

# Mise au point d'un dispositif automatique de caractérisation du module solaire à base d'un microcontrôleur PIC16F877 Application au module solaire hybride en a-Si:H

Salima Djerroud\* et Amine Boudghene Stambouli

Laboratoire d'Electronique de Puissance et d'Energie Solaire, 'L.E.P.E.S.'  
Université des Sciences et de Technologie d'Oran, 'U.S.T.O.M.B.'  
B.P. 1525, El M'Naouer, 31024, Oran, Algérie

(reçu le 17 Février 2010 – accepté le 25 Novembre 2010)

**Résumé** - *La qualité des générateurs photovoltaïques (GPV) installés jusqu'à présent pouvait être contrôlée uniquement par le biais de système de mesures onéreux et peu pratique. Deux points importants sont étudiés dans le cadre de ce travail. Dans la première partie, on s'intéresse au développement d'un dispositif automatique de caractérisation de module PV à base du PIC16F877 sous condition de fonctionnement réel. Nous présentons dans la deuxième partie, une évaluation pratique des performances électriques d'un module solaire en silicium amorphe a-Si:H hybride (couches minces inorganique/substrat organique) en temps réel, orienté vers le sud avec une inclinaison de 38°, meilleure orientation pour la ville d'Oran (Algérie).*

**Abstract** – *The quality of photovoltaic generators (PV) installed so far could only be controlled through measurement system expensive and unpractical. Two important points are studied in this work. In the first part, we study the development of an automatic characterization device of the photovoltaic module of PIC16F877 based on condition of real operation. We present a second part, a practical evaluation of electrical performance of amorphous silicon solar module a-Si: H hybrid (thin inorganic / organic substrate) in real time, facing south with an inclination of 38 °, and a better direction for the city of Oran (Algeria).*

**Mots clés:** Dispositif automatique - Silicium amorphe - Module PV hybride - PIC16F877  
- Caractérisation - Couches minces - Morphologie - Performances électriques.

## 1. INTRODUCTION

L'énergie photovoltaïque (PV) obtenue grâce aux cellules solaires est de plus en plus considérée comme une source d'énergie qui peut contribuer à la production mondiale d'électricité tout en participant au développement durable. L'industrie PV est concentrée à près de 99 % sur l'utilisation du silicium comme matériau de base [1].

A l'heure actuelle, le coût du silicium dans l'élaboration d'un module PV peut atteindre 50 % du prix de revient total. Il est clair que la réduction du coût du module passe par la réduction du coût de l'élaboration du substrat. La méthode la plus accessible pour les industriels est la réduction de l'épaisseur des plaques de silicium, tout en utilisant des substrats bon marché [2].

D'autres matériaux sont également utilisés, le tellurure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS), et de gallium (CIGS). Ces technologies basées sur des films minces, sont encore très coûteuses, mais laissent espérer des rendements et une durée de vie au moins équivalentes au silicium.

\* Salima\_djerroud@hotmail.com - aboudghenes@yahoo.fr

## 2. CELLULES SOLAIRES EN COUCHES MINCES

### 2.1 Silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H)

Lors de sa première introduction au début des années 60, il n'était pas utilisable puisqu'il contenait beaucoup de défauts qui en limitaient les performances. Après une dizaine d'années, il a été constaté que l'utilisation d'un plasma de silane ( $\text{SiH}_4$ ) pour le dépôt du a-Si:H permettait d'obtenir un matériau où 99.9 % des défauts étaient saturés (passivés) par l'hydrogène [3].

A partir de ce moment là, la recherche sur le silicium amorphe hydrogéné s'est intensifiée, notamment dans le domaine des cellules solaires photovoltaïques en couches minces. Cet engouement était principalement dû 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 PV en films minces peut être réalisé en une couche 400 fois plus mince qu'une cellule PV cristalline et avec une surface 40 fois plus grande. Il semble donc évident que les coûts devraient être beaucoup plus faibles, la disponibilité des matériaux de base de plus en plus élevée et le procédé de fabrication plus simple [4].

