

## Modélisation de la caractéristique de sortie d'un module photovoltaïque installé à Ouargla

Ahmed DJAFOUR<sup>1,\*</sup>, Mohamed Salah AIDA<sup>2</sup> et Boubaker AZOUI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Univ Ouargla, Fac. des Sciences Appliquées, Lab. LAGE, Ouargla 30 000 (Algérie)

<sup>2</sup>Univ Constantine 1, Fac. des Sciences, Constantine 25000, Algérie

<sup>3</sup>Univ Hadj Lakhdar Batna, Fac. de Technologie, Laboratoire LEB, Batna 05000, Algérie

\*E-mail : [djafour.ah@univ-ouargla.dz](mailto:djafour.ah@univ-ouargla.dz)

**RÉSUMÉ :** Dans le but d'étudier une approche intégrée du système solaire photovoltaïque, nous avons réalisé une validation d'un modèle de la caractéristique de sortie d'un module photovoltaïque. Ce travail est effectué en tenant compte de la variation de deux paramètres qui sont l'éclairement (E) et la température (T), en se basant sur des résultats expérimentaux obtenus sur site et les données de constructeur. L'étude de ce modèle nous a permis de présenter une méthode de translation de la caractéristique courant-tension donnée dans des conditions standards d'éclairement et de température, vers d'autres conditions distinctes désirées.

**MOTS-CLÉS :** Modélisation, Simulation, Matlab, Module photovoltaïque, Validation expérimentale.

**ABSTRACT:** In the aim to study an integrated approach of the solar photovoltaic system, we have made a validation of a model of the output characteristic of a photovoltaic module. This work is realized taking into account the variation of two parameters which are the irradiation (E) and the temperature (T), based on experimental results obtained on-site and the manufacturer data. The study of this model has allowed us to present a method of translation of the current-voltage characteristic given under standard conditions of irradiation and temperature, to other distinct conditions desired.

**KEYWORDS:** Modeling, Simulation, Matlab, photovoltaic module, Experimental Validation.

### I. Introduction

Les problèmes climatiques et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre poussent les chercheurs à trouver des moyens de production d'énergie moins polluants.

La conversion photovoltaïque du rayonnement solaire en électricité est un des moyens d'exploitation du gisement solaire. Elle est réalisée par des cellules solaires. Il est à noter qu'en dépit de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans une cellule, ni sous forme chimique ni sous aucune autre forme. Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement [1].

Actuellement le rendement de conversion d'énergie solaire en énergie électrique avec des modules au silicium cristalline les plus efficaces est encore faible (souvent inférieur à 20 %), avec comme objectif d'atteindre un rendement de 23% en 2020. Ce rendement faible ainsi que le coût élevé de la source photovoltaïque ont incité les utilisateurs à exploiter le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur PV et le récepteur associé. Cette adaptation est effectuée à l'aide de convertisseurs statiques contrôlés pour différents modes de fonctionnement [1, 2].

Le coût et les performances des systèmes PV installés dépendent fortement des modules PV. Cependant, les paramètres électriques des modules, à savoir la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit, peuvent être différentes de ceux fournis par le constructeur, d'ailleurs, comme ces paramètres peuvent changer à mesure que le module vieillit. Par conséquent, le comportement du modèle mathématique d'un module PV peut ne pas correspondre au fonctionnement aux conditions réelles. Différents modèles de cellules solaires ont été présentés dans la littérature [3-7]. Le modèle le plus précis, noté modèle double diode [3], utilise un circuit équivalent avec deux diodes, mais il est assez complexe en raison de la présence d'une double exponentielle et six paramètres à attribuer.

Un autre modèle, sur la base de circuit d'une seule diode, a ensuite été proposé dans [4, 5]. Dans les deux cas, les modèles mathématiques nécessitent la connaissance respectivement de six et cinq paramètres qui ne sont pas directement disponibles sur les fiches techniques des fabricants. Un modèle avec tous les paramètres réalisables à partir de fiche de fabricant est proposé dans [7]. La détermination des paramètres d'un tel modèle nécessite l'utilisation de méthodes numériques.

Pour la réalisation d'un programme de simulation et d'optimisation des systèmes Photovoltaïques (PV), il est indispensable de disposer d'un modèle qui reproduise la courbe caractéristique I-V de manière exacte. La plupart des modèles du générateur PV existants sont validés dans des conditions standards de fonctionnement ( $T=25^{\circ}\text{C}$  ;  $E=1000 \text{ W/m}^2$ ).

