

## Procédé d'encapsulation des modules photovoltaïques type mono-verre

A. El Amrani<sup>\*\*</sup>, A. Mahrane, F.Y. Moussa et Y. Boukennous

Unité de développement de la Technologie du Silicium,  
02, Bd Frantz Fanon, B.P. 399, Alger

(reçu le 27/12/05 ; accepté le 07/02/06)

**Résumé** - L'une des étapes importante dans l'industrie photovoltaïque réside dans l'encapsulation des cellules solaires. Elle consiste à regrouper des cellules en série ou en parallèle afin de permettre leur utilisation à des tensions et courants pratiques tout en assurant leur isolation électrique et leur protection contre les facteurs extérieurs tels que l'humidité, la pluie, la neige, les poussières, la corrosion, les chocs mécaniques, etc. Nous nous proposons dans le cadre de ce travail de présenter le procédé d'encapsulation que nous avons mis en oeuvre au niveau de l'Unité de Développement de la Technologie du Silicium (UDTS). Nous nous focaliserons plus particulièrement sur le traitement thermique, car il constitue l'étape la plus critique dans le procédé conditionnant par là même la qualité et la fiabilité du module. Ce traitement thermique est conduit en deux temps : la lamination suivie de la polymérisation. A l'issue du traitement thermique, nous obtenons un ensemble compact. Différents tests de réticulation de l'EVA ont été nécessaires afin de déterminer les paramètres technologiques (niveau du vide, pression, température et temps), conduisant à un procédé performant. Ces résultats ont confirmé par les tests effectués au laboratoire européen Joint Research Centre (JRC) d'Ispra (Italie). En outre, nous avons constaté une amélioration des performances électriques du module après encapsulation (gain en courant de l'ordre de 4 à 6 % et gain en puissance de l'ordre de 4 à 7 %), principalement due à l'utilisation d'un verre traité en surface permettant le piégeage de la lumière incidente réduisant ainsi la réflexion à moins de 8 %.

**Abstract** - One of the most important steps in the photovoltaic industry is the encapsulation of the solar cells. The encapsulation consists to assemble the cells in series or parallel to allow them operate with useful currents and tensions and, at the same time, to allow their electrical isolation and protect them against atmospheric factors (humidity, rain, snow and dust) which causes corrosion, and mechanical shocks. In this paper, we present the encapsulation process we have developed at Silicon Technology Unit (UDTS) for crystalline silicon solar cells. We will focus particularly on the thermal treatment, the most critical step in the process, which decide on the quality and the reliability of the module. This thermal treatment is conducted in two steps: the lamination and the polymerisation. Several tests of EVA reticulation have been necessary for setting technological parameters as the level of vacuum, the pressure, the temperature, and the time. The quality of our process has been confirmed by the tests conducted on our modules at the European Laboratory of Joint Research Centre (JRC) of Ispra (Italy). The electrical characterisation of the modules has showed that after the encapsulation the current has been improved by a factor of 4 % to 6 % and the power gain by a factor of 4 % to 7 %. This is mainly due to the fact of using a treated glass, which reduces the reflection of the light at a level as low as 8 %.

**Mots clés:** Module photovoltaïque - Encapsulation - Lamination - Polymérisation - EVA.

### 1. INTRODUCTION

Dans la fabrication d'un module photovoltaïque, l'encapsulation a pour but de regrouper les cellules en série ou en parallèle afin de permettre leur utilisation à des tensions et des courants pratiques tout en assurant leur isolation électrique et leur protection contre les facteurs extérieurs. Cette protection doit permettre une durée de vie des modules photovoltaïques supérieure ou égale à 20 ans. En pratique, l'encapsulation consiste à la mise en sandwich de l'ensemble constitué par les cellules et le matériau encapsulant (EVA) entre deux plaques de verre (procédé bi-verre) ou entre une plaque de verre et un ensemble constitué de couches minces de polymères (tedlar, mylar) et d'aluminium, c'est le procédé mono-verre. C'est ce dernier que nous avons développé à l'UDTS, pour son faible coût et ses meilleures performances.

