

Modules photovoltaïques

Filières technologiques

par **Alain RICAUD**

Gérant de CYTHELIA Consultants (Savoie-Technolac)

Professeur associé à l'Université de Savoie

Ancien directeur de France-Photon (Angoulême),

Solarex Corp (Frederick, Md), et Solems SA (Palaiseau)

1. Présentation générale.....	D 3 940 — 2
1.1 Les énergies renouvelables	— 2
1.2 Le solaire photovoltaïque	— 2
1.3 Films minces ou silicium massif ?.....	— 2
1.4 Techniques de dépôt.....	— 3
2. Filières chalcogénures polycristallins	— 3
2.1 CdS/CdTe	— 3
2.1.1 L'hétérojonction CdS-CdTe	— 4
2.1.2 Méthodes de dépôt.....	— 5
2.1.3 Réponse spectrale	— 5
2.1.4 Performances	— 6
2.1.5 Toxicité.....	— 6
2.1.6 Production	— 6
2.2 Cu(In,Ga)Se ₂	— 6
2.2.1 Matériau CIS.....	— 7
2.2.2 Hétérojonction CIS-CdS	— 7
2.2.3 Méthodes de dépôt.....	— 7
2.2.4 Performances	— 8
2.2.5 Couche fenêtre	— 9
3. Filières silicium amorphe et microcristallin	— 9
3.1 Silicium amorphe (a-Si:H)	— 9
3.1.1 Méthode de dépôt	— 9
3.1.2 Structure.....	— 10
3.1.3 Réponse spectrale et performances.....	— 10
3.1.4 Effet Staebler-Wronski	— 10
3.1.5 Les modules	— 11
3.1.6 Coût/performance	— 13
3.2 Silicium microcristallin (μc-Si).....	— 14
3.2.1 Silicium polycristallin	— 15
3.2.2 Silicium micromorphe.....	— 15
4. Conclusion	— 16
Pour en savoir plus	Doc. D 3 940

Les films minces, qu'ils soient polycristallins, amorphes ou microcristallins, présentent des avantages certains dans la course à la production de modules solaires à grande échelle par leur capacité de produire de grandes plaques où l'interconnexion des cellules est intégrée, par leur consommation très réduite de matière et leur faible consommation énergétique durant le cycle de production.

1. Présentation générale

1.1 Les énergies renouvelables

L'utilisation massive des énergies fossiles et fissiles, même si elle a envahi tout le champ de l'activité des hommes d'aujourd'hui, reste un épiphénomène à l'échelle de l'histoire humaine ; elle apparaît à travers deux petits pics, l'un au cours du XIX^e siècle avec le charbon et la découverte des machines à vapeur, l'autre au XX^e siècle avec le pétrole, le gaz et le nucléaire. Sur la base des consommations actuelles et des taux de croissance, l'AIE a prédit la date prévisible de l'extinction des ressources stock : 2040 pour le gaz et le pétrole, 2080 pour le nucléaire classique et 2200 pour le charbon.

Or, pour servir les besoins des nations pauvres qui représentent plus des deux tiers de la population, le monde a besoin de se forger une nouvelle stratégie énergétique, qui pour respecter l'environnement global, devra d'abord reposer sur la sobriété et l'efficacité énergétique et inéluctablement utiliser les sources renouvelables.

L'irradiation solaire annuelle sur l'ensemble de la planète au niveau de la mer (754 millions de TWh) représente plus de 5 000 fois l'énergie que nous consommons en 2003 (environ 12 Gtep ou 139 000 TWh). Sur le long terme – environ 50 ans – le potentiel extractible des différentes sources d'énergie renouvelable pourrait en pratique couvrir la consommation mondiale actuelle :

- la photosynthèse au premier chef avec 6 Gtep (70 000 TWh) ;
- puis le vent avec 1,7 Gtep (20 000 TWh) ;
- la grande hydraulique 14 à 20 000 TWh, dont le potentiel théorique mondial est d'environ 40 000 TWh ;
- le solaire installé sur les toits des bâtiments industriels, commerciaux, tertiaires et domestiques 0,25 Gtep (2 900 TWh dont 2 300 de thermique et 600 de photovoltaïque) ;
- et la géothermie des couches profondes 0,2 Gtep (2 300 TWh).

Jusqu'à la fin des années 1980, les forces de changement venaient de réactions négatives aux deux chocs pétroliers. Depuis une quinzaine d'années, le changement est poussé par la nécessité positive de stabilisation du climat de la planète et depuis peu, il est tiré par les opportunités alléchantes d'investissements dans des systèmes de production d'énergie plus performants, plus propres et plus efficaces.

1.2 Le solaire photovoltaïque

L'une des plus belles inventions du XX^e siècle est presque passée inaperçue : il s'agit de la conversion directe de l'énergie lumineuse en électricité. Par l'étendue de ses applications et la diversité des services rendus par de petites sources autonomes d'électricité, le module solaire photovoltaïque n'a pas fini de nous étonner. Pour comprendre comment il fonctionne, ainsi que les systèmes qui lui sont associés, on se référera utilement à l'article [D 3 360] *Convertisseurs photovoltaïques*.

Jusqu'en 1997, la technologie modulaire du photovoltaïque pouvait laisser croire à son développement spontané par la conquête progressive de niches de marchés dans les pays développés, à travers des applications professionnelles (bornes téléphoniques d'appels d'urgence, télédétection, alarme, balisage, relais télécom, etc.). Les profits réalisés sur les premières niches permettant de développer au fur et à mesure, des niches plus vastes. En d'autres termes, à la différence des technologies lourdes et centralisées comme le nucléaire (EPR) ou comme la fusion thermonucléaire (ITER), l'industrie photovoltaïque n'aurait pas eu besoin de l'argent public et de l'État pour se développer...

À suivre ce raisonnement, avec des taux de croissance « naturels » de 15 % par an, il aurait fallu encore attendre 2015 pour que la production mondiale annuelle atteigne 1 000 MW/an. Autrement dit, la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire serait restée un gadget, ou au mieux l'énergie pour les sites isolés quand on n'a vraiment pas le choix !... Cette vision, hélas, est encore celle des décideurs en France.

Or le monde a bougé ; des actions politiques d'envergure nous sont venues du Japon, puis de l'Allemagne, et plus récemment de l'Union européenne. En 2003, pour la cinquième année consécutive, une croissance supérieure à 30 % portait les ventes mondiales à 740 MWc ! Et si l'Italie s'y met, nous serons à plus de 1 350 MWc en 2005. En 2004, le cumul des productions depuis 1978 s'établissait à 4 090 MWc dont 1 700 (42 %) produits au Japon, 940 (23 %) aux États-Unis, 1 070 (26 %) en Europe et 380 (9 %) essentiellement depuis l'Inde et l'Australie. Ce cumul représente en puissance crête installée, l'équivalent de quatre tranches nucléaires, mais en production réelle, seulement 4 900 GWh car le productible du solaire n'est que de 1 200 h par an au lieu de 6 600 h pour le nucléaire. Le prix de vente moyen des grands modules au silicium cristallin s'établissait entre 2,5 et 2,8 €/Wc dépendant des quantités. Il baisse de 20 % chaque fois que double la production cumulée. Le silicium cristallin est encore la technologie dominante avec plus de 80 % de part de marché.

La **puissance crête d'un module photovoltaïque** s'exprime en Wc (watt-crête). C'est la puissance que ce module peut fournir s'il est branché sur sa charge optimale et soumis à un éclaircissement solaire de 1 000 W/m² (**spectre AM 1.5**) alors que la température des cellules est de 25 °C.

Le **spectre AM 1.5** correspond au spectre de la lumière solaire après qu'elle ait traversé une épaisseur d'air pur correspondant à 1,5 fois l'épaisseur de l'atmosphère. Cette situation se présente en pratique lorsque le ciel est très clair et que le Soleil se trouve à une hauteur de 41,8° au-dessus de l'horizon.

1.3 Films minces ou silicium massif ?

Depuis la découverte des propriétés photovoltaïques du **silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H)** à l'université de Dundee, en 1975, les scientifiques et les industriels du monde entier ont déployé une intense activité dans le domaine des films minces. Cet engouement subi était dû principalement au fait que ces films ont un coefficient d'absorption de la lumière solaire de plusieurs ordres de grandeur supérieur à celui du silicium cristallin et qu'ils sont souvent produits directement à partir de la phase gazeuse. Ainsi, un module photovoltaïque en films minces peut-il être réalisé en une couche 400 fois plus mince qu'une cellule photovoltaïque cristalline et avec une surface 40 fois plus grande. Il semble naturel d'en conclure que les coûts devraient être beaucoup plus faibles, la disponibilité des matériaux de base plus grande et le procédé de fabrication des modules plus simple.

D'ailleurs, la démarche naturelle d'un chercheur, qui aujourd'hui reprendrait le travail à zéro pour développer une cellule photovoltaïque, consisterait certainement à partir d'une surface ou de films minces plutôt que d'un cristal fondu transformé en lingot et découpé en plaquettes au prix de trois mises en forme et de la perte de sciage de matériau précieux. A priori, cette hypothèse de départ semble la bonne, personne ne le conteste... Mais il se trouve que dans le monde des technologies, la vie réelle n'est pas à l'image de la logique scientifique. Le développement technologique est en réalité un long processus qui s'élabore à partir d'une chaîne de savoir-faire, où chaque génération ajoute sa contribution aux acquis développés par ses prédécesseurs.

Il en va ainsi pour la plupart des technologies où tout challenger part avec un handicap d'autant plus grand que la technologie à détrôner est plus mature.

Concernant l'industrie photovoltaïque, comment le silicium cristallin peut-il avoir autant de succès ? Sa largeur de bande interdite (son « gap ») est en effet, légèrement trop faible pour le spectre solaire, et le caractère indirect des transitions – en raison de la structure atomique du silicium cristallin – donnent un faible coefficient d'absorption nécessitant par conséquent une forte épaisseur (300 μm) de matériau pour absorber tout le spectre solaire.

Parce que, depuis le développement du transistor en 1957, le silicium cristallin est le semi-conducteur le mieux connu dans tous ses aspects, tant dans ses caractéristiques atomiques intimes que dans son usinage pour la production à grande échelle. Aussi peut-être, parce qu'au temps de la conquête spatiale américaine à la fin des années 1960, on ne savait pas faire les cellules solaires autrement qu'avec les techniques élaborées par l'industrie des semi-conducteurs. Parce qu'enfin la communauté des chercheurs dans ce domaine, se chiffre en dizaine de milliers... alors que dans le domaine des films minces, ils ne sont que quelques centaines d'individus.

Mais la règle économique n'a pas toujours le dernier mot. On se doute bien que les tubes cathodiques, qui ne cessent de voir leur coût diminuer au fur et à mesure que progressent les écrans plats en films minces, disparaîtront quand même un jour comme des dinosaures... Outre la limitation de la matière première (silicium de haute pureté), la technologie cristalline n'a pas encore renouvelé sa vision conceptuelle des équipements et des machines de traitement des cellules et modules au niveau de capacités d'usines de 100 MW/an. La plupart des équipements des installations actuelles de production ont un débit nominal de l'ordre de 1 à 10 MW/an. Seule la technique du sciage à fil a représenté un réel saut technologique permettant un réel changement d'échelle de la capacité de production et de la productivité.

Les **cinq raisons du succès actuel de la technologie du silicium cristallin massif** sont les suivantes :

- matériau semi-conducteur le mieux connu et savoir-faire bien répandu ;
- rendements photovoltaïques satisfaisants (modules de 13,5 %) ;
- sécurité dans les procédés de fabrication des cellules et modules ;
- rapport coût/rendement adéquat pour les segments de marché des sites isolés (le tiers du coût d'un système à 15 €/Wc) ;
- durabilité élevée de la structure cristalline (garanties généralisées à 25 ans par la plupart des constructeurs).

