

Aperçu des technologies photovoltaïques

L'histoire du photovoltaïque a commencé il y a environ 60 ans avec des cellules solaires en silicium cristallin. Aujourd'hui encore, cette technologie possède la plus grande part de marché. Entre-temps, beaucoup d'autres technologies photovoltaïques ont été développées. Nous vous présentons celles qui comptent aujourd'hui pour la production électrique et comparons leurs caractéristiques, leurs avantages et leurs inconvénients. Texte: Dr. Stephan Buecheler

Le terme photovoltaïque désigne la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique. La lumière du soleil est captée par un matériau (un semi-conducteur le plus souvent) et dépose son énergie sous l'effet de l'excitation des paires de porteurs de charge libres. Celles-ci sont divisées en charges positives et négatives par un champ électrique dans une cellule solaire et amenées par deux électrodes (contact avant et arrière) à un récepteur.

Parmi les technologies pertinentes pour la production électrique aujourd'hui, on distingue en gros les cellules solaires en silicium cristallin et celles en couches minces. Dans l'application pratique, plusieurs de ces cellules sont connectées pour former des modules solaires. Le volume de marché des différentes technologies en couches minces a augmenté de plus de 100 % ces dernières années, le marché est cependant toujours dominé (86 %) par les modules en silicium cristallin.

Modules solaires en silicium cristallin

Après l'oxygène, le silicium est l'élément le plus répandu sur terre. Dans la nature, on le trouve principalement sous forme de dioxyde de silicium (SiO₂) à l'état de sable de quartz ou de cristal de quartz. Le SiO₂ est transformé en silicium polycristallin (poly-Si) ultra-pur au cours d'un processus qui compte plusieurs étapes et consomme beaucoup d'énergie. Coulé en blocs, il sert de matériau de base pour les cellules solaires en poly-Si. Une opération supplémentaire permet de tirer du silicium monocristallin (mono-Si) à partir de poly-Si fondu. Les blocs de poly-Si ou mono-Si obtenus sont découpés en tranches (« wafer ») d'env. 0,2 mm d'épaisseur et transformés en cellules solaires à l'issue d'un processus en plusieurs étapes. Pour produire des modules solaires, les cellules sont d'abord regroupées en fonction de la puissance, interconnectées en séries par des pistes conductrices pour former des chaînes, laminées entre du verre et des films plastiques (Tedlar ou polyester) puis pourvues de contacts électriques. Les modules solaires en silicium mono ou polycristallin qui ont déjà fait leurs preuves depuis longtemps dominent le marché. Leurs avantages sont les rendements élevés et la bonne disponibilité du matériau de base.

Modules solaires en couches minces

Pendant longtemps, le terme de « module solaire en couches minces » était synonyme de silicium amorphe (a-Si). Contrairement au silicium cristallin, les atomes du matériau amorphe ne sont pas ordonnés, ce qui lui confère d'autres caractéristiques physiques. La plage du spectre solaire qui peut être



Différentes technologies photovoltaïques existent sur le marché.

transformée en énergie électrique est plus réduite. Cette plage peut être décalée par l'ajout d'autres éléments chimiques dans les couches a-Si (dopage au germanium, par ex.). On peut aussi obtenir ce résultat par un ordonnancement partiel des atomes de la couche de silicium amorphe en nanocristaux (nc-Si). Si l'on empile deux (tandem) ou trois (triple) cellules solaires (a-Si et/ou nc-Si), on augmente la partie du spectre solaire transformée. Entre-temps, d'autres technologies en couches minces, comme le CdTe (avec du tellure de cadmium comme semi-conducteur composé) ou le CIGS (avec du diséléniure de cuivre-indium-gallium).

(Cu(In,Ga)Se₂) comme semi-conducteurs composés se sont établis sur le marché. L'une des raisons principales de leur part de marché relativement faible est que les procédés de fabrication sont en grande partie secrets.