### 2. CONSTITUTION DU MODULE ET DES MATERIAUX UTILISES

Le module photovoltaïque consiste en un lot de cellules, sensiblement de mêmes caractéristiques électriques, connectées entre elles puis enrobées dans une résine transparente, l'EVA. Les faces avant et arrière des cellules sont recouvertes respectivement d'un verre et d'un film multicouche étanche. La Figure 1 illustre en détail la composition du module photovoltaïque. Les matériaux que nous avons utilisés pour la fabrication des modules sont :

#### 2.1 Le verre

C'est un verre trempé de 4 mm d'épaisseur avec une faible teneur en fer afin de permettre une meilleure transmission optique. Sa caractérisation avec un spectrophotomètre (Varian Cary 500 UV-VIS-NIR) montre une

---

\* elamrani@msn.com

transmission supérieure à 95 % dans la gamme utile du spectre solaire 380 nm à 1200 nm. Sa face extérieure, traitée à l'acide fluosilicique ( $H_2SiF_6$ ), est recouverte de nano pores qui piègent la lumière incidente et réduisent la réflexion en surface à une valeur inférieure à 8 % dans la gamme 380 nm à 1200 nm (Fig. 2).

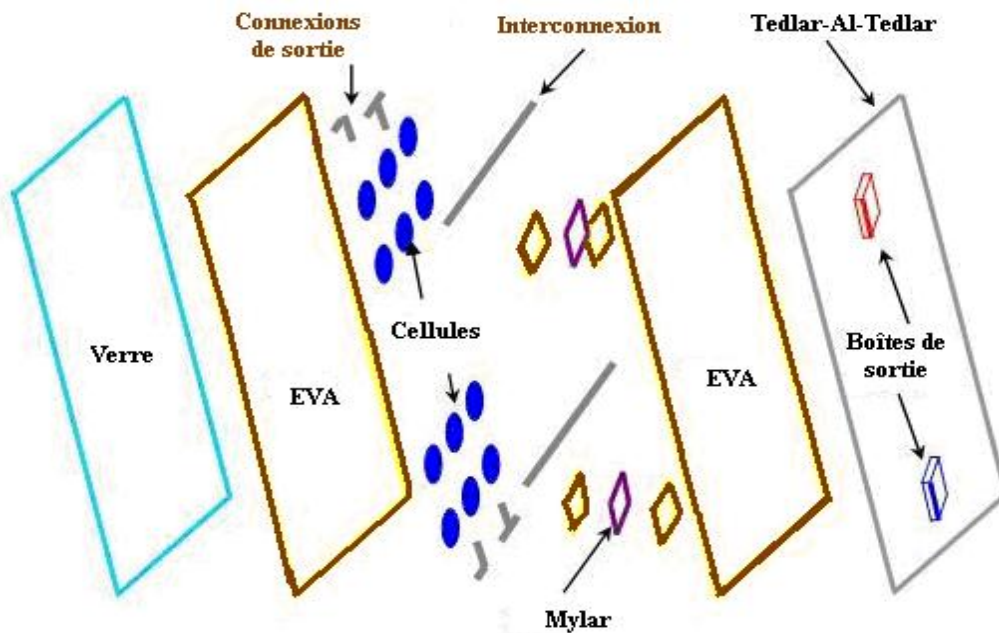


Fig. 1: Schéma éclaté d'un module de type 'mono-verre'

## 2.2 La résine

C'est une résine transparente, thermosensible, formée de chaînes de copolymères d'éthylène et de vinyle acétate, l'E.V.A. Traitée thermiquement entre 150 et 160 °C, elle présente de grandes propriétés adhésive, diélectrique, thermique et d'étanchéité. Celle utilisée, l'ELVAX 150 de Dupont de Nemours, a une transmission optique supérieure à 92 % identique à celle du verre dans la gamme 400 nm à 1100 nm (Fig. 2).

Les quatre caractéristiques qui ont fait de l'EVA un matériau de choix pour l'encapsulation sont:

- sa résistivité électrique très élevée le classant comme un très bon isolant électrique;
- ses températures de fusion et de polymérisation relativement faibles;
- son très faible taux d'absorption d'eau;
- sa bonne transmission optique.