Les deux raisons pour lesquelles des limitations sont à prévoir sur le moyen terme sont :

- indisponibilité de la matière de base en volume important à une pureté et un coût raisonnable. Aucun procédé simplifié n'est parvenu à rivaliser avec le procédé Siemens, standard de fabrication du silicium électronique. Le photovoltaïque, dont les exigences techniques sont inférieures, utilise les déchets des usines électroniques : un gisement limité, faisant peser la crainte permanente d'une hausse des coûts (le prix de la charge de silicium solaire est passé de 6 €/kg en 1996 à 26 €/kg à la fin 1997) et même d'une pénurie, compte tenu du redémarrage de l'industrie des semi-conducteurs en 2004. Quelle industrie mature fonderait ses approvisionnements sur les poubelles d'une industrie plus noble ? Une industrie nouvelle nécessite d'être créée dès 2005 ;
- le format réduit de chaque élément (surface unitaire inférieure à 200 cm^2) et la capacité actuelle des équipements de production (environ 3 MWc par unité) limiteront la réduction des coûts à un niveau asymptotique autour de 1,5 €/Wc.

1.4 Techniques de dépôt

Un spectre très étendu de composés semi-conducteurs présente les caractères requis pour la conversion photovoltaïque.

Dans cet article, nous désignerons par **film mince toute structure ayant une épaisseur totale inférieure à 5 μm** .

Faisant le choix de matériaux à fort coefficient d'absorption, où les épaisseurs requises sont de l'ordre de quelques micromètres, nous nous contenterons d'étudier ici les plus performants.

Il existe de très nombreuses techniques de dépôt de films minces semi-conducteurs. Dans le tableau 1, nous avons rassemblé les techniques applicables à la production de modules photovoltaïques en les divisant en trois grandes catégories : les techniques physiques sous vide, les réactions chimiques en phase vapeur, les autres techniques (sérigraphie, bain chimique, dépôt électrolytique).

2. Filières chalcogénures polycristallins

Dans la **filière polycristalline**, deux options se détachent nettement depuis quelques années par leurs performances et leur simplicité de mise en œuvre : la filière CdTe et la filière CuInSe₂ (et sa variante Cu(In,Ga)Se₂ encore dénommée CIGS), toutes deux le plus souvent associées à une couche fenêtre au CdS.

Nous allons voir que les performances des matériaux polycristallins sont étroitement liées à la taille et à l'orientation des grains. Le type de conduction est en général gouverné par la composition chimique, notamment l'écart à la stœchiométrie, ce qui implique que le dopage des couches n'est le plus souvent pas nécessaire.

2.1 CdS/CdTe

Jusqu'à une date récente, il était admis que la filière au CdS/CdTe représentait l'approche la plus prometteuse pour les cellules de nouvelle génération. CdTe paraissait être un matériau idéal pour les cellules solaires en films minces pour au moins trois raisons :

- le gap d'énergie est de type direct : ainsi le coefficient d'absorption est élevé ($> 10^5 \text{ cm}^{-1}$ dans le visible) et la couche absorbante ne nécessite pas plus de quelques micromètres pour absorber 90 % du spectre solaire, autorisant par conséquent l'utilisation de matériaux relativement impurs dont la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ne dépasse pas quelques micromètres ;
- la valeur du gap $E_g = 1,45 \text{ eV}$ est idéale pour la conversion photovoltaïque du spectre solaire ;
- de nombreuses méthodes existent pour déposer CdTe avec une vitesse de dépôt très élevée tout en gardant une qualité raisonnable.

Depuis plus de trente ans que la recherche est active, les propriétés des films de CdS et de CdTe sont maintenant bien connues des chercheurs. Au moins huit techniques de dépôt de la couche active ont été envisagées :

- PVD (dépôt physique en phase vapeur) ;
- CVD (dépôt chimique en phase vapeur) ;
- CSVT (*Close space vapour transport*) ;
- ED (dépôt électrolytique) ;
- *Screen Printing* (sérigraphie) ;
- *Spray Pyrolysis* (vaporisation suivie de pyrolyse) ;
- *Hot Wall Epitaxy* (épitaxie en phase vapeur à courte distance) ;
- *Atomic Layer Epitaxy* (dépôt contrôlé de couches atomiques successives).

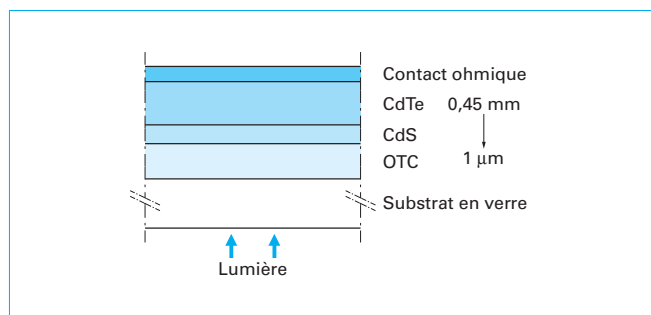
Tableau 1 – Les techniques de dépôt utilisées dans la production de modules en films minces

Méthode de dépôt	Sigle	a-Si:H	μc-Si	CdS	CIGS	CdTe
Techniques sous vide						
<i>Physical vapour deposition</i>	PVD				**	**
<i>Hot wall epitaxy</i>	HWE					**
<i>Close spaced sublimation</i>	CSS			*		**
<i>Sputter deposition</i>	SD	*			**	
<i>Reactive laser evaporation</i>	RLE	*				
<i>Electron beam evaporation</i>	EBE	*				
Réactions chimiques en phase vapeur						
<i>Chemical vapour deposition</i>	CVD			*		*
<i>Plasma enhanced CVD</i>	PECVD	***	***			
<i>Photo CVD</i>	PHCVD	*				
<i>Hot wire chemical vapour deposition</i>	HWCVD		*			
<i>Metal-organic chemical vapour deposition</i>	MOCVD					*
<i>Solid vapour reaction</i>	SVR					
<i>Closed space vapour transport</i>	CSVT					***
Autres procédés						
<i>Liquid phase epitaxy</i>	LPE		*			
<i>Atomic layer epitaxy</i>	ALE					*
<i>Zone melting recrystallisation</i>	ZMR		*			
<i>Chemical bath deposition (electroless)</i>	CBD			**	*	
<i>Spray pyrolysis</i>	SPL			*	*	*
<i>Electrodeposition</i>	ED			***	**	**
<i>Stacked layer reaction</i>	SLR					*
<i>Screen printing</i>	SPR				*	***

Les termes anglais utilisés par les chercheurs ont été maintenus :

- les méthodes qui sont déjà les plus communément utilisées sont repérées par *** ;
- les méthodes dans la phase préindustrielle par ** ;
- les méthodes encore au stade du laboratoire par *.

La figure 1 montre la structure de la cellule solaire la plus courante. Elle consiste en une hétérojonction n-CdS/p-CdTe. Le CdS du type N est déposé sur le verre couvert d'une couche d'OTC (oxyde transparent conducteur) tel que In_2O_3 ou SnO_2 .

**Figure 1 – Structure d'une cellule de base au CdS-CdTe**

2.1.1 L'hétérojonction CdS-CdTe

Comme le montre figure 2, la plupart des cellules au CdTe utilisent en superstrat une couche de CdS de type n, dont le gap très élevé, de 2,4 eV, lui permet d'agir comme fenêtre d'entrée de la lumière (pas d'activité photoélectrique) et comme barrière de potentiel (hétérojonction CdS-CdTe). En tant que partenaire de type n du CdTe de type p, le CdS a été utilisé dès 1970 dans les premières cellules solaires. La couche fenêtre a en général une épaisseur de quelques dixièmes de micromètres.

Le procédé de fabrication nécessite qu'au moins une étape se fasse à plus de 400 °C, qu'il s'agisse du dépôt de CdTe ou du recuit postérieur indispensable. Au-dessus de 450 °C, le composé est un solide extrêmement stable [1]. En effet, la matière condense de façon stœchiométrique tant que le substrat est maintenu au-dessus de cette température. Dans ce procédé haute température, les films sont en général naturellement de type p avec une concentration de porteurs p inférieure à 10^{15} cm^{-3} provenant d'un léger manque de Cd. Il est remarquable que CdS et CdTe puissent être déposés en utilisant les mêmes techniques. La dernière étape est la formation de l'électrode arrière.

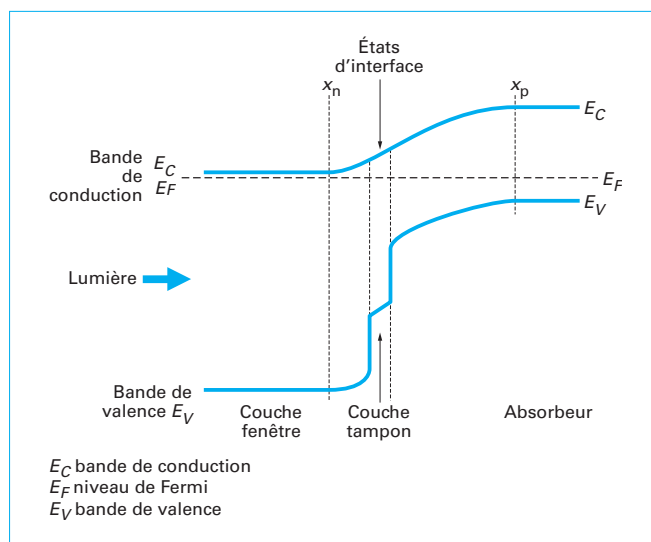


Figure 2 – Schéma des bandes dans l'hétérojonction CdS-CdTe

Sous illumination, les porteurs sont surtout générés dans la zone de charge d'espace du CdTe de type p. Donc la collecte des porteurs se fait par le champ plutôt que par la diffusion. Comme il n'y a presque pas de zone de charge d'espace dans le CdS qui est fortement dopé et parce que la durée de vie des porteurs minoritaires y est très courte, la couche CdS est en fait une couche morte du point de vue photovoltaïque. Il est souhaitable de minimiser son épaisseur pour réduire les pertes d'absorption optique.

2.1.2 Méthodes de dépôt

L'étape la plus importante est la formation de la couche absorbante en CdTe avec une épaisseur de 1,5 à 6 μm . De nombreuses techniques permettent de préparer des couches de type P de bonne cristallinité et de grande mobilité des électrons : sublimation/condensation (S), une modification de ce processus à savoir sublimation en espace clos (CSS), vaporisation chimique (CS), électrodéposition (ED), sérigraphie (SP), déposition de vapeur chimique (CVD) et sputtering. Chacune des méthodes recensées ci-dessus présente des avantages et des inconvénients qui n'ont pas la même valeur suivant que l'on se place du point de vue du chercheur de laboratoire ou de celui de « l'ingénieur méthodes » d'un centre de production. Bien qu'elles ne donnent pas les plus beaux cristaux, ce sont les méthodes du type CSS qui présentent de loin les plus grandes vitesses de dépôt (jusqu'à 1 $\mu\text{m/s}$ chez First Solar) et donc sont les plus intéressantes pour un investissement de production de masse.

2.1.2.1 Procédé de sérigraphie

Le procédé de sérigraphie (SPR) de Matsushita-Panasonic est d'une extrême simplicité puisqu'il met en œuvre cinq machines à sérigraphier et trois fours à passage :

- sérigraphie d'une couche d'Ag-In sur un support de verre borosilicaté suivi de la sérigraphie d'une pâte de CdS recuite sous atmosphère d'azote à 690 °C ;
- sérigraphie d'une pâte de CdTe recuite à 620 °C sous atmosphère d'azote ;
- sérigraphie d'une pâte de carbone suivie de la sérigraphie puis cuisson d'une couche d'Ag formant la grille positive face arrière.

