

6. Types de cellules Photovoltaïques

Thomas Zimmer, Université de Bordeaux, France

Résumé

Objectifs	2
Introduction.....	2
Matériaux solides cristallisés.....	3
Silicium Monocristallin	3
Silicium polycristallin	4
Du disque cristallin à la cellule solaire.....	5
Matériaux amorphes et films minces.....	6
Cellules de film mince de CdTe.....	6
Cellules de film mince de CIGS	7
Cellules de silicium amorphes	8
Discussion	9
Production	9
Efficacité de conversion des cellules solaires.....	10
Technologies naissantes.....	10
Références.....	11

Objectifs

À l'issue de ce chapitre, le lecteur sera capable :

- D'avoir une idée précise de l'évolution de la production photovoltaïque globale
- De connaître la différence entre une cellule solaire de silicium mono- et polycristallin
- De comprendre le concept des matériaux amorphes et de film mince
- D'identifier la structure des cellules de film mince de CdTe et de CISG aussi bien que des cellules de Silicium amorphes
- De connaître les principales technologies photovoltaïques
- D'appréhender les technologies photovoltaïques émergentes

Introduction

La capacité photovoltaïque solaire mondiale atteindra 320 à 430GW d'ici fin 2018. La Fig. 1 affiche un scénario cumulatif global du marché des panneaux PV [1]. Le scénario minimal (« Low scenario ») suppose que les marchés dans les pays d'émergents ne décolleront pas, alors que le scénario optimiste (« High scenario ») assume un marché vigoureux des PV dans les régions émergentes [2].

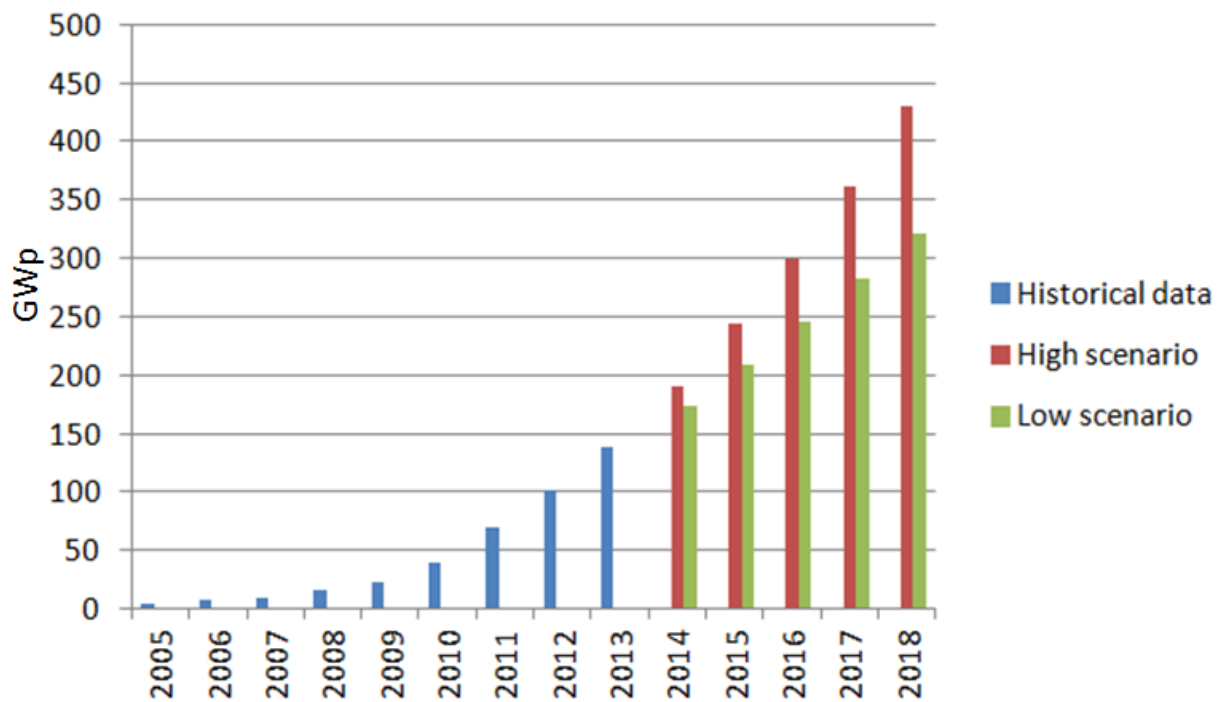


Fig. 1 scénario cumulatif Global de PV jusqu'en 2018, données de [1]

Pour la production des panneaux solaires, nous pouvons distinguer deux technologies majeures :

- Matériaux solides cristallisés
- Matériaux amorphes en film mince

La première catégorie (matériaux solides cristallisés) représente environ 90% de la part de marché, les matériaux amorphes et en film mince couvrent 10%, mais avec une tendance à la hausse.