L'objectif de ce travail est de valider un modèle du générateur PV sous différentes conditions d'éclairage et de température, en se basant sur des données expérimentales et les données de constructeur.

Dans cet article nous proposons un modèle d'un module photovoltaïque, qui n'utilise que des paramètres fournis par les fiches techniques des fabricants et, en outre, il n'exigeait pas de méthodes numériques. Une description détaillée des expérimentations et du modèle est présentée. Une validation expérimentale du modèle est prouvée à des conditions non standard, enfin différents résultats de simulation sont mis en évidence.

## II. Installation expérimentale

Le site d'implantation de notre installation d'expérimentation est l'université de Ouargla. Cette installation est dédiée à l'étude et la caractérisation des modules photovoltaïques. Pour notre expérimentation nous avons utilisé un module solaire TE 500 de solar Energy, type polycristallin. Les paramètres de ce module sont mesurés et enregistrés comme suite :

- La tension et le courant du module sont mesurés par un voltmètre numérique (METEX M-4660M) et un ampèremètre (MULTIMETER GDM 351).
- Des thermocouples sont utilisés pour mesurer la température.
- Un solarimètre de type MGE mode est utilisé pour mesurer l'intensité des radiations solaires, le capteur de solarimètre est installé sur la structure de module et parallèlement à sa surface. Le schéma de l'installation est présenté à la figure 1.

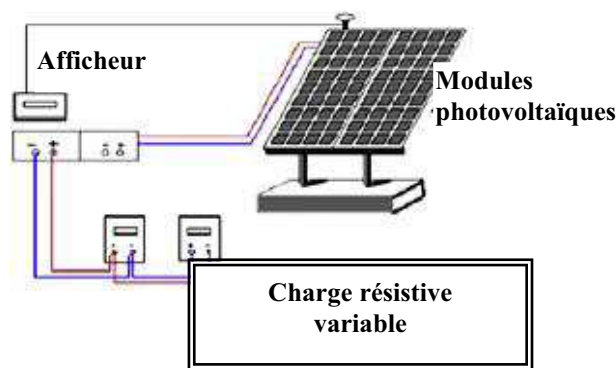


Figure 1 : Installation d'expérimentations

## III. Tests et modélisation de module PV

### III.1. Tests sur le Module PV

Pour réaliser ces mesures, il est important de s'assurer d'effectuer les relevés à ensoleillement constant. La méthode la plus simple de tracer une caractéristique (I-V) d'un panneau PV est de connecter directement à ses bornes une résistance variable de 0 à l'infini. Cependant, il faut prendre quelques précautions pour faire le choix de ce rhéostat.

La procédure de mesures effectuées sur notre panneau TE500, consiste à prendre des points de mesure des couples (courant – tension) de module régulièrement disposés sur le graphe,  $I=f(V)$  pour des conditions d'éclairement et de température bien déterminées. Par la suite nous présentons les résultats de mesure des caractéristiques (I-V) et (P-V) confrontés avec les résultats de modèle de simulation.

## III.2. Modélisation

### III.2.1. La caractéristique de Module PV :

La caractéristique (I-V) pour un module est décrite par l'équation non linéaire (1). Pour des modules supposés dépourvus de fuites ( $R_{sh}$  infinie) cette relation est [8], [9] :

$$V = V_{th} \times \log\left(\frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1\right) - R_s I \quad (1)$$

Avec :  $V_{th}$ ,  $I_{ph}$ ,  $I_s$  et  $R_s$ , respectivement la tension thermique, Le photo-courant, le courant de saturation et la résistance série de module.

L'identification de l'équation (1) nécessite trois mesures, pour un éclairement et une température donnés : le courant de court circuit, la tension de circuit ouvert et les coordonnées du point de la puissance optimale ( $I_{op}$ ,  $V_{op}$ ).

La tension  $V_{th}$ , la résistance série  $R_s$  sont respectivement identifiées par les équations suivantes [6], [10] :

$$V_{th} = n_s * n * k * \frac{T}{q} \quad (2)$$

$$R_s = \frac{(V_{th} * \ln[(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}}) * \exp(\frac{V_{co}}{V_{th}}) + \frac{I_{op}}{I_{cc}}] - V_{op})}{I_{op}} \quad (3)$$

Avec :  $n_s$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $q$  et  $I_{cc}$ , respectivement le nombre des cellules en série dans le module, le facteur d'idéalité ( $1 < n < 2$ ) pour une cellule, constante de Boltzmann, la charge de l'électron et le courant de court circuit.