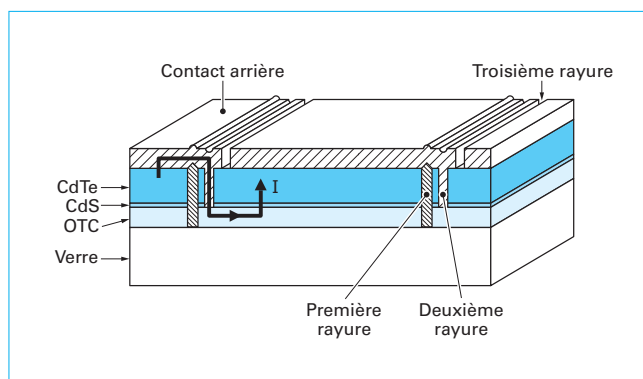


Figure 3 – Vue en coupe de l'interconnexion monolithique en tuiles d'un module CdTe

Compte tenu de la simplicité, les performances à 8,7 % sur 1 200 cm^2 peuvent être jugées comme relativement bonnes.

2.1.2.2 Procédé par électrodéposition

Le verre est recouvert d'un oxyde d'étain (SnO_2) déposé par CVD en très grande série dans un four de float par le fabricant de verre. La couche de CdS est déposée chimiquement par CBD (procédé « electroless ») à partir d'une solution aqueuse contenant de l'ammoniaque, qui complexe les ions Cd^{2+} et de la thio-urée comme source des ions soufre. L'épaisseur optimale est d'environ 80 nm ; les paramètres du dépôt sont faciles à contrôler. L'absorbeur est une couche de CdTe beaucoup plus lente et plus difficile à déposer. C'est une voie électrochimique contenant les ions Cd^{2+} et HTeO_2^+ , nécessitant une injection de courant de façon suffisamment homogène sur toute la surface pendant une durée relativement longue (6 h environ pour une couche de 2 μm) et suivie d'un recuit à 400 °C. Le changement d'échelle lors du passage du laboratoire au pilote a posé de sérieux problèmes d'homogénéité. On imagine les difficultés pour le passage en production sur des modules de 60 cm $\times$ 120 cm... Le contact ohmique peut être obtenu par différentes méthodes, toutes basées sur le fait qu'il faut enrichir la couche en Te. On mentionnera l'utilisation du Cu suivi d'un dépôt de Ni, mais on utilise aussi le carbone, suivi d'une évaporation d'Al et de Ni. Les interconnexions des cellules se font grâce à trois rayures laser comme indiqué sur la figure 3.

Les tests de vieillissement accéléré font apparaître une légère dégradation de la résistance série conduisant à une perte de rendement de 1 % après 1 000 h d'exposition.

2.1.3 Réponse spectrale

La figure 4 montre comment la réponse spectrale dépend des méthodes de dépôt. Les meilleurs résultats obtenus à ce jour l'ont été par l'équipe de T. L. Chu et Sh. S. Chu de l'université de « South Florida » qui ont déposé le CdS par CBD et le CdTe par CSS ; ils ont en outre ajouté un film de MgF_2 agissant comme antireflet sur la surface du verre [2]. Ils obtiennent :

- un facteur de qualité de $n = 1,6$;
- une densité de courant de saturation $J_s = 2 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$;
- une tension de circuit ouvert $V_{co} = 0,843 \text{ V}$;
- une tension d'utilisation $V_{pm} = 0,720 \text{ V}$;
- une densité de courant de court-circuit $J_{cc} = 25,1 \text{ mA/cm}^2$;
- un facteur de forme $FF = 0,745$;
- un rendement de 15,8 % sous un spectre AM 1.5.

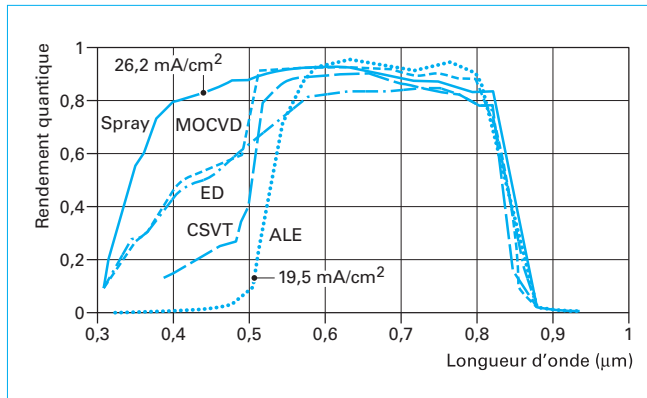


Figure 4 – Réponse spectrale de cellules CdTe mesurées au NREL et dépendant des méthodes de dépôt. Effet de l'épaisseur de la couche de CdS

2.1.4 Performances

Tous ces procédés ont conduit à des rendements compris entre 10 et 16 %. Les records mondiaux de 15,8 % (1993) et de 16,9 % (1997) ont été obtenus en utilisant la technique CSS (*Close Space Sublimation*) qui n'est en réalité qu'une modification d'un processus d'évaporation où la différence de température et la distance entre source et substrat sont minimisées. Le CdTe se sublime de façon congruente, ce qui permet de le vaporiser à partir de creusets ouverts. Ces rendements élevés ont été obtenus à une température de substrat d'environ 600 °C ce qui a exigé l'usage d'un substrat de verre en borosilicate. L'utilisation de verre ordinaire (« soda-lime ») moins cher a donné des rendements inférieurs (12 %) dus à la température de dépôt plus basse [3]. À cause de son taux élevé de dépôt d'environ 10 µm/min la technique CSS convient bien pour une production en série. En effet, ANTEC Solar GmbH et First Solar LLC (États-Unis) produisent de grands modules dans des unités de production de capacité supérieure à 10 MWc/an sur la base de cette technique. L'électrodéposition à partir de solutions aqueuses se fait à basse température avec des vitesses de dépôt de 0,06 µm/min typiquement (200 fois moins vite que la méthode CSS). Des rendements de 14 % pour les petites cellules et au-dessus de 8 % pour des modules de 30 × 30 cm² ont été obtenus [4]. Entre 1999 et 2001, BP Solar aux États-Unis, a pratiqué une production en série de CdTe en utilisant cette technologie. Le tableau 4 résume les activités industrielles principales.

2.1.5 Toxicité

Les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du cadmium limitent les tentatives de développement de cette filière. Pourtant, le Cd est un élément déjà utilisé dans l'industrie dans des proportions bien plus considérables ; il est produit à partir de l'extraction du Zn à raison de 20 000 t/an ; jusqu'à une date récente, il était très utilisé comme pigment des peintures rouges, et comme stabilisant pour le PVC. Il reste utilisé dans les accumulateurs au NiCd. Une usine fabriquant 2 MW de cellules photovoltaïques au CdTe en produirait seulement 60 kg/an (soit moins d'un gramme par module de 30 W).

L'élément Cd présente une toxicité certaine quand on s'y trouve exposé de façon chronique (dans le long terme, il peut provoquer des dysfonctionnements rénaux ou des cancers du poumon) ; les composés du Cd tels que CdO, CdCl₂, CdSO₄, sont très solubles dans l'organisme humain. Ils sont donc dangereux, surtout au cours du processus de fabrication. Les fumées de CdO en particulier peu-

vent être très nocives. Cependant, de nombreuses études ont montré que les modules peuvent être produits avec des risques industriels normaux et que des techniques convenables existent pour le traitement des déchets [5]. Certaines protections sont donc à prendre par les opérateurs dans le procédé de fabrication : manipulation des solutions, rejets, évacuation des fumées, d'où la nécessité de visites médicales à intervalles réguliers. En fait, dans le procédé ED, les opérateurs sont en général exposés à des concentrations 100 fois plus faible que la recommandation donnée par le HSE EH 40/93 (*Occupational exposure limits : ISBN 011 882080X*) qui est pour le Cd de 0,05 mg/m³ par 8 h d'exposition. La concentration létale est de 290 mg/m³ pendant 10 min.

Plusieurs recommandations issues de la Commission européenne ont limité la production et l'utilisation du Cd dans l'industrie. CdS et CdTe ne sont pas solubles dans l'organisme ; CdTe en particulier est un composé extrêmement stable qui ne présente pas de toxicité sous cette forme. Le produit fini sous forme de module encapsulé ne présente donc aucun danger, même en cas d'incendie. Le battage médiatique autour du Cd risque fort cependant d'empêcher le développement de cette filière sur la base d'arguments plus émotionnels que scientifiques, ce qui fait dire aux acteurs de la filière que le cadmium est plus politiquement dangereux que chimiquement toxique... Ces questions nécessitent une attention supplémentaire maintenant qu'il devient obligatoire de définir des stratégies de fin de vie ou de recyclage des modules [6].

2.1.6 Production

Dès 1995, l'extrapolation à court terme des données des petits pilotes de production en exploitation permettait d'espérer faire passer le coût usine de production de grands modules sous la barre symbolique des 3 €/Wc pour une unité de production de 3 MW de capacité avec un coût matière de l'ordre de 1,2 €/W et des amortissements de l'ordre de 0,8 €/W. Sur ce point, on peut utilement se référer à une étude comparative des coûts de production des trois filières films minces (a-Si:H, CdTe, CIS) réalisée par le consortium BP Solar, ZSW, PST, Cythelia dans le cadre d'un projet européen nommé APAS MUSIC FM en 1995-96 [7]. L'énergie consommée vient principalement de la fabrication du verre, ainsi le temps de retour énergétique n'est que de quelques mois.

2.2 Cu(In,Ga)Se₂

Le **diséléniure de cuivre et d'indium (CIS)** est un matériau composé de type I-III-VI, de structure chalcopyrite de plus en plus prometteur pour la production de masse de modules en films minces [8].

La structure de base de la cellule Cu(In,Ga)(Se)₂ [diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium : CIGS] est donnée figure 5.

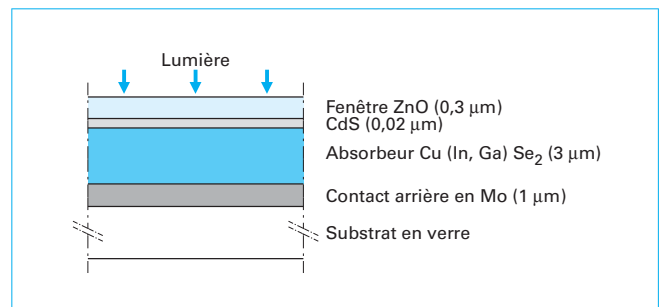


Figure 5 – Coupe de la cellule au CIGS

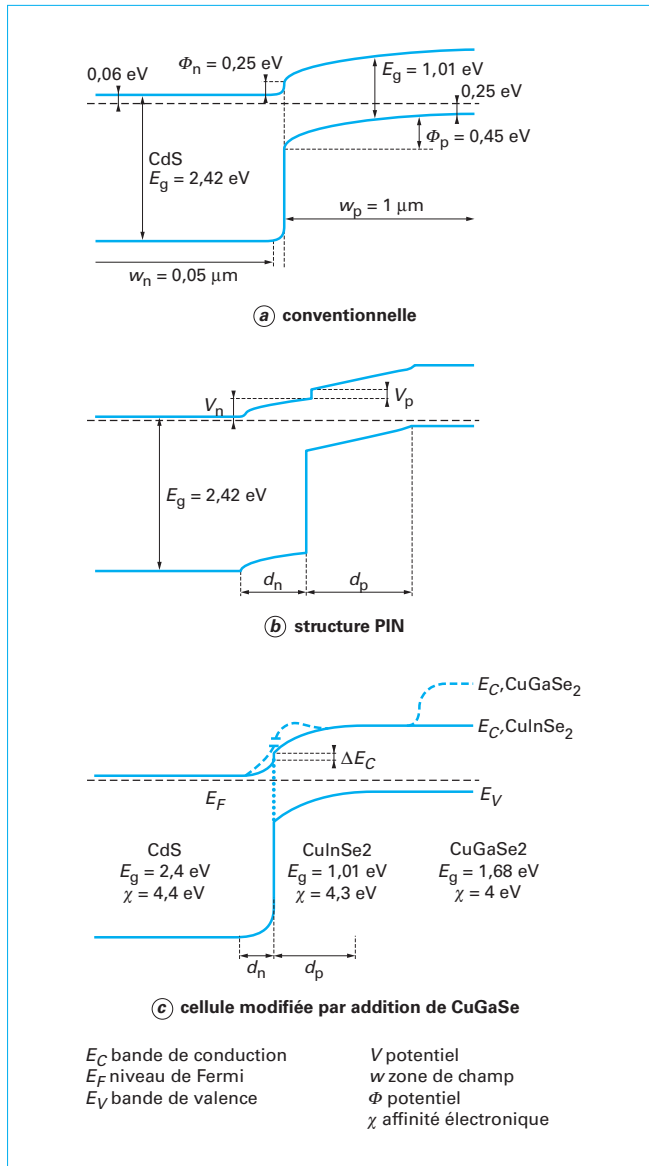


Figure 6 – Structure de bande de la cellule CIS/CdS

2.2.1 Matériau CIS

Contrairement aux matériaux III-V tels que GaAs ou InSb qui doivent être synthétisés dans des conditions d'extrême pureté, les matériaux de type II-VI comme CdTe ou I-III-VI comme CIS sont beaucoup plus tolérants aux impuretés. Le CIS est un matériau peu connu des physiciens du solide pour la plupart formés à l'école du silicium. Il y a effectivement un déficit de connaissances fondamentales et très peu de données de base. La communauté ne rassemble que 200 personnes dans le monde, mais comme disent les chercheurs qui ont choisi cette voie : « Mère Nature est avec nous... », le matériau est en effet plein de défauts mais ceux-ci ne sont pas actifs ou du moins ils sont « tamponnés ». Il y a en effet une autocompensation des centres tueurs, les écarts de composition ne se traduisent pas par des écarts dans le « gap », il y a un effet de photodopage

dans le CIS, un champ face arrière se forme naturellement à la surface du molybdène lorsqu'on dépose le CIS (croissance d'une couche interfaciale de MoSe₂ de quelques nanomètres avec un dopage P⁺), toutes propriétés autant heureuses qu'inattendues pour l'ingénieur process [9].

