

Caractérisations Electriques et Thermiques d'un Module PV au Silicium Multicristallin en Milieu Contrôlé et sur Site Saharien

K. Agroui ^(a), A. Belghachi ^(b) et S. Kadri ^(b)

^(a) Unité de Développement la Technologie du Silicium (UDTS), 2, Bd. Dr. Frantz Fanon BP 399
Alger Gare (Algérie) E-Mail: kagroui@caramail.com

^(b) Centre Universitaire de Béchar (Algérie)

Résumé – L'objectif de cette communication est l'étude des caractéristiques électriques et thermiques d'un module PV constitué de cellules solaires au silicium multicristallin élaborées suivant la méthode de cristallogenèse POLIX. Il s'agira d'établir les caractéristiques du module PV suivant la méthode de la norme internationale IEC 1215 avec une confrontation des valeurs nominales fournies par le constructeur. D'autre part, l'évaluation des performances électriques du module sur le site saharien de Béchar nous permettra de comprendre les causes de la perte de la puissance du module PV en milieu naturel.

Abstract – The objective of this communication is the study of electrical and thermal characteristics of PV module based on multi-crystalline solar cells elaborated with POLIX solidification process of silicon. The purpose of this investigation is to establish the module characteristics by using the international standard IEC 1215 method with nominal values confrontation as given by the manufacturer. Moreover, the evaluation of the electrical performances of PV module on Saharian site of Bechar allow us to understand the reasons of PV module power losses under natural sunlight site.

Mots Clés : Silicium multicristallin – Cellule solaire – Technologie d'encapsulation – Module PV – Caractérisation thermoélectriques – Fiabilité et certification.

1. INTRODUCTION

Le silicium multicristallin est un matériau rometteur dans la conversion photovoltaïque. Actuellement, la production mondiale de modules PV à base de cellules solaires au silicium multicristallin ne cesse de croître pour des raisons de coûts estimés moindres que ceux du silicium monocristallin. On estime que 40 % de cellules solaires sont fabriquées à base de silicium multicristallin. Ces considérations ont conduit à l'introduction d'une nouvelle filière appelée « ""filière silicium multicristallin ou semi-cristallin ». L'avantage avec ce type de matériau est le maintien des principales étapes technologiques de la réalisation de la cellule solaire au silicium monocristallin auxquelles est adjointe la passivation des joints de grains. Cette filière présente à l'heure actuelle le meilleur rapport rendement de conversion/coût de fabrication avec un fort potentiel d'amélioration [1].

2. DESCRIPTION TECHNIQUE DU MODULE PV PWX 500

Le module PWX 500 est composé de 36 cellules solaires carrées de 4 inches, au silicium multicristallin, disposées en série selon la configuration de quatre guirlandes comportant chacune 9 cellules solaires comme illustrées par la figure 1.

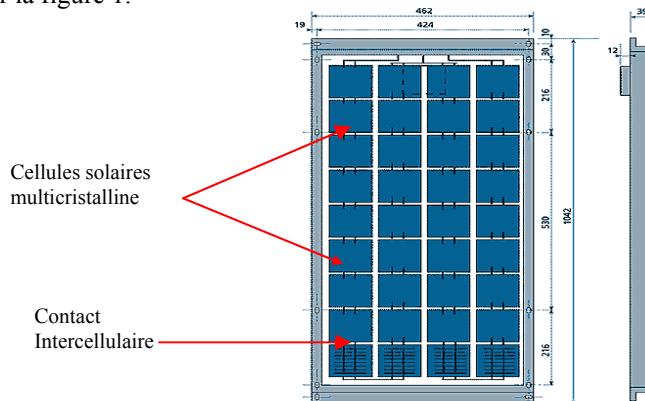


Fig. 1: Module photovoltaïque PWX 500

L'ensemble de ces cellules subit le process d'encapsulation avec le copolymère EVA permettant de confiner au module une meilleure stabilité en milieu naturel. L'encapsulation des cellules entre deux plaques de verre trempé à haut coefficient de transmission garantit l'excellente solidité et fiabilité du module. La technologie d'utilisation d'un verre en face arrière (bi-verre) assure un comportement optimal à celui-ci dans les conditions

climatologiques extrêmes (température, humidité) auxquelles il peut être soumis. Le bi-verre bénéficie donc des garanties de l'excellent comportement mécanique et d'isolement électrique du verre à la fois à l'avant et à l'arrière du module. De plus le verre assure une dissipation thermique maximum. Deux diodes D_1 et D_2 , placées dans une boîte soigneusement protégée suivant la norme IP 55, assurent une protection du module contre d'éventuelles occultations [2].