### 2.2 Films sur substrat plastique

Bien que les polymères plastiques possèdent plusieurs avantages par rapport aux substrats de verre. Ces substrats sont en effet, plus facilement intégrables dans les processus industriels (découpage, production en continu), leur légèreté et leur moindre coût ouvrant la voie à de nouvelles applications.

En outre, ces supports polymères absorbent dans l'ultra-violet, ce qui diminue, les problèmes d'instabilité des cellules hybrides. L'utilisation de ces substrats conduit néanmoins à certains nombres d'inconvénients, puisque la plupart des polymères ne supportent pas des températures supérieures à  $140^\circ\text{C}$ , ce qui ne permet pas une bonne connexion entre les particules et une bonne adhésion aux substrats.

De plus, plusieurs plastifiants présents dans ces substrats diffusent dans la cellule, ce qui influe sur le rendement de cette dernière.

## 3. DISPOSITIFS ET CAPTEURS DE MESURES

Le dispositif de mesure se compose essentiellement d'un microcontrôleur (16F877) et d'un ensemble de capteurs, soit deux capteurs d'éclairement respectivement une photorésistante LDR05, ainsi qu'une photodiode BPW21. Un capteur de température analogique le LM35, et enfin, un pont diviseur et une résistance shunt de très faible valeur sont utilisés pour le relevé de la tension et du courant du module photovoltaïque.

### 3.1 Mesure des paramètres climatiques

#### a- Mesure de température

On a opté pour le capteur de température analogique LM35. Cette sonde convertit la température en faible tension, elle est calibrée en usine de telle façon à avoir 0 V à  $0^\circ\text{C}$  avec une pente de  $10\text{ mV}/^\circ\text{C}$ .

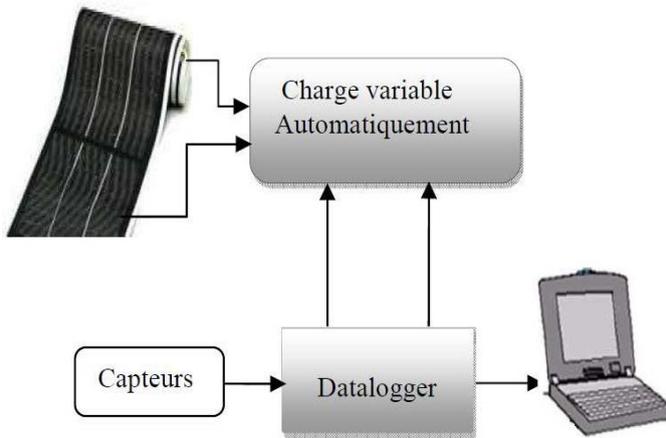


Fig. 1: Schéma bloc du système de caractérisation

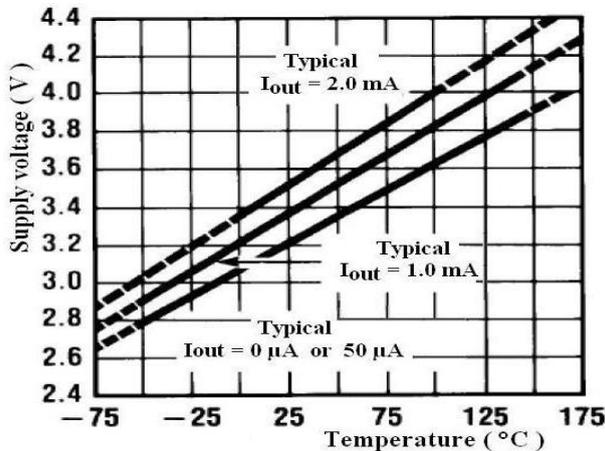


Fig. 2: Caractéristique tension / température du LM35

### b- Mesure d'éclairement

On a utilisé deux photo-détecteurs dont les caractéristiques sont différentes, à savoir, une photorésistante et une photodiode.