Il y existe également des technologies émergentes comme :

- Cellules solaires photoélectrochimiques de Grätzel
- Cellules solaires organiques

Ces formes émergentes de cellules PV ne sont pas encore mûres pour la production en masse et l'installation de centrales de grande puissance ; mais leurs propriétés prometteuses en font des candidats sérieux pour le marché photovoltaïque dans les années à venir.

Matériaux solides cristallisés

Silicium Monocristallin

La cellule solaire de silicium monocristallin est constituée d'un grand monocristal de silicium pur. Ce monocristal est le plus souvent fabriqué suivant la méthode de Czochralski. Cette méthode consiste d'abord en la fonte de silicium semi-conducteur de grande pureté (ayant seulement quelques ppm d'impuretés) dans un creuset à 1425 degrés Celsius. Pendant ce procédé de fonte, des atomes d'impuretés agissant comme dopants tels que le bore (pour le semi-conducteur de type p) ou le phosphore (pour le semi-conducteur de type n) sont ajoutés au silicium fondu pour doper le silicium ; pour des cellules PV le dopant préféré est le bore. La deuxième étape consiste en une solidification dirigée à partir d'un germe monocristallin de petite taille. On part du matériau (Si) fondu à une température juste au-dessus du point de fusion, avec un gradient de température contrôlé. Le germe est suspendu au-dessus du liquide et est tenu par une tige. Le liquide se solidifie sur le germe en gardant la même organisation cristalline au fur et à mesure que l'on tire le germe vers le haut tout en le faisant tourner¹. Les gradients de température, la vitesse d'extraction et la vitesse de rotation doivent être contrôlés avec précision. Le résultat est ainsi un monocristal, cylindrique de grande taille. Le procédé de fonte a besoin à la fois d'une atmosphère inerte (par exemple l'argon) et d'une chambre inerte (par exemple quartz). Les inconvénients du procédé de fonte classique sont la basse vitesse de production et les coûts de production car ce procédé est un grand consommateur d'énergie. En outre le lingot doit être scié afin de produire le disque mince à partir duquel on fabrique la cellule solaire. Ce procédé est long et en outre a comme conséquence la perte de matériau précieux. Beaucoup d'efforts de R&D sont entrepris par l'industrie du PV afin d'améliorer le procédé de fabrication. L'aspect du monocristal de silicium est en grande partie noir (voir figure 2).

¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Procédé_de_Czochralski

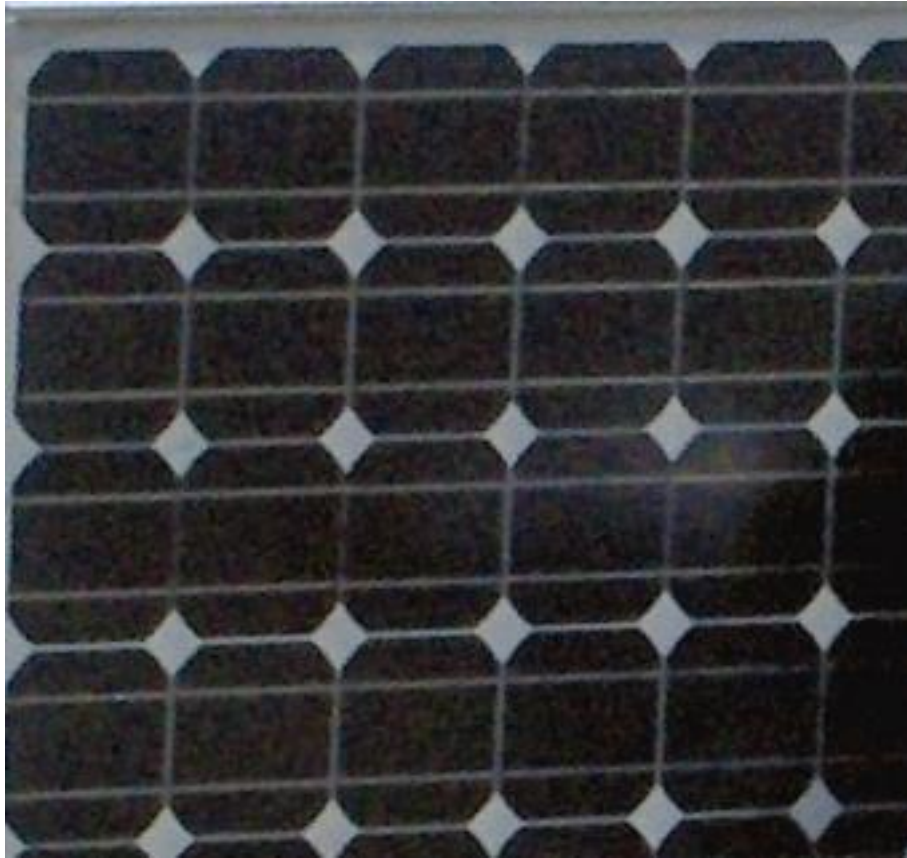


Figure 2 : Module Monocristallin de silicium

Silicium polycristallin

Le silicium polycristallin est très proche des modules monocristallins. La même théorie concernant le fonctionnement de la cellule s'applique ; la principale différence est le procédé de fabrication. Les cellules Poly-Si sont fabriquées avec du Si fondu pur dans un moule de section carrée ; le refroidissement est une étape essentielle parce qu'il détermine la grosseur du grain et la distribution des impuretés. Les lingots obtenus sont coupés en barres avec une section transversale de 15.6cm x 15.6cm ; finalement ils sont sciés pour obtenir les disques minces. Ce procédé de fabrication donne une structure cristalline multi-grain. Comparé au Si monocristallin, la structure est moins idéale ayant pour résultat une perte d'efficacité de conversion d'environ de 1% comparé à du mono-Si [3], mais cet inconvénient est surmonté par des coûts inférieurs de production. Un deuxième avantage est l'agencement des cellules qui sont rectangulaires, comparé au « pseudo-carré » du mono-Si ; ainsi ils peuvent être agencés de façon optimisée dans les modules PV. L'aspect du poly-Si est distinctement bleu (voir la figure 3) dû à l'absorption manquante des photons de plus haute énergie. En fait, ces photons de haute énergie de la partie supérieure du spectre visible sont réfléchis et ne sont pas absorbés.



Figure 3 : Module de silicium polycristallin

En conclusion, il n'y a qu'une différence mineure entre les cellules poly-Si et celles mono-Si en termes de performance, d'efficacité de conversion et de coûts ; en outre, d'autres caractéristiques sont également souvent à retenir comme la durée de vie et la garantie. Finalement, les facteurs tels que la disponibilité et la réputation du constructeur peuvent jouer un rôle tout aussi important.

Du disque cristallin à la cellule solaire

Après la fabrication d'un disque cristallin de type p, les étapes suivantes sont nécessaires afin d'obtenir un module PV fonctionnel [4] :

- Préparation de la surface pour la nettoyer des défauts venant du procédé de découpage
- Gravure de la surface dans le but de créer de petites pyramides sur la surface pour une absorption plus élevée de photons (par conséquent, une orientation non-optimale dans l'espace de la cellule PV est ainsi moins critique)
- Diffusion du phosphore pour créer une couche mince de type N sous la surface et par conséquent créer la jonction photovoltaïque PN
- Dopage de la face postérieure avec une couche de P+
- Ajout d'un film anti-réflexion sur la surface
- Connecter le contact en métal entre la couche N et la surface
- Ajouter une électrode en aluminium sur la face arrière et le contact arrière

La figure 4 montre une vue en coupe d'une cellule solaire mono-Si.

