



Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis

Sommaire

Juin 2006

Editorial

I L'industrie photovoltaïque aux Etats-Unis

I.1 Introduction

- I.1.1 Historique
- I.1.2 Un secteur en croissance continue
- I.1.3 Les différents acteurs

I.2 Le marché des installations photovoltaïques

- I.2.1 La situation à l'échelle mondiale
- I.2.2 Les installations aux Etats-Unis

I.3 La production de cellules photovoltaïques

- I.3.1 La production mondiale
- I.3.2 La production aux Etats-Unis

II Recherche et Développement

II.1 Principe de la conversion photovoltaïque

- II.1.1 Effet photoélectrique et jonction pn
- II.1.2 Limitations

II.2 Les filières silicium cristallin

- II.2.1 Silicium cristallin
- II.2.2 Silicium multicristallin
- II.2.3 Programme 'Crystalline Silicon'

II.3 Cellules couches mince

- II.3.1 Silicium amorphe
- II.3.2 Tellurure de Cadmiun (CdTe)
- II.3.3 Les cellules CIS et CIGS

II.4 Cellules multijonctions haute performance

II.5 Cellules organiques

- II.5.1 Cellules organiques polymère(s)
- II.5.2 Cellules hybrides
- II.5.3 Cellules de Graetzel



*Système photovoltaïque (904 KW) installé par la société PowerLight sur le toit de la plate-forme logistique de FedEx à Oakland (CA).
Crédits: PowerLight*



Logos des deux principaux laboratoires nationaux responsables de la recherche sur le photovoltaïque: le «National Renewable Energy Laboratory» (NREL) et le «Sandia National Laboratory»

Conclusion

Nous avons décidé de consacrer ce nouveau numéro au thème du photovoltaïque dans un dossier qui intègre une description des politiques de soutien à ce secteur, des acteurs économiques, et des technologies employées. Le photovoltaïque utilise les procédés de l'industrie électronique, et comme cette dernière, il va profondément évoluer avec l'émergence des nanotechnologies. A travers les multiples contacts que nous développons avec la communauté scientifique américaine, nous avons ainsi constaté que ce sujet donne lieu à un développement des programmes de recherche et des projets soutenus tant par les pouvoirs publics que les entreprises privées. Dans ce domaine, la France n'est clairement pas en position de leader par comparaison au Japon, à l'Allemagne ou aux Etats-Unis. Même si les politiques énergétiques ont conduit la France vers d'autres options, il nous a cependant paru intéressant de présenter une des autres voies étudiées actuellement.

Le secteur énergétique, au niveau mondial, doit accompagner une demande croissante avec une raréfaction des ressources tout en répondant aux menaces du changement climatique induites par l'émission de gaz à effet de serre. Les changements dans les technologies utilisées, le basculement des sources conventionnelles vers les énergies renouvelables, dépendront évidemment du prix relatif du kWh produit. De nombreux scientifiques américains commencent à se montrer confiants dans la compétitivité croissante des énergies renouvelables, due à la fois à l'amélioration du rendement des nouvelles technologies et au renchérissement des énergies fossiles. Dans un paysage américain complexe, avec une administration fédérale qui temporise et retarde ses décisions stratégiques, la Californie apparaît encore une fois comme précurseur et terrain d'expérimentation. Celle-ci souhaite imposer que 20% de la production électrique proviennent des énergies renouvelables d'ici 2010 en développant la géothermie, l'éolien, la biomasse et le solaire photovoltaïque. A l'heure actuelle, cette part n'est encore que de 8%. L'administration de Sacramento a lancé plusieurs initiatives pour atteindre cet objectif, dont un plan de développement du solaire. Deux méthodes de production coexistent en Californie : la production concentrée dans des centrales thermiques solaires installées dans les déserts du sud de l'Etat et la production photovoltaïque distribuée. Pour cette dernière, un vaste plan vient d'être annoncé, doté de 2,9 milliards de dollars, avec pour objectif l'équipement d'un million de toits et générer une puissance de 3000 MW.

Après quatre ans passés en tant qu'attaché scientifique à San Francisco, ce dossier constitue le dernier auquel il m'aura été donné de participer. Il me semble assez représentatif du travail de veille que les missions scientifiques mènent à l'étranger. Il est aussi exemplaire, parce qu'il décrit comment les Etats-Unis développent de nouveaux programmes avec une multitude d'acteurs au niveau fédéral comme au niveau des états, avec des expérimentations et des initiatives souvent locales.

Au moment de mon départ, je souhaite remercier tous les lecteurs qui auront été fidèles à cette publication et je souhaite bonne chance à l'équipe qui va la poursuivre.

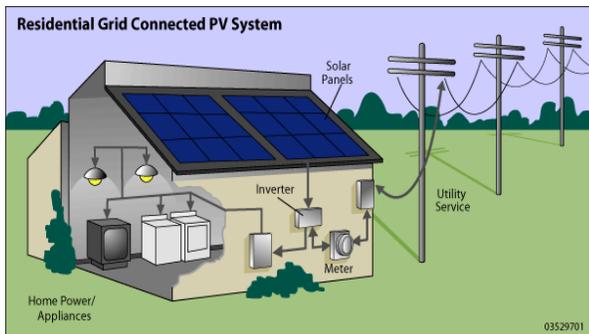
Christophe Lerouge
Attaché pour la Science et la Technologie
San Francisco

qui fait appel à des technologies de très haute performance a largement contribué au progrès de l'industrie photovoltaïque. Ce n'est que dans les années 70 que sont apparues les premiers systèmes de plus faible coût ouvrant la voie à des applications grand public. Il s'agissait de dispositifs très basse puissance alimentés par l'énergie solaire comme les calculatrices à écran LCD ou les montres. Par la suite sont apparus les systèmes d'alimentation des dispositifs autonomes tels que les téléphones de secours en bord de route, les capteurs ou les systèmes pour habitations isolées.

Afin de stimuler la demande et d'accélérer la baisse des coûts de fabrication, certains pays comme le Japon, l'Allemagne ou les Etats-Unis ont mis en place de vastes programmes d'équipement de «toits solaires», non seulement sur les habitations individuelles, mais aussi sur les bâtiments tertiaires (façade ou couverture). Grâce à des subventions, le coût moyen de production d'un grand panneau solaire est passé de 7.50 à 4 dollars par watt entre 1990 et 2005 soit l'équivalent d'une réduction continue des coûts de 3 à 5% par an [2].

I.1.2 Un secteur en croissance continue

L'industrie PV connaît aujourd'hui une forte croissance essentiellement poussée par le marché des installations photovoltaïques subventionnées et qui sont les systèmes raccordés au réseau et destinés à la production décentralisée d'électricité.



Fonctions de base d'un système PV raccordé au réseau

- Une tension continue (DC) est produite par les panneaux solaires installés sur le toit
- Un onduleur («inverter») transforme la tension continue (DC) en tension alternative (AC) directement utilisable pour alimenter les appareils de la maison.
- Un compteur supplémentaire permet de raccorder le système PV au réseau électrique public et de redistribuer ainsi l'électricité non utilisée.

Figure 2. Système photovoltaïque résidentiel raccordé au réseau.

Selon la «Solar Energy Industries Association» (SEIA), 82% des cellules photovoltaïques vendues dans le monde en 2005 ont servi à équiper les systèmes installés sur les toits résidentiels et bâtiments commerciaux. Le coût de ces installations est aujourd'hui amorti entre 5 et 10 ans suivant

les politiques incitatives des pays.

Le marché du photovoltaïque est devenu très rentable: les constructeurs ont vendu cette année pour plus de 15 milliards de dollars de nouveaux produit à travers le monde. Il connaît depuis 5 ans une croissance annuelle de 30% [3]. Les investissements associés à la construction de nouvelles usines de fabrication de cellules solaires dépassent un milliard de dollars en 2005. L'industrie PV a levé au cours des 12 derniers mois plus de 1.8 milliards de dollars sur les marchés financiers à travers 27 transactions financières enregistrées [4].

I.1.3 Les différents acteurs

En 2000, le secteur PV concernait quelque 20.000 emplois qualifiés à haute valeur ajoutée [5]. D'ici 2020, il comptera plus de 150.000 personnes. Afin de mieux appréhender le domaine du PV aux Etats-Unis, le schéma de la figure 3 donne une vue simplifiée des différents acteurs impliqués.

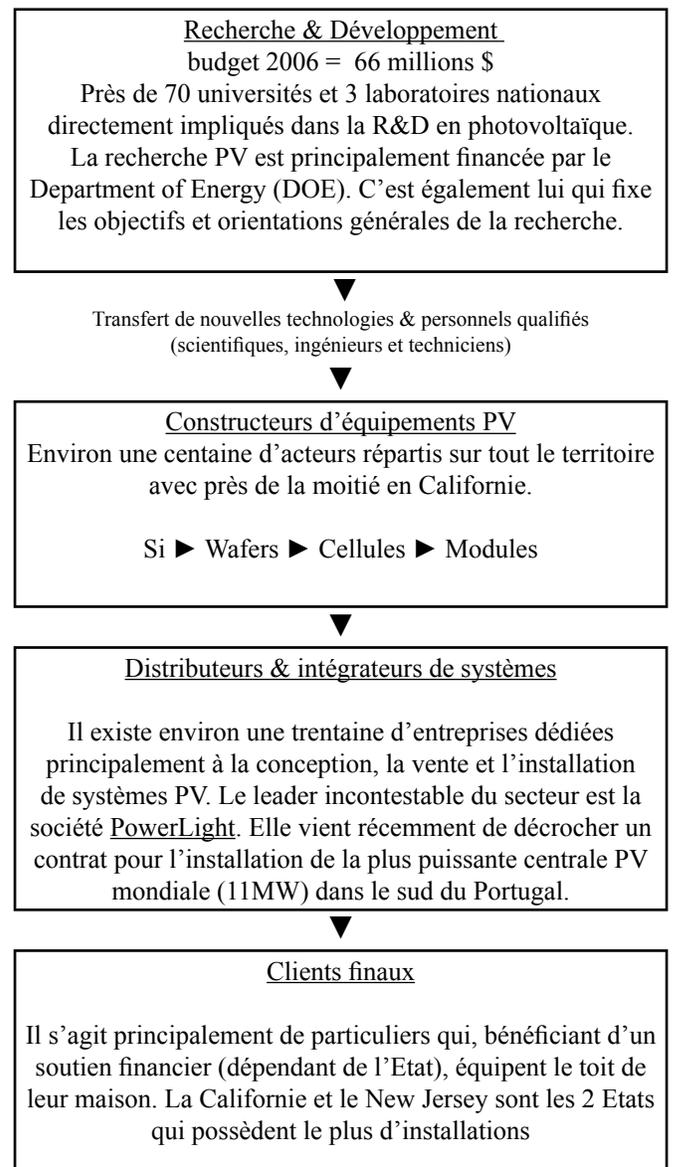


Figure 3. Schéma simplifié des différents acteurs du PV aux Etats-Unis

Il existe encore bien d'autres acteurs impliqués dans ce secteur comme les Etats Fédérés, les consultants, les financiers. Plusieurs sociétés de capital risque (ex: Draper Fisher Jurvetson, Mohr Davidow Ventures, New Enterprise Associates, etc) ont récemment investi dans de jeunes entreprises innovantes. Une liste non-exhaustive de ces start-ups ainsi qu'un bref descriptif de leur technologie est présentée sur la figure 4.