#### *La photorésistante (LDR05)*

C'est un dipôle à semi conducteur sans jonction, dont la résistance varie lorsqu'elle est exposée à la lumière dans une certaine gamme de longueur d'onde.

#### *La photodiode (BPW21)*

Une photodiode est considérée comme le photo détecteur de base de la majorité des capteurs optoélectroniques. C'est l'élément d'extrémité chargé de convertir l'énergie lumineuse en une énergie électrique. La photodiode, sous éclairement, génère un courant qui dépend de sa sensibilité spectrale et du flux lumineux incident.

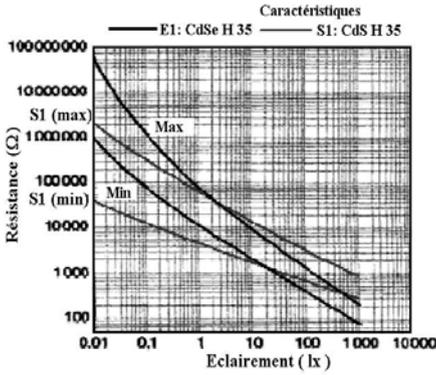


Fig. 3: Caractéristique de la photorésistance utilisée (LDR)

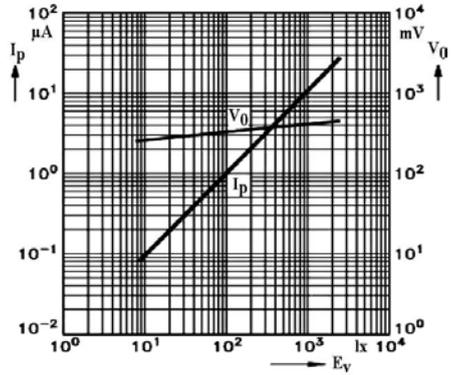


Fig. 4: Caractéristique de la photodiode utilisée (BPW21)

### 3.2 Unité d'acquisition des données

Le PIC est chargé de convertir le signal analogique électrique en valeurs numériques qui seront affichés en temps réel à l'aide des quatre afficheurs sept segments. Ces mêmes valeurs seront enregistrés dans sa mémoire EEPROM, et qui seront par la suite téléchargées vers un PC à travers le port série, RS232 en vue de la manipulation, la visualisation et l'enregistrement des résultats.

L'alimentation de la carte est assurée par des piles LR6 (Lithium 3Ah) à haut rendement. Pour garantir une durée d'autonomie importante du dispositif, on a imposé les faits suivants:

1. Réduction de la consommation des afficheurs: double multiplexage, un multiplexage par digit et un multiplexage par segment ce qui nous a permis de diminuer considérablement  $I_{DD}$  ;
2. Affichage clignotant (visibilité 33 % de 1 seconde);
3. Extinction de l'affichage au terme de la phase acquisition et mise en veilleuse du PIC.

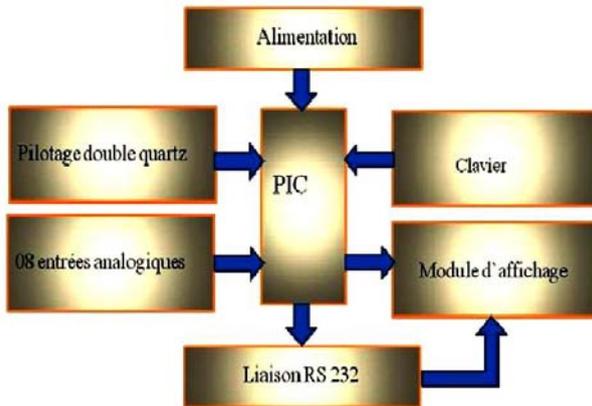


Fig. 5: Schéma synoptique du datalogger

### 3.3 Charge électronique variable

Vu le système de caractérisation réalisé, qui est autonome, on a été amené à réaliser une charge électronique variable automatiquement, grâce à un circuit CNA à résistances pondérés 7 bits, adapté à notre montage. On peut ainsi relever automatiquement 128 mesures pour le couple (I - V).