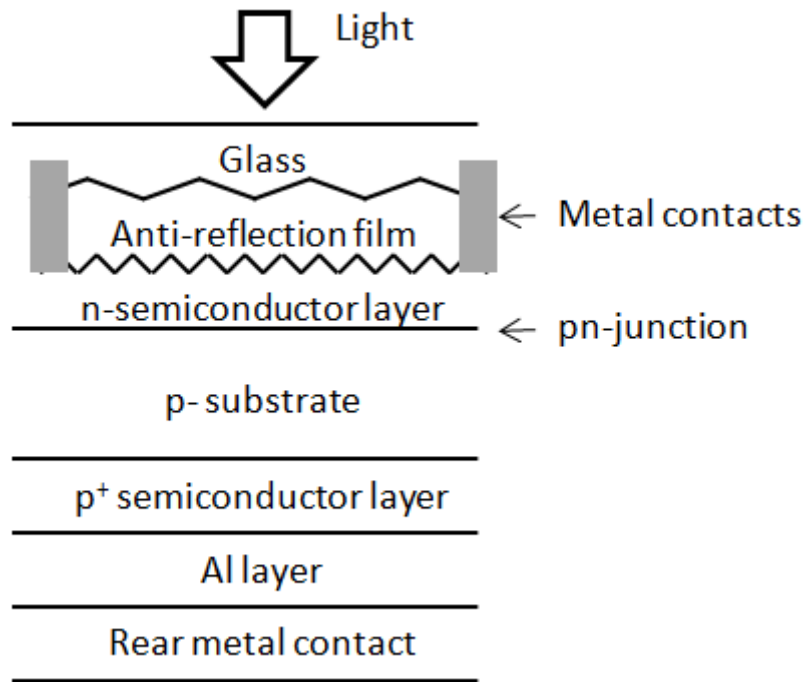


Figure 4 : Vue en coupe schématique d'une cellule solaire mono-Si

Matériaux amorphes et films minces

Les cellules solaires en film mince sont également souvent appelées cellules solaires de seconde génération [5]. Nous trouvons dans cette catégorie les cellules amorphes en Si, en CdTe et les cellules CIGS. CIGS signifie : Cuivre Indium Gallium Selenide. L'avantage énorme de ces cellules se situe dans le fait que très peu de matériau est nécessaire pour leur fabrication. Les procédés de fabrication permettent de fabriquer des relativement grandes surfaces soit sur des substrats flexibles soit sur des substrats rigides ; grâce à ces propriétés, une fabrication à bas coût pour la production de cellules PV est envisageable. En fait, les matériaux de film mince peuvent absorber très efficacement des photons (le coefficient d'absorption est jusqu'à 100 fois plus élevé comparativement au Si mono- ou polycristallin). Par conséquent, ils ont besoin seulement d'une épaisseur de quelques microns comparée à l'épaisseur d'environ 200µm exigée pour les cellules Si mono- ou le polycristallin.

Cellules de film mince de CdTe

Les cellules de film mince de CdTe se sont développées très rapidement ces dernières années. Les raisons sont les suivantes : (1) les procédés de fabrication sont au point, (2) leur compétitivité en termes de coût, et (3) leur efficacité de conversion élevée. Pour l'instant, les cellules de film mince de CdTe dominent l'industrie PV du film mince. Les modules PV films minces commerciaux atteignent une efficacité de conversion jusqu'à 12,6% [5]. Le CdTe possède un intervalle de bande direct de 1.45eV et répond bien au spectre d'émission solaire.

Des techniques de fabrication à bas coûts ont été développées afin de réaliser ces modules. Les étapes principales de fabrication sont récapitulées (voir également la figure 5) ci-dessous : Une surface en verre est couverte d'un film de SnO₂ dopé par du fluor ; le rôle du film SnO₂ est double : la faible épaisseur du film optimise le contact avec le verre sans absorber trop de photons et sur la partie supérieure du film, il permet de récupérer les électrons (il agit en tant qu'électrode). Suit une couche tampon de CdS (100 nm). Ensuite la couche de CdTe active ayant une épaisseur 3 à 7µm est ajoutée en tant qu'absorbant de photons. Sur la face postérieure, une électrode de contact est ajoutée pour compléter le dispositif. La figure 5 ci-dessous montre une section transversale de cellule de film mince de CdTe.