3. CARACTERISTIQUES I-V DU MODULE

3.1. Caractéristiques I-V sous obscurité

Les figures 2 et 3 montrent le comportement de la caractéristique courant-tension du module PWX 500 à l'obscurité en mode de polarisation inverse et directe respectivement.

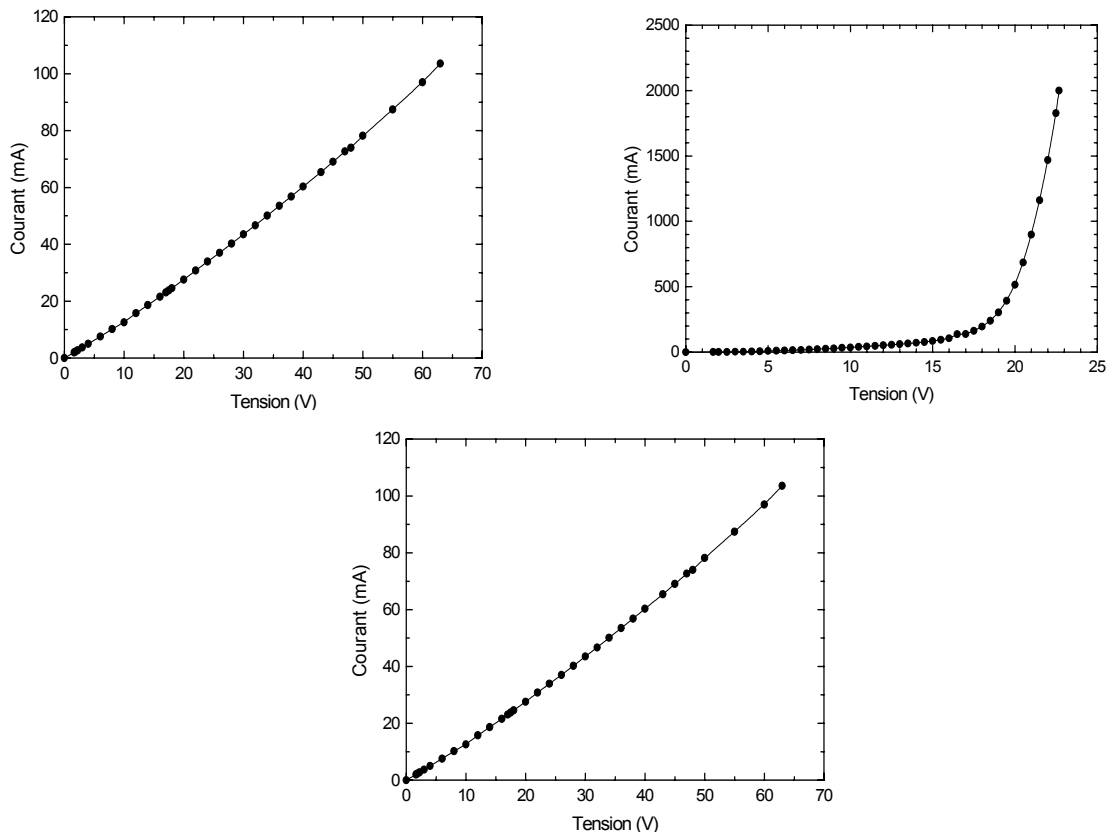


Fig. 2: Caractéristique I-V à l'obscurité en mode de polarisation inverse du module PWX 500

La caractéristique I-V à l'obscurité en mode de polarisation directe du module PWX 500 conserve la même allure que celle d'une cellule solaire avec un courant ayant le même ordre de grandeur. Il s'est produit simplement une translation dans l'axe des tensions à cause de la mise en série des 36 cellules solaires qui constituent le module PV.