Le tellure de cadmium est, contrairement au métal lourd qu'est le cadmium élémentaire, un composé chimique stable et non toxique pour l'homme. Le processus de fabrication des modules solaires en couches minces est fondamentalement différent de celui des modules solaires en silicium cristallin. Certes, les cellules solaires sont aussi constituées de contacts électriques et d'un absorbeur dans lequel – en lien avec d'autres couches – s'effectue la séparation des porteurs de charge, mais ces empilements de couches sont directement réalisés sur un support. L'épaisseur des empilements est généralement inférieure à 5 µm, sachant que la couche qui absorbe la lumière n'occupe que 1 à 3 µm, soit environ 100 fois moins que sur les cellules solaires en silicium cristallin. Par conséquent, il faut nettement moins de matériau et d'énergie pour la fabrication.

Le support peut être du verre ou des films métalliques ou plastiques selon la technologie. Si

l'on utilise des supports flexibles, il est possible d'employer des procédés rouleau à rouleau rapides pour fabriquer les couches. Dans la technologie en couches minces, les cellules solaires peuvent aussi être interconnectées par des pistes conductrices pour former des modules après avoir été regroupées selon la puissance, comme pour les cellules en silicium cristallin.

Les cellules solaires sont cependant nettement plus souvent interconnectées en séries pour former des modules par une structuration adaptée dès la fabrication. Cette méthode s'appelle aussi l'interconnexion monolithique reconnaissable aux minces bandes parallèles sur les modules solaires.

Sur le marché, on trouve presque uniquement des modules laminés bi-verre sans cadre. Les contacts électriques sont réalisés au verso, vers l'extérieur. Les modules solaires flexibles sont encore un produit de niche. Ils promettent néanmoins de nombreux avantages : les produits flexibles et légers offrent des possibilités d'applications supplémentaires, comme l'installation sur des surfaces courbes ou des bâtiments qui ne peuvent supporter de charges supplémentaires. D'autres technologies à fort potentiel qui ne sont pas encore mesurables sur le marché du photovoltaïque, mais qui présentent un grand potentiel, sont les cellules à pigment photosensible (aussi appelées cellules Grätzel), les cellules solaires organiques, les collecteurs hybrides et les cellules ultra-efficaces associées à un système optique qui centralise la lumière du soleil sur les cellules.

Réduire l'énergie grise du système complet

La croissance annuelle du marché mondial du photovoltaïque a toujours dépassé de loin les 10 % ces dernières années. Les prix ont été divisés par deux en un peu moins de 5 ans. Ainsi, dans beaucoup d'endroits, la production d'électricité permet déjà de couvrir les coûts, voire d'être rentable. Il est bien sûr important de veiller à une production d'électricité rentable à un prix au kW le plus bas possible et donc au prix de l'énergie produite. Pour une production d'électricité durable, le temps de retour énergétique du système doit cependant être encore minimisé.

L'intégration au bâtiment constitue une solution. Lorsque la conception du produit et la technologie choisie le permettent, les modules solaires peuvent assurer une fonction supplémentaire de l'enveloppe du bâtiment et réduire l'énergie grise de l'ensemble du système. Source : TEC 21. ■

L'auteur: Stephan Buecheler, physicien, directeur de la recherche sur le CIGS et le CdTe au département Films minces et photovoltaïque de l'EMPA à Dübendorf.

Modules solaires en silicium cristallin		
	Solarmodule aus monokristallinem Silizium	Modules solaires en silicium polycristallin
Taux de rendement (rapport entre la puissance générée et la puissance du rayonnement)	Modules disponibles sur le marché : 14-16 % ; avec concepts alternatifs : plus de 20 %. En laboratoire, une structure un peu plus complexe a permis d'obtenir un taux de rendement des cellules de 25 %.	Modules disponibles sur le marché : 13-15 % ; des taux plus élevés à l'avenir sont prévisibles. En laboratoire, on a montré un taux de rendement des cellules solaires de 20,4 % et un taux de rendement des modules solaires de 18,4 %.
Couleur	Bleu foncé à gris foncé avec interstices blancs ou noirs ; le plus souvent, les modules sont renforcés mécaniquement par un cadre d'aluminium.	Différents tons de bleu dus aux différentes orientations des cristaux de silicium ; le plus souvent, les modules sont renforcés mécaniquement par un cadre d'aluminium.
Temps de retour énergétique pour un site d'installation en Europe du sud avec un rendement annuel de 1700 kWh/kWc ⁵ (Durée pendant laquelle les modules solaires doivent être exploités afin de fournir l'énergie nécessaire à la production et à la déconstruction)	1,7 an	1,7 an
Part de marché en 2011 (modules fournis)	37,7 % (croissance de 36 % par rapport à l'année précédente)	48 % (croissance de 36 % par rapport à l'année précédente)
Disponibilité des matériaux de base	Aucun problème, mais énergivore	Aucun problème, mais énergivore
Conclusion	Technologie éprouvée, taux de rendement élevé, nécessite beaucoup d'énergie pour la fabrication	Technologie éprouvée, nécessite beaucoup d'énergie pour la fabrication