#### a- Schéma électrique

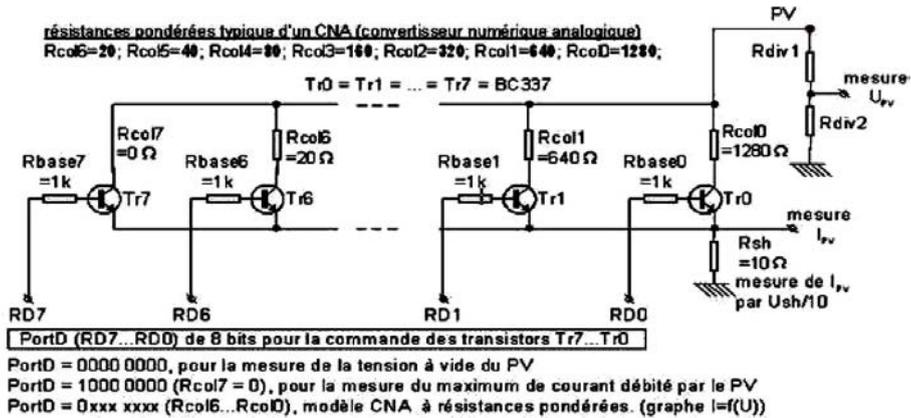


Fig. 6: Charge variable à base des transistors bipolaires montée en CNA

#### b- Principe de cette méthode

Le principe de cette méthode est de fixer des points choisis d'une manière à ce qu'ils soient répartis d'une manière plus au moins équidistante sur tout l'intervalle de la caractéristique I(V) du module.

Pour ce faire et afin d'avoir le maximum de point possible atteignant les 256 mesures (Limite EEPROM du PIC), le nombre de transistors utilisés est fixé à huit commandés à travers leur courant de base pour qu'ils fonctionnent en modes commutateurs (saturé ou bloqué). En conséquence, des valeurs de courant de collecteur ( $I_c$ ) sont imposées par des résistances de collecteurs bien déterminées pour la fixation des points de mesures.

Le choix des transistors est conditionné par les valeurs critiques du module à caractériser. Dans notre cas, c'est un module dont les caractéristiques sont:  $V_{oc} = 6$  V et  $I_{cc} = 300$  mA . On a opté pour le module BC337 ( $V = 45$  V ,  $I = 800$  mA ).

## 4. PRINCIPE DE PRISE DE MESURE

### 4.1 Phase 1: Acquisition des mesures et stockage en EEPROM

A la mise en marche, ce dispositif se met à l'état 1 = horaire 00:00 par défaut.

**Etat 1:** Réglage **heures**: Incrémenter (++) ou décrémenter (--);

Appuyer sur le bouton (Fct) pour passer à l'état 2; sinon, après 10 s, le dispositif passe en mode acquisition automatique.

**Etat 2:** Réglage **minutes**: Incrémenter (++) ou décrémenter (--);

Appuyer sur le bouton (Fct) pour passer à l'état 3; sinon, après 10 s, le dispositif passe en mode acquisition automatique.

**Etat 3:** Mode acquisition automatique

Le dispositif passe en mode acquisition automatique: 1 mesure/seconde, avec enregistrement sur EEPROM.

Affichage (clignotant 33 % de 1 s) successif des canaux 1 (mesure de I) et 2 (mesure de V ), en boucle fermée.

Acquisition autonome de 256 mesures puis mise en veilleuse du PIC (128 mesures pour I et 128 mesures pour V). Au terme de cette phase, l'afficheur est éteint pour économiser la pile.