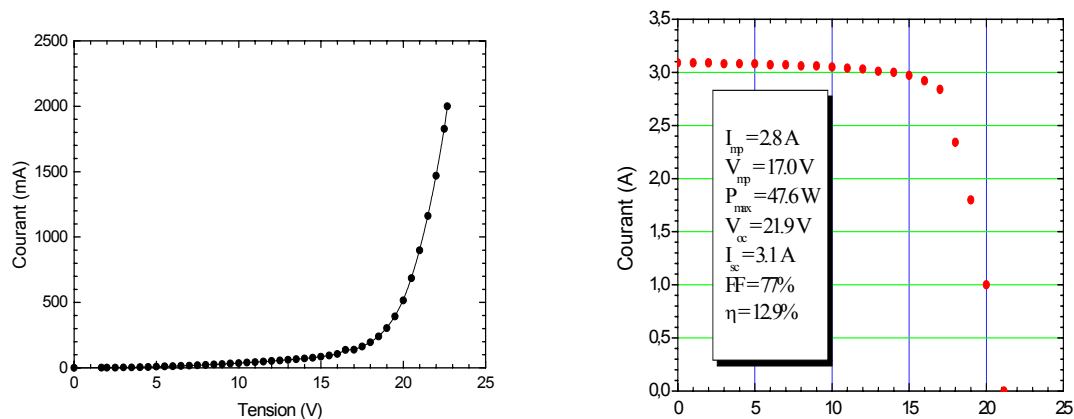


Fig. 3: Caractéristique I-V à l'obscurité en mode de polarisation directe du module PWX 500

Fig. 4: Caractéristique I-V sous éclairage du module PWX 500 aux conditions STC

3.2. Caractéristique I-V sous éclairement

La caractérisation courant-tension du module PV est réalisée avec le simulateur solaire SPI 240 conformément à la CEI 904-1 et aux conditions standards (STC) [3]. La Figure 4 illustre le tracé des caractéristiques I-V ainsi que ses performances électriques aux conditions STC.

4. TEST D'ISOLATION ELECTRIQUE DU MODULE PV

Ce test a pour but de déterminer si le module est ou n'est pas suffisamment isolé. Le principe de cet essai consiste à appliquer une tension continue entre le circuit cellulaire, dont les connexions de sorties sont mises en court-circuit et connectées au pôle positif d'une source de tension continue (V_c), et le cadre constituant le châssis du module pour mesurer le courant de fuite résultant (I_f). La résistance d'isolement (R_i) du module est donnée par la relation suivante [4] :

$$R_i = \frac{V_c}{I_f} \quad (1)$$

Les figures 5 et 6 illustrent les caractéristiques $I_f = F(V_c)$ et $R_i = F(V_c)$ respectivement. Pour une tension continue de 1000V, le courant de fuite est de l'ordre de $1\mu A$ soit une résistance d'isolement de 1000 M Ω ce qui satisfait les exigences et les critères d'acceptation d'un module PV.

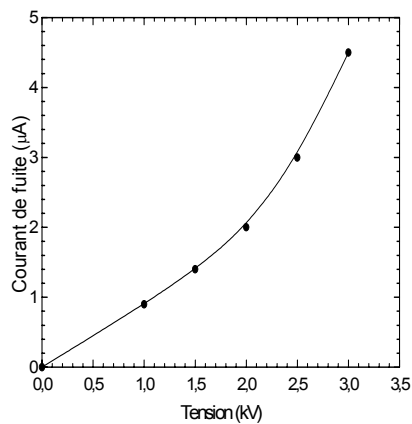


Fig. 5: Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée au module PWX 500.

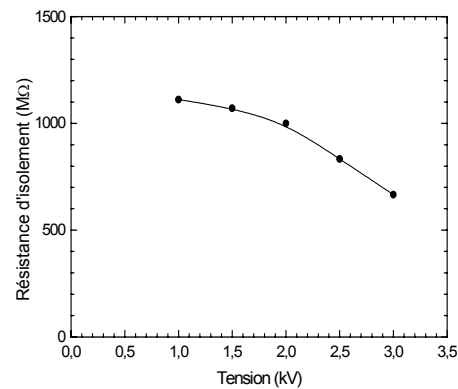


Fig. 6: Evolution de la résistance en fonction de la tension appliquée du module PWX 500

5. INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT ET DE LA TEMPERATURE

5.1. Influence de l'éclairage

Les variations de la tension du circuit ouvert et du courant du court-circuit en fonction de l'éclairage du module PWX 500 sont illustrées par les figures 7 et 8.