Les paramètres du générateur avec ( $N_s$  modules en séries et  $N_p$  modules en parallèles) identifiant l'équation (1) sont reliés à ceux du module solaire par les relations suivantes : l'indice "mod " signifie, module

$$I_{cc} = N_p.I_{cc}(mod) \quad (4)$$

$$I_{op} = N_p.I_{op}(mod) \quad (5)$$

$$V_{oc} = N_s.V_{oc}(mod) \quad (6)$$

$$V_{op} = N_s.V_{op}(mod) \quad (7)$$

$$R_s = \frac{N_s}{N_p} R_s(mod) \quad (8)$$

### III.2.2. Evolution de la caractéristique (I-V)

La courbe (I-V) de l'équation (1) est une courbe arbitraire de référence, applicable à un niveau d'éclairement et de température de la cellule en particulier. Pour d'autres valeurs d'éclairement et de température, l'évolution de l'équation (1) se fait par les équations suivantes [6], [10,11] :

Photo courant :

$$I_{ph}(E,T) = I_{ccref} * (\frac{E}{E_{ref}}) * [1 + \alpha * (\Delta T)] \tag{9}$$

Avec : E, l'éclairement, (W/m<sup>2</sup>)

α : Le coefficient de température de courant, (A/°C)

$$\Delta T = T_{mod} - T_{mod\ ref} \tag{10}$$

T<sub>mod</sub> : La température de module qui varie en fonction de la température ambiante et l'éclairement, selon la relation linéaire suivante [12-13] :

$$T_{mod} = T_{amb} + (\frac{NOCT - 20}{800}) * E \tag{11}$$

Avec : NOCT la température nominale de fonctionnement des cellules de module qui est mesurée sous les conditions suivantes : journée claire d'ensoleillement moyenne de 800W/m<sup>2</sup>, une température ambiante de 20°C et une vitesse moyenne du vent de 1m /s.

Courant de saturation de module :

$$I_s = I_{s,ref} * (\frac{T_{mod}}{T_{ref}})^3 * \exp[(\frac{E_g * q}{n * k}) * (\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{mod}})] \tag{12}$$

Avec : E<sub>g</sub>, l'énergie de gap

Dans notre travail, nous avons utilisé le module photovoltaïque du type TE500. Les caractéristiques de ce module, dans les conditions standards (1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C et Air masse 1,5), sont présentées dans le tableau I.

**Tableau I : Spécification de Module TE500 (36 Cellules Connecté en Série) dans les Conditions Standard, [14]**

Puissance maximale, P <sub>op</sub>	55Wc
Tension de puissance maximale, V <sub>op</sub>	17.5V
Courant de puissance maximale, I <sub>op</sub>	3.14 A
Tension de circuit ouvert, V <sub>co</sub>	22.20 V
Courant de court circuit, I <sub>cc</sub>	3.5 A
Le coefficient de température de courant	0,95 mA/°C
La surface d'un module 1.003*0.462m <sup>2</sup>	

#### IV. Validation de modèle de translation de la caractéristique (I-V)

Pour valider le modèle mathématique de translation des caractéristiques (I-V) que nous avons présenté, nous avons simulé les caractéristiques (I-V) pour les différentes valeurs d'éclairement et de température par l'utilisation de notre organigramme exécuté sous Matlab, et cela par l'utilisation des équations (1) à (12) et les données de tableau I.

##### IV.1. Présentation des résultats

##### IV.1.1. Translation des courants de courts circuits et des tensions de circuits Ouverts

Nous présentons les résultats des mesures sur un panneau solaire TE500 installé dans notre site d'expérimentation et les résultats de simulation avec notre modèle. Le tableau II donne les

résultats des translations en appliquant la méthode de translation pour le cas de référence :  $E=1000\text{W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ .

L'erreur relative est calculée par la relation suivante :

$$E_{r,X}(\%) = \frac{X_{cal} - X_{mes}}{X_{mes}} * 100 \quad (13)$$

Avec X :  $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ .

$X_{mes}$  : La valeur mesurée

$X_{cal}$  : La valeur calculée

$E_{r,X}$  : L'erreur est exprimée en (%)

**Tableau II : Résultats Comparatifs Selon le Modèle de Simulation et les Mesures**

Temps(h)	08h30	09h	10h	11h	11h30	12h30
E ( $\text{W/m}^2$ )	219	347	527	603	633	737
$T_{mod}$ ( $^\circ\text{C}$ )	19.4	20.7	28.9	35.2	36.5	39.2
$I_{cc\_mes}$ (A)	0.75	1.19	1.88	2.15	2.25	2.6
$V_{co\_mes}$ (V)	20.5	20.9	20.75	20.4	20.5	20.4
$I_{cc\_cal}$ (A)	0.76	1.20	1.85	2.13	2.23	2.61
$V_{co\_cal}$ (V)	20.38	20.95	20.93	20.65	20.62	20.65
$E_{r\_Icc}$ (%)	1.65	1.64	-1.52	-0.88	-0.45	0.55
$E_{r\_Vco}$ (%)	-0.5	0.27	0.90	1.24	0.63	1.27

La comparaison de notre méthode pour la translation des points des courbes (I-V) de certaines conditions d'éclairements et de température à partir des conditions initiales de référence  $1000\text{W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ , appliquées au même module photovoltaïque TE500 et en utilisant la méthode de translation selon notre modèle (voir le tableau II), avec les valeurs des points mesurées expérimentalement s'est avérée très favorable pour notre modèle.

#### IV.1.2. Comparaison des caractéristiques expérimentales et simulées de sortie PV

Les caractéristiques (I-V) et (P-V) du panneau TE500 expérimentales et simulées et les points des puissances maximales correspondantes sont indiquées dans les figures (2) et (3). Les résultats expérimentaux montrent qu'au point de puissance maximale la tension était de 15,1 V et le courant était de 1.45 A. Et pour la même tension d'entrée, dans le modèle de simulation nous trouvons 1.522 A ; un rapprochement a été trouvé entre eux et il se manifeste dans la figure 2 avec un écart de 4,7 %.

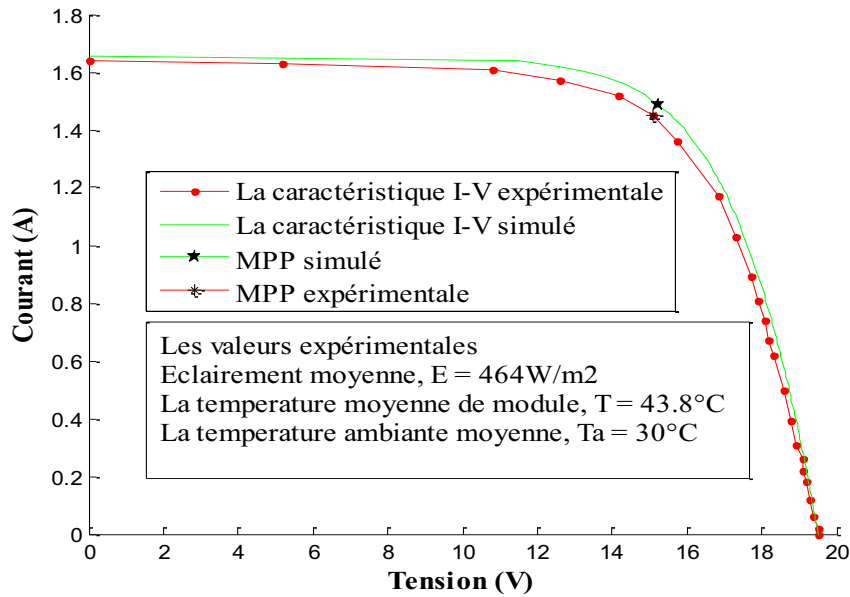


Figure 2 : La courbe de la caractéristique I-V expérimentale et simulé de module PV TE500

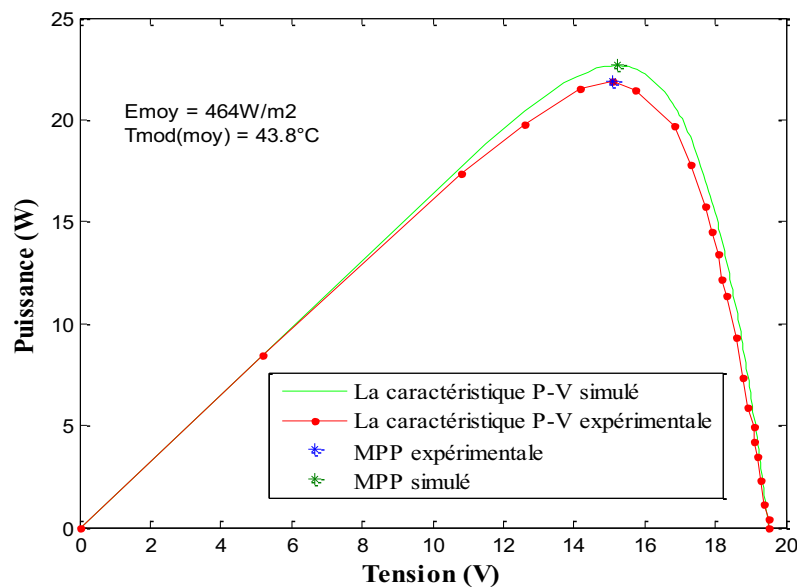


Figure 3 : La courbe de la caractéristique P-V expérimentale et simulé de module PV TE500