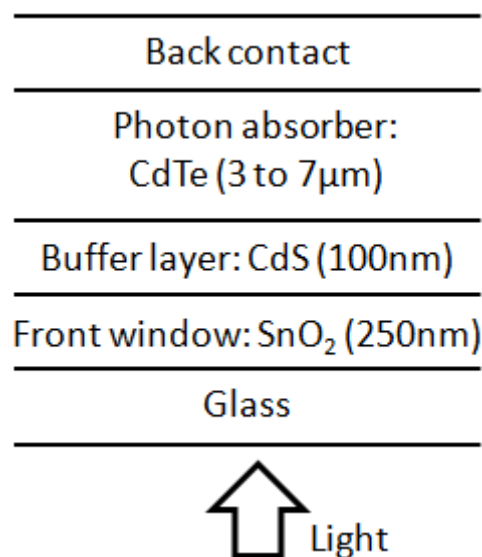


Figure 5 : Vue en coupe schématique d'une cellule de film mince de CdTe

Une efficacité de conversion élevée, un dispositif stable dans le temps et une production en chaine ont fait en sorte que le développement des cellules de film mince de CdTe s'est accéléré. Cependant, l'utilisation d'un matériau toxique (Cd) exige une attention particulière pendant la production des cellules aussi bien que pendant la phase de recyclage à la fin de leur vie. Afin de s'affranchir de ce matériau toxique, d'autres matériaux de film mince sont étudiés : Ce sont des cellules de film mince de CIGS et des Cellules en silicium amorphes.

Cellules de film mince de CIGS

Les cellules solaires en CIGS se trouvent dans la catégorie des cellules de film mince. Comparé à d'autres types de cellule de film mince, les cellules solaires de CIGS sont considérées comme très prometteuses. En fait, leur efficacité de conversion est proche de l'efficacité de conversion des cellules Si polycristallin.

La figure 6 montre la vue en coupe d'une cellule de CIGS. À partir de la face postérieure, une couche de molybdène est déposée sur un substrat en verre. La prochaine couche comprend l'absorbant de photon qui est un alliage de Cu (In, Ga) Se₂ (Di-séléniure de cuivre, d'indium

et de gallium). L'épaisseur de cette couche est d'environ $2\mu\text{m}$ et elle est fabriquée par évaporation sous ultraviolette à une température de 550°C . La substitution du In par du Ga permet le réglage de la bande d'énergie interdite (entre 1eV et 1.7eV). Ensuite une couche tampon de CdS ou ZnS de type N avec une épaisseur d'environ 50nm est ajoutée. Elle permet d'optimiser les interfaces entre l'absorbant CIGS, la couche non-dopée d'i-ZnO, et la couche supérieure de type n (ZnO Al) qui forme le contact. Ces trois couches supérieures sont transparentes afin de permettre le passage des photons vers la couche d'absorbant.

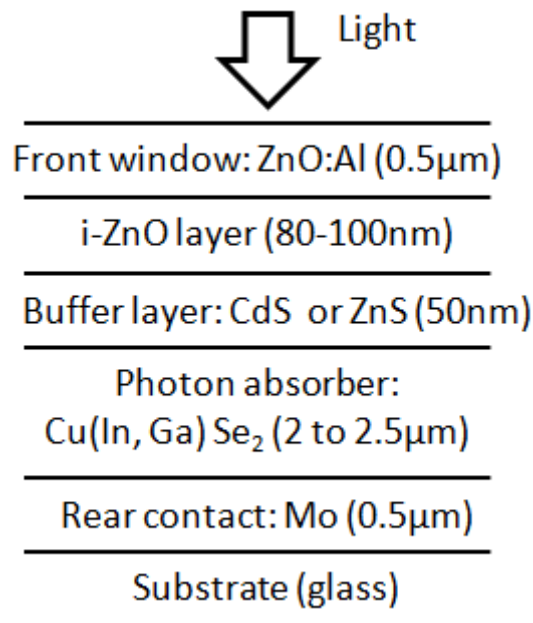


Figure 6 : Vue en coupe schématique d'une cellule de film mince de CIGS

Cellules de silicium amorphe

Le silicium amorphe (a-Si) est la forme non cristalline du silicium. Des panneaux de silicium amorphe sont fabriqués en utilisant le procédé par dépôt chimique en phase vapeur pour créer une couche mince de matériau de silicium d'environ $1\mu\text{m}$ d'épaisseur déposée sur un matériau de substrat tel que le verre ou le métal. Le principal avantage ici est la possibilité de déposer le silicium amorphe aux températures très basses. La structure de base consiste en l'empilement successif de trois couches : p-i-n. Au sein de la cellule p-i-n se trouve un champ électrique qui accélère les porteurs de charge créés par les photons absorbés ; en fait, le silicium amorphe a une mobilité très faible d'environ $1\text{ cm}^2/\text{Vs}$ [6] comparé à la mobilité de plus de $1000\text{cm}^2/\text{Vs}$ pour le silicium monocristallin. Un inconvénient majeur des films minces amorphes de silicium est la dégradation significative de leur efficacité de conversion une fois exposés au soleil (d'environ 15 à 35%). La stabilité peut être améliorée en utilisant des couches plus minces. Cependant, en faisant ainsi, l'absorption de la lumière sera réduite aussi bien que l'efficacité de conversion des cellules. Une solution consiste en l'utilisation de l'assemblage de deux, voire trois couches contenant des cellules de p-i-n empilées les unes sur les autres (Figure 7). Elles sont séparées par des jonctions minces de