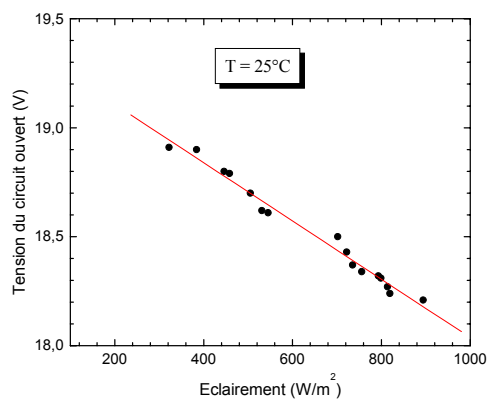


Fig. 7: Influence de l'éclairage sur la tension du circuit-ouvert du module PWX 500

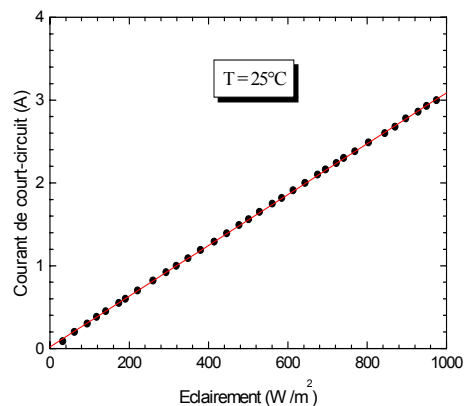


Fig. 8 : Influence de l'éclairage sur le courant de court-circuit du module PWX 500

5.2. Influence de la température

Pour des applications à faible température, le courant et la tension générés par un module PV sont supposés linéaires [5]. Ceci permet de décrire l'effet de la température sur les performances d'un module PV par des

coefficients. Si nous désignons par P un paramètre physique du module à la température T , on définit le coefficient de température correspondant comme suit [6] :

$$\beta_1 = \frac{P(T) - P(T_{ref})}{T - T_{ref}} \quad (2)$$

Le coefficient de température réduit est donné par:

$$\beta_2 = \frac{\beta_1}{P(T_{ref})} 100\% \quad (3)$$

L'évolution du courant de court-circuit, la tension du circuit ouvert, la puissance optimale ainsi que la résistance série du module PWX 500 sont illustrées par les figures 9, 10, 11 et 12, respectivement, sous un éclairage constant de 100 mW/cm^2 .

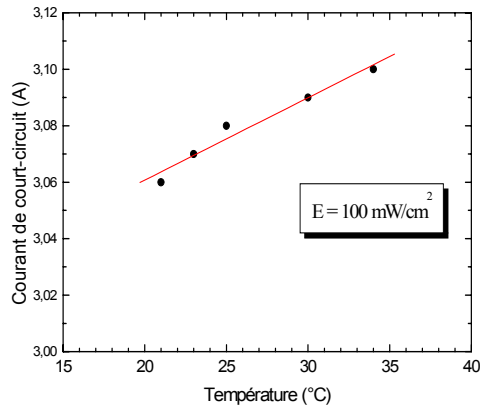


Fig. 9: Influence de la température sur le courant de court-circuit du module PWX 500

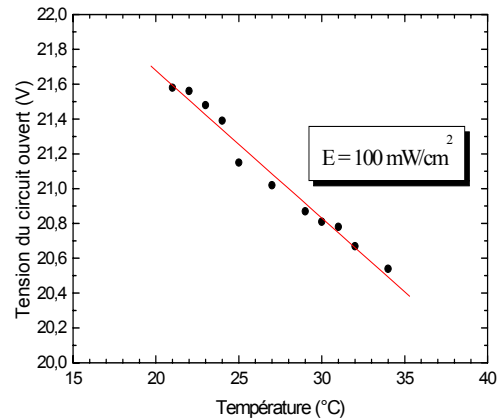


Fig. 10: Influence de la température sur la tension du circuit-ouvert du module PWX 500