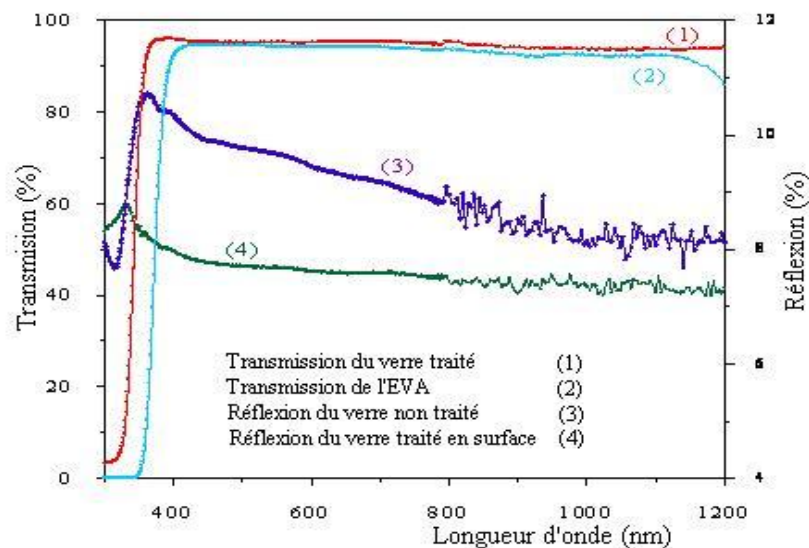


Fig. 2: Spectres de transmission et de réflexion du verre et de l'EVA

Sa composition et ses caractéristiques sont données dans les tableaux 1 et 2 respectivement.

**Tableau 1:** Composition de l'ELVAX 150, [1]

Composés	Proportions (%)
Vinyle acétate	36
Ethylène	60.95
Peroxyde (agent de réticulation)	1.5
Stabilisateur	0.1
Absorbant UV	0.25
Anti-oxydant	0.20
Silane (agent d'adhésion)	1

**Tableau 2:** Composition de l'E.V.A.

Caractéristiques	Valeur
Densité	0.957 g/cc
Epaisseur	≈ 0.45 mm
Elongation de rupture	900 – 1100 %
Module d'élasticité	4.8 MPa
Résistivité électrique	$10^{14} \Omega/\text{cm}$
Indice de fusion	4.3 g/min
Point de fusion	110 °C
Absorption d'eau	0.05 % - 0.13 %

### 2.3 Le mylar

Le mylar, utilisé pour isoler électriquement les connexions de sortie de la face arrière des cellules, est un film polymère transparent d'épaisseur 56  $\mu\text{m}$ . C'est un composé de polyéthylène téréphtalate (PET), de constante diélectrique très élevée lui permettant d'être un très bon isolant électrique.

### 2.4 Le tedlar- aluminium - tedlar

L'arrière du module est constitué d'un film multicouche tedlar-aluminium-tedlar. L'aluminium dont le rôle prouvé contre l'humidité et les chocs mécaniques [2, 3] est mis en sandwich entre deux feuilles de tedlar de 180  $\mu\text{m}$  d'épaisseur appelé polyvinyle fluoré (PVF). Pour améliorer les performances électriques du module, nous avons utilisé une feuille de tedlar de couleur blanche [4].

## 3. PROCEDE DEVELOPPE

Le procédé d'encapsulation des cellules photovoltaïques comprend 9 étapes principales comme illustré sur la figure 3.