Modules solaires en silicium monocristallin



Modules solaires en silicium polycristallin

Modules solaires en couches minces		
Modules solaires en couches minces en silicium (a-Si / nc-Si)	Modules solaires en tellure de cadmium (CdTe)	Modules solaires CIGS en diséléniure de cuivre-indium-gallium (Cu(In,Ga)Se ₂)
Modules en silicium amorphe (a-Si) disponibles sur le marché : 4-7 % ; modules solaires tandem ou triple jonction disponibles sur le marché (en cellules a-Si et/ou à nanocristaux [nc-Si-]) : jusqu'à 10 %. En laboratoire, on a obtenu avec la technologie a-Si/nc-Si un taux de rendement des modules de 11,7 % et un taux de rendement des cellules de 12,3 %.	Modules disponibles sur le marché : 11-12 %. Le potentiel de cette technologie est pourtant bien supérieur. En laboratoire, on a atteint 15,3 % pour un module et 17,3 % pour une cellule.	Modules disponibles sur le marché : 12-14 %. Elle présente le potentiel le plus élevé de toutes les technologies à couches minces pour des taux de rendement élevés. En laboratoire, on a réalisé des cellules solaires à 20,3 % et des modules solaires à 15,7 %.
Rouge foncé à gris foncé (modules solaires avec une seule couche a-Si) Bleu foncé à gris foncé (modules tandem ou triple jonction)	Gris foncé à noir	Gris foncé à noir
1,0 an	0,8 an On s'attend à ce que le temps de retour énergétique puisse encore baisser considérablement par la diminution des températures de processus, l'accélération de la croissance de la couche et l'utilisation de films métalliques ou plastiques plutôt que du verre comme support.	1,3 an On s'attend à ce que le temps de retour énergétique puisse encore baisser considérablement par la diminution des températures de processus, l'accélération de la croissance de la couche et l'utilisation de films métalliques ou plastiques plutôt que du verre comme support.
2,7 % (croissance de 5 % par rapport à l'année précédente)	8,2 % (croissance de 37 % par rapport à l'année précédente)	2,9 % (croissance de 129 % par rapport à l'année précédente)
Aucun problème	Le tellure est souvent qualifié d'élément rare. Les matières premières autorisent toutefois une croissance considérable du marché. D'après des estimations conservatrices, on pourra par exemple atteindre d'ici 2020 une capacité de production annuelle de 14 GWc (60 % du volume photovoltaïque total en 2011), voire 38 GWc dans un scénario optimiste.	L'indium et le gallium sont des éléments rares qui constituent un composant important. C'est l'indium qui risque d'être plus limitant, car il sert aussi dans les écrans plats. Les matières premières autorisent toutefois une croissance considérable du marché. Il existe des estimations conservatrices et optimistes en matière de production annuelle qui prédisent 13 GWc ou 22 GWc respectivement pour 2020.
Prix le plus bas, bon comportement thermique et en cas de faible luminosité, temps de retour énergétique court, modules solaires flexibles possibles	Faibles coûts de production, bon comportement thermique, temps de retour énergétique très court, couleur sombre homogène, modules solaires flexibles possibles, matériaux de base disponibles en quantité limitée	Taux de rendement élevé, faible temps de retour énergétique, couleur sombre homogène, bon comportement thermique, modules solaires flexibles possibles, matériaux de base disponibles en quantité limitée



Modules solaires en couches minces en silicium (a-Si/nc-Si)
Objet: Lotissement Sihlweid, Zurich Leimbach



Modules solaires en tellure de cadmium (CdTe)



Modules solaires CIGS en diséléniure de cuivre-indium-gallium (Cu(In,Ga)Se₂)