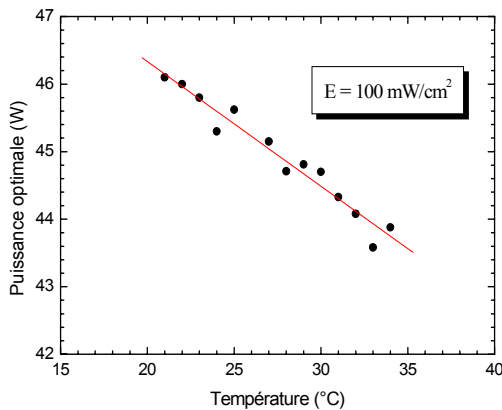


Fig. 11: Influence de la température sur la puissance optimale du module PWX 500

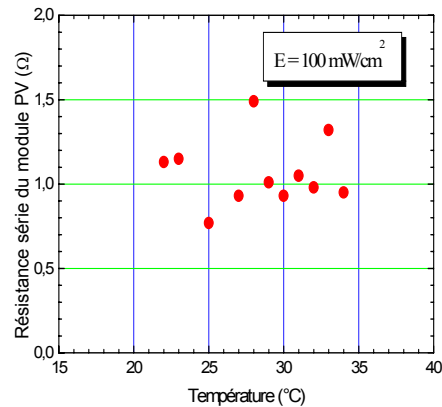


Fig. 12: Influence de la résistance série en fonction de la température du module PWX 500.

Les coefficients de température des performances électriques du module sont résumés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Coefficients de température des performances du module PV PWX 500.

P	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
β_1	9.2 mA/°C	-84.1 mV/°C	-190.0 mW/°C
β_2	0.30 %/°C	-0.38 %/°C	-0.40 %/°C

D'autre part la résistance série, liée à la résistance des électrodes de contacts et celle du matériau, varie selon la température comme illustre par la figure 12. A 25 °C la résistance série du module est de $0.8 \text{ } \Omega$. de ce fait, si on suppose que les cellules solaires sont identiques, la résistance série moyenne de la cellule est de $22 \text{ m}\Omega$.

6. ETUDE EXPERIMENTALE DU PHENOMENE HOT-SPOT

La procédure de test du phénomène "Hot-Spot" dans un module PV est un test de contrôle de qualification. Le but de cette procédure est de définir une méthode de test simple et rapide permettant d'évaluer les effets d'un échauffement localisé par exemple suite à la présence de cellules solaires incompatibles ou partiellement

occultées par des causes externes [7]. La figure 13 montre l'effet de l'occultation de la cellule de test sur le courant de court-circuit et le courant optimal du module. Il est aisé de montrer que dans ce cas de figure la condition de la procédure de test est vérifiée et par conséquent le facteur d'occultation favorisant le phénomène "Hot-Spot" est de 75%. La caractéristique I-V du module sous l'effet du phénomène Hot-Spot est illustrée par la figure 14.

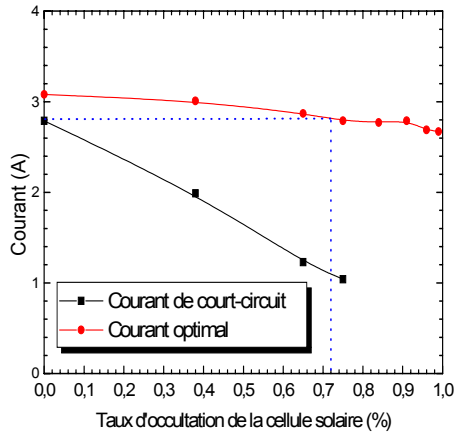


Fig. 13: Conditions favorisant le phénomène Hot-Spot du module PWX 500

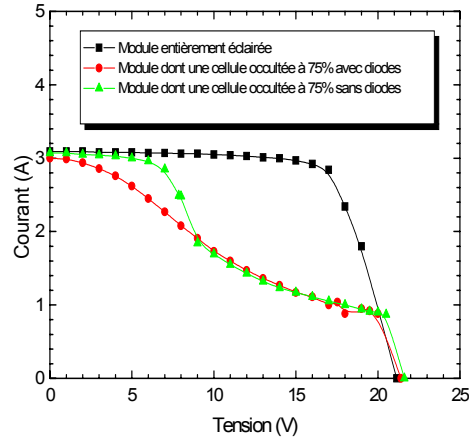


Fig. 14: Caractéristique I-V sous les conditions du Hot-Spot du module PWX 500

7. SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE DANS UN MODULE PV.

Le fonctionnement d'une cellule solaire sous éclairage est décrit par les équations suivantes [8]:

