

Août 2019

Guide des modules bifaciaux

Utilisation des modules solaires
bifaciaux – possibilités d'application
sur les bâtiments et
dimensionnement des composants
des installations

Auteurs

Francesco Frontini, SUPSI

Mauro Caccivio, SUPSI

Christian Renken, CRENERGIE SÀRL

En collaboration avec Christian Moll, Swissolar (association suisse des professionnels de l'énergie solaire)

**Cette étude a été élaborée pour le compte de SuisseEnergie.
Les auteurs sont les seuls responsables du contenu.**

Adresse

SuisseEnergie, Office fédéral de l'énergie (OFEN)

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Adresse postale : CH-3003 Berne

Infoline : 0848 444 444, www.infoline.suisseenergie.ch

energieschweiz@bfe.admin.ch, www.suisseenergie.ch, twitter.com/suisseenergie

Sommaire

1	Introduction sur les modules solaires bifaciaux	5
1.1	Rappel historique	6
1.2	Technologie	7
2	Analyse du marché	11
2.1	Comprendre les fiches techniques : la puissance bifaciale	12
2.1.1	La norme CEI et ses définitions	12
2.1.2	Demande de subventions pour des systèmes solaires bifaciaux	14
3	Champs d'utilisation et application	15
3.1	Champ d'utilisation	15
3.2	Facteurs influençant les performances bifaciales	16
3.2.1	Facteur de bifacialité	16
3.2.2	Angle d'incidence des modules solaires	17
3.2.3	Réflexion (albédo) de l'arrière-plan	17
3.2.4	Distance entre les modules solaires et l'arrière-plan	18
3.2.5	Écartement des rangées de modules solaires.....	19
3.2.6	Modules solaires semi-transparents	19
3.2.7	Ombrage projeté par la structure de montage et les câbles solaires.....	20
3.3	Critères de sélection des produits pour les modules solaires bifaciaux.....	21
3.4	Dimensionnement des composants électriques	22
3.5	Sources	24
4	Bons exemples sur le terrain.....	25
4.1	Installation photovoltaïque en toiture avec modules bifaciaux, Steffisburg (BE).....	25
4.2	Installation photovoltaïque bifaciale en toiture, Kingsten, État de New York (États-Unis)....	28
4.3	Façade photovoltaïque bifaciale au CSEM à Neuchâtel (NE).....	31
4.4	Abri pour voitures photovoltaïque avec modules bifaciaux à Tucson, Arizona (États-Unis).34	
4.5	Garde-corps photovoltaïque bifacial sur les terrasses d'un immeuble d'habitation, Oerlikon (ZH).....	37

4.6	Installation photovoltaïque bifaciale en plein champ avec modules solaires installés verticalement, Merzig (Allemagne).....	40
4.7	Modules bifaciaux avec système de conception innovante pour installations PV montées sur toiture, bâtiment « NEST », Empa, Dübendorf (ZH)	43
4.7.1	Description du projet	43
5	Résumé.....	46
6	Notice.....	47
7	Liste des illustrations.....	52

1 Introduction sur les modules solaires bifaciaux

L'efficacité des modules solaires photovoltaïques (modules PV) s'est considérablement accrue au cours de ces dix dernières années. La multiplication constante des installations photovoltaïques dans le monde s'est accompagnée d'énormes réductions de prix au cours de la même période. L'augmentation de la puissance à coût égal est un concept mis en œuvre par l'industrie dans le but d'améliorer le rendement des modules solaires : l'amélioration de la pureté des matériaux, l'élaboration de nouveaux concepts pour une détection optimale du courant photogénéré et l'optimisation de la disposition des modules sont quelques-unes des méthodes utilisées par l'industrie pour porter au fil des ans la performance des modules standard à 60 cellules de 200 à 300 watts. Ces derniers temps, la commercialisation des modules solaires bifaciaux s'est accélérée. Cette technologie fait appel à des cellules solaires et des dispositions de modules aptes à capter la lumière sur les deux faces et à convertir plus efficacement les rayons du soleil en courant électrique. Grâce à l'optimisation de leur positionnement et de leur orientation ainsi qu'à la réduction maximale des zones ombragées sur leur face arrière, les modules photovoltaïques bifaciaux sont capables de générer entre 5 % et 30 % d'énergie de plus que les modules photovoltaïques monofaciaux classiques.



Illustration 1 : modules bifacial SkySlate de 3S Solar Plus à 60 cellules monocristallines, sans châssis, verre/verre (photo : 3S Solar Plus)

1.1 Rappel historique

Le concept de cellules solaires bifaciales n'est pas nouveau. Il a été introduit pour la première fois en 1960 par H. Mori, un chercheur japonais, quatre années seulement après la présentation par Chapin, Pearson et Fueller du tout premier prototype de cellule solaire monofaciale en silicium, dans les Bell Laboratories. Le concept développé par Mori repose sur une cellule solaire à double jonction, où les photons incidents émis par les faces avant et arrière génèrent des électrons dans les deux jonctions p-n, à savoir la cellule solaire avant et la cellule solaire arrière.

Dans les années qui ont suivi fut proposé le concept de cellule solaire à simple jonction sur la base du principe de passivation à champ de surface arrière (Back-Surface-Field ou « BSF ») et à contact arrière (Back-Contact), où les électrons sont générés dans la région émettrice de la face avant. Ces concepts sont en réalité les mêmes que ceux que l'on rencontre aujourd'hui au quotidien sur le marché des modules photovoltaïques monofaciaux en silicium.

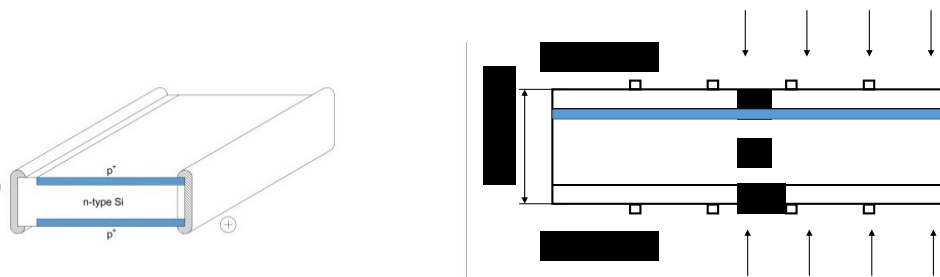


Illustration 2 : Concept bifacial développé par Mori (à gauche) et concept Back-Surface-Field avec jonction p-n simple (à droite). Les jonctions p-n sont surlignées en bleu.

Les premiers modules bifaciaux ont été utilisés dans la recherche spatiale à partir de 1974 dans le but d'obtenir une meilleure efficacité et une baisse de température par rapport aux cellules monofaciales en silicium. C'est pour cette même raison que la station spatiale internationale est à l'heure actuelle toujours alimentée intégralement grâce à des installations solaires bifaciales américaines et russes.

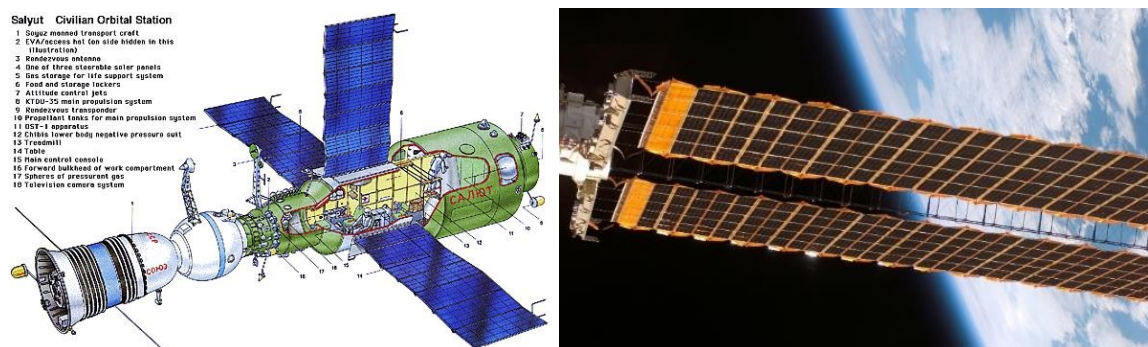


Illustration 3 : Station spatiale Saliout 3 (à gauche) avec modules solaires bifaciaux ; installation photovoltaïque de la station spatiale internationale ISS (à droite) Source : NASA.

La première installation photovoltaïque terrestre à modules bifaciaux bien documentée fut construite par TNC Consulting en 1997 sur un mur antibruit, près de Zurich.

Sur cette installation pionnière, les murs antibruit PV bifaciaux remplacent totalement les murs antibruit verticaux conventionnels. Les coûts des murs antibruit transparents classiques sont donc

comparables à ceux d'un mur antibruit PV bifacial. Cela est vrai surtout pour les coûts du verre, du châssis, de la structure de montage et d'une partie des travaux. Cette installation a fait l'objet d'un remaniement et d'une extension en 2005 et se compose désormais de deux installations PV distinctes avec des technologies de cellules différentes.

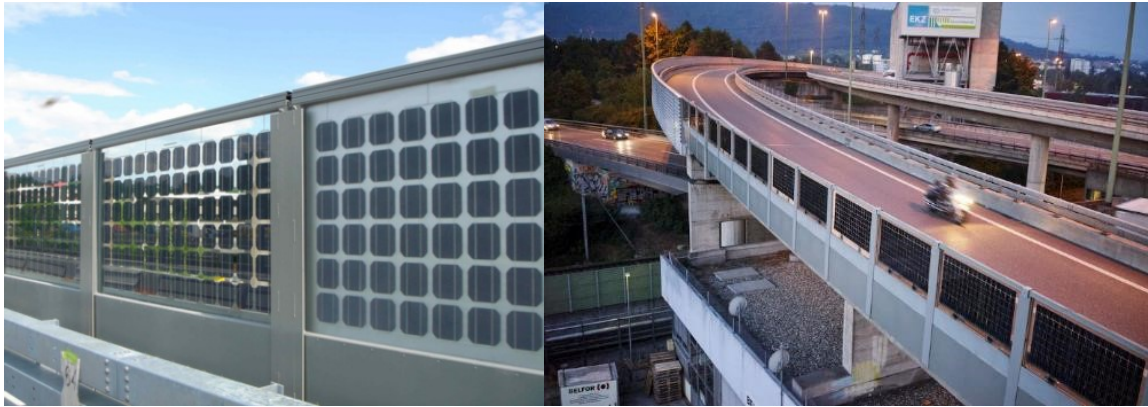


Illustration 4 : Installation PV bifaciale d'une puissance de 6 kW, Zurich, avant (à gauche) et après (à droite) la mise à niveau de 2005 (photo : TNC)

En 2003, Hitachi lance la production en masse de modules solaires bifaciaux, suivi peu après par Sanyo et Sunpower : le module bifacial fait enfin son entrée sur le marché de masse.

1.2 Technologie

En règle générale, un module bifacial peut être décrit comme un module standard muni d'une « source lumineuse » supplémentaire sur la face arrière, laquelle augmente la quantité du courant généré par les photons. Cela montre clairement que les faces avant et arrière du module ne sont pas des composants séparés électriquement et travaillant en parallèle, mais qu'il s'agit en fait de deux vues différentes d'un même objet, avec une plus grande efficacité rendue possible grâce à une absorption lumineuse accrue.

Il existe différents concepts de cellules solaires bifaciales : par souci de concision, seuls les deux types les plus courants du marché sont décrits ici.

Le schéma ci-après illustre la comparaison entre une cellule solaire PERC monofaciale et une cellule solaire PERC bifaciale. L'abréviation PERC signifie « Passivated Emitter and Rear Contact » (émetteur passif et contact arrière) : cette technologie est à l'origine des gains d'efficacité les plus récents enregistrés avec des modules PV au silicium cristallin par rapport au type BSF (Back Surface Field) classique. Le processus de passivation réduit la perte de cellules tout en augmentant la réflectivité interne avec, comme corollaire, une meilleure absorption de la lumière. En modifiant le contact arrière de la cellule pour permettre la pénétration des photons, on obtient une configuration bifaciale qui n'est pas symétrique en soi. En réalité, l'absorption de la lumière provenant de la face arrière est moins efficace que celle de la lumière provenant de la face avant : pour ce type de technologie, le « facteur de bifacialité », c'est-à-dire le rapport entre la puissance mesurée sur la face arrière et la puissance mesurée sur la face avant, est d'environ 70 %.

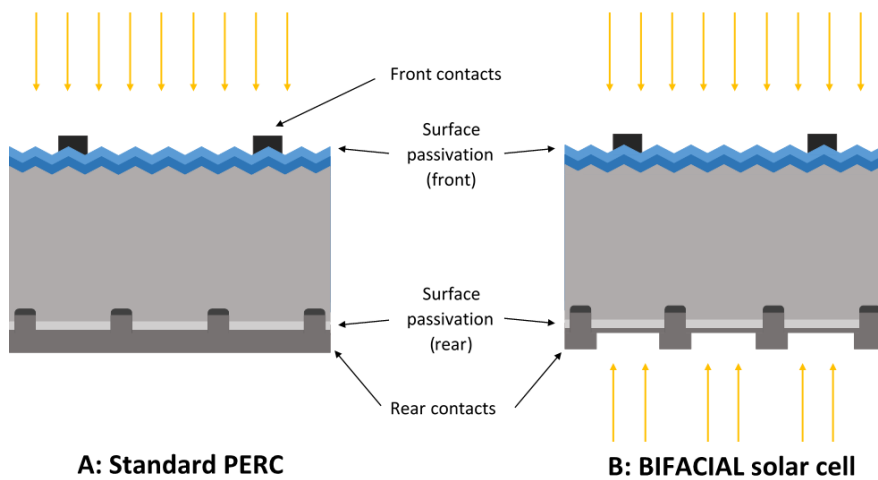


Illustration 5 : PERC classique vs PERC bifacial (source : Solarworld)

Une autre technologie bifaciale, beaucoup plus symétrique que la technologie PERC, repose sur des cellules à hétérojonction. Ce type de cellules, introduit à l'échelle industrielle par Sanyo à la fin des années 1990, est principalement fondé sur l'utilisation de n-silicium au lieu de p-silicium comme matériau de base. Le p-silicium est du silicium dopé de bore, l'une des principales matières responsables de la dégradation induite par la lumière (LID), laquelle affecte négativement la performance des modules PV au bout de quelques heures suivant l'effet du rayonnement lumineux.