tunnel (non affichées sur la figure 7). Chaque couche de cellules p-i-n possède une composition atomique particulière afin d'ajuster le domaine d'énergie.

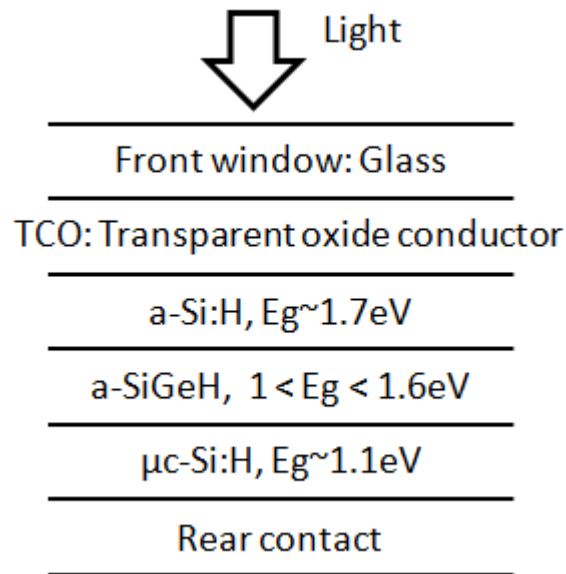


Figure 7 : Vue en coupe schématique d'une cellule amorphe de film mince de Si

Discussion

Jusqu'ici nous avons présenté les principales technologies : à savoir les cellules en Silicium de type mono- et polycristallin, en matériau amorphe et de film mince. Dans cette section, nous analyserons ces technologies en termes de production globale et discuterons de leur efficacité de conversion.

Production

En 2013, la production globale annuelle de PV était de 38.7GWp. 9% des modules PV fabriqués étaient des modules de film mince, 36 % étaient des modules de silicium monocristallin et la plus grande partie (55%) était de modules en Si polycristallin. La figure 8 montre cette distribution.

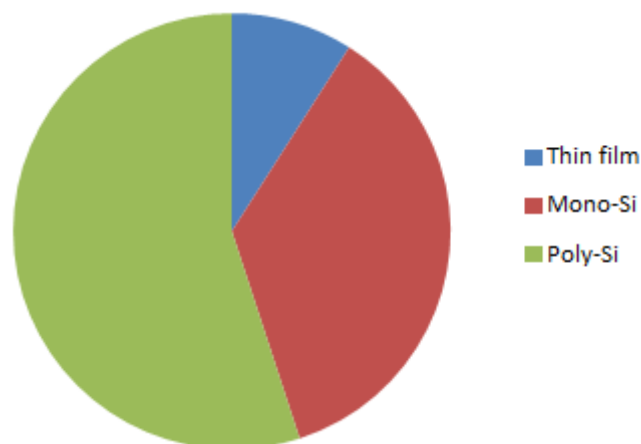


Figure 8 : Niveau de production de PV par technologie en 2013, données issues de [7]

Efficacité de conversion des cellules solaires

L'efficacité de conversion maximale des cellules solaires obtenue jusqu'en 2014 est récapitulée ci-dessous [7] :

- L'efficacité de conversion record de cellules de laboratoire est
 - 25 % pour les cellules en silicium monocristallin,
 - 20.4 % pour les cellules en silicium polycristallin,
 - 19.8 % pour les cellules solaires de film mince de CIGS,
 - 19.6 % pour les cellules solaires de film mince de CdTe.
- L'efficacité de conversion pour une cellule commerciale a augmenté au cours des 10 dernières années de :
 - 12 % à 16 % pour les modules utilisant le silicium,
 - 9 % à 13 % pour les modules utilisant le CdTe.