**4.2 Phase 2: Transfert de l'EEPROM vers un PC par liaison série**

1. Brancher la fiche DB9F au port série COM1 d'un compatible PC.
2. Lancer le programme 'Mv8chnv3.exe', et configurer la liaison série pour un transfert en 8N1 - 115200 bauds - sans protocole. Enfin, clic sur le bouton 'Start'.
3. Appui bref sur le poussoir « fct » du datalogger pour lancer le transfert des 256 mesures stockées en EEPROM vers le PC.
4. Une fois terminé, clic sur le bouton 'Stop', puis copier / coller le contenu de la zone Memo du programme 'Mv8chnv3.exe' vers un tableur (par exemple Excel) pour l'analyse des données et le tracé des graphiques.

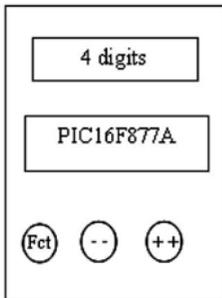


Fig. 7: Schéma bloc de l'appareil de mesure

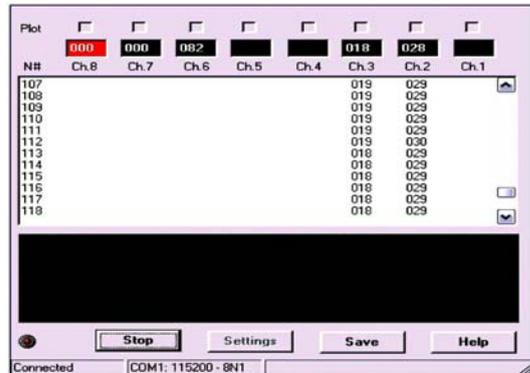


Fig. 8: Interface graphique de la phase d'acquisition sur PC

**5. EXPERIMENTATION ET RESULTATS**

Le module utilisé pour valider le système de caractérisation conçu et réalisé dans cette étude est un module en couche mince à base de silicium amorphe déposé sur un substrat flexible en fonctionnement depuis 2004.

**5.1 Caractéristiques optoélectroniques**

Plusieurs essais ont été effectués dans différentes conditions. On a été amené à recalculer à plusieurs reprises les composants de la charge électronique afin de pallier toute l'échelle du courant et de la tension, comme le montrent les figures ci-dessous.