Le n-silicium n'est pas affecté par l'effet LID, ce qui est un avantage considérable et permet des rendements plus élevés que le p-silicium. Toutefois, le processus industriel sous-jacent est plus complexe et plus onéreux. Dans le cas des cellules à hétérojonction (HJT), deux minces couches supplémentaires de silicium amorphe sont déposées symétriquement sur les deux faces du matériau de base. Après dépôt d'une couche mince d'oxyde conducteur transparent, le processus de métallisation pour le dépôt par contact est également symétrique : cette configuration conduit à un facteur de bifacialité qui peut même dépasser 95 %.

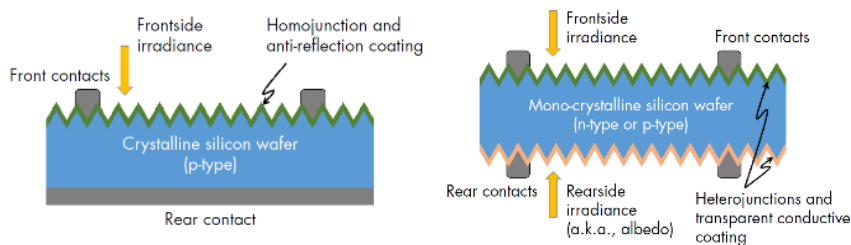


Illustration 6 : Cellule BSF standard (à gauche) vs cellule HJT bifaciale (à droite) (photo : EPRI)

Comme indiqué précédemment, les cellules solaires bifaciales délivrent des courants plus élevés. C'est pourquoi il est crucial que la connexion des cellules génère le minimum de pertes ohmiques lorsqu'elles sont connectées en série, ce afin d'augmenter la tension au niveau du module. Il existe sur le marché différents types de contacts, depuis les bandes standard avec revêtement cuivre et argent (4, 5 ou 6 barres-bus ou « busbars ») jusqu'aux contacts dits « multifilaires » tels que SmartWire (de Meyer Burger) ou la technologie CELLO (de LG) avec plusieurs fils profilés fins au lieu de bandes conductrices plus larges et plus épaisses (barres-bus). Les avantages des contacts

multiples sont, outre une résistivité réduite, une redondance accrue et la détection de courant en cas de rupture de cellules.



Illustration 7 : Technologie de connexion SmartWire (à gauche ; source : Meyerburger) et cinq barres-bus (à droite ; source : Aiko Solar)

L'utilisation de demi-cellules permet quant à elle d'obtenir une meilleure résistance à la rupture des cellules, une réduction du courant et, ainsi, une amélioration du rendement grâce à la baisse de la perte de résistance. Certains fabricants proposent cette solution en connectant en série le même nombre de cellules solaires disposées en deux tronçons parallèles ; au niveau des modules, ce principe garantit la compatibilité totale avec les paramètres électriques des modules standard.



Illustration 8 : Demi-cellules – une solution pour accroître l'efficacité (source : PVmanmanufacturing.org, Canadian Solar)

Une autre option pertinente pour réduire les pertes dues aux ruptures de cellules des modules PV bifaciaux est l'utilisation d'une structure verre-verre permettant d'encapsuler les cellules. La plupart des produits du marché bénéficiant de cette structure sont munis de différents encapsulants (éthylène-acétate de vinyle [EVA], polyvinylbutyral [PVB], etc.) et bénéficient de diverses propriétés en termes de fiabilité, de prix et de sécurité (l'EVA, par exemple, est le « cheval de bataille » du secteur du PV, et le PVB est le matériau utilisé pour le feuilletage du verre de sécurité dans les secteurs de l'automobile et du bâtiment). Récemment, des films plastiques transparents ont également été présentés comme une alternative au verre sur la face arrière, en vue de faciliter le processus de laminage à l'EVA.

Un composant essentiel des modules solaires bifaciaux est la boîte de jonction : les premiers modules disponibles sur le marché ont été équipés de boîtes de jonction standard montées sur la face arrière. Il en résulte des pertes d'ombrage considérables susceptibles d'engendrer simultanément des points chauds (« hot spots ») et une baisse du facteur de bifacialité. Le développement des modules bifaciaux a permis d'obtenir des boîtes de jonction plus minces

pouvant être placées sur les bords des modules et, dans certains cas, divisées en trois boîtiers distincts, un avantage tant en termes d'esthétique du produit qu'en termes de réduction des pertes d'ombrage. Par ailleurs, il convient de veiller au bon dimensionnement des diodes de protection, qui doivent résister à des courants plus élevés que pour les modules standard.

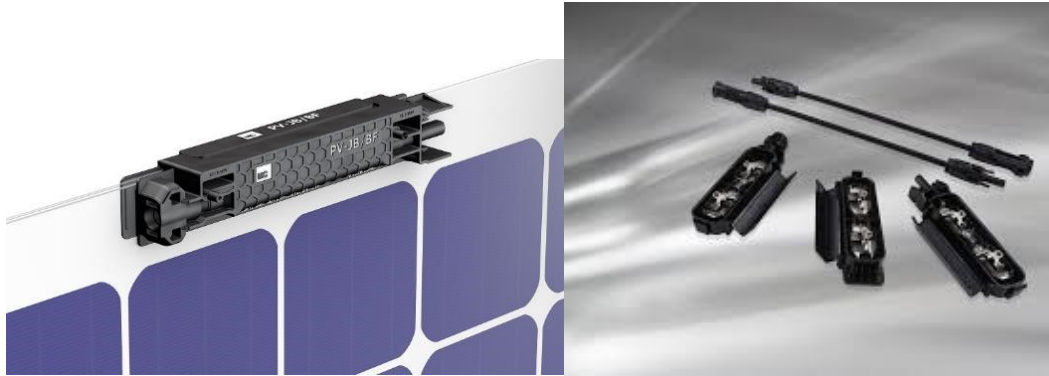


Illustration 9 : Boîtes de jonction pour modules solaires bifaciaux (photo : Stäubli, TE Connectivity)

2 Analyse du marché

Comme décrit dans la section précédente, les technologies bifaciales du marché sont disponibles dans différentes typologies afin de répondre aux exigences des diverses applications – depuis les façades ventilées jusqu'aux modules solaires sur toiture plate, en passant par les lucarnes et les garde-corps. Vous trouverez ci-après un tableau non exhaustif des principaux acteurs du marché des technologies bifaciales. L'accent a été mis principalement sur les modules standard plutôt que sur les modules sur mesure, ce afin d'obtenir une comparaison directe entre les différents produits.

Société	P_{\max} face avant [W]	Barres-bus (BB) / Multifilaire (MW)	Cellules [#/type]	Cadre de module	[verre-verre / verre-backsheet]	Facteur de bifacialité
3S Solar Plus	295	5 BB	60 full	Non	VV	non disp.
Canadian Solar	315	5 BB / MW	120 half	Oui	VV	70 %
JA Solar	375	5 BB	72 full	Non	VV	70 %
Jinko	380	5 BB	144 half	Non	VV	70 %
Joliwood	330	-	120 half	Non	VV	non disp.
LG electronics	390	MW	72 full	Oui	VB	76 %
Longi	375	5 BB	72 full	Oui	VV	> 75 %
Megasol	305	5 BB	60 full	Non	VV	non disp.
Meyerburger	315	MW	60 full	Non	VV	93 %
NSP	310	5 BB	60 full	Oui	VV	non disp.
PVP	300	4 BB	60 full	Oui	VV	de 70 à 90 %
Solarworld	290	5 BB	60 full	Oui	VV	non disp.
Sunpreme	300	3 BB	60 full	Non	VV	non disp.
Suntech	375	5 BB	72 full	Oui	VV	non disp.
Trina	365	5 BB	72 full	Non	VV	non disp.
Yingli	360	5 BB	144 half	Non	VV	non disp.

Tableau 1 : Tour d'horizon des modules bifaciaux du marché

Note : la mention « non disp. » signifie que le facteur de bifacialité ne figure pas sur la fiche technique.

2.1 Comprendre les fiches techniques : la puissance bifaciale

Un examen des caractéristiques des modules proposés sur le marché révèle quelques écarts de puissance de sortie maximale non négligeables ; cela s'explique par les différentes technologies cellulaires employées, par les dimensions des modules et, d'une manière générale, par la présentation des informations sur la fiche technique ou dans la documentation technique.

2.1.1 La norme CEI et ses définitions

La norme CEI 60904-1-2 pour la définition des méthodes de mesure de la puissance électrique des modules bifaciaux vient compléter la norme CEI 60904-1 pour la mesure des modules PV monofaciaux. La norme a été publiée finalement en janvier 2019.

Cette norme constitue une référence commune pour la définition des propriétés intrinsèques des modules bifaciaux : en termes plus précis, elle définit la puissance maximum (P_{max}) pour différents niveaux de rayonnement solaire sur la face arrière, en utilisant les facteurs dits de « bifacialité », lesquels permettent de calculer les valeurs des faces avant et arrière dans les conditions STC.

φ_{Isc} est le facteur de bifacialité du courant de court-circuit, φ_{Pmax} est le facteur de bifacialité du point de puissance maximum et φ_{Voc} est le facteur de bifacialité de la tension de marche à vide : tous ces facteurs sont exprimés en pour cent et traduisent le rapport entre les valeurs mesurées sur la face avant et la face arrière pour un rayonnement de 1000 W/m^2 , une température de 25 °C et un spectre solaire AM de 1.5, comme illustré dans les trois équations suivantes :

$$\varphi_{Isc} = \frac{Isc_r}{Isc_f}$$

$$\varphi_{Pmax} = \frac{Pmax_r}{Pmax_f}$$

$$\varphi_{Voc} = \frac{Voc_r}{Voc_f}$$

La norme stipule que la valeur P_{max} du module sur la face avant doit être mesurée à des valeurs de rayonnement équivalentes à 1000 W/m^2 sur la face avant et à des valeurs différentes sur la face arrière.

Les facteurs de bifacialité servent à calculer un rayonnement solaire équivalent sur la face avant pour ensuite déterminer la puissance maximale avec différents niveaux de luminosité équivalents sur la face arrière : au moins trois niveaux de rayonnement solaire différents doivent être calculés en utilisant le plus petit des deux facteurs de bifacialité φ_{Isc} et φ_{Pmax} .

À l'issue de ce processus, au moins deux valeurs P_{max} spécifiques – $P_{maxBiFi-10}$ et $P_{maxBiFi-20}$ – pour des intensités d'irradiation de la face arrière de 100 W/m^2 et 200 W/m^2 respectivement, doivent être consignées dans le rapport d'essai.

Exemples de fiches techniques

Les fabricants de modules s'efforcent d'ores et déjà d'inclure dans leurs fiches techniques certaines des informations requises par la norme, mais cela n'est pas toujours clair. Le tableau ci-dessous est un tableau typique extrait d'une fiche technique d'un module bifacial :

ELECTRICAL DATA | STC*

	Nominal Max. Power (Pmax)	Opt. Operating Voltage (Vmp)	Opt. Operating Current (Imp)	Open Circuit Voltage (Voc)	Short Circuit Current (Isc)	Module Efficiency
	300 W	32.5 V	9.24 A	39.3 V	9.82 A	17.83%
	5% 315 W	32.5 V	9.7 A	39.3 V	10.31 A	18.72%
Bifacial Gain**	10% 330 W	32.5 V	10.16 A	39.3 V	10.8 A	19.61%
	20% 360 W	32.5 V	11.09 A	39.3 V	11.78 A	21.40%
	30% 390 W	32.5 V	12.01 A	39.3 V	12.77 A	23.18%

Illustration 10 : Caractéristiques électriques d'un module bifacial extraites de la fiche technique du fabricant, exemple 1

La première ligne de l'illustration 10 montre la mesure STC du module considérée comme monofaciale, tandis que les lignes suivantes décrivent les puissances pour une irradiation croissante de la face arrière (P_{maxBiFi-5}, P_{maxBiFi-10}, etc.). Une autre approche se présente comme suit :

Electrical Characteristics											Test uncertainty for Pmax: ±3%	
Model Number												
Testing Condition	Front	Back	Front	Back	Front	Back	Front	Back	Front	Back	Front	Back
Maximum Power (Pmax/W)	355	267	360	270	365	274	370	278	375	282		
Open Circuit Voltage (Voc/V)	48.1	47.8	48.2	47.9	48.3	48.0	48.4	48.1	48.6	48.3		
Short Circuit Current (Isc/A)	9.61	7.26	9.72	7.33	9.84	7.42	9.95	7.52	10.03	7.58		
Voltage at Maximum Power (Vmp/V)	39.2	39.7	39.3	39.8	39.5	40.0	39.6	40.1	39.8	40.2		
Current at Maximum Power (Imp/A)	9.06	6.73	9.16	6.79	9.25	6.86	9.35	6.94	9.43	7.01		
Module Efficiency(%)	18.0	13.6	18.3	13.7	18.5	13.9	18.8	14.1	19.0	14.3		

STC (Standard Testing Conditions): Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25 C, Spectra at AM1.5

Illustration 11 : Caractéristiques électriques d'un module bifacial extraites de la fiche technique du fabricant, exemple 2

Dans l'exemple 2, les coefficients bifaciaux φ_{Isc} , φ_{Pmax} et φ_{Voc} peuvent être calculés directement à partir des valeurs de puissance de la face arrière et de la face avant mesurées à 1000 W/m². La valeur P_{maxBiFi} n'est toutefois pas indiquée. Certains fabricants déclarent la puissance pour un gain bifacial maximal de 20 %, par exemple, comme le montre le nom du produit dans l'exemple 3 :

Elektrische Spezifikationen	Bifacial 380			Bifacial 365			Bifacial 355		
Einstrahlung Vorderseite STC*	100 %			100 %			100 %		
Einstrahlung Rückseite STC*	0 %	10 %	20 %	0 %	10 %	20 %	0 %	10 %	20 %
Nennleistung P _{mpp}	315	348	380	305	338	365	295	325	355
Kurzschlussstrom I _{sc}	9.3	10.2	11.1	9.2	10.1	11.0	9.1	10.0	10.9
Leerlaufspannung V _{oc}	43.8	43.9	44.0	43.7	43.8	43.9	43.5	43.6	43.7
Strom I _{mpp}	8.6	9.52	10.43	8.56	9.47	10.34	8.52	9.38	10.26
Spannung V _{mpp}	36.6	36.7	36.6	35.6	35.7	35.6	34.6	34.7	34.6
Maximale Systemspannung	1000 V								

Illustration 12 : Caractéristiques électriques d'un module bifacial extraites de la fiche technique d'un fabricant, exemple 3

D'autres fiches techniques ne contiennent pas de données électriques sur la bifacialité, mais indiquent seulement le gain bifacial potentiel sur la première page de leur fiche technique.