Start-up	Technologie
Energy Innovations Pasadena, Californie Fondé en 2000 http://www.energyinnovations.com/	Energy Innovations développe un système de concentrateur appelé «Sunflower» muni d'un mécanisme de pilotage permettant de suivre la course du soleil tout au long de la journée. La société espère ainsi amener le coût de l'électricité solaire en dessous des tarifs appliqués par les distributeurs traditionnels.
Nanosolar Palo Alto, Californie Fondé en 2002 http://www.nanosolar.com/	Nanosolar a mis au point une technologie de film en couche mince qui permet de fabriquer des cellules solaires dont le rendement et la durée de vie sont semblables aux cellules conventionnelles en silicium.
Konarka Technologies Lowell, Massachussets Fondé en 2001 http://www.konarka.com/	Konarka développe des produits PV à base de polymères dont le coût par unité de surface est largement inférieur à celui des cellules en silicium.
XsunX (autrefois Sun River Mining) Aliso Viejo, Californie Fondé en 2003 http://www.xsunx.com/	XsunX est à l'origine d'une technologie, « Power Glass », de film en couche mince transparent qui peut être déposé sur du verre et permettre d'utiliser les fenêtres des habitations pour produire de l'électricité.
HelioVolt Austin, Texas Fondé en 2001 http://www.heliovolta.com/	La technologie d'HelioVolt (FASST) permet de déposer des films en couche mince de Cuivre-Indium- Sélénium (CIS). Ce revêtement de surface photovoltaïque peut s'appliquer aux matériaux de construction standard tels que l'acier et le verre architectural.
Miasole (autrefois Raycom) San Jose, Californie http://www.miasole.com/	La technologie de Miasole est basée sur un procédé de pulvérisation sous vide qui est employé pour déposer un matériau semi-conducteur en couche mince composé de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium (CIGS).
Solexant Sunnyvale, Californie http://www.solexant.com/	Solexant développe des nanostructures qui une fois intégrées dans un film couche mince augmentent le rendement et réduisent le coût d'une cellule PV. L'ajout de ces nanomatériaux permet d'absorber une plus large partie du spectre et notamment l'infrarouge.
Prism Solar Technologies Stone Ridge, New York Fondé en 2005 http://www.prismsolar.com/	Prism Solar Technologies (PST) est une start-up qui fabrique un nouveau type de module PV utilisant des composants optiques transparents pour collecter, filtrer et focaliser la lumière du jour sur les cellules solaires.

Figure 4. Liste non-exhaustive de start-ups américaines financées par du capital risque.

On constate également, l'émergence de sociétés de capital risque spécialisées dans les technologies dites "propres" (ex: Cleantech Venture Network, Expansion Capital Partners, NGEN Partners, Nth Power, etc). Le photovoltaïque fait partie de ce secteur d'investissement émergent appelé "Clean Technology [6]" dont les perspectives de croissance semblent prometteuses, particulièrement en ce qui concerne le domaine de l'énergie. En Californie le secteur des "technologies propres" progresse: avec 36% de croissance entre 2004 et 2005, il a attiré 484 millions d'investissements en capital risque en 2005 [7].

En matière de politique incitative, on constate un manque de cohérence au niveau fédéral dans la mesure où les aides financières accordées sont essentiellement décidées au niveau de chaque Etat. Il existe donc plusieurs législations différentes, ce qui rend le système moins efficace que celui mis en place au Japon ou en Allemagne où un programme unique s'applique à tout le pays.

I-2 Le marché des installations photovoltaïques

Le marché des installations PV est défini comme l'ensemble des installations terrestres d'une puissance minimale de 40W. Un système PV est constitué de modules, d'un onduleur, de batteries et de tous les composants d'installation et de commande (cf. figure 1.). En 2005, les revenus associés à la vente de modules PV s'élevaient à 6,7 milliard de dollars [8]. Sur la base d'une croissance de 30%, ces revenus atteindront 25 milliards de dollars en 2010.

I.2.1 La situation à l'échelle mondiale

En 2005, le marché mondial des installations photovoltaïques a atteint un record avec une capacité installée de 1.460 mégawatts (cf. figure 5.), correspondant à une croissance annuelle au cours des 10 dernières années de 34%. En conservant cette croissance annuelle moyenne, la capacité photovoltaïque totale dans 10 ans atteindra 50 GW. En 2005, pas moins de 57% de ces installations, soit 837 mégawatts, ont été réalisées en Allemagne. En comparaison, 8 fois moins de dispositifs PV ont été installés aux Etats-Unis.

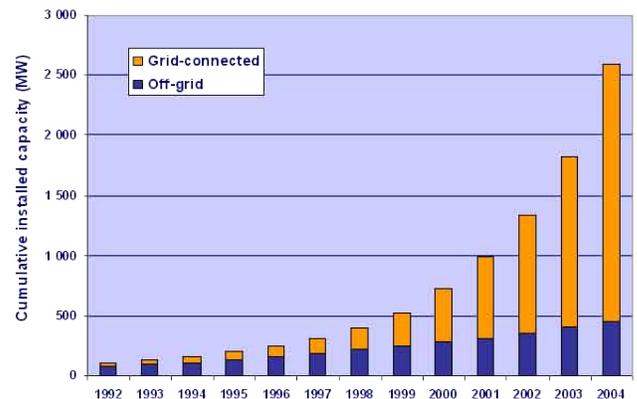


Figure 4. Evolution de la puissance PV cumulée installée dans le monde entre 1992 et 2004 par domaine d'application.

Pays	Pourcentage des installations mondiales en 2005
Allemagne	57%
Japon	20%
Etats-Unis	7%
Reste de l'Europe	6%
Reste du monde	10%
TOTAL	1.460 MW

Figure 5. Répartition mondiale de la puissance PV installée en 2005.
Source Solarbuzz [4].

D'après le graphique de la figure 4, on observe que la croissance est plus importante pour les systèmes PV raccordés au réseau que pour les non-raccordés. Ceci s'explique par les nombreux programmes de subventions mis en place notamment au Japon et en Allemagne. A ce jour, le Japon possède presque la moitié des systèmes PV installés dans le monde. Plus de 230.000 de ces dispositifs installés chez des particuliers ont bénéficié de subventions depuis 1994 ; avec une puissance moyenne de 3,5 kW, ils représentent 90% du parc PV au Japon.

Pays	Puissance photovoltaïque cumulée par pays en 2004 (MW)
Japon	1132
Allemagne	794
Etats-Unis	365
Australie	52
Pays-Bas	49
Espagne	37
Italie	31
France	26
Suisse	23
Autriche	19
Mexique	18
Canada	14
Corée	10
Royaume Unis	8
Norvège	7
TOTAL	2,595

Figure 6. Puissance PV cumulée installée dans le monde en 2004 [9]

D'après les chiffres donnés dans le tableau ci-dessus (figure 6.), on remarque que plus de 88% de la capacité photovoltaïque cumulée en 2004 se concentre dans les 3 pays que sont le Japon, l'Allemagne et les Etats-Unis. La puissance électrique totale en 2004 s'élevait environ à 2.6 GW, ce qui représente seulement 0.1% de la consommation d'énergie actuelle des Etats-Unis estimée à 3 TW pour une population de 285 millions d'habitants [10].

1.2.2 Les installations aux Etats-Unis

Les Etats-Unis possèdent actuellement environ 475 MW de capacité installée, dont approximativement 55% est raccordée au réseau électrique. Cette capacité est suffisante pour alimenter environ 240.000 foyers. En 2005, dans les

deux Etats (Californie et New Jersey) où le marché est le plus important, le chiffre d'affaire était de 360 millions de dollars, soit 45 MW installés. La Californie représente le plus important marché aux Etats-Unis et le cinquième dans le monde. Dans le cadre du programme de subventions mis en place par la commission sur l'énergie («California Energy Commission»), plus de 15.000 systèmes raccordés au réseau électrique ont été installés en décembre 2005 sur des maisons et des petites entreprises. Le 12 janvier 2006, la commission californienne sur les équipements collectifs publics a approuvé le programme intitulé «California Solar Initiative» (CSI). Cette initiative prévoit des incitations financières d'un total de \$3.2 milliards de dollars sur 11 ans, assez pour installer 3.000 mégawatts d'énergie solaire soit l'équivalent de 1 million de toits équipés. Dans un délai de trois ans, le marché PV annuel en Californie excédera celui des Etats-Unis en 2005. Le marché américain des installations PV se décompose en 4 secteurs :

1. Les installations pour particuliers non-raccordés au réseau

En 2004, plus de 10 MW de systèmes de ce type ont été installés aux E-U. Ce secteur inclut principalement les solutions d'alimentation pour les résidences éloignées, les bateaux, les camping-cars, les maisons de vacances, les fermes, etc. Les systèmes fournissent l'électricité pour tous les types de charges utilisées dans l'habitat moderne. La plupart des systèmes ne dépassent pas 1 kilowatt de puissance, possèdent plusieurs jours d'énergie stockée en batterie, et alimentent habituellement des charges DC. Quelques systèmes utilisent des onduleurs autonomes pour actionner des charges qui fonctionnent en AC et peuvent être associées à un générateur diesel pour assurer une autonomie totale.



Figure 7. Système PV non-raccordé au réseau et alimentant une maison à Coal Creek Canyon dans le Colorado. L'utilisation de l'énergie solaire est maintenant préconisée par les plus grands distributeurs d'électricité de l'Etat.

2. Les installations au réseau pour le secteur commercial & industriel non-raccordés

Ce secteur est le deuxième plus grand du marché PV américain (18.0 MW installés en 2004). Il couvre une large gamme d'applications en télécommunications allant des répéteurs et amplificateurs pour tous les modes de communication (fibres optiques, liaison satellite et liaison par câble), à de petites stations de transmission de données pour le téléphone, la télévision et les communications sécurisées à travers tout le pays. Les systèmes d'alimentation à distance équipent aussi les sondes et transmetteurs utilisés dans de nombreux domaines comme la météo, la sismologie, le contrôle de la qualité de l'air, les téléphones de sécurité sur le bord des routes, les parkings et le contrôle du trafic auto routier. Le domaine de l'éclairage et de la signalisation à

distance est en fort développement ; les applications incluent les arrêts d'autobus, les panneaux de signalisation routière, la navigation côtière, l'éclairage extérieur des bâtiments d'entreprises, etc.