**Test 1:** le 20/08/2009 à 13 h 24

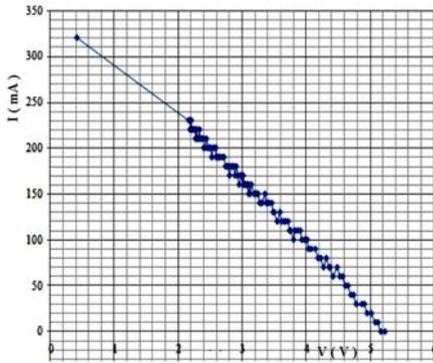


Fig. 9: Caractéristique I–V

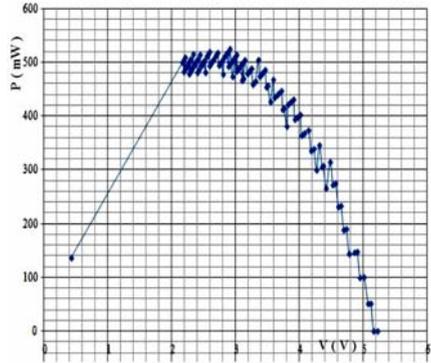


Fig. 10: Caractéristique P–V

**Test 2:** le 23/08/2009 à 16 h

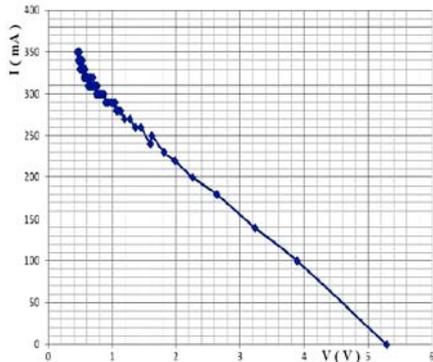


Fig. 11: Caractéristique I–V

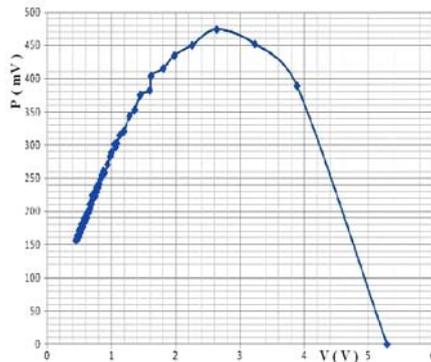


Fig. 12: Caractéristique P–V

**Test 3:** le 21/08/2009 à 12h27

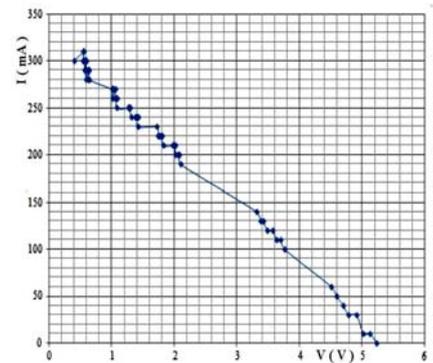


Fig. 13: Caractéristique I–V

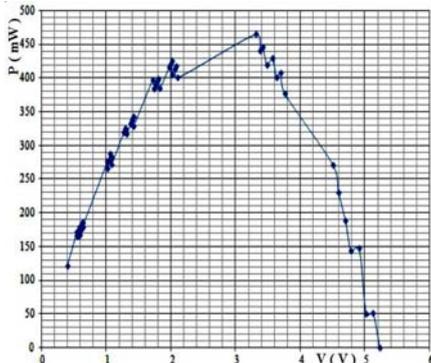


Fig. 14: Caractéristique P–V

Pour vérifier la crédibilité du dispositif réalisé, on a opté pour d'autres tests et en utilisant autres types de modules photovoltaïques.