375Watt

MONOCRYSTALLINE BIFACIAL SOLAR MODULE

Features



Higher power output
The power generation can increase up to 25%



High PID resistant
Advanced cell technology and qualified materials lead to high resistance to PID



High efficiency Bifacial PERC cell

By using bifacial PERC cell and double glass technology, the frontside power can reach to 375W, and the backside power generation can increase up to 25%.

Illustration 13 : Caractéristiques électriques d'un module bifacial extraites de la fiche technique du fabricant, exemple 4

2.1.2 Demande de subventions pour des systèmes solaires bifaciaux

Lors de la demande de contribution unique à l'investissement de Pronovo dans le cadre de la rétribution unique des installations photovoltaïques, la puissance nominale dans les conditions STC doit être indiquée sur la face avant des modules solaires bifaciaux. La puissance supplémentaire de la face arrière des modules solaires bifaciaux n'est pas prise en compte, car il n'existe pas encore de définition normative permettant de les définir avec précision. Ainsi, la puissance de la face arrière est supposée égale à 0 Watt, comme s'il s'agissait d'un module solaire classique.

La nouvelle norme CEI TS 60904-1-2 « Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices » (Mesure des caractéristiques courant-tension des dispositifs photovoltaïques [PV] bifaciaux), publiée en 2019, détermine la méthode de mesure des modules solaires bifaciaux, mais ne définit toujours pas les modalités de calcul de la puissance STC.

3 Champs d'utilisation et application

Grâce à la production supplémentaire de la face arrière, les modules solaires bifaciaux peuvent atteindre des rendements de plus de 24 %. La valeur du gain supplémentaire dans la pratique dépend du type d'application. Le rendement énergétique annuel des modules solaires bifaciaux est fortement influencé par le rayonnement diffus du ciel et le rayonnement réfléchi diffus se produisant derrière les modules. Une disposition de modules ouverte sur l'horizon conjuguée à un arrière-plan clair avec un facteur de réflexion élevé – également appelé « albédo » – ont un effet positif sur la production d'énergie. A contrario, les ombrages de proximité, qui peuvent être projetés par des composants de la structure de montage ou par les câbles solaires, entraînent une diminution de rendement.

La simulation du rendement énergétique des installations photovoltaïques bifaciales est plus complexe qu'avec les modules solaires conventionnels. L'estimation du rayonnement diffus à l'arrière des modules solaires repose exclusivement sur des paramètres existants et des chiffres comparatifs. Pour cette raison, il est important de tenir compte d'une tolérance suffisante lors du dimensionnement des composants électriques tels que les onduleurs, les câbles solaires, les fusibles, etc. Faute de quoi, des restrictions de puissance des onduleurs, voire des pannes du système dues au déclenchement des coupe-circuits automatiques de l'installation PV ne sont pas à exclure, en particulier dans les zones susceptibles de générer des pics de production élevés (par exemple en raison de la réflexion de la neige).

3.1 Champ d'utilisation

L'utilisation de modules solaires bifaciaux est de mise pour autant que la structure ou le support de montage permette un rayonnement diffus du ciel ou un rayonnement réfléchi diffus suffisant, y compris sur la face arrière des modules solaires bifaciaux. C'est le cas des supports de montage des modules sur les toitures plates suffisamment décalées par rapport au sol, sur les garde-corps des balcons et des terrasses, sur les murs antibruit, sur les auvents vitrés de terrasses et abris de voitures ou de vélos, ou encore sur les murs-rideaux en verre. Les modules bifaciaux ne sont pas recommandés pour les types de montage où les modules sont installés directement sur un sol opaque, comme c'est le cas, par exemple, sur des toits en tuiles.



Illustration 14 : De nombreuses applications se prêtent à l'utilisation de modules solaires bifaciaux ; en haut (de g. à d.) : garde-corps d'une terrasse solaire d'une puissance de 3 kWp sur un immeuble d'habitation à Oerlikon (ZH) ; installation en toiture d'une puissance de 101 kWp à Steffisburg (BE), 3S Solar Plus ;

en bas (de g. à d.) : installation PV en plein champ d'une puissance de 28kWp avec modules solaires installés à la verticale, en Allemagne, Next2Sun ; façade en verre d'une puissance de 69 kWp, à Neuchâtel, CSEM

3.2 Facteurs influençant les performances bifaciales

3.2.1 Facteur de bifacialité

Le facteur de bifacialité se définit comme le rapport entre le rendement de la face arrière du module et le rendement de sa face avant. La puissance nominale dans les conditions d'essai normalisées (STC) entre la face arrière et la face avant du module, qui dépend de la technologie de cellules utilisée, peut varier d'un fabricant à l'autre. Le facteur de bifacialité se situe généralement entre 60 % et 90 %. C'est pourquoi, selon le produit, les gains énergétiques supplémentaires peuvent varier considérablement.

La production annuelle d'énergie de la face arrière du module est générée par le rayonnement diffus du ciel et le rayonnement réfléchi diffus supplémentaire. Les modules solaires bifaciaux produisent chaque année jusqu'à 30 % d'énergie en plus que les modules solaires monofaciaux conventionnels. Le diagramme suivant montre la courbe de performance de modules solaires bifaciaux par rapport à un module solaire classique.

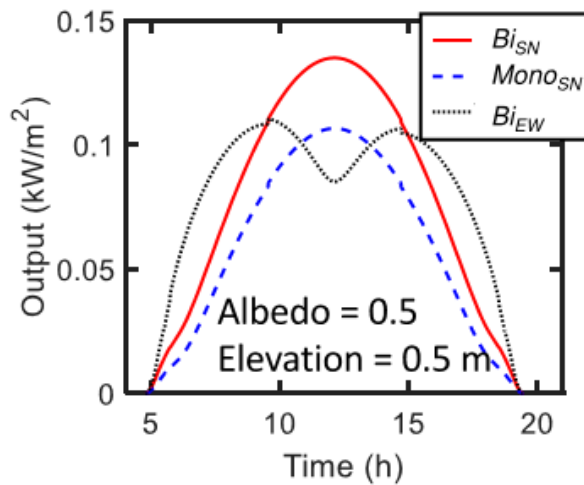


Illustration 15 : Courbe de performance d'un module solaire monofacial orienté sud (ligne bleue) comparée à celle d'un module solaire bifacial orienté sud (ligne rouge) et à celle d'un module solaire bifacial orienté est-ouest (ligne grise), où les pics de production se produisent le matin et l'après-midi^[1].

3.2.2 Angle d'incidence des modules solaires

Lorsque l'angle d'incidence du module augmente, l'intensité du rayonnement diffus à l'arrière des modules et, par conséquent, la production d'énergie de la face arrière, augmentent également. Étant donné que la quantité d'énergie générée par la face avant diminue en même temps que l'angle d'incidence augmente, il en résulte un optimum mathématique pour l'angle d'incidence des modules solaires bifaciaux. Cet angle d'incidence est environ 20 % supérieur à la valeur idéale de l'angle d'incidence des modules solaires monofaciaux conventionnels ^[1, 2], laquelle dépend du site d'implantation de l'installation PV.

3.2.3 Réflexion (albédo) de l'arrière-plan

Plus encore que le rayonnement diffus du ciel, le rayonnement réfléchi diffus fournit la plus grande proportion de lumière diffuse, en fonction de la nature du sol ou de surface d'arrière-plan des modules solaires. Le facteur de réflexion de l'arrière-plan dépend dans une large mesure de la teinte et de la nature de la surface d'arrière. La réflexion de la neige et de l'eau en particulier (installations photovoltaïques flottantes) permet d'obtenir un rendement énergétique supplémentaire important avec, à la clé, une hausse sensible de la part de l'électricité hivernale. La règle générale est la suivante : plus la surface est claire et réfléchissante, plus le rayonnement diffus et, par conséquent, la production d'énergie supplémentaire sont élevés. Le tableau suivant montre les valeurs indicatives du facteur de réflexion de différentes surfaces ^[3, 4].

Nature de la surface	Facteur de réflexion (albédo)
Plan d'eau	de 5 à 22 %
Sol herbeux	de 20 à 30 %
Asphalte	de 10 à 15 %
Béton	20 %
Sol de gravier clair	30 %
Membrane de toit gris clair	60 %
Béton peint en blanc	de 60 à 80 %
Neige fraîche	de 80 à 90 %

Tableau 2 : Valeurs indicatives du facteur de réflexion pour différentes surfaces

3.2.4 Distance entre les modules solaires et l'arrière-plan

Un autre facteur important ayant une incidence sur le rendement énergétique est la distance entre l'arrière-plan réfléchissant et les modules solaires bifaciaux. De faibles écartements n'entraînent que de faibles gains de production au niveau de la face arrière du module. En augmentant la distance, on obtient une hausse tant du rayonnement diffus du ciel que du rayonnement réfléchi diffus à l'arrière des modules. Le gain de production supplémentaire peut alors augmenter de quelques pour cent, voire jusqu'à 30 % dans des conditions idéales. Le schéma ci-après (illustration 16) montre l'évolution de la production d'énergie en fonction de la variation de la distance entre le module et l'arrière-plan, et pour différentes valeurs d'albédo. Ce schéma peut également servir d'outil pour le dimensionnement d'installations photovoltaïques bifaciales.

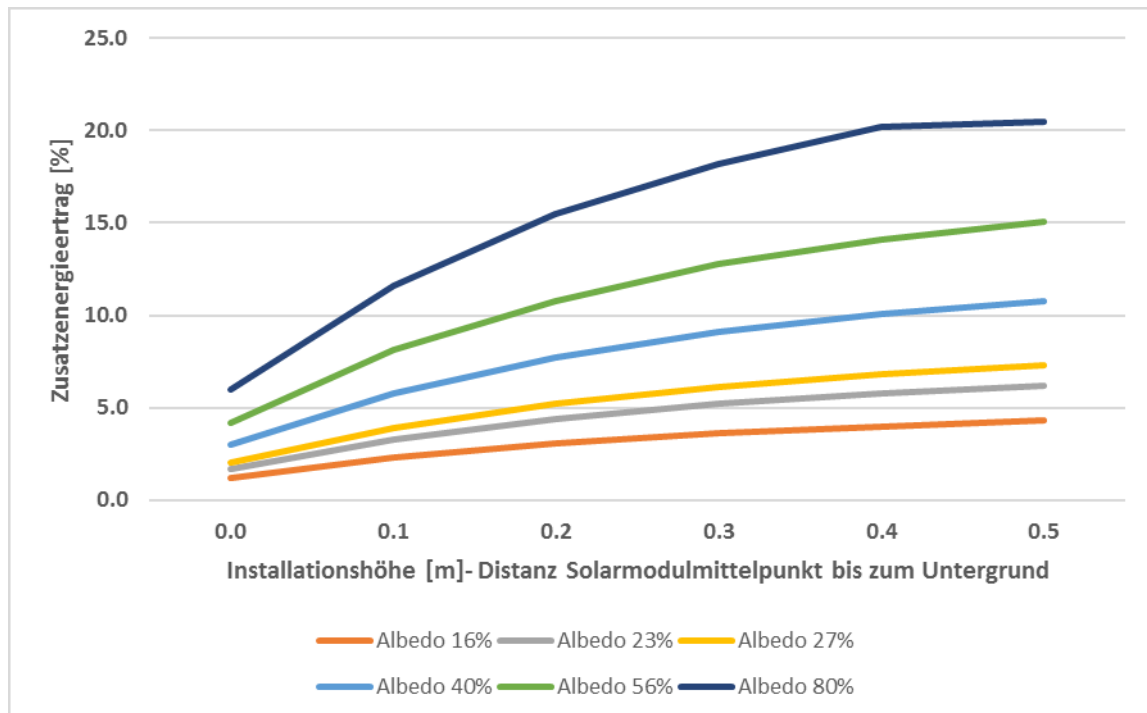


Illustration 16 : Production d'énergie supplémentaire des modules photovoltaïques bifaciaux avec facteur de bifacialité = 65 %, orientés vers le sud avec un angle d'incidence de 30° et un écartement de 2,5 m entre les rangées de modules, à différentes distances du sol et pour différentes valeurs d'albédo^[3].

3.2.5 Écartement des rangées de modules solaires

Les distances entre les rangées d'un champ de modules solaires influencent le rayonnement diffus relevé à l'arrière des modules solaires. Lorsqu'ils sont placés à proximité les uns des autres, les modules solaires ont une ouverture restreinte sur l'horizon, ce qui minimise le rayonnement diffus. Par ailleurs, lorsque le soleil est bas, un auto-ombrage sur les faces avant peut se produire d'une rangée sur l'autre. Ce phénomène d'auto-ombrage est à éviter dans la mesure du possible. Résultat : le taux de surface utile du champ solaire occupé par les rangées de modules est d'environ 40 %^[5]. Si l'utilisation de modules solaires bifaciaux est envisagée sur des rangées plus espacées, il convient de comparer au préalable le rendement bifacial supplémentaire escompté avec la perte de production due à la perte de surface utile du champ solaire.

Il est déconseillé d'utiliser des supports de montage traditionnels lorsque les modules solaires sont placés tout près du sol, avec un angle d'incidence faible (angle d'incidence jusqu'à env. 10°). Dans ces cas précis, le potentiel de production des modules solaires bifaciaux est difficilement exploitable.