Figure 8. Vue aérienne des 900KW de capacité PV installés sur le toit de la plate-forme logistique de FedEx à Oakland (CA).

3. Les installations raccordées au réseau

Avant 1999, ce secteur ne concernait que les « early adopters » et sa croissance annuelle en puissance installée ne dépassait pas 2 MW. Aujourd'hui c'est de loin l'application la plus importante de tout le domaine PV. En 2004, avec 57MW de nouvelle puissance installée, ce secteur doublait de taille par rapport au nombre d'installations en 2003. Dynamisé par l'offre de subventions et la baisse des prix, ce secteur est voué à une forte croissance pour plusieurs années. La tendance actuelle est à l'intégration des systèmes PV dans l'habitat ou les bâtiments commerciaux : «Building Integrated PV» (BIPV).



Figure 9. Installation de 12.6 KW (SunPower) sur le toit d'une maison à Santa Barbara en Californie.

4. Le secteur gouvernemental

Le gouvernement finance une large gamme d'applications dont la plupart sont considérées comme émergentes. Le département de défense (DOD) finance par exemple 0.5MW d'installations par an ce qui correspondait en 2004 à un total de 5 MW de puissance cumulée. Ces systèmes sont destinés à des applications allant de l'alimentation de capteurs autonomes à de petites centrales électriques hybrides (PV/diesel). Le département de l'énergie (DOE) a subventionné à hauteur de 25% le programme intitulé : « Utility Photovoltaic Group ». Au cours des 5 dernières années, plus de 1000 installations de service ont été mises en place grâce à ce programme. Un autre programme important piloté par le gouvernement concerne l'équipement des écoles : « PV for Schools ».



Figure 10. Centrale électrique PV portable qui a été employée par l'Agence Fédérale de Gestion des Secours (FEMA) lors des ouragans qui ont frappé la Caroline du Nord en 1998 et Porto Rico en 1999.

I.3 La production de cellules PV

L'industrie PV actuelle repose essentiellement sur la technologie silicium. En 2004, 98.6% des systèmes PV ont été fabriqués à base de silicium (mono cristallin, multi cristallin et silicium amorphe) [8]. Il existe cependant d'autres technologies prometteuses comme les films en couche mince (CdTe, a-Si, CuInSe), les matériaux organiques ou les nanoparticules mais à ce jour elles sont encore en phase de développement. Selon certains experts, le silicium est voué à dominer le marché pendant encore au moins 15 ans.

I.3.1 La production mondiale

En 2005, la production mondiale de cellules photovoltaïques a progressé de 45%, pour atteindre l'équivalent de 1.832 MW en termes de puissance électrique. Le marché connaît depuis 5 ans une croissance annuelle de 30%. Le Japon est le premier constructeur mondial : les entreprises japonaises produisent environ la moitié des cellules solaires dans le monde [11].

Fabricant	Capacité (MW/an)	Pays
Sharp	400	Japon
Kyocera	240	Japon
BP Solar	100	Australie, Espagne, Etats-Unis
Q-Cells	175	Allemagne
Mitsubishi	95	Japon
Shell Solar	90	Allemagne, Etats-Unis, Portugal
Sanyo	77	Japon
Isofoton	75	Espagne
Suntech Power	80	Chine
RWE Schott Solar	100	Allemagne, Etats-Unis

Figure 11. Capacité et lieu de production (cellules PV) en 2005 des premiers constructeurs mondiaux [11].

La part de marché des Etats-Unis qui était de 11% en 2004 est tombée à 9% en 2005. Cette baisse est en partie due à la forte progression de la Chine dont la production est passée

de 51.8 MW en 2004 (4.1% en part de marché) à 150.7 MW (8.3% en part de marché) en 2005.

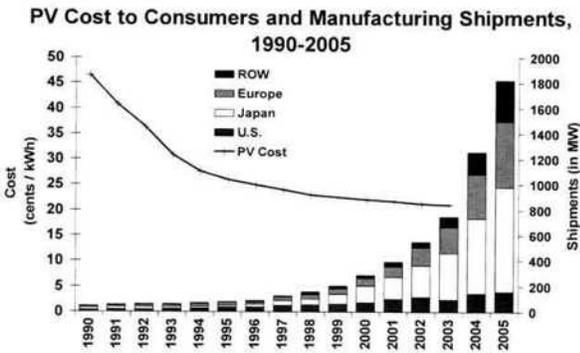


Figure 12. Evolution entre 1990 et 2005 du coût aux consommateurs et de la production mondiale de cellules PV [3]. Les Etats-Unis sont représentés par le segment inférieur des barres et ROW désigne le reste du monde (haut de colonne).

Région	Production en 2005 (MW)	Pourcentage
Japon	825	45%
Europe	515	28%
Etats-Unis	155	9%
Chine	151	8%
Reste du monde	174	10%

Figure 13. Répartition par pays de la production mondiale en 2005 [3].

Grâce aux programmes nationaux de financement de la R&D et les investissements dans les équipements de production, le coût du KWh produit par une cellule photovoltaïque est aujourd'hui dix fois inférieur à celui qui prévalait dans les années 80. Chaque doublement de la capacité de production a conduit à une baisse des prix de l'ordre de 18%.

Cette forte croissance a toutefois entraîné pour l'année 2005 une pénurie de silicium. Il est probable que le prix de la matière première augmente un peu au cours des années à venir mais face à cette forte demande, de nouveaux acteurs pourraient apparaître et certains constructeurs envisageraient même le rachat de leur fournisseur. De nouvelles méthodes de production permettent également de diminuer l'épaisseur des tranches de silicium. L'épaisseur des cellules a ainsi constamment diminué partant de 400µm pour les premières cellules, à 350 µm dans les années 90, puis 300µm en 2002 et 180µm en 2005 (produits Sharp). La tendance générale des constructeurs est à la concentration verticale : les compagnies intègrent toute la chaîne de valeur (fournisseur de matière première, fabrication de cellules, modules et systèmes). La prochaine génération d'outils de production est actuellement en cours de développement auprès des principaux équipementiers. Dans le même temps, de nouvelles lignes de production à capacité très élevée (3000 wafers par heure) sont en cours de construction (voir le site

web de Solarbuzz, <http://www.solarbuzz.com/>, pour connaître les derniers projets en cours).

1.3.2 La production aux Etats-Unis

La part de la production des États-Unis comparée à la production mondiale a nettement changé depuis les années 80. De 1980 à 1985, l'industrie des États-Unis a largement dominé le marché mondial, contribuant à 50% ou plus de la production dans le monde. Cependant, depuis 1985 jusqu'à nos jours, cette part relative a diminué de façon significative. La figure n°14 ci-après représente l'évolution de la production mondiale avec la contribution des Etats-Unis (courbe blanche) associée. On note avec la très forte croissance de la production mondiale depuis 1999 que la production américaine a largement perdu ses parts de marché.

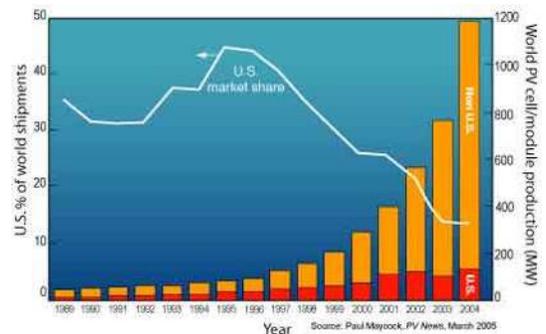


Figure 14. Evolution entre 1989 et 2004 de la part de marché des Etats-Unis comparée à la production PV mondiale [11].

En 2004, la production totale américaine s'élevait à 161,7 MW. Le tableau ci-dessous (cf. figure 15.) détaille la capacité de production PV américaine par constructeur et par type de technologie.

De nouvelles compagnies sont apparues récemment et ne figurent pas dans ce tableau. Il s'agit par exemple de la société SunPower basée à San José en Californie et qui bénéficie de l'expérience et des moyens techniques de son actionnaire majoritaire : la compagnie Cypress Semiconductor. SunPower possède une technologie avec des contacts électriques en face arrière et un rendement de cellule pouvant atteindre 21,5%.

Quelques caractéristiques techniques de leurs produits sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Rendement d'une cellule	21.5%
Rendement d'un module	17.2 – 17.7%
Puissance maximale d'un module	215-220 W
Durée de vie d'un module	25 ans
Caractéristiques d'un module	1,56 m x 0,8 m 46 mm d'épaisseur 15 kg

Figure 16. Quelques caractéristiques techniques de modules PV fabriqués par SunPower.

Fabricant de modules PV en silicium cristallin	Technologie	Production 2004 (MWp)	
		Cellules	Modules
Shell Solar	Silicium monocristallin	60.0	60.0
BP Solar	Silicium multicristallin	14.2	14.2
General Electric	Silicium monocristallin (rebus de la microélectronique)	25.0	25.0
RWE Schott Solar	Ruban de silicium	10.0	10.0
Evergreen Solar	Ruban de silicium	6.0	6.0
<i>Total silicium cristallin</i>		<i>115.2</i>	<i>115.2</i>
Fabricant de films en couche mince			
Shell Solar	CuInSe (CIS)	2.0	2.0
United Solar Systems Corporation	Silicium amorphe	14.0	14.0
First Solar	CdTe	6.0	6.0
Global Solar	CIS	1.0	1.0
<i>Total couche mince</i>		<i>23.0</i>	<i>23.0</i>
Autres	Concentrateur	0.5	0.5
<i>Production totale US 2004</i>		<i>161.7</i>	<i>161.7</i>

Figure 15. Capacité de production en 2004 par type de technologie des constructeurs américains [12].

MWOE Solar (Midwest Optoelectronics), une autre société récemment créée, possède une forte expertise en technologie couche mince (silicium amorphe) notamment dans l'équipe du Dr. Xunming Deng professeur à l'université de Toledo. SolFocus, qui travaille en collaboration avec des équipes de l'université de Merced et du Palo Alto Research Center (PARC), propose une technologie basée sur un concentrateur optique permettant d'atteindre de hauts rendements (>40%).