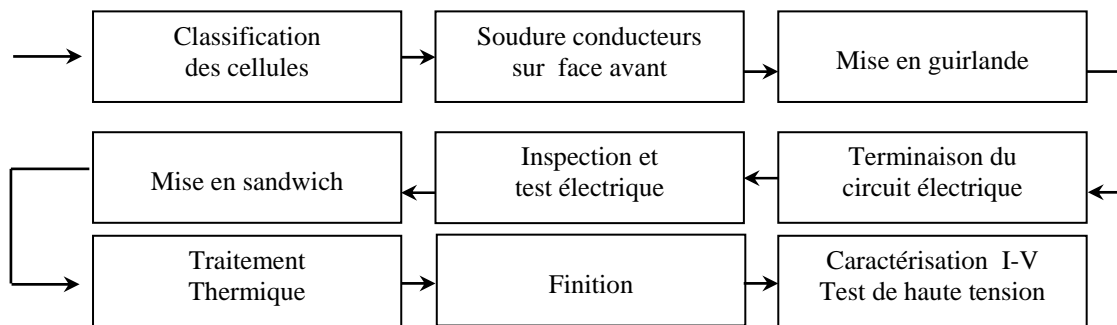


Fig. 3: Schéma synoptique du procédé de fabrication de modules photovoltaïques

Du fait de l'irréversibilité de la réaction de polymérisation, l'étape du traitement thermique est capitale dans le procédé d'encapsulation des cellules photovoltaïques. Elle est aussi bien déterminante pour la qualité du module que pour sa durée de vie. Si un défaut (casse, court-circuit, glissement des guirlandes, présence d'un corps étranger) survient au cours de l'une de ces deux opérations et particulièrement durant la polymérisation, le module sera déclassé ou rejeté.

Le cycle de lamination débute par l'introduction de l'ensemble constitué de cellules et des matériaux encapsulants dans la chambre inférieure du laminateur où la température est maintenue constante à 100 °C. La chambre supérieure, dont la paroi du bas constitue le diaphragme, est à ce moment sous vide (0.1 mmHg).

La lamination se fait en réalité en deux temps. Dans une première phase, on procède au pompage de l'air se trouvant à l'intérieur de la chambre inférieure contenant le laminât et ce durant 5 mn. Le niveau du vide atteint est alors de 0.1 mmHg, il sera maintenu durant les opérations de lamination et de polymérisation. Dans une deuxième phase, alors que la chambre supérieure maintenue sous vide à 0.1 mmHg durant ces 5 premières minutes, elle sera mise sous pression atmosphérique en 1 minute de temps. Cette étape est désignée sous le vocable 'Press time'. A ce stade, l'action conjuguée de la pression exercée par le diaphragme et l'effet de l'aspiration conduit à chasser l'air résiduel se trouvant dans le laminât. Ceci marque la fin du cycle de lamination.

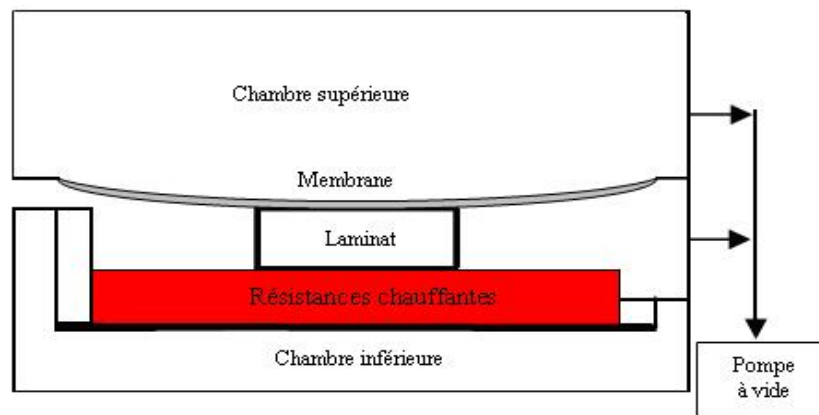


Fig. 4: Schéma du laminateur

La réticulation ou polymérisation à 156 °C dure 15 minutes. Une réaction de polymérisation de l'EVA s'enclenche à l'issue de laquelle tous les matériaux encapsulants se lient très fortement et ce d'une manière irréversible, conduisant à l'obtention d'un ensemble compact. Après refroidissement à 100 °C, la chambre inférieure est mise sous pression atmosphérique alors que celle du haut revient à 0.1 mmHg. Ceci constitue le cycle long du procédé d'encapsulation.

Dans l'industrie, c'est le cycle dit rapide ou court qui est utilisé. Sa durée moyenne est d'environ 22 minutes si l'on ne tient pas compte des temps de charge et de décharge.