3.2.6 Modules solaires semi-transparents

Sur les modules solaires bifaciaux standardisés munis de 60 ou 72 cellules de silicium, comme ceux proposés par de nombreux fabricants, les cellules sont disposées en optimisant au maximum la surface disponible et à des distances minimales les unes des autres. En particulier les jours de beau

temps, lorsque le rayonnement direct est élevé, une augmentation du rayonnement diffus à l'arrière des modules solaires généré par la transmission lumineuse entre les cellules est difficilement envisageable. Si des modules solaires bifaciaux sur mesure sont prévus pour les façades, les garde-corps de terrasse ou les auvents, alors la transmission lumineuse peut être augmentée en ménageant des écartements plus importants entre les cellules en silicium. Le choix d'un arrière-plan avec un facteur de réflexion élevé (p. ex. Albédo > 0,5) permet de maximiser le rendement énergétique supplémentaire généré.

3.2.7 Ombrage projeté par la structure de montage et les câbles solaires

Le rayonnement solaire direct n'atteint pas la face arrière des modules solaires bifaciaux, excepté si les modules sont orientés est-ouest et verticalement. Toutefois, l'ombrage projeté par des composants du système de montage ou des câbles solaires réduit le rayonnement diffus sur la face arrière du module et donc, par la même occasion, le rendement énergétique. Les aspects ci-après doivent donc être pris en compte lors de l'étape de planification.

- Lors du choix du système de montage, il convient de veiller à ce que la face arrière des modules solaires ne soit pas recouverte par les profilés porteurs. Plusieurs fabricants proposent déjà des systèmes spéciaux pour les modules solaires bifaciaux où les modules solaires sont positionnés et fixés de manière linéaire sur les deux bords longs des modules. La face arrière des modules solaires est exempte dans une large mesure de composants générateurs d'ombres de proximité.



Illustration 17 : Modules solaires bifaciaux avec système de montage inadapté. L'ombrage généré par les profilés porteurs diminue la production énergétique de la face arrière du module ; source : Renewable Energy World

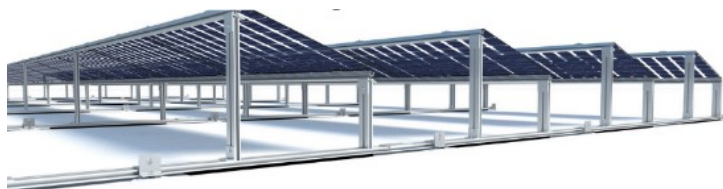


Illustration 18 : Système de montage bifacial Opsun Systems. Support linéaire pour un rayonnement diffus sans obstacle sur la face arrière du module.

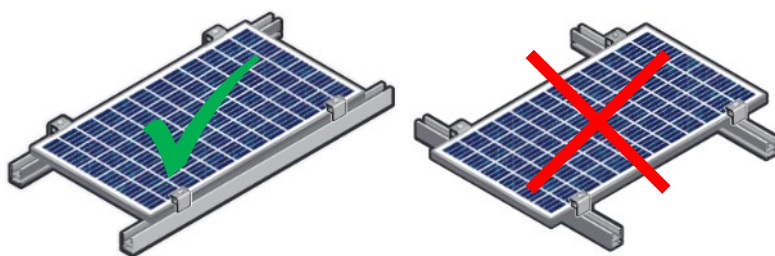


Illustration 19 : Une fixation appropriée des modules solaires bifaciaux permet d'obtenir un potentiel de production maximal.

- Sur les installations PV bifaciales, les câbles solaires doivent être fixés le plus près possible de la structure porteuse afin de ne pas recouvrir les cellules de silicium de la face arrière. Lors de la pose et de la fixation des câbles solaires, il convient de respecter le rayon de courbure minimal admissible du produit. Ce dernier est en règle générale supérieur d'un facteur de 4 à 6 par rapport au diamètre extérieur du câble. En présence de coudes plus serrés, il existe un risque d'endommagement du câble solaire. Les instructions du fabricant doivent être respectées.

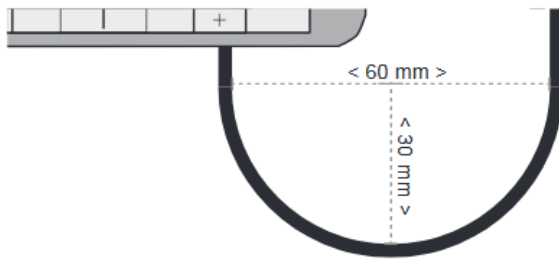


Illustration 20 : Informations du fabricant sur le rayon de courbure minimal des câbles solaires

3.3 Critères de sélection des produits pour les modules solaires bifaciaux

- **Puissance électrique**

À ce jour, la spécification de la puissance électrique STC des modules solaires bifaciaux n'est toujours pas normative. C'est pourquoi les spécifications du fabricant concernant ces produits ne sont pas uniformes. La plupart des fabricants indiquent la puissance STC du module avec diverses autres puissances de rayonnement (par exemple 5 %, 10 %, 20 % et/ou 30 % de puissance de rayonnement dans les conditions STC) sur la face arrière du module. Pour de nombreux produits, la puissance STC de la face arrière ou le facteur de bifacialité sont mentionnés en sus. C'est pourquoi il est absolument recommandé d'y prêter attention lorsqu'on compare différents produits.

- **Facteur de bifacialité**

Le facteur de bifacialité est un critère de qualité. Plus ce facteur est faible, plus les gains énergétiques supplémentaires potentiels de la face arrière sont faibles. En règle générale, la puissance nominale de la face arrière représente 60 à 90 % de celle de la face avant. Cela signifie que la production énergétique supplémentaire de la face arrière peut varier considérablement d'un fabricant à l'autre. Dans la plupart des cas, le facteur de bifacialité ne figure pas sur les fiches techniques du fabricant. Il est donc conseillé de s'enquérir de cette valeur auprès du fournisseur ou de la calculer vous-même à l'aide des informations fournies par le fabricant sur la production supplémentaire exprimée en pour cent.

- **Boîtes de jonction et câbles solaires**

Les boîtes de jonction électriques des modules solaires bifaciaux doivent être situées à proximité des cellules en silicium et ne doivent pas leur porter ombrage. Les câbles solaires

doivent sortir par la face latérale des boîtes de jonction afin qu'ils puissent être fixés au plus près du bord du module lors du montage. Les modules solaires bifaciaux munis de boîtes de jonction conventionnelles sur la face arrière active – comme cela était le cas avec la première génération de produits de certains fabricants – sont à bannir.

- **Cadre du module**

Certains fabricants proposent des modules solaires bifaciaux munis d'un cadre conventionnel. La hauteur du cadre est comprise entre 35 et 40 mm et entraîne dans la plupart des applications des pertes de puissance sur la face arrière du module. Le choix de modules solaires bifaciaux sans cadre est recommandé. La prudence est toutefois de mise lors du transport et de la manipulation de ces produits, car l'élément pourrait se briser immédiatement et intégralement en cas de choc impactant les bords du verre. Pour la fixation des modules solaires sans cadre, il convient d'utiliser des dispositifs de serrage les plus plats possibles, faute de quoi la surface du module serait ombragée, ce qui entraînerait également des pertes de production.

3.4 Dimensionnement des composants électriques

Préalablement au dimensionnement des composants électriques avec modules solaires bifaciaux, il convient de déterminer le rayonnement supplémentaire attendu et, par conséquent, la production supplémentaire générée par la face arrière des modules. À cette fin, le facteur de réflexion de l'arrière-plan/du sol doit être défini. Les valeurs indicatives tirées de la documentation (voir également le tableau 2) peuvent être utilisées à cet effet. Il est ensuite recommandé de calculer la production d'énergie à l'aide d'un logiciel de simulation, comme PVSyst ou Polysun. Il est également possible, à l'aide d'un diagramme, d'estimer la production supplémentaire pour divers cas de figures avec différents supports de montage des modules et différentes valeurs d'albédo (voir l'illustration 16). Toutefois, cette méthode n'offre pas la même précision que la simulation de production effectuée à l'aide d'un logiciel professionnel.

La détermination de tous les composants électriques doit tenir compte de la puissance supplémentaire attendue au niveau de la face arrière du module. Cette règle s'applique non seulement aux onduleurs, mais aussi aux câbles DC, à la protection contre les surtensions, aux coupe-circuits, aux fusibles et aux disjoncteurs différentiels (RCD). Il convient de tenir compte en particulier de l'intensité croissante du courant des modules solaires. La tension électrique, en revanche, reste constante comme pour un module solaire monofacial et ses variations sont exclusivement fonction des variations de température, et non – ou quasiment jamais – du rayonnement diffus supplémentaire se produisant sur la face arrière du module.

Sur les sites exposés à des réflexions lumineuses supérieures à la moyenne, par exemple dans les régions montagneuses sujettes à de fortes chutes de neige ou sur les rives/au-dessus des plans d'eau, des pics de production supérieurs à la moyenne sont susceptibles de se produire ; dans de tels cas, les composants doivent être suffisamment surdimensionnés, à défaut de quoi des restrictions de puissance ou des perturbations de fonctionnement pourraient se produire.

Elektrische Spezifikationen

Einstrahlung Vorderseite STC*	100 %		
Einstrahlung Rückseite STC*	0 %	10 %	20 %
Nennleistung P_{mpp}	295 W_p	320 W_p	345 W_p
Spannung U_{mpp}	32.1 V	32.1 V	32.1 V
Strom I_{mpp}	9.20 A	9.98 A	10.76 A
Leerlaufspannung U_{oc}	39.0 V	39.0 V	39.1 V
Kurzschlussstrom I_{sc}	9.74 A	10.57 A	11.36 A
Wirkungsgrad	17.9 %	19.5 %	21.0 %
Maximale Systemspannung (IEC)	1500 V		
Rückstrombelastbarkeit	15 A		
Toleranz Nennleistung	[-0, +5] W_p		

*Elektrische Leistungsdaten bei STC (1000 W/m², 25°C, AM 1.5).
Bifaciale Anteile berechnet.

Illustration 21 : Spécifications électriques SkySlate Bifacial, 3S Solar Plus : la hausse de la puissance des modules solaires bifaciaux est générée par l'augmentation du courant. La tension électrique, en revanche, reste constante dans les conditions STC.

3.5 Sources

[1] Optimization and Performance of Bifacial Solar Modules: A Global Perspective

Auteurs : Xingshu Sun, Mohammad Ryyan Khan, Chris Deline, and Muhammad Ashraful Alam, Network of Photovoltaic Technology, Purdue University, West Lafayette, IN, 47907, États-Unis, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 80401, États-Unis

[2] Illumination homogeneity of bifacial systems – outdoor measurements with systematically varied installations conditions

Auteurs : Thomas Baumann*, Markus Klenk, Nico Keller, Hartmut Nussbaumer, Franz Baumgartner, ZHAW (Université des sciences appliquées de Zurich), SoE, Institute of Energy Systems and Fluid Engineering, Technikumstrasse 9, CH-8401 Winterthur, Suisse

[3] Calculating the additional energy yield if bifacial solar modules, White paper Solarworld

[4] Photovoltaik – Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen,

Auteur : Dr. Heinrich Häberlin, Electrosuisse Verlag, 8320 Fehraltorf

[5] Photovoltaik, Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis,

Auteur : Konrad Mertens, Carl Hanser Verlag

[6] BIFACIAL SOLAR PHOTOVOLTAIC MODULES – Program on Technology Innovation, White paper, EPRI, Palo Alto, États-Unis

[7] Future Of Bifacial Si Solar Cells For Space Application,

Auteurs : G.M. Grigorieva et al., 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valence, Espagne

4 Bons exemples sur le terrain

4.1 Installation photovoltaïque en toiture avec modules bifaciaux, Steffisburg (BE)

Description du projet



En 2018, l'installation PV d'une puissance de 101 kWp a été aménagée sur un toit plat neuf à Steffisburg (BE). L'installation comprend un total de 342 modules bifaciaux SkySlate de 3S Solar Plus SA d'une puissance nominale de 295 Wp chacun. L'angle d'inclinaison des modules est de 20°.

La production estivale mesurée, corrigée des variations climatiques, est supérieure d'environ 20 à 25 % aux prévisions applicables à des modules solaires monofaciaux qui seraient installés sur le même site.

Données techniques de l'installation

Puissance installée : 101 kWp

Surface du champ solaire : 562 m²

Propriétaire et participants au projet

Propriétaire/investisseur : commune de Thoune

Entreprise : Brunner Imboden AG

Fournisseur du système : 3S Solar Plus SA

Modules solaires

Type : SkySlate Bifacial,
sans cadre, verre/verre laminé (2 × 2,5 mm)

Technologie : cellules monocristallines de type nPERT

Nombre de cellules : 60



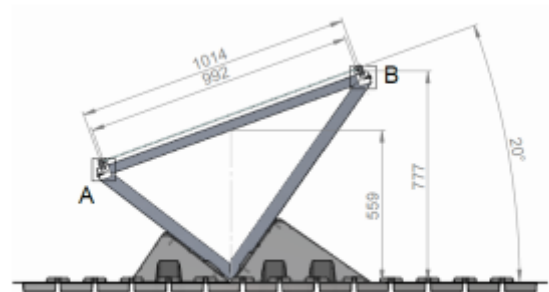
Dimensions :	992 mm × 1658 mm × 6 mm
Poids :	22,5 kg
Puissance nominale :	
avec rayonnement sur la face arrière, conditions STC : 0 %,	295 Wp
avec rayonnement sur la face arrière, conditions STC : 10 %,	320 Wp
avec rayonnement sur la face arrière, conditions STC : 20 %,	345 Wp
Face arrière uniquement, conditions STC :	250 Wp
Facteur de bifacialité :	85 %

Structure porteuse

Type :	Contec greenlight bifacial
Type de fixation :	système de montage en aluminium avec quatre points de fixation du verre, centre des modules solaires env. 55 cm au-dessus du sol construction légère avec 20 kg/m ² de poids supplémentaire
Angle d'inclinaison :	20°

Arrière-plan et sol

Matériau de surface :	couche de graviers
Couleur :	Terracotta
Albédo :	30 % (estimation)



Configuration des onduleurs

8 onduleurs Fronius Symo de 7.0-3-M à 20.0-3-M

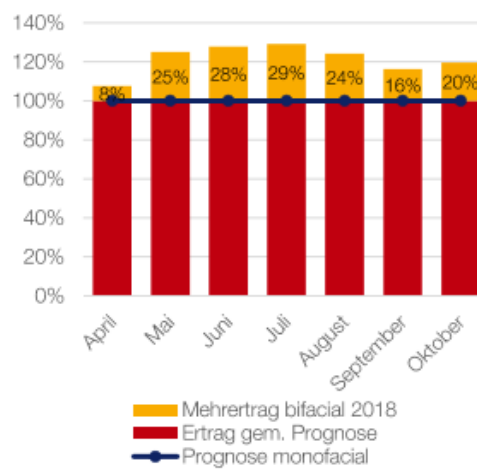
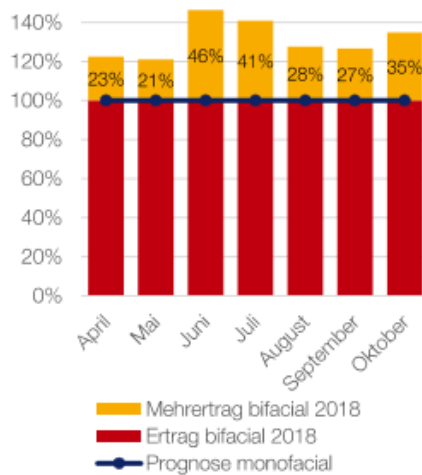
Puissance nominale CA des onduleurs 117 kW

Rapport de puissance $P_{CC \text{ modules}} / P_{AC \text{ onduleurs}} : 0,86$

Données de surveillance de la production énergétique

Pendant la période de mesure allant d'avril 2018 à octobre 2018, la production après correction climatique a été d'environ 20 à 25 % supérieure aux prévisions relatives à des modules solaires monofaciaux !