Afin de combler le retard des Etats-Unis pris notamment en matière de production photovoltaïque et de croissance du marché interne, Georges Bush a présenté en février 2006, un nouveau programme : «Solar America Initiative» (SAI). Cette initiative a pour objectif d'atteindre, d'ici 2025, une capacité installée de 5 à 10 GW ; cette puissance correspond approximativement à l'électricité nécessaire pour alimenter 2 millions de foyers. Pour atteindre cet objectif, l'accent doit être mis sur trois actions majeures :

1. Augmenter le rendement de la conversion énergie solaire / énergie électrique.
2. Améliorer la durée de vie et la fiabilité des dispositifs photovoltaïques (PV).
3. Réduire le coût de fabrication des cellules, modules et systèmes PV.

La proposition de budget 2007 pour les activités de R&D en PV est de 139 millions de dollars, ce qui correspond à une augmentation de 78% par rapport à l'année précédente. C'est la première fois que l'on note une telle augmentation. Le programme SAI finance trois types d'activités : la recherche fondamentale, les projets liés aux matériaux et dispositifs avancés et enfin le développement technologique. L'accent est mis sur le financement de ces deux dernières activités afin de dynamiser le marché américain du PV en définissant de nouveaux objectifs ambitieux et en se concentrant sur les défis technologiques associés à la fabrication et la production. Ces

projections sont en accord avec la roadmap mise en place en septembre 2004 par «The U.S. Photovoltaic Industry».

Ce nouveau programme ne fait cependant pas l'unanimité auprès du milieu académique car cette augmentation ne concerne pas les programmes de recherche fondamentale pour lesquels les fonds pourraient même être inférieurs à ceux disponibles l'année précédente. Les activités de recherche fondamentale sont tout à fait essentielles, ce sont elles qui ont permis d'atteindre les performances de l'industrie actuelle et ce sont elles qui conduiront cette industrie vers de nouvelles technologies encore plus performantes.

II Recherche et Développement

II.1 Principe de la conversion photovoltaïque

II.1.1 Effet photoélectrique et jonction PN

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'on illumine un semiconducteur avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semiconducteur, créant ainsi des paires électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.

Si on illumine une jonction PN (dispositif dans lequel le dopage du semiconducteur passe brusquement d'un type P à un type N, figure 17), les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (phototension); s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque.

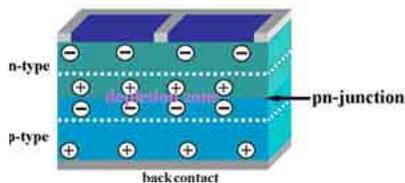


Figure 17
Jonction pn dans une cellule photovoltaïque

II.1.2 Limitations

Si chaque photon incident permettait d'injecter un électron dans le circuit électrique, les dispositifs photovoltaïques seraient très efficaces. En pratique, plusieurs facteurs limitent cette photo-conversion.

La première limitation vient de la longueur d'onde du rayonnement incident, qui doit être assez faible pour que l'énergie des photons soit supérieure à celle du gap et puisse être absorbée. Ainsi, avec un gap de 1.14 eV, le silicium monocristallin n'absorbe que les photons de longueur d'onde inférieure à 1100 nm, l'absorption optimale se trouvant aux alentours de l'énergie du gap. Vu que le spectre d'émission solaire s'étend de 250 à 2000 nm avec un pic d'émission dans le visible entre 500 et 700 nm, seule une partie du rayonnement est utile à la création de porteurs de charge (voir figure 18).

Une deuxième limitation vient du fait qu'on ne récupère pas tous les porteurs photogénérés. Après séparation

dans la zone de charge d'espace, les électrons et les trous doivent diffuser dans les zones neutres du semiconducteur. On ne peut pas éviter qu'une certaine proportion de ces porteurs se recombine avant d'atteindre les contacts du dispositif, affectant ainsi le rendement de conversion énergétique. Le taux de recombinaison est plus important si le matériau présente des défauts de structure (semiconducteur multicristallin ou amorphe) ou des impuretés (silicium fortement dopé ou de pureté chimique insuffisante). Au-delà de ces limitations fondamentales, il faut aussi tenir compte de nombreux autres facteurs de perte que les différentes technologies doivent minimiser : photons réfléchis, pertes résistives, contacts métalliques, etc.

Shockley et Quesseir [15] ont démontré que théoriquement une cellule solaire à jonction PN ne peut dépasser une efficacité de 31%, ce qui correspond à une puissance électrique de 190 W/m². Toutefois, les meilleurs prototypes de laboratoire à une jonction réalisés aujourd'hui ne dépassent pas 25.1% [16] soit environ 150 W/m².

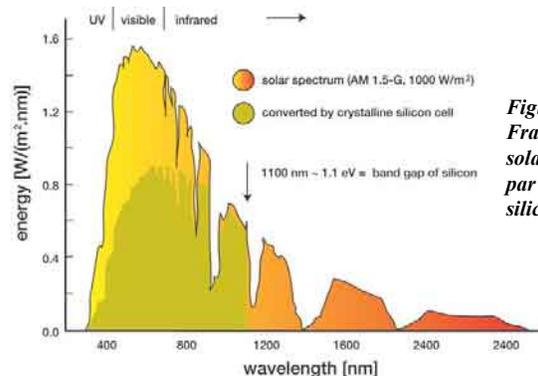


Figure 18
Fraction du spectre solaire convertie par une cellule en silicium cristallin

II.2 Les filières silicium cristallin

Etant donné que le maximum du rayonnement solaire se situe autour de 830 nm, le semiconducteur optimal pour réaliser une cellule solaire à jonction PN doit posséder un gap de ~1.5eV. De ce point de vue, avec un gap de 1.1 eV, le silicium n'est certainement pas le matériau idéal, mais il est pourtant le plus employé à ce jour pour la réalisation de cellules solaires. Aujourd'hui le silicium correspond à 99% de la production mondiale photovoltaïque pour les applications terrestres dont 90% de silicium de type cristallin (multicristallin et monocristallin) [17]. Ceci s'explique par le fait que l'industrie photovoltaïque profite du développement de l'industrie des semi-conducteurs qui est capable de fournir avec le silicium une matière première d'excellente qualité pour les panneaux solaires ainsi que des technologies de fabrication parfaitement maîtrisées. Cependant, le coût de production reste élevé: malgré une croissance commerciale annuelle de 30%, le coût du kWh photovoltaïque reste environ dix fois celui fourni par le gaz ou le nucléaire (une fois raccordé au réseau). La recherche américaine se focalise sur l'amélioration de l'efficacité des cellules silicium et l'optimisation des techniques de production industrielles afin de réduire les coûts.

II.2.1 Silicium monocristallin

Les cellules à base de silicium monocristallin représentent en 2005 29% [18] du marché photovoltaïque mondial. Elles sont réalisées à partir des mêmes plaquettes de silicium monocristallin qu'utilise l'industrie de la microélectronique, produites à partir de lingots de silicium fabriqués selon le procédé de croissance Czochralski. Le coût du matériau et des procédés de fabrication font que le produit fini est très onéreux, mais les cellules ont la meilleure efficacité et une excellente stabilité. Les meilleurs prototypes de laboratoire approchent 25% de rendement (University of New South Wales en Australie [16]) tandis que les cellules commerciales ont un rendement entre 17% et 20% qui se traduit par des modules d'une efficacité variant entre 14 et 16%.

II.2.2 Silicium multicristallin

Une alternative au silicium monocristallin est le silicium multicristallin. Il est généralement obtenu par refonte des chutes de silicium de l'industrie de la microélectronique, procédé moins coûteux que la croissance d'un monocristal. Cependant, l'efficacité des cellules est pénalisée par un taux de recombinaison des porteurs plus élevé que dans le silicium monocristallin. La cellule de laboratoire la plus performante atteint cependant 19.8% de rendement (University of New South Wales en Australie [16]) et l'efficacité des modules commerciaux tourne autour de 10-12%. Les modules PV multicristallins représentent 62% de part de marché des technologies PV dans le monde [18].

II.2.3 Programme 'Crystalline Silicon'

Les financements consacrés par le DOE à la recherche fondamentale sur silicium cristallin pour le PV représentent environ 5 millions de dollars en 2006 [18] soit 1/5 du budget consacré à la recherche fondamentale en PV (environ 25 millions en 2006). Ce financement est relativement modeste comparé aux fonds destinés à l'industrialisation, la fabrication et le marketing des panneaux solaire silicium.

Organisation et financement de la recherche PV aux USA

L'essentiel de la recherche sur le photovoltaïque est géré par NREL (National Renewable Energy Laboratory) qui reçoit son financement du DOE (Department of Energy). Le NREL, à travers le National Center for Photovoltaics (NCPV), est responsable de l'attribution des financements aux universités et aux industriels dans le cadre des programmes PV financés par le DOE. Il conduit également une importante recherche appliquée et fondamentale, en interne et également en collaboration avec les universités, les industriels et les laboratoires nationaux comme le Sandia National Laboratory (SNL) et le Brookhaven National Laboratory.

Le DOE dispose d'un budget de 66 millions de dollars pour 2006 pour financer la recherche et le développement de la filière photovoltaïque [19]. Cet argent est reparti sur 3 secteurs principaux, la Recherche Fondamentale, les Matériaux et les Dispositifs Avancés et le Développement Technologique. Une augmentation importante des crédits est prévue pour 2007 dans le cadre du nouveau programme 'Solar America Initiative' annoncé en début d'année par le président Bush. Cependant la plupart des financements seront dédiés à la fabrication, l'industrialisation et le marketing [19].

En ce qui concerne la recherche fondamentale, il y a d'une part les technologies classiques silicium qui disposent d'un programme spécifique, le 'Crystalline Silicon Project' et d'autre part les nouveaux concepts et les technologies spécifiques. Ces derniers sont soutenus dans le cadre de différents projets, comme le programme 'FUTURE GENERATION PROJECT' lancé en 1998 [20] et visant à stimuler l'émergence de nouvelles technologies PV (18 universités impliquées). Dans la continuité de ce programme, le projet 'BEYOND THE HORIZON' lancé en 2001 [20] a permis de soutenir les recherches de 11 universités et 5 industries pour le développement de diverse technologies, des cellules organiques photovoltaïques aux technologies couches minces en passant par la nanostructuration du silicium. Enfin il existe un programme coordonnant les recherches sur les cellules hautes performances, la 'High Performance Initiative'.

En plus de ses fonctions de coordinateur et de centre de recherche, le NREL conduit des tests, mesures, fournit des certifications et s'assure de la standardisation des technologies PV. Globalement les activités de recherche aux USA regroupent une quarantaine d'universités, une dizaine d'industriels et plusieurs laboratoires et centres de recherche nationaux (NREL, SNL, Brookhaven National Laboratory, NASA Glenn Research Center et des laboratoires du Department of Defense).