**Test 1:** Module en silicium monocristallin ( $V_{oc} = 21 \text{ V}$  et  $I_{cc} = 130 \text{ mA}$ )

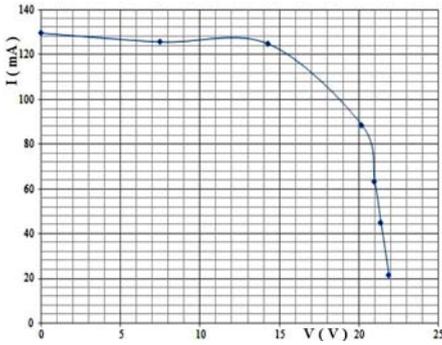


Fig. 15: Caractéristique I-V

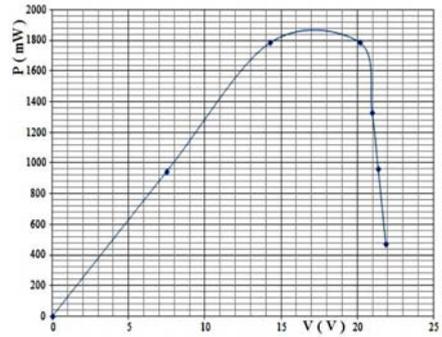


Fig. 16: Caractéristique P-V

**Test 2:** Cellule Si amorphe sur un substrat non flexible ( $V_{oc} = 2.68 \text{ V}$  -  $I_{cc} = 556 \text{ mA}$ )

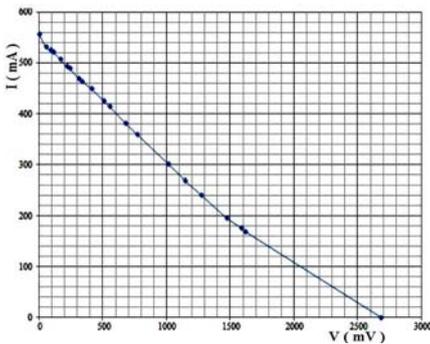


Fig. 17: Caractéristique I-V

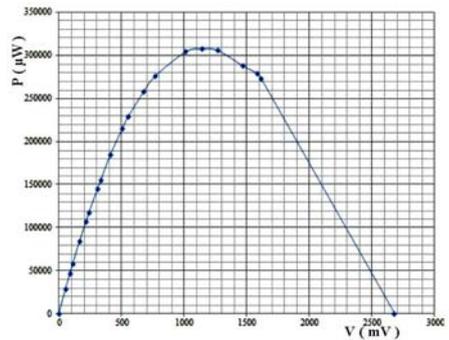


Fig. 18: Caractéristique P-V

**Test 3:** Module Si amorphe déposé sur substrat flexible ( $V_{oc} = 5.4 \text{ V}$  -  $I_{cc} = 330 \text{ mA}$ )  
(21/08/2009 à 15h27)

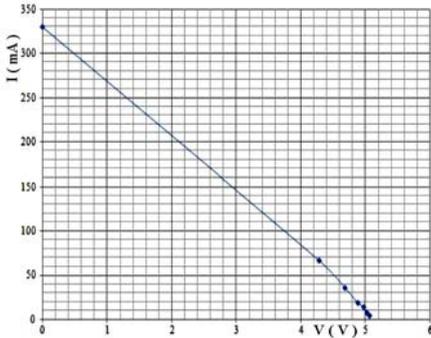


Fig. 19: Caractéristique I-V

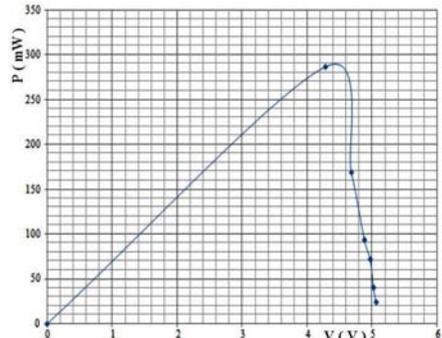


Fig. 20: Caractéristique P-V

## 5.2 Modèle de comparaison

La caractéristique du module solaire peut être modélisée électriquement par une source de courant  $I_{sc}$  shuntée par  $m$  diodes montées en série, les diodes sont considérées idéales [5, 6].

Ci-dessous sont présentées les courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  du modèle idéal, en considérant les valeurs idéales des résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  du module PV [7-9].

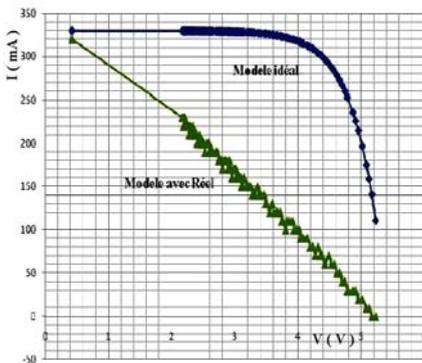


Fig. 21: Comparaison des caractéristiques I–V

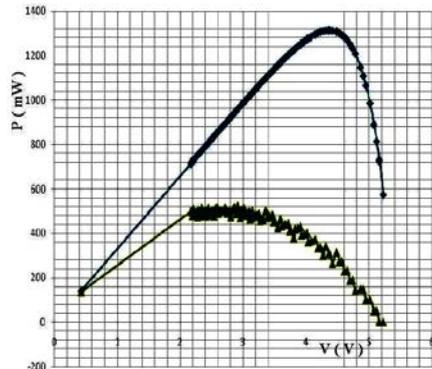


Fig. 22: Comparaison des caractéristiques P–V

## 6. INTERPRETATION DES RESULTATS

Les résultats obtenus montrent que la caractéristique  $I(V)$  du module solaire hybride (couches minces inorganiques et un substrat organique) diffère de la caractéristique conventionnelle des modules cristallins. Elle présente une caractéristique linéaire avec un facteur de forme très faible  $FF = 30 \%$ . Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette linéarité de la caractéristique:

a- La résistance série: ( $R_s = 5.09 \Omega$ ), elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule.