	Prognose ¹	Energieertrag 2018	Prognose ¹	Energieertrag 2018	Mehrertrag
	MWh	MWh	kWh/kWp	kWh/kWp	
Summe	97.3	61.9	964.7	613.0	
Januar	3.4		34.0	0.0	
Februar	5.2		52.0	0.0	
März	8.9		88.3	0.0	
April	10.5	12.9	104.0	127.5	+23%
Mai	11.4	13.8	113.0	136.9	+21%
Juni	11.9	17.4	118.0	172.7	+46%
Juli	12.6	17.8	125.0	176.0	+41%
August	11.2	12.7 ²	111.0	141.7	+28%
September	9.2	10.3 ²	90.9	115.2	+27%
Oktober	6.5	7.9 ²	64.9	87.5	+35%
November	3.8		37.2	0.0	
Dezember	2.7		26.4	0.0	



Ertrag gegenüber Prognose (ohne Wetterkorrektur). April 2018: nur Teilbetrieb.

Wetterkorrigierter³ Ertrag gegenüber Prognose. April 2018: nur Teilbetrieb.

¹ Basierend auf [PVGIS](#) (freistehend, monofaciale Module, Systemverlust 12%, geg. Standort; Aug. 2018)

² Ausfall eines Wechselrichters am 3.8. bis November 2018

³ Wetterkorrektur: Einstrahlungsdaten für Thun über letzte 10 Jahre monatlich gemittelt und Ertragsprognose proportional zu effektiven Monatseinstrahlungswerten korrigiert.

Illustration 22 : Production avec les modules « 3S SkySlate® Bifacial », 3S Solar Plus

4.2 Installation photovoltaïque bifaciale en toiture, Kingsten, État de New York (États-Unis)

Description du projet

En 2016, une installation PV d'une puissance de 154,3 kWp a été aménagée sur un toit plat en béton peint en blanc à Kingsten, dans l'État de New-York (États-Unis). Cette installation comprend au total 532 modules bifaciaux Bi60-368BSTC de Prism Solar d'une puissance nominale de 290 Wp chacun. L'angle d'inclinaison des modules est d'environ 35°.



Les mesures réalisées font apparaître une production supplémentaire d'environ 10 à 30 % au printemps et d'environ 22 % sur l'ensemble de l'année par rapport à des modules solaires monofaciaux.

Caractéristiques techniques des installations

Puissance installée : 154,3 kWp

Surface du champ solaire : 887 m²



Participants au projet

Entreprise :

Sunrise Solar Solutions, LLC

Fournisseur du système :

Prism Solar Technologies

Modules solaires

Type :

Bi60-368BSTC, sans cadre

Verre/verre laminé (2 × 3,2 mm)

Technologie :

cellules monocristallines de type N

Nombre de cellules :

60

Dimensions :

984 mm × 1695 mm × 7,2 mm

Poids :

28,9 kg

Puissance nominale :

avec rayonnement sur la face arrière, conditions STC : 0 %, 290 Wp

avec rayonnement sur la face arrière, conditions STC : 30 %, 368 Wp

Face arrière uniquement, conditions STC : 261 Wp

Facteur de bifacialité : 90 %

Structure porteuse

Type : SunRail Structure Bifacial™, Opsun systems Inc.

Type de fixation : système de montage en aluminium avec quatre points de fixation,
centre des modules solaires env. 75 cm au-dessus du sol, ossature
vissée directement sur le toit

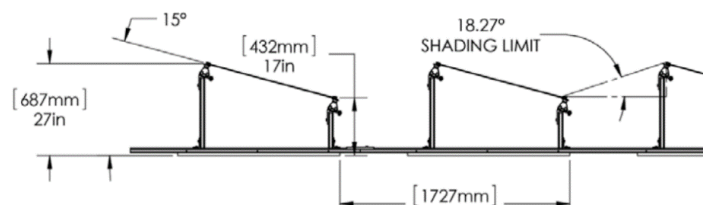
Angle d'inclinaison : env. 35°

Arrière-plan et sol

Matériau de surface : toit en béton

Couleur : peinture blanche

Albédo : 75 %



Configuration des onduleurs

5 onduleurs SolarEdge SE33.3KUS

266 optimiseurs de puissance SolarEdge P730

Rapport de puissance $P_{CC \text{ modules}} / P_{AC \text{ onduleurs}} : 0,927$



Données de surveillance de la production énergétique

L'installation photovoltaïque a été mise en service en 2016. Au cours de la première année d'exploitation, la production s'est élevée à 1650 kWh/kWp, soit une production supérieure d'environ 22 % à celle d'une installation monofaciale située au même endroit (1350 kWh/kWp). Pendant les mois d'hiver, la réflexion supplémentaire due à la neige a permis d'obtenir une production plus élevée de 38 % à 60 %. En été, l'augmentation de la production se situe entre 11 % et 30 %. Malgré les onduleurs déjà surdimensionnés, ceux-ci atteignent temporairement leur limite de capacité lors des belles journées printanières. Le choix d'onduleurs de plus grande taille pourrait donc se traduire par une production encore supérieure de 22 %.

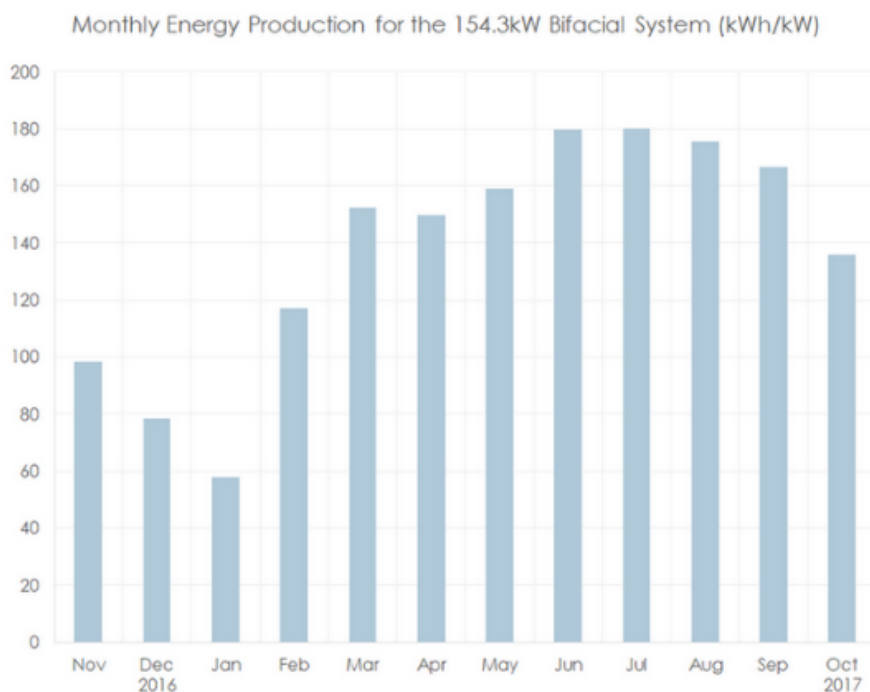


Illustration 23 : Production d'énergie mensuelle de l'installation photovoltaïque bifaciale d'une puissance de 154,3 kWp sur un toit plat blanc à Kingsten, dans l'État de New-York (États-Unis).

4.3 Façade photovoltaïque bifaciale au CSEM à Neuchâtel (NE)

Description du projet

En 2015, une installation PV d'une puissance de 69,0 kWp a été aménagée sur une structure métallique et constitue, avec la construction esthétique de la façade, une part de l'architecture du bâtiment. L'installation se compose de 210 modules solaires verre/verre (verre de sécurité feuilleté), d'une puissance nominale de 330 Wp. En raison des épaisseurs de verre sélectionnées, chaque module pèse 120 kg. Les modules solaires semi-transparents ont été fabriqués avec des cellules en silicium bifaciales à hétérojonction (HJT). Grâce aux grands écartements des cellules (40 mm), les modules affichent une transparence de 40 %.



Caractéristiques techniques des installations

Puissance installée :	69,0 kWp
Surface du champ solaire :	592 m ²

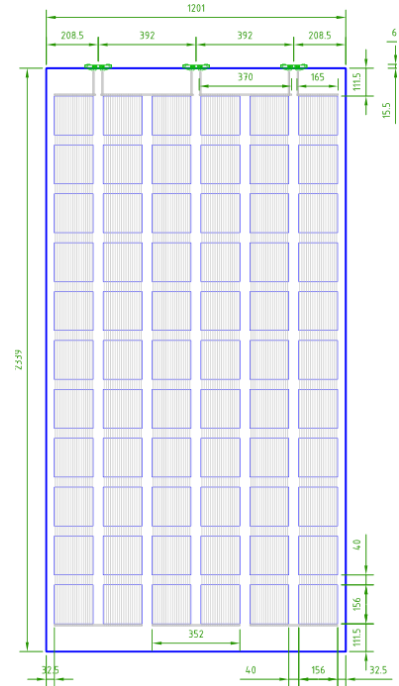
Propriétaire, architecte et participants au projet

Propriétaire/investisseur :	Viteos SA, Ville de Neuchâtel et CSEM SA
Architecte :	GD Architectes (Neuchâtel)
Entreprise :	Acomet SA, Zwahlen et Mayr SA,
Fournisseur du système :	MeyerBurger AG

Modules solaires

Type :	façade Clear 330, sans cadre verre/verre laminé (ESG, 6 mm × ESG 10 mm)
Technologie :	technologie à hétérojonction (HJT), combinaison de cellules solaires au silicium cristallin et de technologies à couche mince

Nombre de cellules :	66
Dimensions :	1200 mm × 2340 mm × 17,5 mm
Poids :	120,0 kg
Puissance nominale :	
avec rayonnement sur la face arrière, conditions STC :	0 %, 330 Wp
Face arrière uniquement, conditions STC :	non disp.
Facteur de bifacialité :	non disp.



Structure porteuse

Type :	structure porteuse en acier spécialement développée pour l'immeuble avec système de façade RAICO en aluminium pour la fixation des modules solaires, dimensions hors tout de la structure porteuse : largeur 44 m × hauteur 14,5 m
Type de fixation :	Les modules solaires sont fixés de façon linéaire sur les bords supérieur et inférieur du verre, ce afin de créer une structure de fixation filigrane. Les câbles solaires sont intégrés dans la construction RAICO et ne sont pas visibles de l'extérieur.
Angle d'inclinaison :	90°

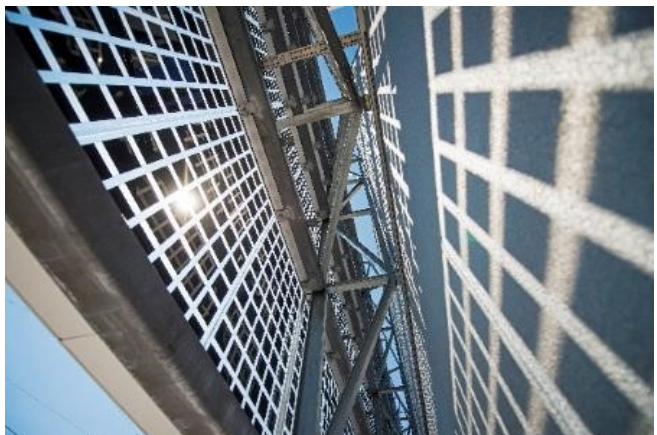
Arrière-plan et sol

Matériau de surface :	façade crépie, peinte
Couleur :	bleu clair brillant
Albédo :	env. 50 % (estimation)

Configuration des onduleurs

4 onduleurs SMA Tripower STP12000TL-20,
1 onduleur SMA Tripower STP8000TL-20,

Rapport de puissance $P_{CC \text{ modules}} / P_{AC \text{ onduleurs}} : 1,24$



Données de surveillance de la production énergétique

L'installation photovoltaïque a été mise en service en septembre 2015. Au cours de la première année d'exploitation, 787 kWh/kWp ont été produits. Au cours de la même période, des valeurs de rayonnement solaire supérieures d'environ 5 % à la moyenne météorologique à long terme ont été enregistrées. Il en résulte que la production énergétique annuelle spécifique de l'installation après correction climatique s'élève à environ 750 kWh/kWp. En comparaison, le calcul de la production annuelle des modules monofaciaux par



simulation PVsyst, dans les mêmes conditions d'orientation et d'emplacement, aboutit à 644 kWh/kWp. En d'autres termes, la production supplémentaire des modules solaires bifaciaux s'élève à près de 13 %. La limite de puissance des onduleurs est atteinte par certains jours de beau temps au cours de l'année, en particulier au printemps.