Programme de recherche photovoltaïque américain

Financement (millions de \$)	2005	56,5 M\$	
	2006 (estimé)	66 M\$	
	2007 (demandé)	139 M\$	
Répartition 2007	Recherche fondamentale 30,0 M\$	Matériaux et Dispositifs Avancés 94,5 M\$	Développement technologique 15,0 M\$
Projets de recherche	<i>University Research Project</i> Réseau d'universités sous contrat du NREL travaillant sur divers sujets fondamentaux tels que les cellules organiques	<i>Thin Film Partnership</i> Regroupe universitaires et industriels travaillant sur les technologies couches minces	<i>Systems Engineering and Reliability</i> Fiabilité et ingénierie des systèmes PV
	<i>High Performance Initiative</i> Regroupe les acteurs des cellules très haute performance	<i>Advanced Manufacturing R&D</i> Techniques et procédés de fabrication	<i>Building Integrated PV</i> PV intégré au bâtiment
	<i>Collaborative Crystalline Silicon Initiative</i> Etude fondamentale des cellules silicium	<i>Module Reliability R&D</i> Fiabilité des modules	

Quelques projets financés par le 'Crystalline Silicon Project' en 2005-2006

- **Matériaux et structure Si avancés au NREL:**
Collaboration avec la communauté PV pour développer des architectures de cellules en silicium cristallin couche mince.
- **Intégration des procédés au NREL**
Développement d'une nouvelle gamme d'outils pour le dépôt, le traitement et la caractérisation des cellules silicium.
- **Centre d'excellence à Georgia Tech**
Développement de procédés industriels notamment les techniques de 'screen printing' et les procédés thermiques rapides.
- **Sous-contrats avec des universités:**
Thèmes de recherche sélectionnés par l'industrie pour l'étude des défauts physiques dans le silicium et le développement de procédés avancés. Georgia Tech, Cal Tech, UC Berkeley, Texas Tech et NCSU prennent part aux projets.

II.3 Cellules couches minces

Les cellules PV couche mince ('thin-film') constituent ce que certains appellent les cellules de **seconde génération** car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. L'intérêt de la technologie couche mince vient de la faible quantité de matériau nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques. Contrairement aux cellules silicium monocristallin, on ne dépose que la quantité de matériau photosensible «efficace» pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns d'épaisseur suffisent). Par ailleurs, on utilise des méthodes de fabrication moins coûteuses qui permettent de plus d'utiliser des substrats flexibles. Les cellules couche mince les plus développées utilisent comme matériau de base le silicium amorphe, le Diséléniure de Cuivre Indium (CIS) et le Tellurure de Cadmium (CdTe).

La recherche sur les cellules couche mince est soutenue dans le cadre du programme 'Thin Film Partnership' piloté par le NREL. Des universités, des laboratoires nationaux et des industriels prennent part à ce programme qui s'intéresse aussi bien à la science de base qu'au développement industriel. Le budget pour 2005 s'établit à 9 millions de dollars avec approximativement 2 millions consacrés à chaque technologie (a-Si, CdTe, CIGS), 1 million pour le centre d'excellence basé à l'université du Delaware et le reste est dédié à l'organisation et aux tests/analyses des modules. [21]

II.3.1 Silicium amorphe (a-Si)

Le silicium amorphe a été le premier matériau 'couche mince' commercialisé. Quelques micromètres de silicium amorphe suffisent à absorber l'essentiel du rayonnement

mais le rendement de conversion est limité par le taux de recombinaison élevé qui caractérise la structure amorphe. Les cellules à silicium amorphe ont tout d'abord été utilisées pour des applications «portables» de faible puissance pour alimenter des produits électroniques comme des calculettes ou des montres à quartz. L'amélioration des performances et un coût inférieur au silicium cristallin lui ont permis de pénétrer le marché des panneaux solaires dans certains secteurs niches où le coût importe plus que le rendement. Les recherches actuelles se concentrent sur l'amélioration des performances et de la stabilité des cellules, la mise au point de techniques de dépôt plus rapides et le développement de cellules multi-jonctions.

Parmi les recherches poursuivies aux Etats-Unis, on notera l'étude de la métastabilité du silicium amorphe. Il s'agit de comprendre l'effet Staebler-Wronski relatif à la dégradation des performances des cellules sous l'effet de la lumière. Une cellule 'neuve' voit ses performances baisser d'environ 10% avant de se stabiliser. Les mécanismes entrant en jeu sont encore assez mal connus. Ils impliquent entre autres la cassure de liaisons hydrogène par l'irradiation lumineuse. La présence d'hydrogène dans la couche est due aux techniques de dépôt du silicium amorphe qui consistent à décomposer un gaz hydrogéné tel que le silane (SiH_4). Pour atteindre une meilleure stabilité, il faut pouvoir réduire la quantité d'hydrogène, mais cela n'est possible qu'au prix d'une vitesse de dépôt plus faible, ce qui est très contraignant pour une production industrielle. La méthode VHF PECVD (dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma haute fréquence) qui est actuellement développée en laboratoire semble être la plus prometteuse pour garder une vitesse de dépôt satisfaisante

Pour améliorer les performances des cellules a-Si, des architectures double et triple jonctions ont été développées, notamment par des équipes de l'Université de Toledo en Ohio et de l'entreprise américaine United Solar, dans le cadre d'un contrat soutenu par le NREL. L'idée est de superposer des jonctions dans la même cellule avec un gap différent afin de capter une plus large fraction du spectre solaire. Les meilleures cellules triple jonction qui atteignent 13% d'efficacité (en régime stabilisé) fonctionnent avec une structure a-Si/a-SiGe/a-SiGe [22]. Certaines équipes étudient la possibilité de remplacer la couche amorphe de a-SiGe par du silicium nano/micro-cristallin pour gagner en conductivité.

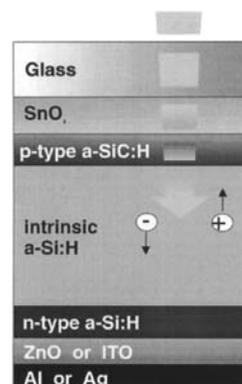


Figure 19
Cellule de silicium amorphe de type p-i-n. Les couche de type p et n sont séparées par une couche dite intrinsèque où les électrons sont photogénérés

II.3.2 Tellurure de Cadmium (CdTe)

Parmi les technologies couches minces, celles utilisant l'hétérojonction tellurure de cadmium/CdS devraient connaître une forte croissance commerciale dans les années à venir. CdTe présente plusieurs avantages à commencer par son gap de 1.45 eV qui approche la valeur idéale. Ce matériau présente un fort coefficient d'absorption qui lui permet d'absorber 90% des photons incidents sur une couche de seulement quelques μm , et il est stable chimiquement et thermiquement. La couche de CdS sert principalement à assurer le transport des électrons qui sont majoritairement photogénérés dans la zone de charge d'espace de CdTe. Les meilleurs rendements obtenus en laboratoire, notamment au NREL, atteignent 16,5% [23]. Par ailleurs, la technologie est déjà bien développée au niveau industriel.

Deux problèmes spécifiques freinent le développement des cellules CdTe. Le premier est que les films de CdTe type p ont une résistance électrique relativement élevée, ce qui nuit aux rendements de conversion en raison des pertes résistives qui en résultent. Le deuxième problème provient du fait que le cadmium est un métal lourd donc polluant. Il existe des préoccupations environnementales au sujet de son utilisation durant la fabrication et le recyclage en fin de vie du produit. Néanmoins, cet aspect n'a pas empêché

le développement important des batteries au cadmium.

Une cellule typique de CdTe est illustrée figure 20. Une couche ($\sim 2 \mu\text{m}$) de CdTe de type p est accolée à une couche mince ($\sim 0,1 \mu\text{m}$) de CdS de type n pour former une hétérojonction. La couche de CdS est largement transparente aux photons incidents car son gap est de 2.4 eV. Les photons sont essentiellement absorbés par la couche de CdTe. Pour compléter la cellule, une couche de TCO (Transparent Conducting Oxide) recouvre la couche de CdS et est connectée à un contact électrique. Le contact électrique au dos des cellules peut être métallique et recouvrir toute la surface car cette couche n'a pas besoin d'être transparente.

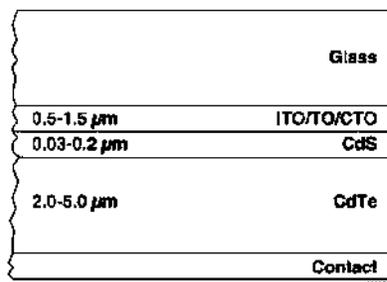


Figure 20
Schéma des différentes couches composant une cellule CdTe classique

Participants au programme couche mince

Organisation / Principal investigateur	Localisation	Description / Titre de l'activité de recherche
Case Western University	Cleveland, OH	Dépôt en phase liquide de couche mince α -CIS
Colorado School of Mines	Golden, CO	Caractérisation et analyse des cellules CdTe
Colorado School of Mines	Golden, CO	Structure des cellules couche mince à base de silicium
Colorado State University	Ft. Collins, CO	Analyse des dispositifs CIS et CdTe
Colorado State University	Ft. Collins, CO	Développement de procédés de fabrication à la chaîne pour les cellules CdTe et étude de la stabilité
Energy Conversion Devices	Troy, MI	Réflecteurs multicouches et cellules nc-Si inférieure à faible gap pour cellules a-Si multi-jonctions
Energy Photovoltaics	Lawrenceville, NJ	Technologie photovoltaïque CIGS avancée
Energy Photovoltaics	Lawrenceville, NJ	Techniques de dépôt avancées pour cellules et modules en silicium microcristallin
First Solar, LLC	Perrysburg, OH	Optimisation des performances des cellules CdTe
First Solar, LLC	Perrysburg, OH	Recherche sur les procédés de fabrication à haut rendement pour la technologie couche mince CdTe
Florida Solar Energy Center	Cocoa, FL	Cellules solaires CIGS par sélénisation et sulfurisation
Florida Solar Energy Center	Cocoa, FL	Test de la fiabilité des modules en climat chaud et humide
Global Solar Energy	Tucson, AZ	Tolérance du dépôt en 3 étapes de CIGS aux variations imposées par le 'roll-to-roll processing'
International Solar Electric Technologies	Inglewood, CA	Transition du laboratoire à la production de masse pour la fabrication des cellules CIGS sans étape sous vide
Iowa State University	Ames, IA	Dispositifs à jonction tandem à haute efficacité et faible gap
ITN Energy Systems	Littleton, CO	Co-évaporation de S et Se assistée par plasma pour dispositifs PV à chalcopirite à large gap
NanoSolar	Palo Alto, CA	Recuit à haute productivité pour cellules PV CIS
National Institute of Standards and Technology	Boulder, CO	Mesure des espèces déposés par plasma et par bombardement pour les cellules a-Si:H et a-SiGe:H
Pennsylvania State U.	University Park, PA	Cellules multifonctions à base de a-Si:H
Pacific Northwest National Laboratory	Richland, WA	Revêtements pour la protection des couches minces
Shell Solar Industries	Camarillo, CA	R&D sur les procédés de fabrication pour les cellules CIS
Syracuse University	Syracuse, NY	Transport aux interfaces et modélisation pour les cellules à base de a-Si:H
Texas A&M University	College Station, TX	Contrôle et test en extérieur en climat chaud et humide pour les cellules couches minces
U. of Delaware, Institute of Energy Conversion	Newark, DE	Centre d'excellence Couches Minces
United Solar Ovonic	Auburn Hills, MI	Cellules et modules haute efficacité à base d'alliages a-Si
University of Florida	Gainesville, FL	Caractérisation de la chimie de réaction pour les cellules CIGS
University of Illinois	Urbana, IL	Compréhension de la structure et des bases chimiques pour les cellules solaires à chalcopirite
University of Nevada	Las Vegas, NV	Caractérisation de la structure électronique et chimique aux interfaces des cellules solaires couche mince
University of North Carolina, Chapel Hill	Chapel Hill, NC	Caractérisation microstructurale et identification des mécanismes Staebler-Wronski dans les cellules a-Si:H
University of Oregon	Eugene, OR	Etude des propriétés électroniques pour l'amélioration des performances et de la stabilité des cellules a-Si
University of South Florida	Tampa, FL	Cellules CdTe haute efficacité
University of Toledo	Toledo, OH	Cellules CdTe fabriquées par sputtering
University of Toledo	Toledo, OH	Cellules triple jonctions a-Si-H / nc-Si haute efficacité
University of Utah	Salt Lake City, UT	Caractérisation des matériaux silicium amorphe