2.2.2 Hétérojonction CIS-CdS

Le schéma des bandes correspondant à la cellule au CIS-CdS est représenté figure 6.

Le rendement théorique de l'hétérojonction (n) CdS-(p) CuInSe₂ se situe autour de 25 %. Le coefficient d'absorption a à peu près le même seuil que celui du c-Si ($E_g = 1,02$ eV), mais il est 100 à 1 000 fois plus fort dans la gamme 1,1 à 2,6 eV ce qui permet une épaisseur d'absorbeur de 1 à 2 µm. La conductivité électrique est contrôlée par les écarts à la stœchiométrie, en particulier par le rapport Cu/In. Des mobilités d'électrons de 1 000 cm²/V et de trous de 20 cm²/V ont été mesurées dans le monocristal. Les niveaux accepteurs dominant sont liés aux lacunes de Cu et les niveaux donneurs aux lacunes de Se.

Des progrès considérables ont été accomplis dans le développement de cellules solaires chalcopyrites au cours des dernières années [10] [11] [12]. Une cellule à base de composés chalcopyrites ternaires du type Cu(Ga,In)Se₂ a atteint un rendement de 18,8 % au NREL. Les principales améliorations sont venues de l'élargissement de la bande interdite du CuInSe₂ par l'utilisation d'alliages du type CuGaSe₂ (**diséléniure de cuivre et de gallium : CGS**) et CuInSe₂. Il est, en outre, tout à fait envisageable de faire des cellules tandem de type CIS/CGS dont les gap respectifs sont de 1 eV et de 1,6 eV.

Un pas décisif est venu fortuitement, lorsqu'un chercheur en panne de verre « borosilicaté » a utilisé du verre ordinaire contenant du sodium et a trouvé ses rendements augmentés d'un point. Depuis tous les laboratoires ont confirmé l'influence bénéfique du sodium contenu dans les substrats de verre « float glass » sur la morphologie et les propriétés électroniques du CIS [13] [14] [15]. Des modèles simplifiés du mécanisme de croissance et le rôle des différentes phases du CIS ont largement contribué à la compréhension des séquences des procédés préalablement définis de façon empirique et ont été utiles dans l'élaboration de recettes plus raffinées [16] [17] [18]. Des modèles pour la structure de l'hétéro-interface ont aussi été développés et ont déclenché des recherches sur les composés à lacunes ordonnées (OVC, *Ordered Vacancy Compound*) et à défauts ordonnés (ODC, *Ordered Defects Compound*) [19].

Plusieurs laboratoires ont atteint des rendements supérieurs à 15 % et une bonne partie des problèmes liés à la production et au changement d'échelle ont été résolus [20]. À présent, les rendements pour des petits modules et des grands modules de plus de 1 000 cm² se situent entre 14 % et 11 %, respectivement (tableau 2).

2.2.3 Méthodes de dépôt

Parmi les très nombreuses méthodes de dépôt du CIS essayées, on notera :

- la coévaporation des trois éléments ;
- la sélénisation de films d'In et de Cu ;
- la pulvérisation cathodique de cibles prédéposées ;
- l'irradiation laser d'un empilement de films des trois éléments ;
- l'électrochimie ;
- la technique de pulvérisation par spray ;
- la sériographie.

Tableau 2 – Rendements, surfaces et procédés Cu(In,Ga)Se₂

Société	Pays	Procédé	Rendement cellule (%)	Rendement mini-module (%)	Surface (cm ²)	Rendement module (%)	Surface (cm ²)
ASC Uppsala	Suède	Coévaporation	16	14,7	20		
EPV [23]	États-Unis	Se(In,Ga) séquentiel				7,7	3 100
ISSET [24]	Allemagne	H ₂ Se séquentiel				7	1 900
Lockheed [25]	États-Unis	Sélénisation séquentielle	9,9				
Matsushita [26]	Japon	Coévaporation	17,6				
NREL	États-Unis	Coévaporation	18,8				
NSE [27]		Coévaporation		12,4	15		
Showa-Shell [28]	Japon	H ₂ Se séquentiel		14,2	52		
Siemens (US) [29]	États-Unis	H ₂ Se séquentiel		13,6	50	11,2 9,4	3 830 4 290
Siemens (D) [30]	Allemagne	RTP séquentiel		11,8	52		
Solarex [31]	États-Unis	Coévaporation		13,0	40		
ZSW [32]	Allemagne	Coévaporation	16,1	13,9	90	11,5	900
Würth Solar	Allemagne	Coévaporation		12,4		10	7 200
CISEL [21]	France	Dépôt chimique	11,3	6	900		
Solaronix [22]	Suisse	Sérigraphie	6,5				

La première méthode est celle qui a permis d'atteindre les plus hauts rendements. La technique de pulvérisation par spray est certainement très simple à mettre en œuvre, mais son rendement matière est assez faible. La technique de sérigraphie (apparue en 2003) est probablement l'une des plus attrayantes.

2.2.3.1 Coévaporation

Dans le dépôt par coévaporation du CIGS, chacune des quatre sources est contrôlée en température et calibrée quant à son émission. Sur un contact arrière en molybdène de 0,25 µm d'épaisseur déposé sur du verre ordinaire, maintenu à une température comprise entre 450 et 550 °C, sont déposés simultanément le Se dont le creuset est chauffé entre 300 et 320 °C, le Cu (1 360 °C), l'In (900 °C) et le Ga (990 °C). Dans la première phase du dépôt, la température du substrat est portée à 550 °C de sorte que la couche de CIGS est riche en Cu ; dans une deuxième phase, la température du substrat passe à 450 °C de sorte que la couche de CIGS est pauvre en Cu. Autrefois, on pensait que l'épaisseur de la couche active devait être au minimum de 3 µm pour des questions de taille de grains ; en fait, on a montré qu'elle peut être réduite à 1 ou 2 µm avec d'aussi bonnes performances.

La température maximale de dépôt est limitée par le ramollissement du verre ; on a en outre constaté que plus la température est élevée et plus s'élargit la distribution des rendements. La cellule est complétée par le dépôt de deux couches de CdS dont la dernière est parfois dopée à l'indium et d'une grille de contact en aluminium.

2.2.3.2 Pulvérisation réactive par spray

Les sources sont le chlorure d'indium, le chlorure cuivreux et la diméthylsélénio-urée. La structure est la même que précédemment : empilement de deux couches de CuInSe₂ suivie de deux couches de CdS dont la deuxième est dopée à l'indium. Les rendements obtenus ne dépassent malheureusement pas 4 %, ce qui a conduit à l'abandon de cette technique.

2.2.3.3 Dépôt électrolytique

La structure de la cellule est la même que celle utilisée classiquement [verre/Mo (0,5 µm)/CIGS(2 µm)/CdS par CBD (30-50 nm)/i-ZnO (sputtering)/n-ZnO:Al (sputtering)], sauf que l'absorbeur est fait par une combinaison d'un dépôt électrolytique suivi d'un recuit sous pression de sélénium à la place de la coévaporation classique. Le procédé a permis en outre la réalisation de matériaux de différentes gaps (1 à 1,6 eV). Actuellement, le rendement record est de 11,3 % sur 0,1 cm² et une valeur de 6 % a été obtenue sur des plaques de 30 × 30 cm² [21].

2.2.3.4 Sérigraphie

Les techniques de dépôt par sérigraphie offrent les avantages cumulés du faible coût des équipements et d'une utilisation à 100 % des matériaux. Peu s'y sont essayés. La société Solaronix (Aubonne, CH) a publié [22] des résultats préliminaires de cellules de 1 cm² à 4 % obtenus sur des plaquettes de 5 cm × 5 cm. Plus récemment, ils ont obtenu sur 0,7 cm² un rendement $\eta = 6,5$ % (tension de circuit ouvert $V_{co} = 418$ mV ; facteur de forme $FF = 0,52$; densité de courant de court-circuit $J_{cc} = 30$ mA/cm²) sur les mêmes substrats. La technique utilisée est la sérigraphie sur un verre recouvert de molybdène d'une pâte CIGS ; la sélénisation des couches dans une étuve à 500 °C, le dépôt de la couche fenêtre CdS par CBD et le dépôt de deux couches de ZnO par « sputtering ».

2.2.4 Performances

Les performances des différents dispositifs réalisés récemment sont résumées dans le tableau 2. Dans la plupart des cas, les rendements élevés sont obtenus sur des cellules photovoltaïques de laboratoire de très petite taille (< 1 cm²). Il est regrettable que la course au rendement continue de se faire sur ce terrain. Plus intéressantes sont les performances réalisées par l'Angstrom Solar Center de l'Université d'Uppsala qui avec un petit module de 9 cellules a obtenu un rendement de 16,5 % en mai 2000.

Le développement de matériaux de gap un peu plus élevé est d'un intérêt particulier. L'augmentation de la tension en circuit ouvert et la diminution de la densité de courant qui en résulteraient permettraient, d'une part, une réduction du nombre d'interconnexions et, d'autre part, éviteraient l'usage de couches d'oxydes transparents fortement conductrices. En outre, les pertes de rendement seraient moins prononcées en fonction de la température, ce qui représente un avantage concurrentiel dans les applications.

L'élargissement de la bande interdite par l'augmentation du taux de Ga dans le CIGS n'est possible que dans le cas du procédé d'évaporation, parce que l'on trouve toujours une ségrégation du Ga vers le contact arrière dans le procédé de sélénisation. Le CuInS_2 , ayant un gap de 1,5 eV, est perçu par une partie de la communauté comme particulièrement intéressant pour une production plus écologique de cellules où le sélénium est remplacé par le soufre. Dans les deux procédés (séquentiel et coévaporation), une bonne homogénéité est obtenue parce que le matériau est préparé riche en Cu et la stœchiométrie est obtenue par une attaque chimique autoajustante.

La famille des chalcopyrites est aussi particulièrement attractive parce qu'elle offre des semi-conducteurs de gaps compris entre 1 et 2,4 eV. Cela suggère le développement de cellules photovoltaïques multispectrales capables d'exploiter au mieux les composantes du spectre solaire. De plus hauts rendements sont obtenus par la combinaison de CuInSe_2 et de CuGaSe_2 dans une structure tandem. Le travail en cours devrait se concentrer sur la compréhension et le développement de la cellule avec verre en superstrat dont le rendement peut être amélioré considérablement. Les composants d'une telle cellule, tels que le contact arrière transparent pour la cellule en superstrat ou les jonctions tunnel sont développés [33].