- *Sous polarisation directe (mode générateur):*

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha(V + R_s I)}{nKT_c} - 1 \right) \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (4)$$

- *Sous polarisation inverse (mode récepteur):*

$$I = I_{sc} + \lambda_{inv} \cdot (R_s I + V)^2 \quad (5)$$

La figure 15 montre une simulation de la caractéristique I-V du module PWX 500 obtenue par le logiciel PV SYST Version 2 [8]. La puissance dissipée dans cellule occultée sous les conditions de Hot-spot (taux d'occultation de 72%) est de 37W dont la température est de 149°C.

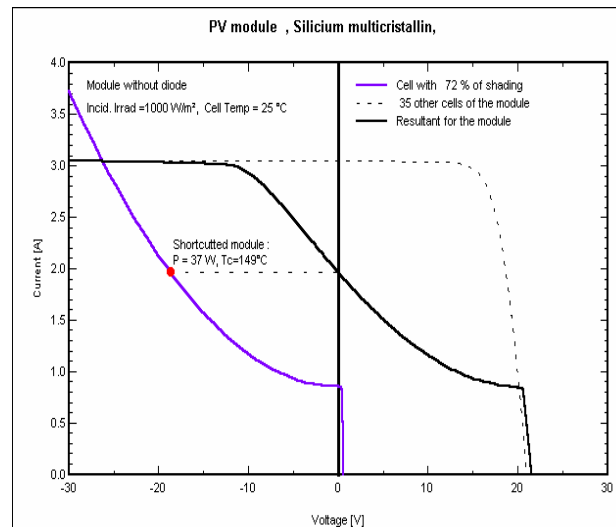


Fig. 15: Caractéristique I-V du module PWX 500 sous les conditions Hot-Spot

8. PERFORMANCES DU MODULE PV PWX 500 EN MILIEU NATUREL

8.1. Caractéristiques I-V du module PV en milieu naturel

Cet essai a pour but de faire une évaluation préliminaire de la capacité d'un module à supporter une exposition dans les conditions du site naturel et de révéler les effets d'une dégradation synergétique qui ne

pourraient pas être détectées par des essais effectués en laboratoire [9]. L'étude a été effectuée sur le site saharien de Béchar en exploitant les données relevées sur la station d'acquisition de données ENERPAC reliée à un système PV de pompage à base de modules PV type PWX 500. La figure 16 illustre le schéma du dispositif expérimental de l'installation PV [10].

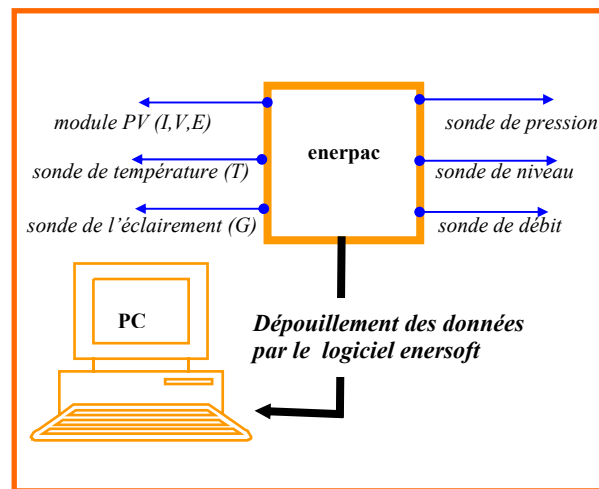


Fig. 16: Schéma du dispositif expérimental de l'installation de la chaîne d'acquisition de données enerpac sur le site de Béchar

La figure 17 illustre les variations journalières moyennes de l'éclairement global incident sur une surface inclinée qui correspond à la latitude du site de Béchar. La figure 18 illustre un réseau de caractéristiques I-V obtenues sous différentes conditions expérimentales.