Un avantage important des cellules PV CdTe vient du nombre de techniques de fabrication des films qui se prêtent à une production de masse. First Solar, compagnie américaine basée dans l'Ohio et leader dans la production de cellules CdTe, utilise une méthode très rapide par transport en phase vapeur qui dépose le film de semi-conducteur de quelques micromètres d'épaisseur en moins d'une minute sur la surface d'une cellule. Les modules commerciaux ont un rendement de 7 à 11% suivant le fabricant. La part de marché actuelle des cellules CdTe tourne autour de 0.5% de la production mondiale.

II.3.3 Les cellules CIS et CIGS

Les cellules couches minces à base de diSéléniure de Cuivre Indium CuInSe_2 (CIS) et Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) sont certainement parmi les plus efficaces. L'intérêt des cellules CIGS est d'exploiter un matériau dont on peut ajuster le gap énergétique en adaptant le rapport atomique In/Ga ce qui permet d'optimiser l'absorption du spectre solaire. Le gap peut ainsi varier de 1.02 eV (CuInSe_2 pur) à 1.68eV (CuGaSe_2 pur). Les cellules CIGS sont ainsi celles qui ont le plus important coefficient d'absorption parmi les cellules couches minces: plus de 99% des photons incidents sont absorbés dans le premier micron du matériau. En laboratoire, les meilleurs rendements publiés atteignent 19.2%, et les cellules testées se sont avérées stables sur une période d'au moins 10 ans [24].

Une cellule CIGS conventionnelle est faite d'un empilement de couches minces. Une première couche de Mo constitue le contact arrière; au dessus, la couche absorbante de CIGS (type p) recouverte d'une couche ultrafine de CdS ou de ZnS (type n) forme la jonction active, et finalement une couche transparente TCO en ZnO (ou ITO) assure la liaison électrique avec les contacts de surface. L'ensemble de ces couches peut être déposé indifféremment sur un substrat de verre, de polymère ou de métal.

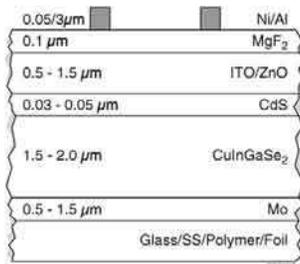


Figure 21
Schéma des différentes couches composant une cellule CIGS classique

Plus efficaces que les cellules CdTe, les cellules CIGS sont cependant plus complexes à fabriquer. Les techniques de production requièrent de multiples étapes sous vide qui pèsent sur les coûts de production. Plusieurs laboratoires s'intéressent à l'amélioration du processus de fabrication.

Les cellules CIS représentent environ 0.5% de la production mondiale de cellules PV. Des entreprises telles que Global Solar (Tucson, Arizona) se spécialisent dans la production de cellules CIGS sur substrat de polymères flexibles. Très récemment, les fondateurs de Google ont investi massivement dans l'entreprise NanoSolar pour construire la plus grande usine de production de cellules solaires au monde en Californie près de San Jose. Ces cellules seront basées sur la technologie CIS.

II.4 Cellules multi-jonctions à haut rendement

Le développement des cellules solaires à haut rendement est motivé en priorité par les applications spatiales où les performances de la cellule priment sur les coûts de fabrication (alimentation des satellites ou sondes spatiales). On peut ainsi faire appel à une conception plus complexe et des matériaux différents. Il s'agit ainsi d'un domaine où la recherche de l'amélioration des rendements PV est très active.

Les cellules multi-jonctions se sont rapidement imposées comme la meilleure solution pour atteindre les plus hautes efficacités. La recherche américaine pour ce type de cellules a largement bénéficié du soutien de la NASA et de l'US AIR FORCE à travers des programmes spatiaux ou militaires. Ces travaux ont d'abord porté sur les cellules à double jonction GaAs/GaInP. Ces cellules comportent un empilement de deux jonctions, l'une réalisée en GaInP, matériau de gap élevé (1,85 eV) qui absorbe les photons de plus forte énergie, que l'on fait croître sur une autre cellule, fabriquée avec un matériau de gap plus faible comme GaAs (1,45 eV) et qui absorbe les photons d'énergie inférieure. Les cellules commerciales de GaAs/GaInP atteignent une efficacité de 22% avec un Voc de 2.06V.

C'est une cellule triple jonction GaInP/GaInAs/Ge (1.8eV/1.4eV/0.67eV) qui détient le record mondial de rendement avec 37.3% (NREL) [25]. En combinant les gaps de chacun des matériaux des jonctions empilées, cette architecture optimise la couverture du spectre solaire. Ces cellules sont produites industriellement par les compagnies américaines Spectrolab et Emcore avec des efficacités variant entre 26 et 28 %.

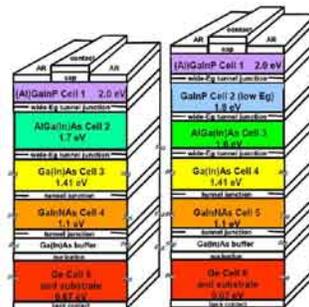


Figure 22
Cellules à 5 et 6 jonctions réalisées par le NREL. Ces prototypes ont une efficacité autour de 20%

Grâce à l'amélioration des matériaux et au développement de jonctions supplémentaires, la prochaine génération de cellules multi-jonctions dépassera probablement 40% d'efficacité. Des programmes de recherche sont en cours pour la réalisation de 4, 5 et 6 jonctions. Des prototypes de cellules à 6 jonctions ont été construits et testés au NREL. Les résultats préliminaires affichent une efficacité de 21% [25]. Les modèles théoriques prédisent une efficacité maximale de 55% pour des cellules à 3 jonctions et à plus de 56% pour 6 jonctions.

Acteurs de la recherche pour les cellules à haut rendement

Projets sur les cellules III-V multi-jonction concentrateurs

Entreprise et université sous contrat avec le NREL dans le cadre du HighPerf Project	Sujet de recherche
Spectrolab	Cellules multi-jonctions ultra-haute efficacité
Amonix	Démonstration d'un module multi-jonctions de plus de 33% d'efficacité
California Institute of Technology	Cellule solaire quadruple-jonctions avec un objectif de 40% de rendement
Georgia Institute of Technology	Nouveau dispositif PV haute performance avec des matériaux III-N
Ohio State	Multi-jonctions III-V optimisé
Sun Power Corporation	Etude d'un concentrateur sur un module SunPower
University of Delaware	Nouveau dispositif PV haute performance avec des matériaux III-N
Arizona State University	Modules PV concentrateur
Concentrating Technologies	Système PV de haute concentration dimensionable

Projets sur les cellules tandem couche mince polycristalline

Organisation sous contrat NREL	Titre de projet de recherche
Georgia Institute of Technology	Cellules Si couche mince inférieure pour structure en tandem
University of Delaware	PV haute performance – Cellules PV tandem couches minces
University of Toledo	Alliages II-IV et structures pour tandem PV
University of Florida	Identification des chemins critiques pour la fabrication de cellules tandem CGS/CIS haut rendement
University of Oregon	Identifier les propriétés électroniques pour améliorer les cellules PV couche mince Cu-Chalcopryte
Oregon State	Nouveaux matériaux pour le développement de cellules couche mince polycristallines
Light Spin Technologies	Nouvelles cellules couche mince polycristallines

Le National Center for Photovoltaics basé au NREL (Golden, Colorado) coordonne le programme 'High Performance PV Project' [26]. Ce programme s'intéresse à la recherche sur les concentrateurs multi-jonctions et les cellules couche mince multi-jonctions haute performance. Des équipes internes au NREL ainsi que des universités et des entreprises collaborent au projet. Le but du HighPerf PV Project est d'explorer les performances ultimes des technologies PV existantes. Les travaux visent à développer des modules commerciaux multi-jonctions avec une conversion effective des modules dépassant 30% et des modules couches minces tandem atteignant 20% d'efficacité. Le DARPA (Defense Advanced Research Project's Agency) conduit son propre programme de recherche sur des cellules à très haut rendement avec pour objectif d'atteindre 50% d'efficacité pour des applications militaires.

II.5 Cellules organiques

La « Troisième Génération » de cellules solaires utilise de nouveaux matériaux, en particulier les polymères, et de nouvelles techniques de fabrication qui structurent la matière à l'échelle du nanomètre. Bien qu'encore caractérisées par des efficacités relativement faibles par rapport à leurs équivalents inorganiques, les cellules organiques pourraient révolutionner le marché du PV grâce à leur faible coût de fabrication et leur facilité d'utilisation (flexibilité, légèreté). La recherche dans ce domaine est extrêmement active depuis plusieurs années et les avancées sont rapides. Les dernières cellules en polymères synthétisés en laboratoire convertissent la lumière avec une efficacité dépassant 5% tandis que les

cellules à colorants organiques dites de Grätzel atteignent 10%. Ces développements commencent à attirer l'intérêt des industriels et des entrepreneurs.