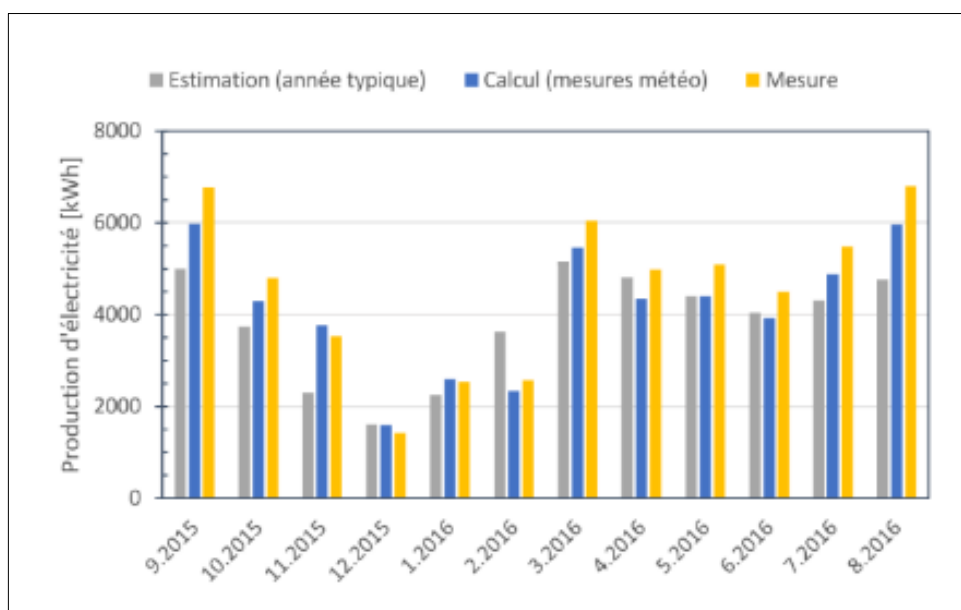


Illustration 24 : Production d'énergie mensuelle de l'installation photovoltaïque bifaciale d'une puissance de 69,0 kWp. Production mensuelle simulée (gris), production mensuelle mesurée (jaune) et production mensuelle après correction climatique (bleu).

4.4 Abri pour voitures photovoltaïque avec modules bifaciaux à Tucson, Arizona (États-Unis)

Description du projet

En 2016, une installation PV d'une puissance de 9,72 kWp a été intégrée à un abri pour voitures de type « carport ». Cette installation comprend au total 36 modules Bi60-343BSTC de Prism Solar d'une puissance nominale de 270 Wp chacun. La structure de montage du toit a été conçue pour l'utilisation de modules solaires bifaciaux, où le rayonnement diffus peut venir frapper la face arrière des modules avec le moins d'obstacles possible. L'angle d'inclinaison des modules solaires est d'environ 7°. La production supplémentaire mesurée par rapport à l'utilisation de modules solaires monofaciaux s'élève à environ 20 %.



Caractéristiques techniques des installations

Puissance installée :	9,72 kWp
Surface du champ solaire :	72 m ²

Participants au projet

Entreprise :	non mentionnée
Fournisseur du système :	Prism Solar Technologies

Modules solaires

Type :	Bi60-343BSTC, sans châssis, verre/verre feuilleté (2 × 3,2 mm)
Technologie :	cellules monocristallines de type N
Nombre de cellules :	60
Dimensions :	984 mm × 1695 mm × 7,2 mm
Poids :	28,9 kg



Puissance nominale :

avec rayonnement sur la face arrière, conditions STC : 0 %, 270 Wp

avec rayonnement sur la face arrière, conditions STC : 30 %, 343 Wp

Face arrière uniquement, conditions STC : 243 Wp

Facteur de bifacialité : 90 %

Structure porteuse

Type : Powers Solar Frames, LLC

Type de fixation : ossature en inox de type « carport », conçu pour des applications photovoltaïques, surface de modules solaires en suspension et reposant sur deux piliers de soutien, dimensions du champ de modules solaires : 10,2 m × 6,8 m ; hauteur min. au-dessus du sol : 3 m

Angle d'inclinaison : 7°

Arrière-plan et sol

Matériau de surface : dalles de pierre

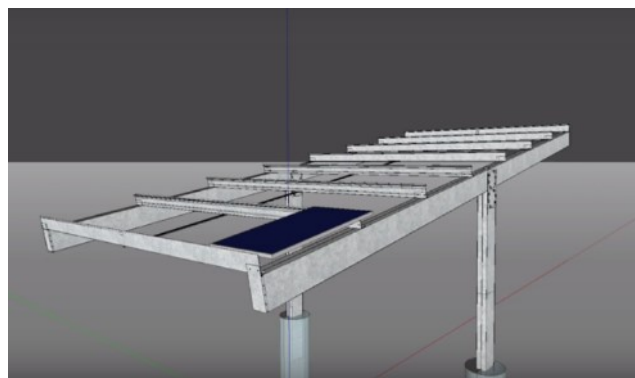
Couleur : claire

Albédo : 40 %

Configuration des onduleurs

1 onduleur SMA 8000US

Rapport de puissance $P_{CC \text{ modules}} / P_{AC \text{ onduleur}}$: 1,22



Données de surveillance de la production énergétique

L'installation photovoltaïque a été mise en service en 2016. Au cours de la première année d'exploitation, la production s'est élevée à 1830 kWh/kWp. La production de l'installation a crû d'environ 20 % par rapport à la production annuelle simulée d'une installation monofaciale qui serait située au même endroit (1500 kWh/kWp). Sur le site de Tucson aussi, la production d'énergie relativement élevée est due au climat désertique. L'onduleur a été dimensionné de la même manière que pour une installation monofaciale conventionnelle. Il convient de partir du principe qu'une production plus élevée peut être obtenue si l'on fait le choix d'un onduleur surdimensionné.

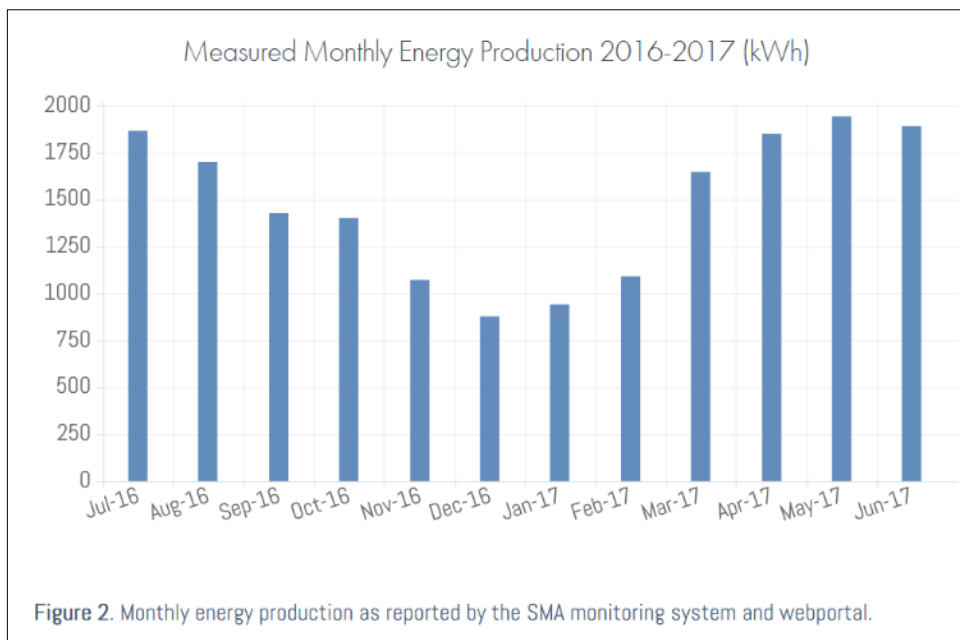


Illustration 25 : Production d'énergie mensuelle de l'installation solaire d'une puissance de 9,72 kWp (12,35 kWp y c. puissance nominale bifaciale dans les conditions STC). La production annuelle au cours de la première année d'exploitation est remarquable : 17 800 kWh sur le site de Tucson, en Arizona.

4.5 Garde-corps photovoltaïque bifacial sur les terrasses d'un immeuble d'habitation, Oerlikon (ZH)

Description du projet

En 2018, une balustrade photovoltaïque bifacial d'une puissance de 3 kWp a été installée sur les garde-corps des terrasses de l'étage en attique de l'immeuble d'habitation sur une longueur de 23 m, en plus de la façade photovoltaïque de couleur et de l'installation en toiture. L'installation comporte 21 modules solaires semi-transparentes sur mesure, d'une puissance de 145 Wp chacun. Les modules solaires sont positionnés à un angle de 90° et orientés à 21° vers le sud-ouest.



Comme l'installation n'a été mise en service qu'à la fin de 2018, aucune donnée de mesure n'est disponible à l'heure actuelle. On peut toutefois tabler sur une production supplémentaire de 10 à 15 % par rapport à une installation avec des modules solaires monofaciaux.

Caractéristiques techniques des installations

Puissance installée :	3,04 kWp
Surface du champ solaire :	21,8 m ²

Architecte et participants au projet

Architectes :	BKG Architekten
Planification solaire :	CREnergie Sàrl
Entreprise :	Suntechnics Fabrisolar AG
Fournisseur des modules solaires :	PVP Photovoltaik GmbH

Modules solaires

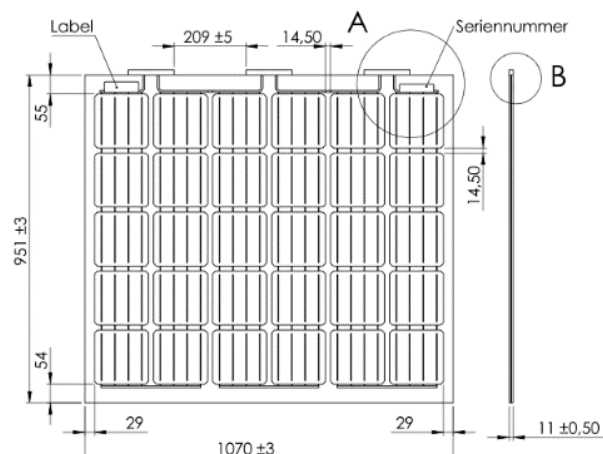
Type : modules bifaciaux PVP sans cadre, verre/verre laminé (2 × 5 mm)

Technologie : cellules monocristallines

Nombre de cellules : 30

Dimensions : 1070 mm × 950 mm × 12 mm

Poids : 28,0 kg



Puissance nominale :

avec rayonnement sur la face arrière, conditions STC : 0 %, 145 Wp

avec rayonnement sur la face arrière, conditions STC : 30 %, 173 Wp

Face arrière uniquement, conditions STC : 101 Wp

Facteur de bifacialité : 70 %

Structure porteuse

Type : garde-corps de terrasse

Type de fixation : structure en acier nickel-chrome avec poteaux entre les modules solaires, intégration des câbles solaires dans la main courante de la structure.

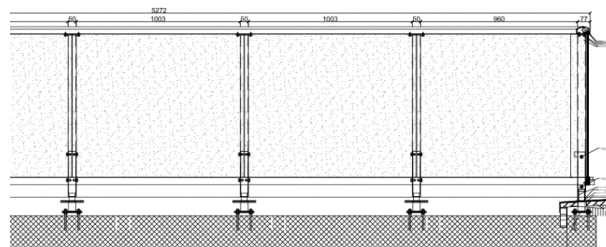
Angle d'inclinaison : 90°

Arrière-plan et sol

Matériau de surface : dalles de pierre sur la terrasse, façade compacte et en verre

Couleur : dalles de pierre couleur claire, façade blanche, verre

Albédo : 60 % (estimation)

**Configuration des onduleurs**

1 onduleur Fronius Symo 5.0-3-M, tous les modules sont montés en série sur l'un des deux onduleurs MPP Tracker

Rapport de puissance $P_{CC \text{ modules}} / P_{AC \text{ onduleur}} : 1,22$

Résultats de simulation de la production énergétique

L'installation photovoltaïque a été mise en service fin 2018. Aussi, aucune donnée de mesure de l'installation n'est actuellement disponible. La simulation pour des modules solaires monofaciaux qui seraient situés au même endroit aboutit à une production annuelle de 1730 kWh (soit 570 kWh/kWp). Avec les modules solaires bifaciaux utilisés, il est possible de tabler sur une production annuelle calculée pouvant atteindre 2000 kWh (entre +10 % et +15 %).

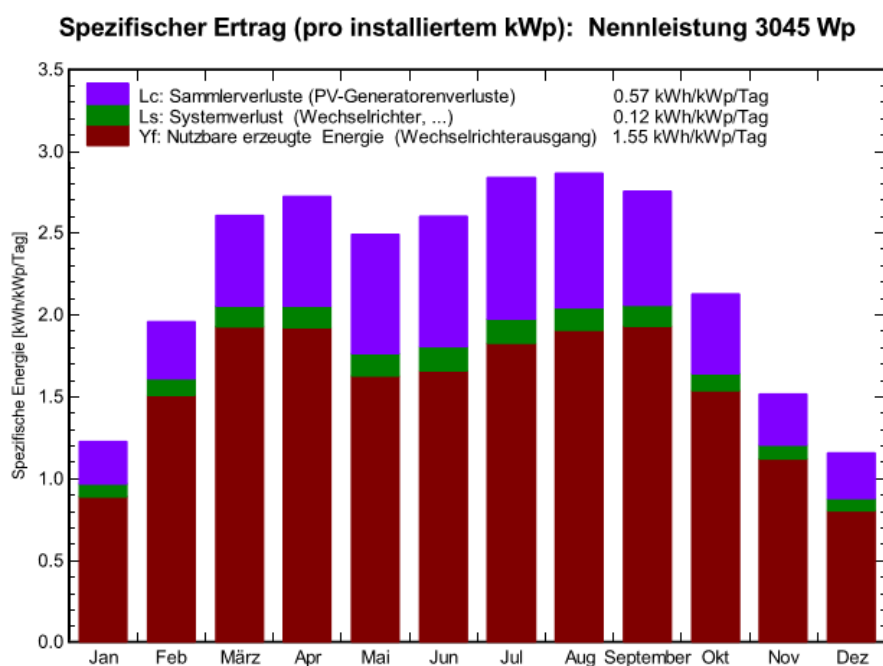


Illustration 26 : Simulation production PVsyst de la face avant du module

4.6 Installation photovoltaïque bifaciale en plein champ avec modules solaires installés verticalement, Merzig (Allemagne)

Description du projet

Pour cette installation pilote d'une puissance de 28 kWp, les modules solaires bifaciaux ont été installés sur un système de montage vertical. L'installation a été mise en service en 2017. Les supports de montage orientés est-ouest ont été disposés avec un écartement de 10 m entre les rangées de modules, ce afin d'éviter autant que possible les zones d'ombre sous celles-ci. L'énergie solaire est produite principalement le matin et l'après-midi. Ce concept exclut la pointe de production de midi, c'est-à-dire lorsque l'offre d'électricité solaire disponible dans le réseau public est généralement supérieure à la demande. Les 96 modules solaires offrent une production annuelle supérieure d'environ 10 % à celui d'une installation



conventionnelle située au même endroit avec des modules solaires orientés plein sud et un angle d'inclinaison de 30°. Pour obtenir cette production supplémentaire, les modules solaires doivent présenter un facteur de bifacialité élevé, à savoir d'au moins 90 %, c'est-à-dire que les deux côtés du module doivent atteindre à peu près la même puissance nominale dans les conditions STC.