Les modules PV TE500 utilisés pour cette analyse ont été caractérisés expérimentalement en utilisant la procédure détaillée qui a été expliqué dans le paragraphe III de cet article. Les expériences ont été menées à Ouargla dans une journée claire et sans nuage. Pour simuler la courbe caractéristique I-V, les valeurs moyennes de l'irradiation solaire et la température ambiante  $464 \text{ W/m}^2$  et  $30^\circ\text{C}$  respectivement, pendant le temps de la prise de mesures ont été prises comme entrées dans le programme de simulation.

**IV.2. Discussions des résultats**

Pour une tension donnée les courants générés par le modèle de simulation sont plus élevés que les courants trouvés expérimentalement, et la différence qui reste légère est probablement due en partie à la négligence de la résistance parallèle dans le circuit équivalent des cellules photovoltaïques.

Notre modèle de simulation donne pour la température moyenne du module PV la valeur  $44.5^{\circ}\text{C}$ , en utilisant la moyenne des irradiances et des températures ambiantes mesurées expérimentalement. Ceci est très proche de la valeur moyenne de la température du module PV mesurée expérimentalement qui est de  $43.8^{\circ}\text{C}$  en utilisant tous les points des mesures. Cette légère différence est principalement due au fait que la température PV est mesurée à l'arrière du module PV, ce qui n'est pas exactement la température de jonction des cellules PV.

Désormais, uniquement à l'aide des données climatiques du site (ensoleillement et température ambiante) et des données du constructeur du module, nous pouvons connaître les couples (tension et courant) disponibles en sortie du module PV et de générateur qui sera composé avec ces modules ; voir, la figure 4 et la figure 5.

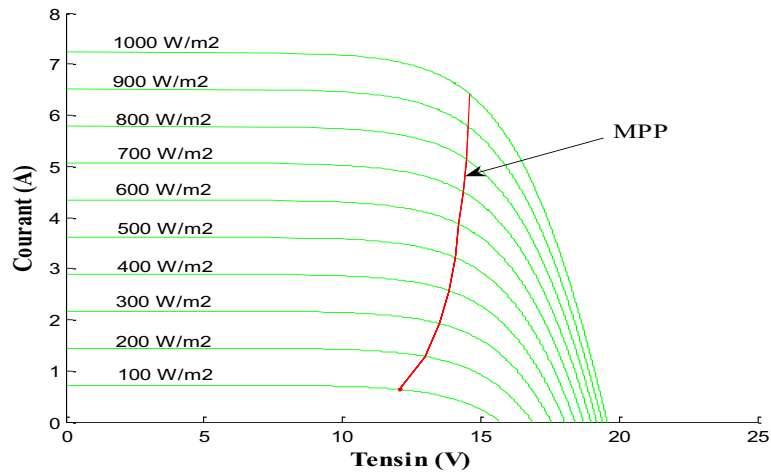


Figure 4 : Les caractéristiques (I-V) pour deux modules TE500 en parallèle à  $T_{\text{mod}} = 60^{\circ}\text{C}$