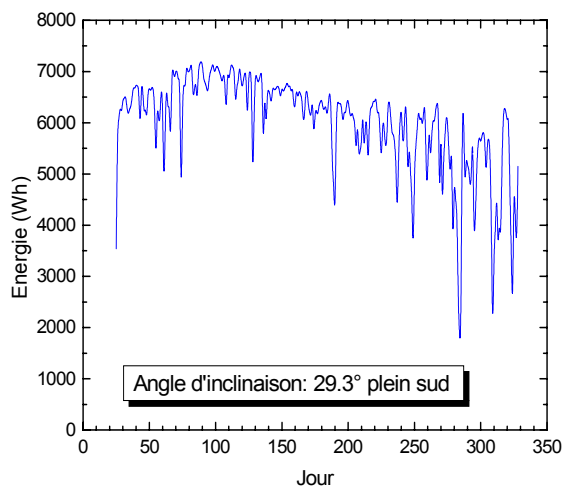


Fig. 17: Evolution de l'éclairement global sur le site saharien de Béchar.

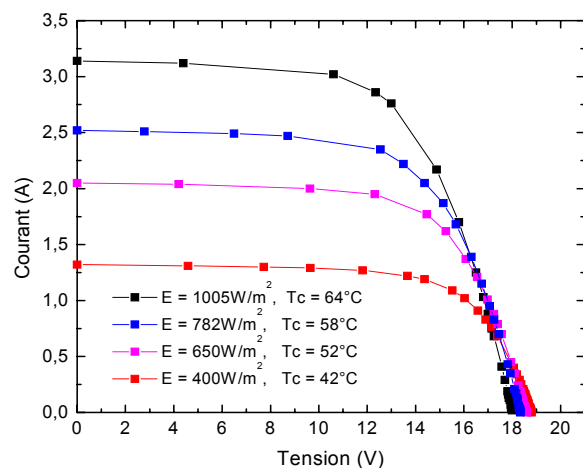


Fig. 18: Caractéristiques I-V du module PWX 500 sur le site saharien de Béchar

8.2. Comportement thermique du module PV en milieu naturel

D'une manière générale la température d'une cellule solaire dans un module PV atteint une valeur limite correspondant à l'équilibre thermique entre la température ambiante et l'échauffement dû au rayonnement incident [10]. Le bilan thermique est décrit par l'équation suivante :

$$\alpha G_{inc} = k(NOCT - T_{amb}) \quad (6)$$

G_{inc} : Rayonnement incident

α : Coefficient d'absorption du rayonnement solaire

k : Facteur de pertes thermiques

T_{amb} : Température ambiante

NOCT : Température nominale de fonctionnement d'une cellule solaire

La méthode proposée pour le calcul du NOCT permet d'évaluer la température nominale de fonctionnement d'une cellule dans un module PV suivant une procédure normalisée [11]. L'intérêt de calcul du NOCT réside dans le fait que ce paramètre est utilisé dans le dimensionnement des systèmes PV comme facteur de production d'énergie. La figure 19 illustre la méthode de la régression linéaire pour le calcul du NOCT

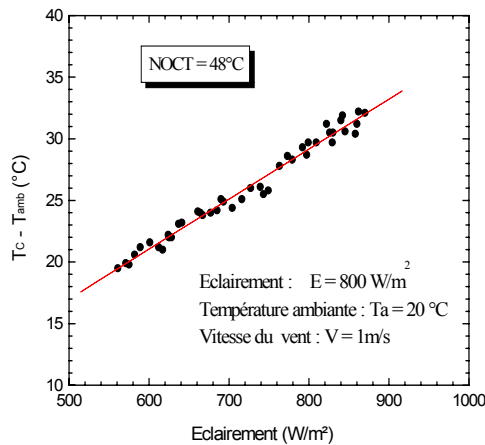


Fig. 19: Evolution de l'écart de température cellule solaire-ambiance naturelle ($T_c - T_a$) en fonction de l'éclairement.