b- La résistance shunt: ( $R_{sh} = 22 \Omega$ ), elle présente la résistance de court-circuit, et elle traduit l'existence d'un shunt à travers l'émetteur, causé par un défaut dans la structure de la cellule.

c- Le substrat: La plupart des polymères ne supportent pas des températures supérieures à  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ , ce qui ne permet pas une bonne connexion entre les particules et une bonne adhésion aux substrats et par conséquent diminution du rendement de la cellule.

d- L'effet Steabler-Wronski: C'est la dégradation au cours du temps. Cette stabilisation est un phénomène spécifique aux matériaux amorphes, et est tristement célèbre par ses conséquences désastreuses sur le rendement des cellules. Il fut découvert par Steabler et Wronski dès 1977, et se caractérise

essentiellement par la diminution lente de la photoconductivité  $\delta_{ph}$  sous fort éclairage, et également une diminution de la conductivité dans l'obscurité  $\delta_d$ .

Le **Tableau 1** illustre et compare les différentes caractéristiques techniques du module.

**Tableau 1:** Récapitulatif et comparatifs des différentes caractéristiques techniques

Caractéristiques techniques	Modèle idéal	Modèle réel
Tension de circuit ouvert (V)	5.4	5.4
Courant de court-circuit (mA)	330	330
Température (°C)	36	36
Eclairage (%)	50	50
Tension maximale (V)	4.38	2.92
Courant maximum (mA)	301.36	170
Résistance série ( $\Omega$ )	0	5.09
Résistance shunt ( $\Omega$ )	$\infty$	22.62
Facteur de forme (%)	74	30
Dimensions (mm)	265 × 235	265 × 235
Puissance maximale (mW)	1319,9568	496.4
Nombre de cellules en série ( $N_s$ )	16	16

## 7. CONCLUSION

Les résultats obtenus montrent que l'outil réalisé valide le modèle conventionnel de conversion photovoltaïque d'une part, et d'autre part, ce nouveau système de mesure permet désormais à tous les installateurs de bénéficier d'un dispositif de mesure, maniable, mobile et affichant un excellent rapport qualité/prix.

Ce travail présente une démarche concrète de la caractérisation d'un système énergétique PV, et donne une idée des points critiques sur lesquels la conception devra être soignée et optimisée.

## REFERENCES

- [1] F. Abdo, 'Croissance de Couches Minces de Silicium par Epitaxie en Phase Liquide à Basse Température pour Applications Photovoltaïques', Thèse de Doctorat, Spécialité: Matière Condensée, Surface et Interface, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, Mars 2007.

- [2] A. Boudghene Stambouli, '*Solar Photovoltaic at the Tipping Point: Pathways from Evolutionary to Disruptive and Revolutionary Technologies*', Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, USTO.MB, 2009.
- [3] A. Ricaud, '*Les Photopiles Solaires*', Presses Polytechniques et Universitaires Romande, Lausanne, 1997.
- [4] Research EU, Magazine de l'Espace Européen de la Recherche: '*Sécurité: Protéger sans Entraver*', N°60, 2009.
- [5] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang and S.R. Wenham, '*Very High Efficiency Silicon Solar Cells-Science and Technology*', IEEE Transaction on Electronics Devices, Vol. 46, N°10, pp. 1940 – 1947, 1999.
- [6] A. Kaminski, '*Etude des Etapes Technologiques Critiques dans la Production des Cellules Solaires au Silicium Multi-Cristallin*', Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 1997.
- [7] R.C. Campbell, '*A Circuit-Based Photovoltaic Array Model for Power System Studies*', 39<sup>th</sup> North American Power Symposium, NAPS'07, pp. 97 – 101, Sept. 30 – Oct. 2, 2007.
- [8] Y.H. de Lim and D.C. Hamill, '*Simple Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays*', Electronics Letters, Vol. 36, N°11, pp. 997 – 999, 2000
- [9] G.R. Walker, '*Evaluating MPPT Converter Topologies Using a Matlab PV Model*', Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC'00, Brisbane, 2000.