L'espace disponible entre les rangées de modules solaires peut être utilisé à des fins agricoles (pâturages, agriculture). Cet argument de poids plaide en faveur du développement des installations photovoltaïques en plein champ.

Caractéristiques techniques des installations

Puissance installée : 27,8 kWp

Surface du champ solaire : 160 m²

Participants au projet

Fournisseur du système : Next2sun GmbH

Fabricant des modules : SI Module GmbH

Modules solaires

Type : bifacial, sans cadre, verre/verre laminé (prototype)

Technologie : cellules monocristallines (Neo Solar Power)

Nombre de cellules : 60

Puissance nominale :

avec rayonnement sur la face arrière, conditions STC : 0 %, 290 Wp

Face arrière uniquement, conditions STC : 260 Wp

Facteur de bifacialité : 90 %

Structure porteuse

Type : Next2Sun

Type de fixation : structure à ossature en acier fixée à des poteaux en U enfoncés à env. 2 m sous terre.

Angle d'inclinaison : 90°

Arrière-plan et sol

Matériau de surface : prairie naturelle

Albédo : 25 % (estimation)

Données de surveillance de la production énergétique

En 2016, la production était de 1040 kWh/kWp. Le schéma suivant indique l'évolution journalière de la puissance d'un string de modules solaires (2,32 kWp) par une journée de beau temps.

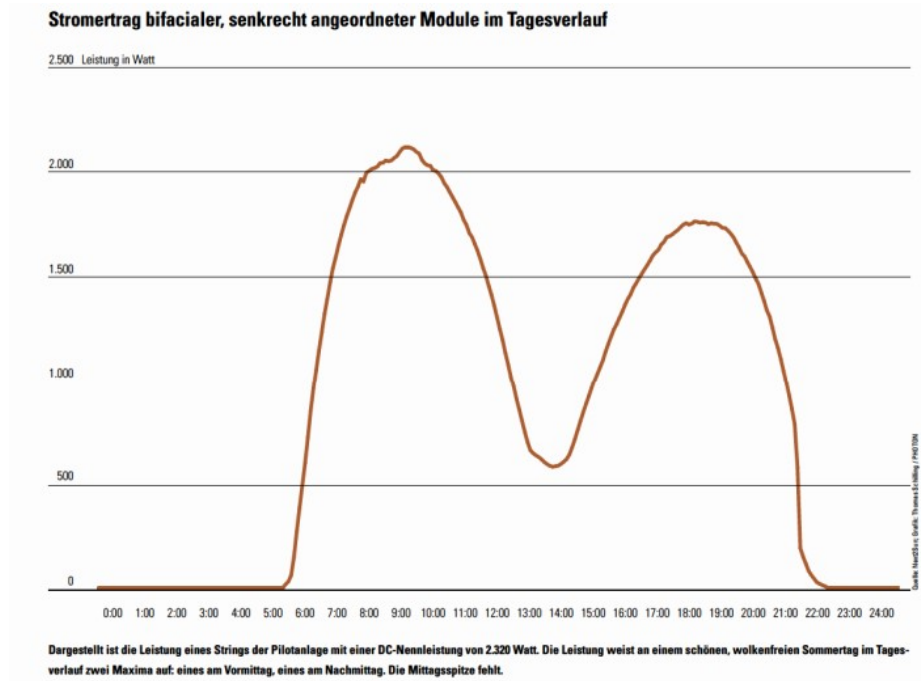


Illustration 27 : Article « Eine Insel mit 2 Bergen » (Une île avec deux montagnes), Photon, juin 2017, Anne Kreuzmann

4.7 Modules bifaciaux avec système de conception innovante pour installations PV montées sur toiture, bâtiment « NEST », Empa, Dübendorf (ZH)

4.7.1 Description du projet

En 2018, l'installation d'une puissance de 18 kWp, a été montée à titre de prototype sur le bâtiment « NEST » de l'Empa. L'installation comprend 60 modules bifaciaux à hétérojonction verre-verre avec technologie SmartWire de MeyerBurger AG, d'une puissance nominale de 300 Wp chacun. Les modules ont été installés sur un système de montage est-ouest avec un support de montage à quatre points et un angle d'inclinaison de 22°. Afin de maximiser la production des faces arrière



des modules, une partie de l'installation a été montée sur un sol de résidus de cristaux de verre de couleur blanche, l'autre partie sur des tôles d'aluminium anodisées mat. La production supplémentaire estimée des modules solaires bifaciaux est de 5 à 10 %. Une maximisation de la production serait possible en optimisant la structure du système à l'aide de modules solaires plus transparents et avec des écartements plus grands entre les cellules de silicium.

Données techniques de l'installation

Puissance installée : 18 kWp

Surface du champ solaire : 95 m²

Propriétaire et participants au projet

Planification, exécution : Miloni Solar AG

Auteur de l'initiative : Empa

Fournisseurs du système : Meyer Burger AG, Pliasys

Modules solaires

Type : bifacial, sans cadre, verre/verre laminé (prototype)

Technologie : technologie à hétérojonction (HJT) avec SmartWire

Nombre de cellules : 60

Dimensions : env. 992 mm × 1658 mm × 6 mm

Poids : 22,5 kg



Puissance nominale :

avec rayonnement sur la face arrière, conditions STC : 0 %, 300 Wp

Face arrière uniquement, conditions STC : non disp.

Facteur de bifacialité : non disp.

Structure porteuse

Type : Pliasys, système spécifique à l'immeuble

Type de fixation : système aérodynamique optimisé avec montage sans pénétration de toiture ; système de fixation en aluminium avec quatre points de fixation du verre et dispositif antichute intégrable

centre des modules solaires situé à env. 40 cm au-dessus du sol

Angle d'inclinaison : 22°



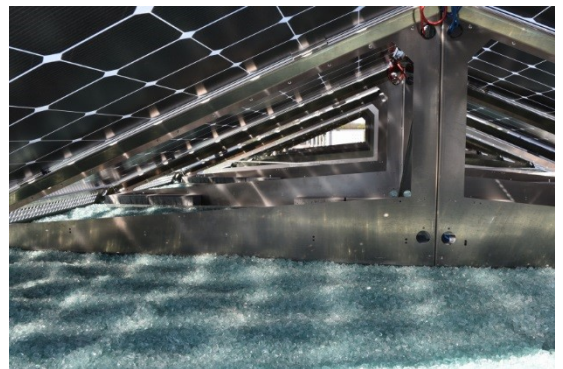
Arrière-plan et sol

Matériau de surface : résidus de cristaux de verre, couleur blanche

tôles d'aluminium, anodisés mats

Couleur : claire, réfléchissante

Albédo : > 60 % (estimation)



Configuration des onduleurs

1 onduleur SMA Tripower STP12000TL-20,

1 onduleur SMA Tripower STP7000TL-20

Rapport de puissance $P_{CC \text{ modules}} / P_{AC \text{ onduleurs}} : 0,94$

Données de surveillance de la production énergétique

Les données de production disponibles pour les 13 premiers mois laissent supposer une production bifaciale supplémentaire d'environ 5 à 10 %.

Bereich	Unterbau (Material)	WR	Modul	Anzahl (Stk)	Leistung (Wp)	Leistung (Wp)	Orientierung (Azimut)	Neigung (°)	Fläche (m2)	Simulation (kWh/a)	Ertrag (kWh/13Mt)	Ertrag korr. (kWh/a)
Dach Ost	Glasschrott	Nr 1	A	18	300	5'400	62	24				
Dach West	Glasschrott	Nr 1	A	18	300	5'400	242	24				
Subtotal 1				36	300	10'800			47.6	9'107	11'605	10'712
Dach Ost	Reflektorblech	Nr 2	A	11	300	3'300	62	24				
Dach West	Reflektorblech	Nr 2	A	11	300	3'300	242	24				
Subtotal 2				22	600	6'600			47.6	5'565	7'307	6'745

Illustration 28 ; source : conférence « Bifaciale Module in innovativem System-Design für Aufdachanlagen » (« conception de systèmes innovants avec modules bifaciaux pour les installations en toiture ») par Miloni Solar, juin 2018

5 Résumé

L'avantage des modules bifaciaux par rapport aux modules solaires conventionnels réside dans le fait que l'électricité est produite sur les deux faces du module avec, à la clé, un gain d'efficacité. Le présent rapport décrit le principe de fonctionnement de la technologie bifaciale et montre la planification optimale de la structure du système ainsi que les possibilités d'utilisation de base offertes par cette technologie.

La structure globale du système est cruciale pour un fonctionnement optimal des modules solaires bifaciaux. La conception de l'installation doit garantir un rayonnement lumineux aussi élevé que possible à l'arrière des modules solaires. Pour ce faire, il est recommandé d'utiliser des modules solaires semi-transparents, de sélectionner le bon type de support de montage des modules ainsi que le bon système de montage lui-même. Le comportement de réflexion de l'arrière-plan des modules solaires fait le reste. Des modules solaires semi-transparents conjugués à des supports de montage clairsemés ont pour effet de réduire la densité de puissance du champ solaire. Le gain de production des modules bifaciaux doit être capable de compenser – et plus – cette baisse, faute de quoi il convient d'adapter la structure du système.

En plus d'être utilisés pour les systèmes montés en toiture, les modules solaires bifaciaux offrent un énorme potentiel pour des usages polyvalents comme éléments de construction intégrés à l'enveloppe du bâtiment et en plein champ. Tout particulièrement en présence d'une surface suffisante pour laisser passer la lumière résiduelle, ainsi qu'en présence d'un environnement lumineux et d'un support de montage judicieux, les modules solaires bifaciaux font valoir tous leurs atouts en tant que système. Toutefois, cela n'est possible que dans la mesure où les pertes due au « mismatch » (écart) entre les deux faces (avant/arrière) et à l'état d'encrassement des modules sont réduites au minimum. Lors de la planification, une attention particulière doit être portée au câblage, à l'albédo de l'arrière-plan, aux zones d'ombre potentielles et au choix d'un système de fixation approprié. Mais dans le cas de modules bifaciaux, il importe également de tenir compte des effets sur le bâtiment lui-même. Cela est particulièrement vrai lorsque les cellules bifaciales en silicium sont intégrées dans des fenêtres ou des modules posés comme garde-corps de balcon. Les ombres projetées par les cellules de silicium agissent comme une protection solaire et modifient ainsi la valeur G de la façade et des fenêtres. De la conception minutieuse des modules bifaciaux dépend le confort de l'utilisateur final et le fonctionnement optimal du bâtiment.

Divers comités techniques internationaux élaborent actuellement un ensemble de normes et de procédures d'essai visant à uniformiser les spécifications ainsi qu'à améliorer la comparabilité et la qualité des produits.

Selon l'« International Roadmap of Photovoltaic (ITRPV) », la part de marché de la technologie bifaciale devrait passer de moins de 5 % en 2017 à environ 40 % en 2028 et devrait donc faire l'objet d'une attention particulière de la part du secteur photovoltaïque et des installateurs.

6 Notice

Utilisation des modules solaires bifaciaux – possibilités d'application sur les bâtiments et dimensionnement des composants des installations

L'efficacité des modules solaires photovoltaïques (modules PV) s'est considérablement accrue au cours de ces dix dernières années. La multiplication constante des installations photovoltaïques dans le monde s'est accompagnée d'énormes réductions de prix au cours de la même période. L'augmentation de la puissance à coût égal est un concept mis en œuvre par l'industrie dans le but d'améliorer le rendement des modules solaires. L'amélioration de la pureté des matériaux, l'élaboration de nouveaux concepts pour une détection optimale du courant photogénéré et l'optimisation de la disposition des modules sont quelques-unes des méthodes mises en œuvre par l'industrie pour porter la performance des modules standard de 60 cellules de 200 à 300 watts au fil des ans. Des modules solaires bifaciaux ont été lancés récemment : cette technologie fait appel à des cellules solaires et des dispositions de modules aptes à capter la lumière sur les deux faces et à convertir plus efficacement les rayons du soleil en courant électrique. Grâce à l'optimisation de leur positionnement et de leur orientation ainsi qu'à la réduction maximale de l'ombrage, les modules photovoltaïques bifaciaux sont capables de générer entre 5 % et 30 % d'énergie de plus que les modules photovoltaïques monofaciaux classiques.

En règle générale, un module bifacial peut être décrit comme un module standard muni d'une « source lumineuse » supplémentaire sur la face arrière, laquelle augmente la quantité du courant généré par les photons. Cela montre clairement que les faces avant et arrière du module ne sont pas des composants séparés électriquement et travaillant en parallèle, mais qu'il s'agit en fait de deux vues différentes d'un même objet, avec une plus grande efficacité rendue possible grâce à une absorption lumineuse accrue.