II.5.1 Cellules organiques polymère(s)

Depuis plusieurs années, les matériaux organiques à base d'oligomères ou de polymères conjugués sont beaucoup étudiés pour leurs propriétés optoélectroniques, plus particulièrement pour fabriquer des diodes électroluminescentes organiques (et des afficheurs à écrans plats), mais aussi dans l'optique d'applications photovoltaïques.

Le principe de base des cellules PV organiques est le transfert photo-induit d'un électron depuis un polymère semiconducteur donneur d'électrons vers un polymère (ou une molécule, comme le fullerène C60) accepteur d'électrons. Les charges doivent ensuite être transportées aux électrodes, et il faut donc que les matériaux utilisés présentent une bonne conductivité. Quand le matériau actif est un polymère conjugué, les charges photogénérées sont délocalisées et occupent les niveaux LUMO et HOMO (équivalents aux bandes de conduction et de valence des semiconducteurs). Le transport des charges est alors contrôlé par les défauts dans les chaînes moléculaires 1D ou par les sauts chaîne à chaîne (intermoléculaires). Si le matériau comporte des petites molécules, le transport est limité par le saut des porteurs de molécule en molécule. Dans tous les cas, la mobilité des porteurs reste très faible, et constitue l'un des facteurs limitant des dispositifs organiques. [27]

Dans un dispositif typique, la couche photoactive est prise en sandwich entre deux couches conductrices dont

l'une est transparente (ITO). L'épaisseur de la couche doit rester très faible (de l'ordre de 100 nm) en raison de la faible mobilité des porteurs, mais ceci limite la densité d'absorption des photons.

Deux types de structures sont utilisés pour la couche active :

- Superposition de couches de polymères d'une épaisseur comparable à la longueur de diffusion des excitons dans le matériau (de l'ordre de 20 nm). Malgré le coefficient d'absorption très élevé du polymère, cette architecture n'est pas optiquement dense, et une partie importante des photons n'est pas absorbée.
- Réseau interpénétré des deux polymères (ou polymère-molécules) pour que, dans tout le volume, il existe une interface donneur - accepteur à une distance égale ou inférieure à la longueur de diffusion des excitons, renforçant ainsi l'efficacité de dissociation. On parle d'hétérojonction en volume ('bulk heterojunction') (figure 22). Idéalement, chaque type de matériau doit être en contact avec une électrode pour assurer le transfert de charge vers le circuit extérieur.

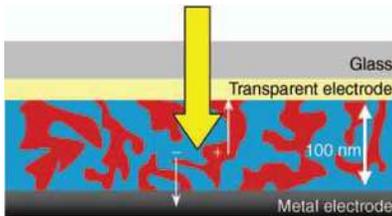


Figure 22
Hétérojonction en volume dans une cellule organique

Une limitation pénalisante vient de la très faible mobilité des électrons dans les polymères de type n, de sorte que l'on tend à les remplacer par de petites molécules conductrices pour assurer le transport des électrons. On améliore la conductivité électronique du milieu en mélangeant au polymère des petites molécules conjuguées (comme les fullerènes) à des concentrations qui permettent la formation de chemins de percolation pour le transport des électrons.

Le mélange polymère/fullerènes est le plus étudié car il produit les meilleurs résultats à l'heure actuelle. Les photons sont principalement absorbés par le polymère car les fullerènes absorbent faiblement dans le visible. Après dissociation de l'exciton à l'interface, les trous migrent vers l'anode transparente (ITO) en 'sautant' d'un segment de polymère à un autre et les électrons sont transportés vers la cathode métallique (Al) en sautant de fullerène en fullerène. Les meilleurs résultats sont obtenus avec un dérivé du fullerène, le PCBM, et avec le polymère PH3T qui dispose de l'un des gaps les plus bas pour les polymères conducteurs (1.9 eV) et d'une relativement 'bonne' mobilité pour les trous ($\sim 0.1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$). Un équipe de l'université du Nouveau-Mexique menée par le professeur Seamus Curran détient le record d'efficacité pour ce type de cellule avec 5.2%. D'autres couples donneur/accepteur sont étudiés tels que des associations polymères/quantum dots. De nouvelles géométries sont aussi à l'étude pour des cellules hybrides qui incorporent un polymère dans une matrice de matériau inorganique (voir prochain paragraphe).

De nombreux facteurs limitent l'efficacité des dispositifs organiques actuels. La taille du gap des polymères conducteurs n'est pas bien adaptée au spectre solaire, la recombinaison des porteurs de charges dans l'hétérojonction en volume reste importante et limite l'efficacité, la dégradation des matériaux au contact de l'oxygène, de l'humidité et sous l'effet de l'irradiation lumineuse limite sérieusement la durée de vie des cellules. Des solutions à tous ces problèmes sont à l'étude en laboratoire. On cherche par exemple à augmenter l'efficacité des cellules en développant des cellules hybrides dans lesquelles on introduit des canaux de conduction en matériau inorganique.



Figure 23
Prototype de cellule organique flexible et transparente

II. 5.2 Les cellules hybrides

Les cellules inorganiques ont un avantage majeur sur les cellules organiques : une mobilité intrinsèque des porteurs de charges largement supérieure, ce qui réduit les pertes de courant par recombinaison. On peut donc penser gagner en rendement en développant des structures hybrides dans lesquelles le transport de charges (et notamment des électrons) est partiellement assuré par un matériau semiconducteur inorganique.

Les premiers prototypes utilisent des films nanoporeux de matériaux semi-conducteurs tels que l'oxyde de titane (TiO_2), l'oxyde de zinc (ZnO_2), ou le sulfure de cadmium (CdS) ou des réseaux de nanotubes de carbone monoparoï, qui forment des nanostructures ordonnées dont on remplit les pores ou espaces libres avec un polymère conjugué. Ce type de structure donne aux porteurs de charge un chemin direct et continu jusqu'aux électrodes. Une autre approche consiste à incorporer dans le polymère des nanoparticules de semi-conducteur (ZnO, CdSe, CdS, CdTe). Outre qu'elles permettent d'améliorer le transport de charges, ces nanoparticules ont une grande efficacité d'absorption optique.

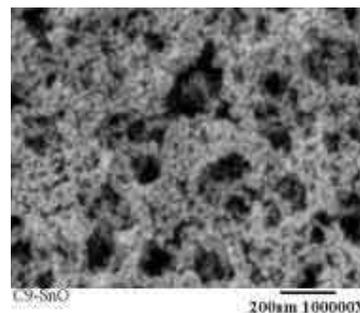


Figure 23
 SnO_2 nanoporeux dans lequel le polymère est injecté pour former une cellule hybride

II.5.3 Les cellules de Grätzel

Les cellules de Grätzel, qui portent le nom de leur inventeur suisse, fonctionnent selon un principe différent des cellules inorganiques car elles différencient les fonctions

d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques. Elles offrent, par leur simplicité de fabrication, l'espoir d'une réduction significative du prix de l'électricité solaire.

Les cellules de Grätzel sont constituées d'une couche mésoporeuse d'un oxyde semi-conducteur à large gap, le plus souvent l'oxyde de titane (TiO_2) (gap de 3.2eV) immergée dans un électrolyte liquide contenant un couple redox (comme I^-/I_3^-). Les grains de TiO_2 sont en contact les uns avec les autres et assurent la conduction des électrons jusqu'à l'électrode. Un colorant organique (le sensibilisateur) recouvre la surface des nano-cristaux de TiO_2 (figure 24). Sous illumination, le colorant absorbe les photons incidents et gagne suffisamment d'énergie pour pouvoir injecter un électron dans la bande de conduction du dioxyde de titane, qui migre ensuite dans la couche conductrice de TiO_2 jusqu'à l'électrode collectrice de courant. Après injection, la forme réduite du couple redox en solution régénère le colorant oxydé, alors que la forme oxydée du couple est réduite à la contre-électrode, bouclant ainsi le processus de régénération. La contre-électrode est généralement couverte de platine pour catalyser la réduction de l'électrolyte.

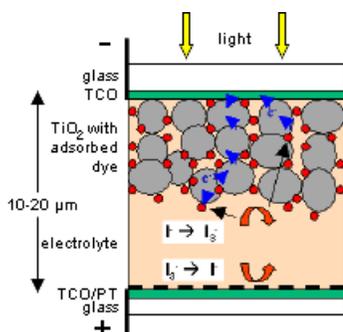


Figure 24
Cellule de Graetzel
Les nanoparticules de TiO_2 (gris) transfèrent les électrons à l'électrode en TCO après séparation des charges à l'interface avec les molécules de colorant (rouges). La réaction d'oxydoréduction du couple I^-/I_3^- complète le circuit.

La méthode standard de préparation des cellules de Grätzel consiste à superposer les différentes couches entre deux plaques de verre. L'utilisation de substrats flexibles est également possible. Les procédés de fabrication sont relativement simples et n'exigent pas d'importantes installations contrairement aux cellules inorganiques. L'efficacité obtenue est remarquable, le record actuel en

laboratoire étant de 10,8% soit plus de deux fois le rendement maximum d'une cellule organique à polymères. Cependant, pour pouvoir devenir réellement compétitives, les cellules de Grätzel devront maintenir des performances stables sur plusieurs années, voire plusieurs dizaines d'années. L'interface solide/liquide des cellules a tendance à se dégrader au fil du temps et des problèmes d'étanchéité se posent. Les chercheurs tentent de remplacer l'électrolyte liquide par un matériau solide, mais les derniers résultats obtenus dans ce sens font état d'une efficacité qui n'atteint que 3-4%.

Les cellules de Grätzel sont les premières cellules de troisième génération sur le point d'être commercialisées. L'entreprise Konarka, basée dans le Massachusetts, développe actuellement des applications commerciales avec ces cellules. Les premiers prototypes ressemblent à s'y méprendre à des films photographiques quant à leur finesse, légèreté et flexibilité. Les cellules peuvent être produites avec différents motifs et couleurs de surface ce qui laisse envisager des applications très variées, telles que des vêtements, des revêtements ou des camouflages photovoltaïques.



Figure 25
Cellules de Graetzel en bandes produites par Konarka

II.5.4 Recherche

La recherche sur les cellules solaires organiques aux Etats-Unis ne bénéficie pas d'un programme coordonné. La technologie est encore à l'état embryonnaire et principalement cantonné aux laboratoires universitaires. Les scientifiques qui s'intéressent à ces nouvelles cellules sont bien souvent des chimistes/polyméristes ayant une expérience des polymères conducteurs et des diodes organiques. Le développement récent des LED organiques avec de bon rendement est de bonne augure pour les cellules solaires qui fonctionnent sur le processus inverse (absorption au lieu d'émission).