2.2.5 Couche fenêtre

Une couche fenêtre de CdS est normalement utilisée, le plus souvent déposé par CBD (dépôt chimique). Les inconvénients associés à cette couche sont : les pertes d'absorption, un décalage de bande de conduction avec les chalcopyrites de plus grand gap et la toxicité du Cd. De plus, certains pensent qu'il est souhaitable de trouver un substitut au procédé CBD parce que ce dernier est difficilement intégrable dans un procédé en ligne.

À cause des problèmes d'environnement suscités par la présence – même en très faible quantité – de Cd dans la couche fenêtre, la communauté des chercheurs est en quête de matériaux inoffensifs, tels que les oxydes transparents semi-conducteurs suivants : SnO_2 , Sn(S, O)_2 , In_2S_3 , In(OH)_3 , In(OH, S) , ZnS , ZnSe , ZnInSe , ZnO , Zn(O, OH, S) , ZrO_2 . Le bon alignement des bandes à l'interface est une condition préalable importante dans le choix des couches alternatives [34]. Jusqu'en 2001, aucune d'entre elles ne permettait d'obtenir les performances que donne une bonne couche de CdS. Le groupe français du LECA/ENSCP (D. Lincot et J.F. Guillemoles) a récemment pu démontrer que le remplacement de CdS par le sulfure d'indium (In_2S_3) déposé par ALCVD (*Atomic layer chemical vapour deposition*) : une technique de CVD séquentielle permet non seulement de palier ces problèmes mais également d'obtenir des cellules solaires de haut rendement (16,4 %), ce qui est une valeur record au niveau mondial pour les cellules solaires sans cadmium, préparées par voie sèche.

Le NREL (National Renewable Energy Laboratory) a annoncé en janvier 2003 deux nouveaux records pour les cellules CIGS. Une cellule de $0,408 \text{ cm}^2$ atteint 19,2 % de rendement AM 1.5. Le deuxième record concerne une cellule de même type mais qui n'utilise pas de cadmium dans la couche fenêtre. Le rendement mesuré pour les mêmes conditions est alors de 18,6 %. La couche de CdS est remplacée par une couche ZnS déposée suivant un procédé développé par l'Université Aoyama Gakuin de Tokyo. L'utilisation du ZnS, en plus d'éviter le cadmium toxique, a l'avantage d'une bande interdite plus large (3,2 eV contre 2,4 eV) : ce qui permet des densités de courants plus fortes.

3. Filières silicium amorphe et microcristallin

Les **matériaux amorphes**, à la différence des cristaux ne possèdent pas d'organisation atomique régulière, du moins à longue distance. En fait un ordre local est préservé. Dans le silicium amorphe, les liaisons chimiques entre un atome Si et ses plus proches voisins satisfont la configuration tétraédrique caractéristique de l'hybridation sp^3 où chaque atome est lié à ses quatre voisins (distants de 0,23 nm) par une liaison covalente Si-Si. Dans les composés covalents et les chalcogénures amorphes, la longueur des liaisons interatomiques et les angles de ces liaisons varient légèrement autour des valeurs moyennes qui sont celles du cristal. Cette dispersion augmente avec la distance, de sorte que dès que la distance à un atome donné dépasse quatre à cinq distances interatomiques, les positions sont aléatoirement distribuées et une fraction importante des liaisons de covalence sont coupées, donc des électrons sont non appariés. On dit de tels atomes qu'ils présentent une liaison pendante « dangling bond ». Cette liaison pendante conditionne l'essentiel du comportement du matériau. Un second électron peut aisément s'y fixer, créant un centre chargé négativement ; l'électron célibataire peut au contraire s'échapper, laissant un centre chargé positivement. On dit que la liaison brisée présente un caractère amphotère.

3.1 Silicium amorphe (a-Si:H)

Le a-Si produit sous vide ou par des méthodes de pulvérisation cathodique contient tellement de défauts que les états localisés dans la bande interdite interdisent son dopage. Des films minces au silicium amorphe ont été réalisés dès 1989 par la méthode de décharge électroluminescente (*glow discharge*) [34].

Dans le procédé de décharge électroluminescente, la présence de 5 à 15 % d'hydrogène permet, grâce à la petite taille de cet atome de saturer les liaisons non satisfaites, réduisant par là même la densité d'états localisés dans la bande interdite.

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) (figure 7) s'est fait connaître par l'annonce de W.E. Spear et P.E. Lecomber de l'Université de Dundee [Solid State Comm. 17 (1975) 1193] qu'il était possible de contrôler le dopage N ou P à condition d'ajouter de l'hydrogène pendant le dépôt. Dès 1977, David Carlson et l'équipe de RCA proclamaient qu'une cellule solaire de 5,5 % avait été réalisée avec un matériau en film mince extrêmement économique. Depuis d'autres méthodes de saturation des liaisons pendantes ont été testées, notamment l'utilisation du fluor (cellules à 6,5 % par Ovshinsky dès 1980). Vint ensuite la période commerciale du marché des calculettes solaires avec Sanyo, Tayio-Yuden et Kaneka au début des années 1980, et des améliorations successives du procédé qui permirent de passer en 15 ans d'un rendement de 4 à 8 %. Plus récemment le dopage de la face d'entrée par le carbone, puis le développement des jonctions tandem PIN-PIN et des jonctions triples dont la dernière est dopée au germanium ont permis d'atteindre des rendements de 12 % au laboratoire.

3.1.1 Méthode de dépôt

La méthode la plus courante de dépôt du silicium amorphe est la décomposition du silane en phase vapeur par une décharge électrique (un champ radiofréquence), encore appelée PECVD (pour *plasma enhanced chemical vapour deposition*) (figure 8). Le gaz est envoyé à faible pression (13 à 1 300 Pa) dans une enceinte à vide propre, contenant deux électrodes. Pour une tension suffisante, une décharge électrique s'établit entre les électrodes conduisant à la

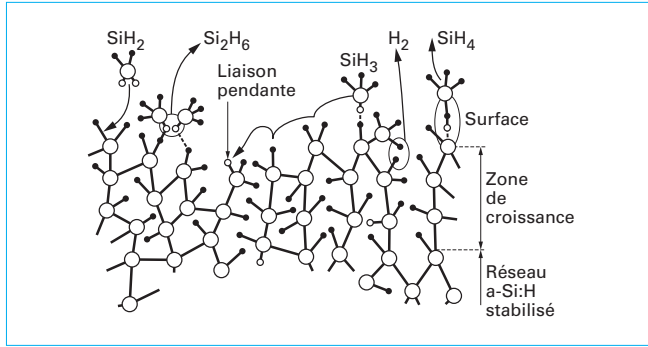


Figure 7 – Structure du silicium amorphe hydrogéné

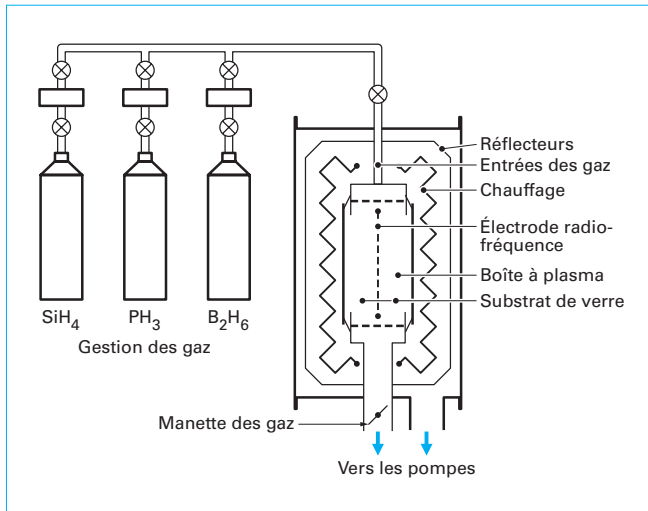


Figure 8 – Schéma de dépôt PECVD dans une boîte à plasma d'un module au a-Si:H

décomposition du silane en éléments chimiques très actifs : radicaux Si, Si-H, Si-H₂, Si-H₃ accompagnés des espèces ioniques correspondantes, Si₄⁺, Si-H₃⁺, Si-H₂⁺ et Si-H₂⁺. Le plasma contient aussi des électrons et des ions négatifs qui assurent la neutralité électrique globale.

Ces éléments chimiques actifs ne demandent qu'à réagir par collisions avec les molécules de silane ou tout autre élément, donnant lieu à des réactions de condensation en oligomères contenant deux ou plusieurs atomes de silicium. Ces éléments, monomères ou oligomères réagissent avec le substrat présent en formant un film mince de silicium amorphe hydrogéné qui croît à la vitesse de quelques dixièmes de nanomètre par seconde.

Les qualités mécaniques et électroniques dépendent de très nombreux paramètres en général optimisés de façon semi-empirique qui dépendent eux mêmes de la géométrie et du type de machine de dépôt. On contrôle en général le niveau de vide, la pression et le débit des gaz réactifs, la puissance électrique et la tension de la décharge, la fréquence de l'excitation électrique, la nature et la température du substrat, et la durée de chaque phase du dépôt.

Les fréquences électriques les plus courantes sont le continu, la radiofréquence à 13,5 MHz, ou les micro-ondes (915 MHz et 2,45 GHz). La température optimale de substrat se situe entre 180 et 300 °C. Aux températures trop basses, les réarrangements chimiques de surface ne sont pas assez rapides et aux trop hautes températures, l'hydrogène ne reste pas dans la couche.

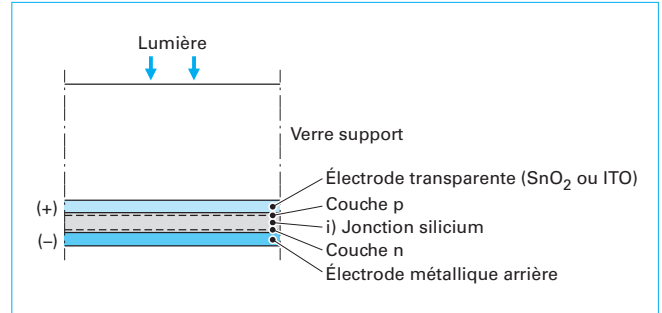


Figure 9 – Structure d'une cellule de type PIN au silicium amorphe avec verre en superstrat

3.1.2 Structure

La structure est en général de type PIN (figure 9). Pour optimiser chacune des couches, on mélange au silane les hydrides correspondants : méthane ou éthylène pour la couche frontale carbonée, diborane (B₂H₆) ou triméthylbore (B(CH₃)₃) pour la couche de type P et phosphine (PH₃) pour la couche de type N. Le silane, pour la couche intrinsèque est introduit pur ou dilué avec H₂, avec He ou avec Ar, avec un débit de l'ordre de 10 à 30 cm³/min (dans les conditions standard).

■ Carbone

Les atomes de carbone, petits et légers, s'ils sont introduits sous forme de méthane (CH₄) mélangé au silane (SiH₄), en proportion x, vont créer des liaisons fortes, d'où une **tendance à élargir le gap**. Le a-Si_{1-x}C_x est donc utilisé comme fenêtre dans les photopiles PIN.

■ Germanium

Les atomes de germanium, encombrants et lourds, s'ils sont introduits sous forme de germane (GeH₄) mélangé au silane (SiH₄), en proportion x, vont créer des liaisons faibles, d'où une **tendance à diminuer la hauteur du gap**. Cette propriété est mise à profit dans les jonctions tandem et dans les jonctions triples où la dernière cellule a un gap de l'ordre de 1,2 eV.

3.1.3 Réponse spectrale et performances

La figure 10 représente les courbes de réponse spectrales de l'œil humain, d'une photopile au silicium amorphe qui encadre parfaitement la précédente, et d'une photopile au silicium cristallin, dont le maximum de sensibilité est fortement décalé vers le rouge par rapport aux deux premiers.

