PV-Anlagen ausschöpfen

Schwenkbare Photovoltaikmodule

Der Boom der Photovoltaik (PV) geht mit wachsenden technischen und finanziellen Herausforderungen einher: sinkende Strompreise auf dem Spotmarkt, Speicherung der PV-Einspeisung, fehlende Produktion im Winter oder die Kompatibilität mit anderen Nutzungen der bebauten Fläche. In diesem Kontext stellt die Technologie der vertikalen bifazialen Photovoltaik eine vielversprechende Lösung dar, denn sie ermöglicht eine bessere Verteilung der Stromerzeugung sowohl über den Tag als auch über das Jahr hinweg, ohne wesentliche Reduktion der Jahresleistung. Allerdings wird sie wegen einer strukturellen Einschränkung – der Anfälligkeit auf Wind – nach wie vor selten eingesetzt. Das Start-up Lightswing Solar hat sich dieser Einschränkung angenommen und eine Halterung entwickelt, die bei Sturm ein gedämpftes Schwingen der PV-Module ermöglicht.

Die Entwicklung eines solchen Konzepts erwies sich als schwieriger als erwartet: Um zu verhindern, dass die Module bei sehr starken Windböen wie Fahnen im Wind flattern, wurde die Halterung mit einem Dämpfungssystem aus zwei leicht gebogenen Edelstahl-scheiben ausgestattet, die gegeneinander schwenken und sich ab einem bestimmten Winkel berühren, um die Energie durch Reibung abzu-

leiten. Zudem wurde eine leichte Abspannung vorgenommen, um sicherzustellen, dass die Eigenoszillationsfrequenz der vier bifazialen Standard-PV-Module mit Doppelglas hoch genug ist, um bei starkem Wind keine Resonanz zu erzeugen.

Simulationen haben bestätigt, dass bei extremen Windverhältnissen mit Böen von 40 m/s (144 km/h) der Widerstand der vertikalen schwenkbaren PV-Module im Vergleich zu feststehenden vertikalen Modulen um den Faktor sechs kleiner ist. Zwei Demonstratoren (einer für die Bodenmontage und einer für die Montage auf einem begrüntem Dach) wurden im Oktober 2024 am Varo-Standort in Cressier installiert. Diese wurden am 15. Juni dieses Jahres bereits Windgeschwindigkeiten von 114 km/h ausgesetzt, ohne dass Schäden entstanden sind.

Diese Erfindung ermöglicht eine starke Reduzierung der Bodenverankerung vertikaler PV-Module und eröffnet neue Anwendungsmöglichkeiten für vertikale bifaziale Solarmodule in grösserer Höhe über dem Boden, beispielsweise auf Parkplätzen, in alpinen Gebieten oder für Agri-PV. Im letzteren Fall bietet diese Lösung zudem den Vorteil, dass ein Treibhauseffekt vermieden wird, der für bestimmte Kulturen, beispielsweise Apfelbäume, schädlich sein kann.