Le cycle court s'arrête à l'étape de la lamination (6 minutes). Après la mise sous pression atmosphérique de la chambre inférieure et sous vide celle du haut, le module est alors retiré et sa réticulation se fait ensuite dans un four à 156 °C pour une durée de 15 minutes.

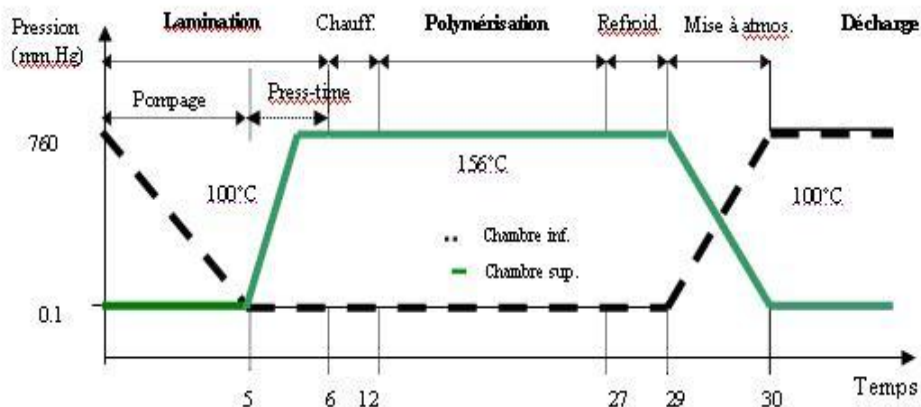


Fig. 5: Paramètres du traitement thermique (cycle long)

#### 4. EVALUATION DU PROCEDE DE FABRICATION

Afin d'évaluer le procédé de fabrication que nous avons mis au point à l'UDTS, neuf (09) modules constitués chacun de 36 cellules carrées de silicium monocristallin de 10 cm<sup>2</sup> munies de couche anti-reflet ont été réalisés.

Nous avons tout d'abord conduit des tests de réticulation de l'EVA qui ont montré que le pourcentage moyen du gel calculé sur plusieurs échantillons est de 84.9 %. Ceci est un indicatif révélateur d'un bon traitement thermique. Ces résultats ont été confirmés par les tests de vieillissement simulés subis avec succès par ces mêmes modules au laboratoire européen ESTI de JRC (Ispra- Italie) [5].

Par ailleurs, nous avons effectué la caractérisation électrique de ces modules à l'aide de deux simulateurs solaires distincts, le SPI SUN de l'UDTS et le LAPSS de l'ESTI (JRC- Ispra) à des fins de comparaison.

Le Tableau 4 représente les caractéristiques électriques typiques de ces modules.

Nous remarquons ainsi que le rendement de conversion et les courants mesurés par le simulateur de l'UDTS sont relativement plus élevés que ceux obtenus avec le simulateur d'Ispra. Inversement, les autres valeurs (tensions, résistance série et facteur de forme) sont elles plus faibles. Ceci peut s'expliquer par la différence entre les spectres solaires des deux lampes, la précision des instruments de mesures et les méthodes de calcul utilisées en particulier celles relative à la détermination de la résistance série.

**Tableau 4:** Caractéristiques électriques typiques d'un module photovoltaïque dans les conditions standard de test

Caractéristiques électriques	SPI SUN (UDTS)	LAPSS (ESTI)
I <sub>sc</sub>	3.38 A	3.25 A
V <sub>oc</sub>	20.9 V	21.9 V
I <sub>m</sub>	3.08 A	2.93 A
V <sub>m</sub>	16 V	17 V
P <sub>m</sub> (W)	52	50.9
FF (%)	69.76 W	71.1 W
Rendement	12.20 %	11.9%
Résistance série	1.7 Ω	2 Ω
I <sub>sc</sub> (Réponse spectrale)	-	3.24 A

#### 5. DISCUSSION

La moyenne des rendements de conversion des modules que nous avons réalisés est de 11.5 %, alors que les cellules utilisées pour ce module ont un rendement individuel de 13.5 %. Cette réduction du rendement n'est pas le résultat d'une dégradation provoquée par le procédé d'encapsulation. Certes, la résistance série des 36 cellules connectées entre elles influe mais de manière minime.