La comparaison des caractéristiques d'une cellule simple jonction PIN et d'une cellule au c-Si est donné sur la figure 11.

3.1.4 Effet Staebler-Wronski

Cet effet tristement célèbre de dégradation sous lumière fut découvert par Staebler et Wronski de RCA dès 1977. Il se caractérise essentiellement par la diminution lente de la photoconductivité σ_{ph} sous fort éclaircissement. Il y a aussi diminution de la conductivité dans l'obscurité σ_d . Bien qu'il reste mal expliqué par la communauté des chercheurs, on peut le caractériser de la façon suivante :

- dans les films intrinsèques la photoconductivité sous illumination peut diminuer d'un facteur 10 ;
- l'effet n'apparaît pas dans les films fortement dopés au bore, au phosphore ou à l'arsenic ;
- les propriétés optiques du matériau ne sont pas affectées ;

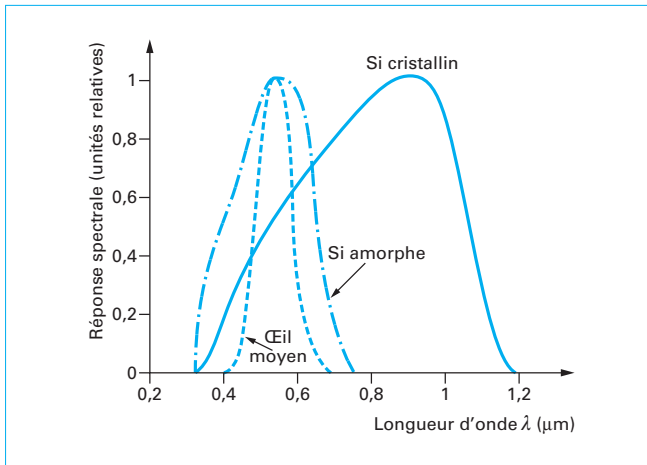


Figure 10 – Courbes de réponse spectrales comparées de l'œil humain, d'une photopile au silicium cristallin et au silicium amorphe

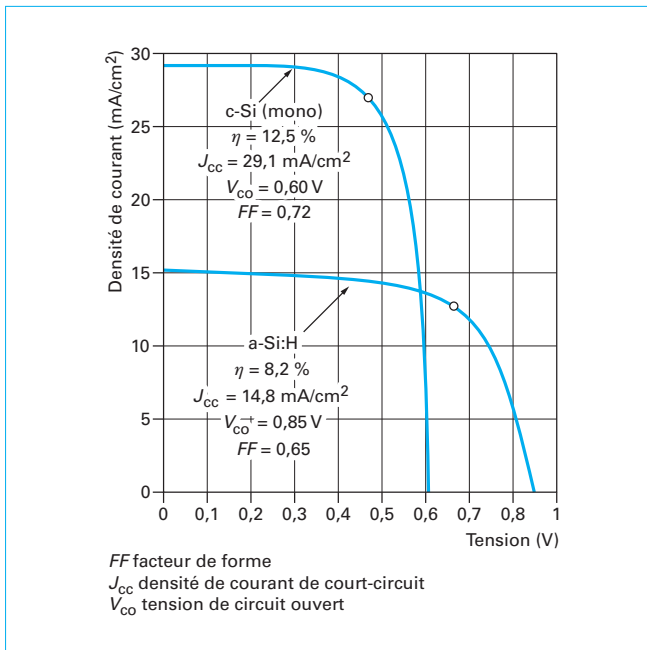


Figure 11 – Comparaison des caractéristiques $i(V)$ type d'une cellule simple jonction (PIN) a-Si:H et d'une cellule au c-Si

- la diminution de σ_d peut signifier un décalage du niveau de Fermi vers le milieu de la bande interdite ;
- la dilution de l'hydrogène accroît la stabilité ;
- les cellules solaires à simple jonction ont une décroissance logarithmique de leur rendement en fonction du temps. L'amplitude de la dégradation est une fonction croissante de l'épaisseur de la couche intrinsèque. Elle est typiquement de 25 % à saturation ;
- le taux de dégradation est proportionnel au carré de l'intensité du flux lumineux ;
- l'effet est réversible ; la valeur initiale de la conductivité peut être rétablie par un recuit de quelques heures à 150 °C, ou par une polarisation en inverse de 24 heures ;

— il y a saturation de la dégradation au bout d'un temps d'exposition qui dépend des conditions de dépôt. Une explication de la saturation de la dégradation a été donnée par Zong Yen Wu et al. de Solems en 1991.

L'effet de dégradation sous lumière a parasité le développement industriel de la filière a-Si:H pendant 15 ans. La mesure systématique des performances électriques de modules au a-Si:H testés pendant six années consécutives à la fin des années 1980 au centre expérimental du GENEC à Cadarache a apporté des résultats intéressants. La bonne nouvelle, c'est que la dégradation sous lumière sature dès les premiers mois d'exposition. Des modules à simple jonction bien encapsulés (pas de dégradation atmosphérique) perdent 20 à 25 % de leur puissance initiale et des modules à double jonction, seulement 10 à 15 %. Une autre caractéristique intéressante des modules au a-Si:H, révélée par cette étude expérimentale sur une longue période, est leur capacité à s'autoréparer pendant la période d'été. En fait, un module à simple jonction, dont la puissance initiale serait de 100 W, ne fera plus que 75 W l'hiver suivant mais remontera à 90 W l'été suivant. À l'opposé des modules traditionnels, il fonctionne donc comme s'il avait un coefficient de température positif.

3.1.5 Les modules

3.1.5.1 Modules à jonctions multiples

La contrainte de la dégradation sous lumière a poussé les chercheurs et les industriels à trouver des astuces dans l'architecture du dispositif pour minimiser cet effet. Les cellules à jonction multiple, en plus de leur rendement quantique étendu dans le rouge, répondent à ce souci ; en effet, on y multiplie le nombre de jonctions avec des matériaux à gap légèrement différents tout en réduisant l'épaisseur de chacune des couches. Les difficultés à surmonter sont : un bon appariement des courants, puisque les cellules sont empilées en série (c'est donc la cellule la plus mauvaise qui impose son courant). Typiquement les épaisseurs optimales pour une jonction tandem sont 60 nm pour la couche i_1 , et 300 nm pour la couche i_2 . Il faut aussi, pour réaliser les contacts intermédiaires, des interfaces fortement recombinantes et transparentes, le plus souvent réalisées avec du silicium microcristallin (figure 12).

Exemple : Solarex Millennia USA, 1997, tandem a-Si:H, MST 56, $\eta_{ini} = 8,21 \%$, $\eta_{stab} = 6,95 \%$, surface $S = 8\,052 \text{ cm}^2$, masse $m = 33 \text{ kg}$ (1,7 W/kg), $P_{max} = 56 \text{ Wc}$, $I_{cc} = 0,87 \text{ A}$ (6,49 mA/cm²), tension de circuit ouvert $V_{co} = 102 \text{ V}$ (1,7 V/cell).

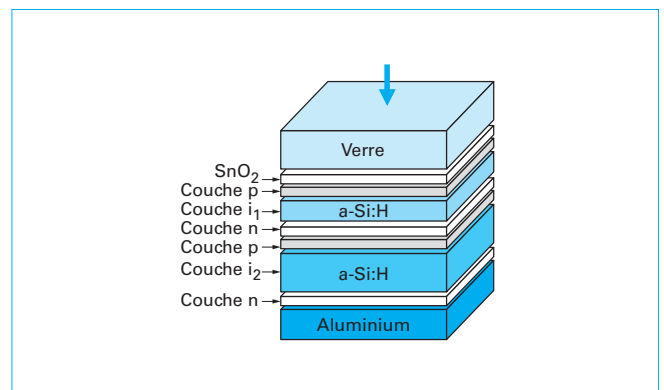


Figure 12 – Modules à jonction tandem avec superstrat en verre

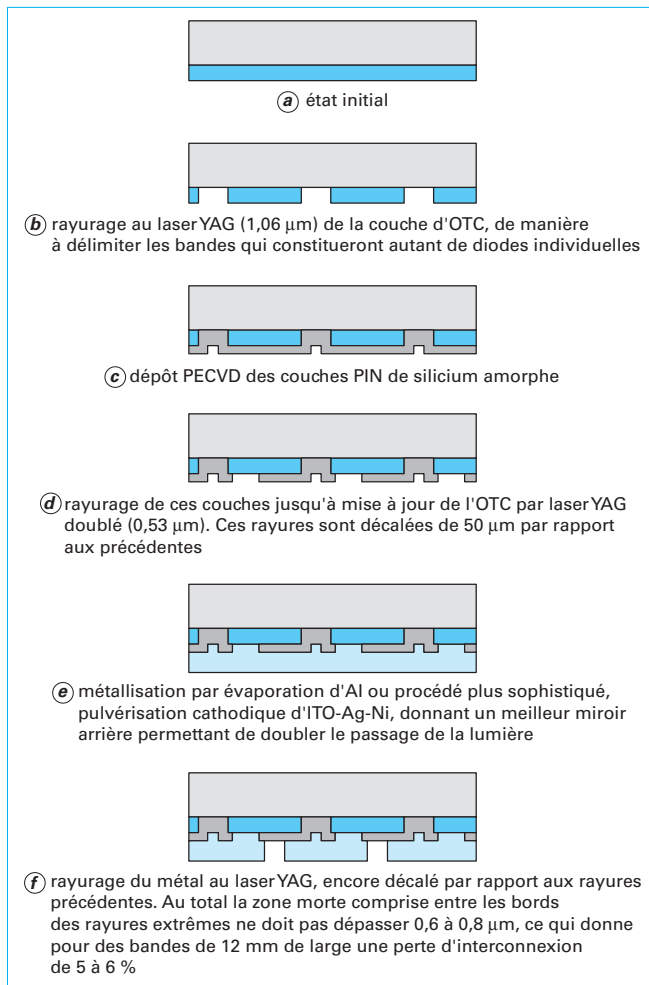


Figure 13 – Interconnexion monolithique en tuiles d'un module au a-Si:H avec superstrat en verre

3.1.5.2 Interconnexion des cellules

La méthode la plus simple de mise en série des diodes PIN est l'interconnexion en tuiles.

La réalisation d'un module comprend les opérations décrites sur la figure 13.

3.1.5.3 Substrats

Les substrats, supports mécaniques nécessaires de ces couches minces sont, soit en avant de la traversée de la lumière (superstrat de verre) soit en arrière (substrat semi-rigide : acier inoxydable, aluminium ou substrat souple : polyimide, *Kapton*).

3.1.5.3.1 Superstrats transparents

Le verre est aussi transparent que possible (extra-blanc/« low iron content ») et doit présenter une résistance mécanique compatible avec les contraintes atmosphériques extérieures (grêle, vents de sable). Le verre trempé thermiquement ne convient pas car il doit subir un traitement thermique ultérieur au moment du dépôt de l'oxyde transparent conducteur qui se fait le plus souvent par des procédés pyrolytiques vers 500 à 600 °C, ce qui a pour effet d'annuler l'effet de la trempe.

L'OTC (oxyde transparent conducteur) est en général de l'oxyde d'étain (SnO_2) ou de l'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO). Ces oxydes sont des semi-conducteurs à grand gap convenablement dopés pour présenter un **facteur de mérite** (produit de l'absorption par la résistance au carré) proche de l'unité. Les OTC ont de manière générale au moins trois fonctions :

- **couche conductrice** : on veut une résistance par carré inférieure à 10 ohms pour les applications en lumière extérieure et de l'ordre de 100 à 200 ohms pour les applications en lumière d'intérieur ;

- **couche barrière de protection chimique** : les dépôts de a-Si:H sur le verre se heurtent au problème de la contamination de la couche P par les impuretés, notamment les alcalins du type sodium (Na) dont la mobilité est grande et qui se trouvent en grande quantité dans les verres de qualité ordinaire (sodocalcique). Il a été démontré que l'alumine est un oxyde très performant pour découpler chimiquement le verre et l'OTC ;

- **couche antireflet/anticoleur** : au problème classique de la réflexion provenant du saut d'indice, il vient s'ajouter dans les systèmes à couches minces multiples, le problème des interférences donnant lieu à des irisations colorées caractéristiques des photodiodes dont la couche d'OTC a une épaisseur comprise entre 0,1 et 1 μm . Pour pallier ce phénomène, on choisit une couche d'indice intermédiaire entre celui de l'OTC et celui du verre (1,7) dont l'épaisseur vaut environ 80 nm pour faire un quart d'onde. Là aussi, l'alumine est un bon candidat.