La puissance bifaciale et les normes CEI

La norme CEI 60904-1-2 pour la définition des méthodes de mesure de la puissance électrique des modules bifaciaux vient compléter la norme IEC 60904-1 pour la mesure des modules PV monofaciaux. Cette norme a été publiée en janvier 2019.

Elle constitue une référence commune pour la définition des propriétés intrinsèques des modules bifaciaux : en termes plus précis, elle définit la puissance maximum (P_{max}) pour différents niveaux de rayonnement solaire sur la face arrière en utilisant les facteurs dits de « bifacialité », lesquels permettent de calculer les valeurs des faces avant et arrière dans les conditions STC.

φ_{Isc} est le facteur de bifacialité du courant de court-circuit, $\varphi_{P_{max}}$ est le facteur de bifacialité du point de puissance maximum et φ_{Voc} est le facteur de bifacialité de la tension en circuit ouvert : tous ces facteurs sont tous exprimés en pour cent et traduisent le rapport entre les valeurs mesurées sur la face avant et la face arrière pour un rayonnement de 1000 W/m^2 , une température de 25 °C et un spectre solaire AM de 1,5.

La norme stipule que la valeur P_{\max} du module sur la face avant doit être mesurée à des valeurs d'éclairement énergétique équivalentes à 1000 W/m^2 sur la face avant et à des valeurs différentes sur la face arrière.

Les facteurs de bifacialité servent à calculer un rayonnement solaire équivalent sur la face avant pour ensuite déterminer la puissance maximale avec différents niveaux de luminosité équivalents sur la face arrière : au moins trois niveaux de rayonnement solaire différents doivent être calculés en utilisant le plus petit des deux facteurs de bifacialité φ_{Isc} et $\varphi_{P_{\max}}$.

À l'issue de ce processus, au moins deux valeurs P_{\max} spécifiques doivent être consignées dans le rapport d'essai.

Critères de sélection des produits pour les modules solaires bifaciaux

Puissance électrique

À ce jour, la spécification de la puissance électrique STC des modules solaires bifaciaux n'est toujours pas normative. C'est pourquoi les spécifications du fabricant concernant ces produits ne sont pas uniformes. La plupart des fabricants indiquent la puissance STC du module avec diverses autres puissances de rayonnement (par exemple 5 %, 10 %, 20 % et/ou 30 % de puissance de rayonnement dans les conditions STC) sur la face arrière du module. Pour de nombreux produits, la puissance STC de la face arrière ou le facteur de bifacialité sont mentionnés en sus. C'est pourquoi il est absolument recommandé d'y prêter attention lorsqu'on compare différents produits.

Facteur de bifacialité

Le facteur de bifacialité est un critère de qualité. Plus ce facteur est faible, plus les gains énergétiques supplémentaires potentiels de la face arrière sont faibles. En règle générale, la puissance nominale de la face arrière représente 60 à 90 % de celle de la face avant. Cela signifie que la production énergétique supplémentaire de la face arrière peut varier considérablement d'un fabricant à l'autre. Dans la plupart des cas, le facteur de bifacialité ne figure pas sur les fiches techniques du fabricant. Il est donc conseillé de demander cette valeur au fournisseur ou de la calculer soi-même à l'aide des informations fournies par le fabricant sur la production supplémentaire exprimée en pour cent.

Boîtes de jonction et câbles solaires

Les boîtes de jonction électriques des modules solaires bifaciaux doivent être situées à proximité des cellules en silicium et ne doivent pas leur porter ombrage. Les câbles solaires doivent sortir par la face latérale des boîtes de jonction afin qu'ils puissent être fixés au plus près du bord du module lors du montage. Les modules solaires bifaciaux munis de boîtes de jonction conventionnelles sur la face arrière active – comme cela était le cas avec la première génération de produits de certains fabricants – sont à bannir.

Cadre du module

Certains fabricants proposent des modules solaires bifaciaux munis d'un cadre conventionnel. La hauteur du cadre est comprise entre 35 et 40 mm et entraîne dans la plupart des applications des pertes de puissance sur la face arrière du module. Le choix de modules solaires bifaciaux sans cadre est recommandé. La prudence est toutefois de mise lors du transport et de la manipulation de ces produits, car l'élément pourrait se briser immédiatement et intégralement en cas de choc impactant les bords du verre. Pour la fixation des modules solaires sans cadre, il convient d'utiliser des dispositifs de serrage les plus plats possibles, faute de quoi la surface du module serait ombragée, ce qui entraînerait également des pertes de production.

Champs d'utilisation et application

Grâce à la production supplémentaire de la face arrière du module, les modules solaires bifaciaux peuvent atteindre des rendements de plus de 24 %. La valeur du gain supplémentaire dans la pratique dépend du type d'application. Une disposition de modules ouverte sur l'horizon conjuguée à un arrière-plan clair avec un facteur de réflexion élevé – également appelé « albédo » – ont un effet positif sur la production d'énergie. A contrario, l'ombrage rapproché peut réduire les rendements, qui peuvent être causés par les composants de la structure de montage ou les câbles solaires.

Le champ d'utilisation des modules solaires bifaciaux est vaste et varié :

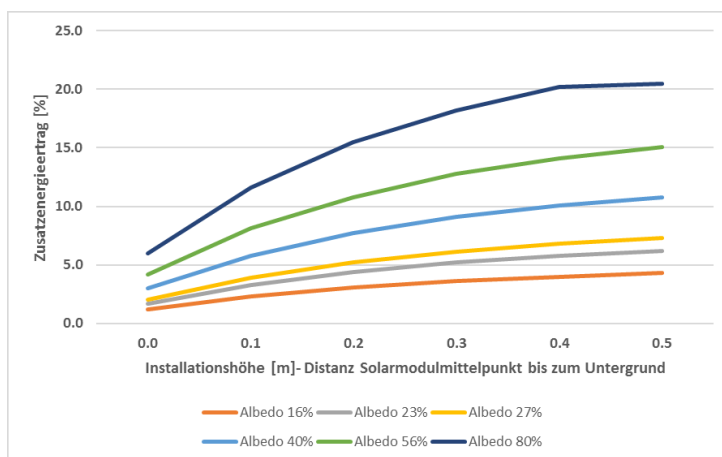
- supports de montage des modules sur toitures plates ;
- installations extérieures montées à la verticale ;
- garde-corps de terrasse et de balcon ;
- murs antibruit ;
- auvents en verre sur les terrasses et comme abri pour véhicules ;
- structure de façades en verre.



Source : CREnergie Sàrl, Winfried Becker, Photon photos (de g. à d.)

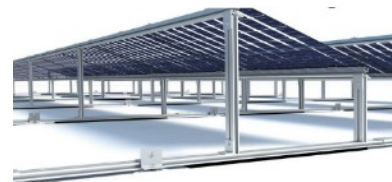
Maximisation du rendement des modules bifaciaux

Sur les toits plats, les modules solaires doivent être fixés le plus loin possible du sol, l'espacement entre les rangées de modules doit être suffisamment grand et l'arrière-plan doit être aussi clair que possible et afficher un albédo élevé (p. ex. sol en gravier blanc). D'autres facteurs propices sont : un angle d'incidence optimal des modules, légèrement supérieur à celui des modules solaires conventionnels, et l'utilisation de modules solaires semi-transparents, où le rayonnement direct augmente au maximum le rayonnement diffus à l'arrière des modules grâce à un écartement approprié des cellules de silicium.



Systemes de montage

Des systèmes de montage spéciaux pour modules solaires bifaciaux sont déjà disponibles sur le marché. Les modules solaires sont positionnés et fixés linéairement sur les côtés longs des modules. La face arrière des modules solaires est exempte dans une large mesure de composants générateurs d'ombres de proximité.



Dimensionnement des composants électriques

Lors du dimensionnement des installations bifaciales, la puissance supplémentaire de la face arrière du module doit être prise en compte lors du choix de tous les composants électriques tels que les onduleurs, les câbles solaires et les fusibles. Dans un premier temps, le facteur de réflexion de l'arrière-plan/du sol est défini. Dans un second temps, il est recommandé de calculer la production énergétique à l'aide d'un logiciel de simulation professionnel. Lors du dimensionnement des composants électriques, une plage de tolérance suffisante doit être prise en compte. La réflexion de la neige en particulier permet d'obtenir une production supplémentaire importante avec, à la clé, une hausse sensible de la part de l'électricité hivernale.

Nature de la surface	Facteur de réflexion (albédo)
Plan d'eau	de 5 à 22 %
Sol herbeux	de 20 à 30 %
Asphalte	de 10 à 15 %
Béton	20 %
Sol de gravier clair	30 %
Membrane de toit gris clair	60 %
Béton peint en blanc	de 60 à 80 %
Neige fraîche	de 80 à 90 %

Subventionnement des installations solaires bifaciales

Lors de la demande de contribution unique à l'investissement de Pronovo dans le cadre de la rétribution unique des installations photovoltaïques, la puissance nominale dans les conditions STC doit être indiquée sur la face avant des modules solaires bifaciaux. La puissance supplémentaire de la face arrière des modules solaires bifaciaux n'est pas prise en compte, car il n'existe pas encore de définition normative pour leur détermination. En d'autres termes, la puissance supposée de la face arrière est de 0 watt, comme s'il s'agissait d'un module solaire classique.

7 Liste des illustrations

Illustration 1 : modules bifacial SkySlate de 3S Solar Plus à 60 cellules monocristallines, sans châssis, verre/verre (photo : 3S Solar Plus).....	5
Illustration 2 : Concept bifacial développé par Mori (à gauche) et concept Back-Surface-Field avec jonction p-n simple (à droite). Les jonctions p-n sont surlignées en bleu.	6
Illustration 3 : Station spatiale Saliout 3 (à gauche) avec modules solaires bifaciaux ; installation photovoltaïque de la station spatiale internationale ISS (à droite) Source : NASA.	6
Illustration 4 : Installation PV bifaciale d'une puissance de 6 kW, Zurich, avant (à gauche) et après (à droite) la mise à niveau de 2005 (photo : TNC).....	7
Illustration 5 : PERC classique vs PERC bifacial (source : Solarworld)	8
Illustration 6 : Cellule BSF standard (à gauche) vs cellule HJT bifaciale (à droite) (photo : EPRI).....	8
Illustration 7 : Technologie de connexion SmartWire (à gauche ; source : Meyerburger) et cinq barres-bus (à droite ; source : Aiko Solar)	9
Illustration 8 : Demi-cellules – une solution pour accroître l'efficacité (source : PVmanmanufacturing.org, Canadian Solar).....	9
Illustration 9 : Boîtes de jonction pour modules solaires bifaciaux (photo : Stäubli, TE Connectivity)	10
Illustration 10 : Caractéristiques électriques d'un module bifacial extraites de la fiche technique du fabricant, exemple 1.....	13
Illustration 11 : Caractéristiques électriques d'un module bifacial extraites de la fiche technique du fabricant, exemple 2.....	13
Illustration 12 : Caractéristiques électriques d'un module bifacial extraites de la fiche technique d'un fabricant, exemple 3.....	13
Illustration 13 : Caractéristiques électriques d'un module bifacial extraites de la fiche technique du fabricant, exemple 4.....	14
Illustration 14 : De nombreuses applications se prêtent à l'utilisation de modules solaires bifaciaux ; en haut (de g. à d.) : garde-corps d'une terrasse solaire d'une puissance de 3 kWp sur un immeuble d'habitation à Oerlikon (ZH) ; installation en toiture d'une puissance de 101 kWp à Steffisburg (BE), 3S Solar Plus ;	16
Illustration 15 : Courbe de performance d'un module solaire monofacial orienté sud (ligne bleue) comparée à celle d'un module solaire bifacial orienté sud (ligne rouge) et à celle un module solaire bifacial orienté est-ouest (ligne grise), où les pics de production se produisent le matin et l'après-midi ^[1]	17
Illustration 16 : Production d'énergie supplémentaire des modules photovoltaïques bifaciaux avec facteur de bifacialité = 65 %, orientés vers le sud avec un angle d'incidence de 30° et un écartement de 2,5 m entre les rangées de modules, à différentes distances du sol et pour différentes valeurs d'albédo ^[3]	19

Illustration 17 : Modules solaires bifaciaux avec système de montage inadapté. L'ombrage généré par les profils porteurs diminue la production énergétique de la face arrière du module ; source : Renewable Energy World.....	20
Illustration 18 : Système de montage bifacial Opsun Systems. Support linéaire pour un rayonnement diffus sans obstacle sur la face arrière du module.	20
Illustration 19 : Une fixation appropriée des modules solaires bifaciaux permet d'obtenir un potentiel de production maximal.	20
Illustration 20 : Informations du fabricant sur le rayon de courbure minimal des câbles solaires	21
Illustration 21 : Spécifications électriques SkySlate Bifacial, 3S Solar Plus : la hausse de la puissance des modules solaires bifaciaux est générée par l'augmentation du courant. La tension électrique, en revanche, reste constante dans les conditions STC.....	23
Illustration 22 : Production avec les modules « 3S SkySlate® Bifacial », 3S Solar Plus.....	27
Illustration 23 : Production d'énergie mensuelle de l'installation photovoltaïque bifaciale d'une puissance de 154,3 kWp sur un toit plat blanc à Kingsten, dans l'État de New-York (États-Unis).	30
Illustration 24 : Production d'énergie mensuelle de l'installation photovoltaïque bifaciale d'une puissance de 69,0 kWp. Production mensuelle simulée (gris), production mensuelle mesurée (jaune) et production mensuelle après correction climatique (bleu).	33
Illustration 25 : Production d'énergie mensuelle de l'installation solaire d'une puissance de 9,72 kWp (12,35 kWp y c. puissance nominale bifaciale dans les conditions STC). La production annuelle au cours de la première année d'exploitation est remarquable : 17 800 kWh sur le site de Tucson, en Arizona.	36
Illustration 26 : Simulation production PVsyst de la face avant du module.....	39
Illustration 27 : Article « Eine Insel mit 2 Bergen » (Une île avec deux montagnes), Photon, juin 2017, Anne Kreutzmann.....	42
Illustration 28 ; source : conférence « Bifaciale Module in innovativem System-Design für Aufdachanlagen » (« conception de systèmes innovants avec modules bifaciaux pour les installations en toiture ») par Miloni Solar, juin 2018	45