Sachant que le rendement est défini par la relation :

$$\eta = \frac{P_m}{P_i \times S}$$

avec: P<sub>m</sub> : puissance électrique maximale délivrée par le module  
P<sub>i</sub> : densité de puissance lumineuse incidente  
S : surface totale du module.

La réduction du rendement s'explique par le fait que seule 89 % de la surface du module, qui est en fait la surface de l'ensemble des cellules, est réellement active lorsque le module est exposé au rayonnement. De manière générale, ce taux est compris entre 80 % et 90 % entraînant une réduction du rendement d'environ 2 % [3].

Par ailleurs, un procédé performant d'encapsulation entraîne une amélioration de certaines caractéristiques électriques du module tels que le courant et le rendement. Ce gain est du à la présence sur la surface du verre de nano pores qui piègent la lumière incidente diminuant ainsi la réflexion. Le second facteur est la bonne adaptation optique obtenue par la superposition de ce verre et de la couche anti-reflet déposée à la surface de la cellule. Le troisième facteur étant la couleur blanche du Tedlar qui augmente la réflexion.

Pour évaluer l'effet de l'encapsulation, il a été introduit deux paramètres sans dimension [2] qui sont :

$$\beta = \frac{I_{SC}(E)}{I_{SC}(NE)} (\%)$$

où,  $I_{SC}(E)$  : courant de court circuit après encapsulation  
 $I_{SC}(NE)$  : courant de court circuit avant encapsulation.

et

$$\alpha = \frac{P_m(E)}{P_m(NE)} (\%)$$

avec:  $P_m(E)$  : puissance maximum après encapsulation  
 $P_m(NE)$  : puissance maximum avant encapsulation.

La caractérisation électrique I-V des modules réalisés avant et après encapsulation a donné les résultats suivants :

$\beta = 1.04$  et  $1.06$                       soit un gain en courant compris entre **4 % et 6 %**

$\alpha = 1.04$  et  $1.07$                       soit un gain en puissance compris entre **4 % et 7 %**.

## 6. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce papier, le procédé d'encapsulation de cellules solaires au silicium monocristallin que nous avons mis au point à l'UDTS. Ce procédé dont la fiabilité a été confirmée par les tests conduits au JRC d'Ispra, a aussi révélé une amélioration des caractéristiques électriques du module au terme de l'encapsulation. Il est à remarquer que les paramètres technologiques que nous avons définis dans ce travail sont relatifs au type d'EVA utilisé et dépendent aussi des caractéristiques du laminateur.

L'EVA est largement utilisé pour l'encapsulation des cellules solaires. Néanmoins, de nos jours, l'EVA peut être remplacé par le nouveau matériau PVB qui présente deux avantages qui sont sa stabilité contre les radiations UV et sa grande adhésion sur le verre [6].

## REFERENCES

- [1] Data Sheet, DuPont de Nemours, 'DuPont™ Elvax® Grade Selection Guide for Adhesives, Sealants and Wax Blends', pp. 3, 2005.
- [2] I.J. Muirhead and B.K. Hawkins, 'An Assessment of Photovoltaic Power in the Telstra Network', Solar Energy Materials and Solar Cells, 36, pp 421 - 432, 1995.
- [3] N.M. Pearsall and R. Hill, 'Photovoltaic Modules, Systems and Applications', In 'Clean Electricity from Photovoltaics', M.D. Archer and R. Hill (Ed), 1, pp. 1 - 42.
- [4] F. Serrano-Casares and O. Aguilera, 'On the Improvement of the Conversion Efficiency of Photovoltaic Modules by the Encapsulation Materials', Proceedings of 2<sup>nd</sup> World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, Vol. 2, pp. 2218 - 2221, 1998.
- [5] Y. Mesbahi et A. ElAmrani, 'Test d'Homologation des Modules UDTS', Rapport Interne UDTS, 1988.
- [6] H. Schmidhuber and K. Krannich, 'Why Using EVA for Module Encapsulation if There is a Much Better Choice?', Proceedings IEEE, Vol. 1, pp. 662 - 663, 2001.