3.1.5.3.2 Substrats opaques

Par rapport aux superstrats, l'avantage des substrats est que l'on peut s'affranchir de la transparence en faisant la diode à l'envers en commençant par la métallisation arrière, la dernière étape étant le dépôt d'une couche de ZnO à basse température (180 °C).

On peut utiliser des substrats polyimides. Le procédé utilise d'un bout à l'autre l'avantage que procure le support en rouleau. Un film polyimide de 13 pouces de large et de 50 μm d'épaisseur peut être transformé en un module de 30 m de long. Les étapes du procédé de « dépôt à l'envers » sont décrites dans la figure 14.

3.1.5.4 Modules souples sur superstrat en acier inoxydable

D'autres fabricants utilisent aussi la technique du « dépôt à l'envers » sur un substrat sous forme de rouleau en acier inoxydable à défillement continu ou sur substrat d'aluminium (figure 15).

Exemple : Unisolar USA, 1998, jonction triple a-Si:H/a-Si:Ge:H, US 64, $\eta_{\text{ini}} = 7,27\%$, $\eta_{\text{stab}} = 6,32\%$, surface $S = 10\,125\text{ cm}^2$, masse $m = 9,17\text{ kg}$, (7 Wc/kg), puissance crête $P_{\text{max}} = 64\text{ Wc}$, intensité de courant court-circuit $I_{\text{cc}} = 4,8\text{ A}$, tension de circuit ouvert $V_{\text{co}} = 23,8\text{ V}$ (1,98 V/cell).

Les modules PVL-64, respectivement PVL-128 d'UNISOLAR a-Si:H à triple jonction déposée au défilé sur substrat acier inoxydable et encapsulés dans un sandwich EVA-Tefzel sont livrés sous forme de rouleaux de 285 cm de long (respectivement 549 cm) et de 40 cm de large qui peuvent être collés sur un substrat métallique. United Solar a inauguré en juin 2002, une usine ayant une capacité de production de 30 MWc/an (figure 16). La ligne de production, conçue par Energy Conversion Devices, Inc. (ECD), utilise une matrice continue et dépose neuf couches successives de silicium amorphe (jonction triple) sur un rouleau en acier inoxydable de 35,5 cm de large sur 2 414 m de long !... La machine traite six rouleaux en parallèle, produisant 14 500 m de cellules en trois jours. En pleine capacité, cette usine devrait augmenter la production américaine de 20 %.

3.1.5.5 Encapsulation

Il faut bien sûr protéger la face arrière, la sortie des connexions ainsi que les bords du panneau contre les agressions atmosphériques, la vapeur d'eau, les ambiances salines et de nature chimique : vapeurs acides, etc.

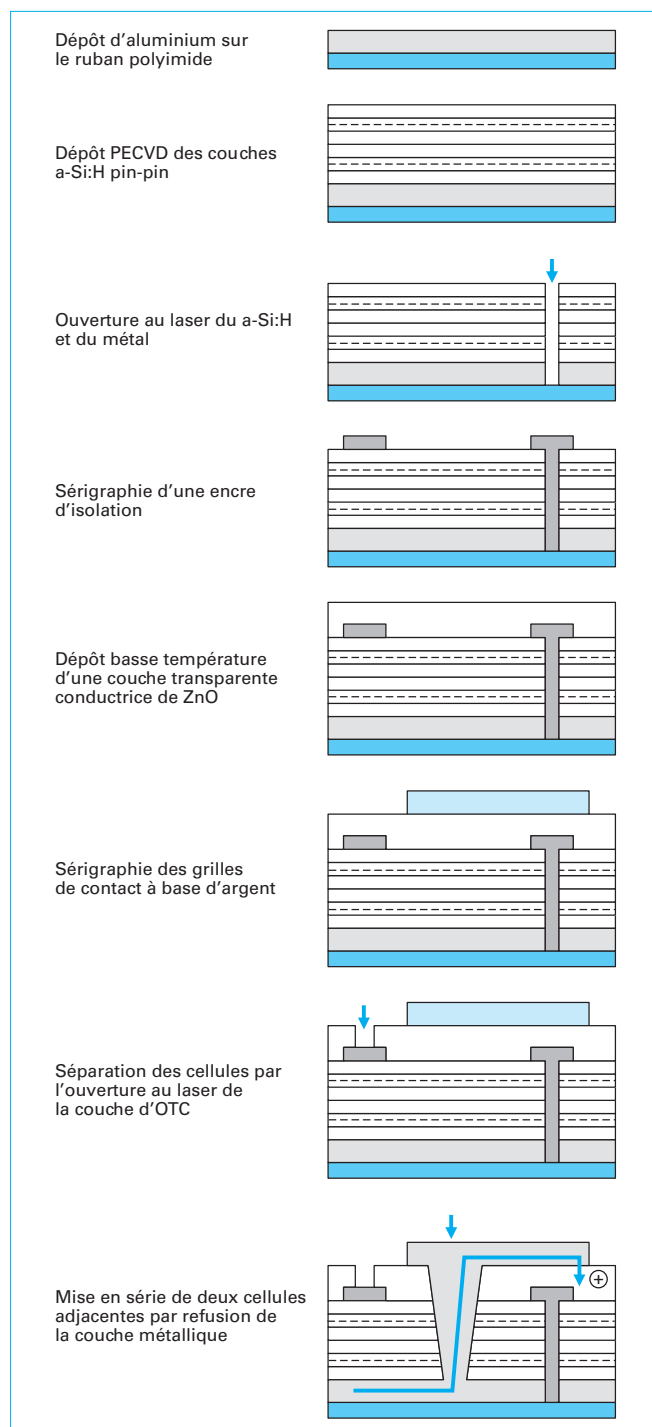


Figure 14 – Procédé de dépôt de a-Si:H sur substrat polyimide souple (lowa Thin Film Technology)

Les fabricants de panneaux au silicium amorphe se sont longtemps inspiré de ce qu'avaient développés leurs collègues de la filière silicium cristallin, à savoir, résine silicone, éthylène-vinyl-acétate (EVA), *Tedlar*, *Tefzel*, sans vraiment se poser la question du

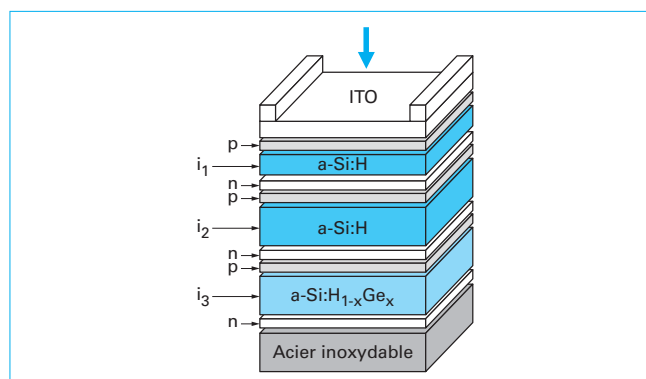


Figure 15 – Module à triple jonction avec substrat en acier inoxydable



Figure 16 – Tambour sur lequel est enroulée une feuille d'acier inoxydable de plusieurs centaines de mètres de long sur laquelle va être déposé le Si amorphe par PECVD au défilé dans un four à passage

cahier des charges spécifique dans la protection des films minces. Il faut en fait particulièrement soigner la protection des bords où apparaissent souvent jusqu'à dix ou douze interfaces entre les différentes couches, mais aussi la sortie des contacts qui ne doit pas se faire par la tranche. En outre, les modules en films minces ne nécessitent pas d'encapsulant polymère épais comme l'EVA, puisqu'il n'y a pas de nécessité de les enrober.

Plusieurs tentatives ont été faites de combiner l'injection d'un cadre en plastique et l'encapsulation (technique de « *Reaction Injected Polymer* »), mais le produit obtenu proposé, ayant un prix de revient assez élevé, ne se justifie que si un cadre est absolument indispensable. Il existe désormais des produits sans cadre de très grande dimension de type biverre, la fixation étant réalisée par deux profilés transversaux en aluminium collés sur le verre arrière.

3.1.6 Coût/performance

Les modules au silicium amorphe en tandem sont trois fois moins chers à produire au mètre carré que les modules cristallins, mais deux fois moins performants. Il en résulte qu'ils sont les meilleurs

candidats dans les applications où le coût d'installation est modeste puisqu'une partie importante de celui-ci est proportionnel à la surface. Ainsi, la filière amorphe, malgré ses faiblesses, reste un candidat crédible pour le remplacement des tuiles, puisque pour cette application particulière, le rendement n'est pas le problème majeur (on estime en effet qu'une puissance installée de 3 kW est amplement suffisante pour une installation domestique et celle-ci occupe une surface de 50 m² avec un rendement stabilisé de 6 %).

Si l'on tient compte en outre, du fait que les rendements des modules cristallins (rendement cellules) et amorphes (rendement d'ouverture) ne sont généralement pas comptabilisés de la même façon, on aboutit sur le terrain à des résultats beaucoup plus proches que sur les étiquettes des constructeurs.

Exemple : typiquement, exposés en plein soleil en toiture à une température de 60 °C, un module US-64 d'Unisolar donne encore 64 W/m² alors qu'un module Photowatt PWX-500 ne donne plus que 84 W/m² réduisant ainsi l'écart de performance à seulement 17 %.

3.1.6.1 Coefficient de température

La **température nominale de fonctionnement d'une cellule solaire** (NOCT) est un paramètre important à considérer dans la pratique. Typiquement, sous un éclairage de 800 W/m², à une température ambiante de 20 °C, pour un module incliné de 45° et soumis à un vent frontal de 1 m/s, la température de cellule varie de 48 à 52 °C en fonction des techniques d'encapsulation et du coefficient d'absorption du module.

Pour le silicium cristallin, la perte relative de puissance est de -0,4 %/°C ; elle n'est que de -0,15 %/°C pour le silicium amorphe. En outre, l'expérience montre que l'amplitude de la dégradation observée sous illumination (effet Staebler-Wronski), se stabilise au bout de quelques mois autour :

- de -30 % pour les modules a-Si:H à jonction simple ;
- de -15 % pour la double jonction ;
- de -10 % pour la triple jonction.

De plus, il a été montré (en particulier grâce aux mesures sur de longues durées au GENE à Cadarache) que, après stabilisation, l'augmentation de la température de fonctionnement de la cellule en été agit comme un recuit, annulant partiellement les effets de la dégradation.

L'effet global est donc la combinaison de deux phénomènes physiques contradictoires : un effet de « recuit » positif (0,3 à 0,4 %/°C

pour des plages de température de 50 à 100 °C) qui compense le coefficient naturel négatif de température (-0,15 %/°C) de sorte que les modules au a-Si:H se comportent dans la durée comme s'ils avaient un coefficient de température légèrement positif. Ils seront donc a priori préférés pour les applications en toitures non ventilées.

3.1.6.2 Coefficient de performance

Le **coefficient de performance d'un module** est le rapport de l'énergie effectivement produite sur une année sur la puissance crête donnée par le constructeur. Il s'exprime en kWh/kWc.

Parce que la concurrence se joue sur le prix du watt-crête (Wc), et non pas sur le prix du mètre carré, ce coefficient est le seul véritable critère qui permette de départager les différents produits. Il est indépendant du rendement standard sous 1 000 W/m². Il dépend en revanche de l'irradiation annuelle du site (directe et diffuse), de la réponse spectrale des cellules et de leur sensibilité aux faibles éclaircissements.