Technologies naissantes

Un effort de recherche énorme est entrepris afin de travailler sur de nouveaux matériaux et de nouveaux concepts pour les modules photovoltaïques. Ici nous ne mentionnerons que les cellules solaires photoélectrochimiques de Grätzel. Elles sont également appelées cellules à colorant photosensible et souvent désignées par l'acronyme dérivé de son appellation en anglais : dye-sensitized solar cell, DSSc, DSC voire DYSC) [8]. Ensuite, nous discuterons brièvement des cellules solaires organiques.

Les avantages des cellules solaires photoélectrochimiques de Grätzel peuvent être récapitulés comme suit : (i) leur coût de fabrication est faible, (ii) une production de masse est possible, (iii) la récupération de la « dette énergétique » est de moins d'un an due au peu d'énergie utilisée lors du processus de fabrication ; (iv) les matériaux utilisés sont non-toxiques et abondants (excepté le platine et le ruthénium), (v) les cellules Grätzel se comportent bien dans des conditions d'exposition au soleil variées telles qu'un angle d'incidence différent, une intensité de rayonnement réduite ou un ombrage partiel ; (vi) en conclusion, les cellules sont (ou peuvent être) légères, flexibles et semi-transparentes. Leurs défis principaux sont l'amélioration de l'efficacité de conversion, puis la stabilité et la robustesse dans le temps.

Une cellule solaire organique est composée de polymères. Sa partie intrinsèque consiste en deux couches : une couche jouant le rôle de donneur d'électrons et l'autre celle d'accepteur d'électrons. Quand un photon est absorbé, il crée une paire d'électron-trou. Contrairement au matériau Si, les porteurs de charge ainsi créés ne sont pas libres. Les électrons excités restent ainsi liés aux trous, formant un exciton. Cet exciton (paire électron-trou) peut être séparé quand il diffuse à l'interface du dispositif.

Comme déjà évoqué, la matière employée pour la production des cellules solaires organiques est le polymère, autrement dit le plastique. Le plastique utilisé présente des

coûts de production faibles et peut être fabriqué en grands volumes, ce qui représente les principaux avantages des cellules solaires organiques. En outre, le coefficient d'absorption optique par des molécules organiques est élevé, ainsi une grande quantité de lumière peut être absorbée avec peu de matériaux. Les principaux inconvénients sont une efficacité de conversion faible, une faible stabilité dans le temps comparée aux cellules photovoltaïques en Si. La R&D des technologies photovoltaïques organiques est en pleine effervescence ; les caractéristiques actuelles en termes d'efficacité de conversion sont de 12% [9] et des durées de vies en conditions extérieures de plus d'une année ont été rapportées [10]. Cependant, quelques années de R&D sont encore nécessaires avant que des modules photovoltaïques organiques puissent effectivement être lancés sur le marché.

Références

- [1] "Global Market Outlook for Photovoltaic 2014-2018", Editor: Tom Rowe, Principal authors and analysts: Gaëtan Masson (iCARES Consulting), Sinead Orlandi, Manoël Rekingier, EPIA European Photovoltaic Industry Association, http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/44_epia_gmo_report_ver_17_mr.pdf
- [2] Peter Fairley, "Topaz Turns On 9 Million Solar Panels", IEEE Spectrum, 01.15
- [3] Electricity from Sunlight: "An Introduction to Photovoltaics" (Hardcover), Paul A. Lynn, John Wiley & Sons, 2010
- [4] Anne Labouret, Michel Viloz, "Energie solaire photovoltaïque", Dunod, Paris, 2009
- [5] Rémy Mosseri, Catherine Jeandel, "L'énergie à découvert", CNRS Editions, Paris, 2013
- [6] N Wyrsh, M Goerlitzer, N Beck, J Meier, A Shah, "Transport Properties of Compensated $\mu\text{-Si: H}$ ", MRS Symp., 1996 - infoscience.epfl.ch
- [7] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, "Photovoltaics Report", 24 October 2014, <http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>
- [8] Michael Grätzel, "Photoelectrochemical cells", review article, p338, Nature, Vol. 414, 15 Nov 2001, www.nature.com
- [9] http://www.heliatek.com/newscenter/latest_news/neuer-weltrekord-fur-organische-solarzellen-heliatek-behauptet-sich-mit-12-zelleffizienz-als-technologiefuehrer/?lang=en
- [10] Suren A. Gevorgyan et al. "Interlaboratory outdoor stability studies of flexible roll-to-roll coated organic photovoltaic modules: Stability over 10,000 h", Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 116, September 2013, Pages 187–196