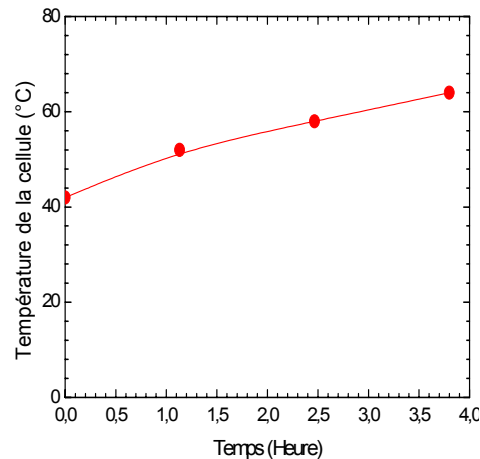


Fig. 20: Evolution de la température de la cellule solaire en milieu naturel en fonction du temps

En milieu naturel la température d'équilibre est atteinte après environ quatre heures d'exposition comme l'illustre la figure 20. La température limite est d'environ 60°C. D'une manière générale, la valeur limite de la température dans un module PV est liée à la nature de la technologie d'encapsulation, le mode d'installation du module PV ainsi que les conditions de l'environnement externe [12]. D'où la nécessité d'utiliser une nouvelle méthodologie normative, qu'il va falloir élaborer au sein du comité technique TC82 de la CEI, pour des applications spécifiques au climat saharien du sud de l'Algérie.

9. CONCLUSION

Nous avons montré que les performances d'un module PV à base de cellules solaires au silicium multicristallin sont étroitement liées à l'éclairement et aussi à la température de fonctionnement des cellules solaires. Cette variation est généralement linéaire pour un éclairement inférieur à 1000 W/m². La condition favorisant le phénomène Hot-Spot correspond à l'occultation de 75 % de la surface la cellule et le NOCT du module est de 48°C. En milieu naturel (site saharien) la température limite de la cellule solaire est d'environ 60°C qui pratiquement est le double de celle mesurée en milieu contrôlé. Cette spécificité climatique devra être prise en considération dans l'étude de la fiabilité et l'efficacité énergétique du module PV dans les régions du sud de l'Algérie.

REFERENCES

- [1] A. Mouhoub, "Le Silicium Polycristallin à Usage Terrestre", CEME'97, Biskra du 03 au 05 novembre 1997.
- [2] Description Technique du Module PV PWX 500, Disponible sur <<http://www.photowatt.com>> (consulté le 1^{er} octobre 2003).
- [3] Spi-Sun Simulator 240 Solar Panel I-V System
- [4] "Essai d'Isolément", Article 10.3 de la CEI 1215.
- [5] G. Freisen, W. Zaiman and J. Bishop, "Temperature Behaviour of Photovoltaic Parameter. 2nd World Conference and Exhibition on Solar Energy Conversion", Vienna (Austria) 6-10 July 1998.
- [6] CEI 891 (1987), "Procédures pour les Corrections en Fonction de la Température et de l'Eclairement à Appliquer aux Caractéristiques I-V Mesurées des Dispositifs Photovoltaïques au Silicium Cristallin."
- [7] G. Bhattacharya and C. Neogy, "Removal of the Hot-Spot Problem in Photovoltaic Modules and Arrays", Solar Cells, 31 (1991) 1-12.
- [8] A. Mermoud, "PVSYST a User Friendly Software for PV Systems Simulation", 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference. 1995. Nice (France)
- [9] "Essai d'Exposition en Site Naturel", Article 10.8 de la CEI 1215.
S. Kadri, "Etude des Performances d'une Installation Photovoltaïque sur le Site de Béchar", Mémoire de Magister, CUB, janvier 2002.
- [10] S. Krauter et al. "Hybrid thermal insulating PV Facade Elements". 2nd World Conference and Exhibition on Solar Energy Conversion. 6-10 July Vienna (Austria) 1998.
- [11] "Mesure de la Température Nominale d'Utilisation des Cellules (NOCT)." Article 10.5 de la CEI 1215.
- [12] P. Koltay, J. Wenk and K. Bücher, "Outdoor Measurements of NOCT and Simulation of its Influence on Energy Collection", 2nd World Conference and Exhibition on Solar Energy Conversion, 6-10 July Vienna (Austria) 1998.