Suivant les résultats d'une étude menée par l'ECN hollandaise (Netherlands Energy Research Foundation, « *Characterization of PV Modules of New-Generations* » octobre 2000) rapportés dans le tableau 3, parmi toutes les catégories de technologies, ce sont les modules au silicium amorphe qui ont donné le meilleur coefficient de performance (performance ratio) dans les conditions d'exposition en façade (avec la très forte composante diffuse du climat hollandais).

3.2 Silicium microcristallin (μc-Si)

Après les épisodes malchanceux de formation non souhaitée de poudres dans les dépôts PECVD au début des années 1990, il a été mis en évidence que sous certaines conditions, on pouvait déposer directement du silicium microcristallin (μc-Si), dont les propriétés optiques ont très vite surpris la communauté. L'idée s'est donc répandue que l'on pouvait fabriquer des diodes au μc-Si par voie plasma et que ces dernières auraient les avantages des techniques de dépôt du a-Si:H sans en avoir les inconvénients.

Tableau 3 – Performances de neuf types de module mesurées sous les conditions d'ensoleillement des Pays-Bas

Fabricant	Type	Technologie	Puissance STC (Wc)	Rendement (en %)		Coefficient de performance		
				à 1 kW/m ²	à 100 W/m ²	DC (1) (kWh/kWc)	AC (2) (kWh/kWc)	AC (2) (kWh/m ²)
BP Solar.....	BP 585	sc-Si	85	13,60	11,90	977	868	118
Siemens Solar	SM-55	sc-Si	55	12,90	11,00	963	855	110
ASE	ASE-100	EFG-Si	100	12,10	10,00	966	857	104
Kyocera	KC 60	mc-Si	60	12,00	10,00	964	856	103
Shell Solar.....	RSM 75	mc-Si	73	10,30	9,00	961	853	88
Siemens Solar	ST 30	CIGS	30	8,10	5,90	930	824	67
Unisolar.....	US-32	a-Si:H triple	32	6,10	7,50	1 164	1 038	63
BP Solarex.....	MST 43	a-Si:H double	43	5,20	4,90	1 001	888	46
FEE.....	A13P	a-Si:H simple	12	4,20	4,00	1 084	961	40

(1) DC sortie champ des modules en courant continu
(2) AC sortie onduleur en courant alternatif

Mais pour que les procédés de dépôt soient économiques, plusieurs conditions doivent être remplies :

- l'épaisseur des dépôts doit être suffisante pour permettre le rendement requis si on sait tirer profit des confinements électrique et optique ;
- la vitesse de dépôt doit être grande (égale ou supérieure à $10 \mu\text{m/h}$) ;
- le substrat utilisé doit être peu cher (le verre ou une céramique type mullite).

3.2.1 Silicium polycristallin

Bien que n'appartenant pas stricto sensu à la catégorie des films minces, nous décrivons succinctement les technologies de silicium microcristallin déposé sur un support étranger. Elles consistent à déposer une couche de silicium de 10 à $40 \mu\text{m}$ d'épaisseur sur divers substrats (silicium métallurgique, poudres de silicium compactées, quartz, céramique ou métal). Depuis 1995, ces couches suscitent un intérêt majeur en Europe et aux États-Unis. Ce succès a entraîné de nombreux laboratoires sur des projets de fabrication de films de Si en phase vapeur sur supports de silicium, de céramique ou même de verre.

En prenant pour substrat le verre Corning 7059 F, la température de dépôt ne doit pas dépasser 600°C . Ce dernier paramètre est la clé pour différencier les procédés de dépôt explorés en deux grandes catégories :

- les procédés de dépôt à basse température ($T < 600^\circ\text{C}$) ;
- les procédés de dépôt à haute température ($T > 800^\circ\text{C}$).

L'élaboration du $\mu\text{c-Si}$ à basse température ($T < 600^\circ\text{C}$) se fait à partir de deux variantes :

- soit en déposant directement du $\mu\text{c-Si}$ par pyrolyse de silane sur un filament chaud ;
- soit en déposant du silicium amorphe hydrogéné par pyrolyse basse pression (LPCVD : *Low pressure chemical vapour deposition*) de silane ou de disilane ou par décomposition plasma (PECVD) de silane en recristallisant le dépôt amorphe par recuit thermique rapide à partir d'un four à lampes.

Les procédés de dépôt de $\mu\text{c-Si}$ à haute température ($T > 800^\circ\text{C}$) utilisent deux types de techniques différentes :

- la pyrolyse du trichlorosilane dans un four à lampes halogène (RTCVD : *Rapid thermal chemical vapour deposition*) ;
- l'épitaxie en phase liquide (LPE).

La décomposition pyrolytique du silane et de l'hydrogène sur un filament chaud de tungstène permet de déposer du silicium microcristallin ($\mu\text{c-Si}$) sur un substrat de verre à 500°C à des vitesses relativement élevées ($> 5 \mu\text{m/h}$).

Les dépôts en phase vapeur (CVD) à des températures supérieures à 800°C en présence d'un gaz contenant le silicium (silane ou chlorosilanes) donnent la possibilité (CNRS-PHASE) d'une croissance plus rapide avec des vitesses de dépôts de l'ordre de $10 \mu\text{m/min}$ par CVD assistée par lampes (RTCVD) où le substrat n'est chauffé que pendant la durée du dépôt à des températures bien plus élevées que celles du gaz (figure 17).

Cependant, le dépôt direct engendre un matériau microcristallin à petits grains (1 à $5 \mu\text{m}$) et fortement distribués, dont les performances sont limitées par l'importante densité des joints de grains. Les rendements restent inférieurs à 10% et ne passent à des valeurs de 13 à 16% qu'avec une recristallisation (augmentation de la taille des grains).

Parmi les solutions alternatives, il y a la formation du silicium polycristallin par le procédé de cristallisation induite par métaux (MIC) du Si amorphe suivi d'une épitaxie en phase vapeur pour épaissir la couche tampon. En effet, certains métaux en contact avec le silicium amorphe (a-Si) induisent le processus de transformation de la phase amorphe à la phase cristalline à des températures bien inférieures à la température de l'eutectique du système métal/Si. Le

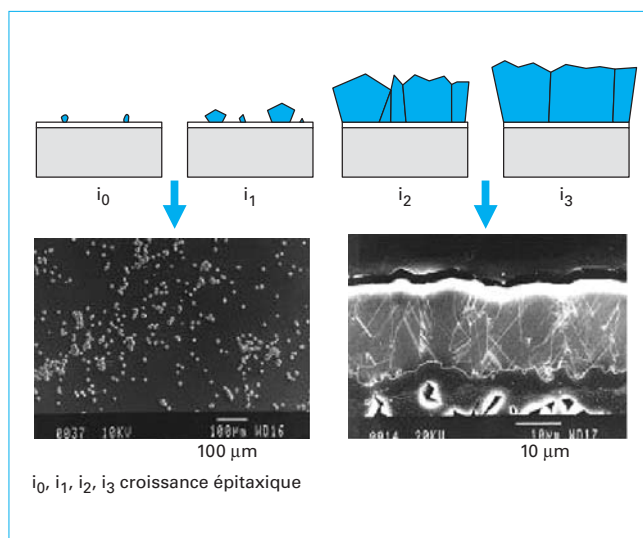


Figure 17 – Croissance de silicium en film mince sur céramique par RTCVD, source CNRS-PHASE

procédé MIC permettrait la formation du Si polycristallin sur des substrats étrangers et bon marché à des températures qui évitent la diffusion d'impuretés métalliques du substrat vers la couche active de silicium ($< 600^\circ\text{C}$).

La croissance par épitaxie en phase liquide (LPE) a comme principal inconvénient l'utilisation d'un substrat cristallin et un coût élevé, mais elle a permis d'obtenir des rendements de 19 à 21% en laboratoire.

3.2.2 Silicium micromorphe

L'équipe du Professeur Shah de l'Institut de MicroTechnique (IMT de Neuchâtel) a pu démontrer que les couches de $\mu\text{c-Si:H}$ déposées en utilisant la technique de VHF-GD (*Very high frequency glow discharge*: décharge lumineuse radiofréquence entre 20 et 70 MHz) donnent un matériau plus prometteur puisqu'ils ont réalisé des cellules dont la réponse dans l'infrarouge s'est considérablement améliorée ($23,5 \text{ mA/cm}^2$ avec seulement $2,2 \mu\text{m}$ d'épaisseur de couche). En outre, les cellules réalisées ne présentent plus aucune dégradation sous exposition à la lumière. L'idée du laboratoire est d'empiler une cellule p-i-n a Si:H classique extrêmement fine avec une cellule p-i-n $\mu\text{c-Si:H}$ de quelques micromètres d'épaisseur [35].

En fait, comme la tension de la cellule inférieure est encore relativement faible, on préfère réaliser une triple jonction dans la configuration :

verre/ SnO_2 /a Si:H ; p-i-n/a Si:H p-i-n/ $\mu\text{c-Si:H}$; p-i-n/ITO/Ag

et dont l'état de l'art donne une distribution de courant : $6,7$; $6,7$; $8,6 \text{ mA/cm}^2$. Dans cette configuration un rendement initial de $9,5\%$ a été obtenu (tension de circuit ouvert $V_{\text{co}} = 2,03 \text{ V}$; facteur de forme $FF = 69,6\%$ et $J_{\text{sc}} = 6,73 \text{ mA/cm}^2$).

La société japonaise Kaneka a récemment repris le leadership qui était détenu au Japon par Fuji ; en effet, depuis 2000, elle fabrique des modules de grandes dimensions ($92 \text{ cm} \times 92 \text{ cm}$) avec un rendement stabilisé à 10% en petites séries.

4. Conclusion

À la condition que de grands programmes nationaux de recherche maintiennent l'engagement à long terme nécessaire, on peut prévoir cinq bonnes raisons pour lesquelles les technologies des films minces seront préférées pour la production de masse :

- les matériaux ayant une bande interdite directe (chalcogénures, silicium amorphe) absorbent dix fois plus la lumière visible que le silicium cristallin ;

- pour une meilleure conversion spectrale, il est plus facile d'empiler dans une cellule photovoltaïque en films minces deux ou trois matériaux différents, la diode frontale convertissant la partie bleue du spectre délivrant la plus haute tension ($V_{oc} \approx 1,00$ V pour $E_g \approx 1,70$ eV) et la diode arrière convertissant la partie rouge avec une plus basse tension ($V_{oc} \approx 0,60$ V pour $E_g \approx 1,10$ eV), l'optimisation du photocourant commun étant obtenue par un traitement approprié des matériaux pendant la phase de dépôt ;

- les matériaux peuvent être déposés directement à partir d'une phase gazeuse ou d'une phase liquide, d'où de grandes réductions de la consommation énergétique et des économies dans la méthode

de fabrication. Les plaques industrielles actuelles sont déjà 50 fois plus grandes que la plus grande cellule solaire cristalline ;

- la possibilité de produire des modules intégrés contenant un grand nombre de cellules, la structuration des modules étant réalisée par rayurage au laser. Les cellules photovoltaïques déposées sur des plaques de verre (configuration superstrat) sont déjà bien protégées ; le processus d'encapsulation se limitant à une protection arrière ;

- l'industrie du verre s'est déjà adaptée à la production de masse de surfaces en verre de technologie de pointe avec revêtement transparent d'oxyde conducteur (OTC) par CVD (dépôt en phase vapeur par procédé chimique) et films métalliques minces par pulvérisation cathodique sous vide. Les volumes typiques de l'industrie du verre se mesurent en millions de mètres carrés par an. Une usine de 100 MWc sur le CdTe a été montée par First Solar dans l'Ohio, le pays des verriers.

Les films minces, qu'ils soient polycristallins, amorphes ou microcristallins présentent donc des avantages certains dans la course à la production de modules solaires à grande échelle. En outre, nous allons voir dans l'article [D 3 941] que les caractéristiques des cellules photovoltaïques en films minces peuvent les rendre plus attrayantes sur le plan commercial, ou plus performantes que les cellules cristallines [36].