Liste non exhaustive d'équipes universitaires travaillant sur des cellules solaires organiques

Université/Laboratoire	Responsable	Site internet	Thème(s) de recherche
UCLA	Pr Yang	http://www.seas.ucla.edu/yylabs/ourresearch.html	Etude des cellules P3HT/PCBM (polymère/polymères) et P3HT/fullerènes.
UCSC	Pr Carter	http://physics.ucsc.edu/~sacarter/index.shtml	Etude des cellules polymère/polymère et TiO_2 /polymères
Virginia Tech	Pr Heflin	http://www.phys.vt.edu/~rheflin/	Etude et amélioration de la morphologie de l'hétérojonction polymère/fullerènes
Wake Forest University	Pr Carroll	http://www.wfu.edu/academics/nanotech/carroll.html	Etude des cellules P3HT/C60 et PCBM/C60
NMSU	Pr Curran	http://nanophysics.nmsu.edu/Research.htm	Etude des cellules P3HT/C60 et PCBM/C60
UCSB	Pr Heeger	http://www.cpos.ucsb.edu/	Physique fondamentale de la génération d'excitons dans les cellules organiques
Argonne National Lab	Pr Wiederrecht	http://chemistry.anl.gov/staff/photosynthesis/wiederrecht.html	Nanophotonique et spectroscopie sur les cellules polymères
University of Arizona	Pr Armstrong	http://www.chem.arizona.edu/faculty/arms/group/	Cristaux liquides pour cellules photovoltaïques
Berkeley	Pr Alivisatos	http://www.cchem.berkeley.edu/pagrp/	Cellules hybrides polymère/tétrapodes inorganiques
Princeton	Pr Forrest	http://www.princeton.edu/~ocmweb/	Cellules photovoltaïques organiques haute efficacité
Cal of Tech - Pasadena	Pr Lewis	http://nsl.caltech.edu/research.html	TiO_2 nanocristallin pour cellules de Graetzel
Johns Hopkins University	Pr Meyer	http://www.jhu.edu/~chem/meyer/meyer.html	Etude du transfert d'électrons photo-induit pour cellules organiques
NREL			De la science de base aux dispositifs organiques

Conclusion

L'énergie solaire connaît un regain d'intérêt aux Etats-Unis. G. W. Bush a annoncé une augmentation de 130% des crédits fédéraux dédiés à la filière photovoltaïque pour 2007, plusieurs états ont mis en place des programmes d'incitations pour l'installations de panneaux solaires et une prise de conscience générale des questions environnementales et énergétiques s'installe progressivement aux Etats-Unis. Bien que devancé par le Japon et l'Allemagne, l'industrie photovoltaïque américaine reste un acteur majeur sur la scène internationale. Sa capacité à innover passe par une recherche de premier rang mondial qui est étroitement liée à l'industrie.

Grâce à une augmentation des capacités de production et un perfectionnement des techniques de fabrication, le prix des modules en silicium baisse et leurs performances augmentent constamment. En dépit de ces avancées, de nombreux scientifiques estiment que la clé du succès se trouve ailleurs, notamment dans les cellules organiques ou les cellules en couches minces. L'émergence récente de ces nouveaux types de cellules a relancé l'espoir de voir un jour émerger une technologie disruptive permettant une baisse drastique du coût du kWh de l'électricité solaire. Cependant il faudra au moins 10 ans avant que les efforts de recherche et développement puissent déboucher sur une telle technologie. La priorité des financements est toujours donnée aujourd'hui au développement de la filière silicium.

Enfin il faut noter que le budget du DOE consacré au photovoltaïque reste anecdotique par rapport aux sommes considérables investies dans les énergies fossiles et nucléaires. Seuls quelques états consacrent des sommes importantes au soutien de la filière. Ce qu'il manque aux Etats-Unis, c'est un programme fédéral d'incitations financières pour faire réellement décoller le photovoltaïque.

Bibliographie

- [1]. International Energy Agency (IEA) - IEA Photovoltaic Power Systems Programme - <http://www.iea-pvps.org/>
- [2]. Données issues d'un rapport de la société Strategies Unlimited - <http://su.pennnet.com/>
- [3]. Solar Energy Industries Association (SEIA) - <http://www.seia.org/>
- [4]. Marketbuzz 2006 report - <http://www.solarbuzz.com/>
- [5]. Estimations basés sur les données de la SEIA «Energy Alternatives and Jobs», Renewable Energy World, v. 3, n. 6, Nov/ Dec 2000, pp. 26-32.
- [6]. "Clean technologie" : voir <http://cleantech.com/index.cfm?pageSRC=CleantechDefined> pour une définition générale.
- [7]. «California's Cleantech Industry: Annual Venture Capital Investment Update 2006» – Environmental Entrepreneurs And Cleantech Venture Network LLC - <http://www.e2.org/ext/jsp/controller?docId=9699>
[aaa] <http://www.pv.unsw.edu.au/Research/3gp.asp>
- [8]. Présentation du Dr. Peter Fath avec la participation de «ISC Konstanz e.V.», Konstanz, Allemagne www.isc-konstanz.de GP Solar GmbH, Konstanz, Germany www.gpsolar.de
- [9]. International Energy Agency - http://www.oja-services.nl/iea-pvps/isr/download/2004_table01.pdf
- [10]. Electric Power Research Institute (EPRI) - Program on Technology Innovation: Nanotechnology Opportunities for the Electric Utility Enterprise - <http://www.epri.com/>
- [11] Rapport de l'Ambassade de France au Japon : " L'énergie photovoltaïque au Japon " – Olivier Georgel – 14/07/2005 - http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm05_046.htm
- [12]. 2005, Photon Int.
- [13]. Paul Maycock, PV news, Mars 2005
- [14]. International Energy Agency – "National Survey Report of PV Power Applications in the United States 2004" - <http://www.iea-pvps.org/countries/usa/index.htm>
- [15] University of New South Wales <http://www.pv.unsw.edu.au/Research/3gp.asp>
- [16] *Solar cell efficiency tables (version 27)*, Martin A. Green, Keith Emery, David L. King, Yoshihiro Hisikawa, Wilhelm Warta, University of New South Wales, Dec. 2005
- [17] Markets Monitor <http://www.marketsmonitor.com/category/IM017.html>
- [18] *The Status and Outlook of Solar Industry*, David E. Carlson, BP Solar
- [19] Solar Energy Industries Association (SEIA) <http://www.seia.org/getpdf.php?iid=101>
- [20] *Exploratory Research for New Solar Electric Technologies*, R. McConnel et Rick Matson, NREL
- [21] *Thin Film PV Partnership Annual Report 2005*, NREL
- [22] *Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells - A status Review* -, Xumming Deng, University of Toledo
- [23] *Advances in CdTe R&D at NREL*, Presentation X. Wu, NREL, Novembre 2005
- [24] *Properties of High-efficiency CIGS thin-film solar cells*, Kannan Ramanathan, James Keane and Rommel Noufi, NREL
- [25] *Bandgap Engineering in High Efficiency Multijunction Concentrator Cell*, N. H. Karam et al., NREL et Spectrolab
- [26] *High Performance Project Overview*, Martha Symko-Davies and Robert McConnell, NREL
<http://www.nrel.gov/highperformancepv/overview.html>
- [27] *Polymer-Fullerene Bulk Heterojunction*, René Jansen, Jan Hummelen, N. Sariciftci, Material Research Society Report 2005

ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES

NANOSCIENCES, MICROELECTRONIQUE,
MATERIAUX

Juin 2006

Pour vous abonner gratuitement à la lettre
ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES
et être informé en priorité de la disponibilité
des prochains numéros, il suffit d'envoyer un
courrier électronique à l'adresse:

subscribe.be.etatsunis@adit.fr

Vous recevrez en retour une confirmation
d'abonnement.

Directeur de la publication :
Michel Israël

Rédacteurs en chef :
Roland HERINO
Christophe LEROUGE

Rédacteurs :
Raphaël ALLEGRE
Rémi DELVILLE

Mise en page et Publication :
Rémi DELVILLE
Raphaël ALLEGRE

ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES
est une publication mensuelle de la Mission pour la Science
et la Technologie de l'Ambassade de France aux Etats-Unis,
dont la diffusion est assurée par l'ADIT

Vous y trouverez un archivage des anciens numéros de la lettre et
découvrirez aussi les autres publications de la Mission
pour la Science et la Technologie

-S&T Presse
-Flash TIC
-Revue santé Etats-Unis
-Revue de l'environnement
-Etats-Unis Espace
-Etats-Unis Microélectronique/ Matériaux
(archives précédant la fusion)

Retrouvez ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES ainsi que
toute l'actualité technologique aux Etats-Unis et dans le reste
du monde sur le site:

<http://www.bulletins-electroniques.com/>

DOSSIERS ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES

- Mars 2006 : Forum Energie et Nanotechnologie : stockage et distribution
- Février 2006 : Recherche et production industrielle des nanotubes de carbone - Recherche américaine : vers un modèle ouvert basé sur la collaboration
- Octobre 2005 : Sciences Physiques : Nanotechnologies et santé publique - A l'interface du nanomonde - De nouvelles cellules photovoltaïques - Du nouveau dans les semiconducteurs
- Août 2005 ; La photolithographie
- Février 2005 : L'électronique grand public aux Etats-Unis
- Juillet 2004 : L'International Roadmap for Semiconductors
- Mai 2004 : Les nanocomposites aux Etats-Unis

AUTRES RAPPORTS ETATS-UNIS

- Mars 2006 : Associations, accréditation, autorégulation : les règles du marché de l'enseignement supérieur américain
- Janv 2006 : Regards français sur la Silicon Valley
- Janv 2006 : Présence française dans le domaine High Tech dans la région de San Francisco
- Sept 2005 : Les efforts de Recherche et Développement en nanotechnologies aux USA
- Sept 2005 : La Politique Fédérale de R&D en Nanotechnologies aux Etats Unis
- Sept 2005 : Initiative jeunes entrepreneurs - Mobilité de jeunes chercheurs/entrepreneurs vers la France
- Sept 2005 : Enseignement universitaire et recherche : comparaison entre les USA, le Japon et la France
- Sept 2005 : Le développement technologique dans la région de San Francisco
- Sept 2005 : Le Devenir des Post-doctorants en Amérique du Nord
- Juin 2005 : Enquête sur le devenir des post-doctorants en Amérique du Nord
- Mai 2005 : La Politique de R&D en Nanotechnologies aux Etats-Unis
- Mars 2005 : La spintronique aux Etats-Unis - Un Aperçu des Recherches
- Jan 2005 : Nanoélectronique - USA
- Jan 2005 : Comment fonctionnent les universités américaines