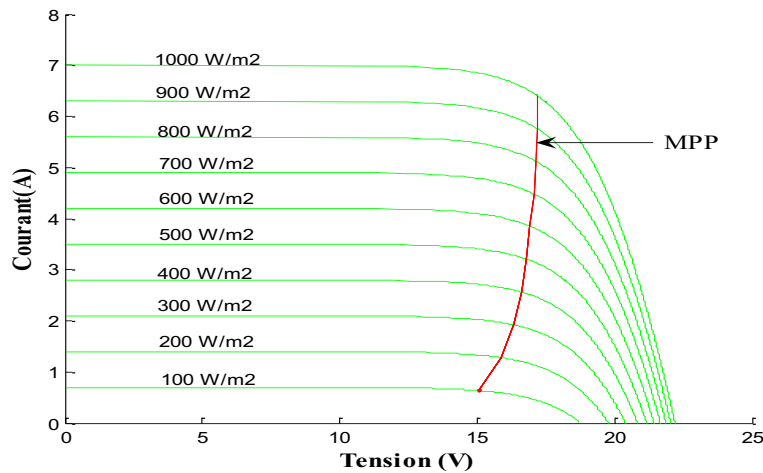
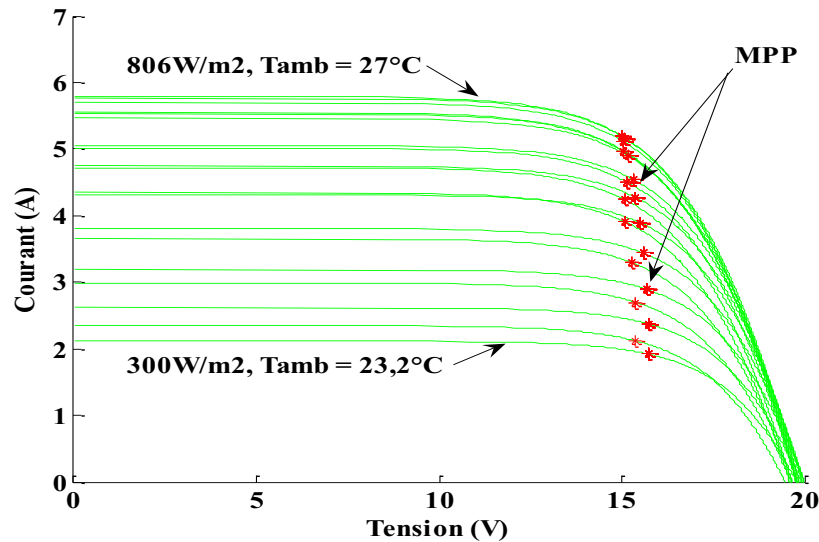


Figure 5 : Les caractéristiques (I-V) pour deux modules TE500 en parallèle à  $T_{\text{mod}} = 25^{\circ}\text{C}$

### IV.3. Application des résultats de simulation

La figure 6 présente les résultats de simulation de la caractéristique (I-V) pour 2 modules en parallèles, et cela suite à l'introduction dans notre programme des données des mesures réels d'éclairement et de température de site de Ouargla pour une journée avec 09 heures de mesures de 08h à 17h.



**Figure 6 : Les caractéristiques (I-V) pour deux modules TE500 en parallèle avec les différentes valeurs d'éclairement et de température pour une journée à Ouargla**

**V. Conclusion**

Les facteurs climatiques, à savoir, l'éclairement et la température influent fortement sur les performances des systèmes de conversion d'énergie solaire à base de générateur photovoltaïque, l'élément le plus onéreux et le plus sensible aux conditions climatiques sur le site. Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle empirique à une diode pour simuler le fonctionnement des modules PV pour différentes conditions d'ensoleillement et de température. Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des données techniques du constructeur.

Nous avons confronté nos résultats de simulation à des données provenant de notre site d'expérimentations des modules. Un bon accord entre les données expérimentales mesurées et les données simulées a été observé. Ce constat témoigne de la qualité du modèle proposé dans cette étude.

L'outil présenté dans cette étude a l'avantage d'être modulaire, ce qui nous permet d'analyser et d'optimiser le fonctionnement global du système photovoltaïque pour différentes utilisations électriques (différentes charges), en fonction des données météorologiques du site, et donc une meilleure gestion des systèmes Photovoltaïques.

**Références**

[1] Y. Pankow ; "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque " ; Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'ENSAM ED432, 2004.

[2] Greenpeace; "Final Solar Generation VI full report Ir.pdf". Disponible sur : <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2011/Final%20SolarGeneration%20VI%20full%20report%20lr.pdf>. ; Consulté le 20/12/2011.

[3] J. A. Gow and C. D. Manning; "Development of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies"; IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. **146**, N° 2, pp. 193-200 (1999).

[4] S. Liu and R. A. Dougal ; "Dynamic Multiphysics Model for Solar Array" ; IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. **17**, N° 2, pp. 285- 294 (2002).

[5] G. Walker; "Evaluating MPPT Converter Topologies using a Matlab PV Model"; Journal of electrical and electronics engineering, Australia, Vol. **21**, pp. 49–55 (2001).



- [6] W. Xiao, W. G. Dunford and A. Capel ; "A novel modeling method for photovoltaic cells" ; 35<sup>th</sup> Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [7] S. Sera, R. Teodorescu and P. Rodriguez ; "PV panel model based on datasheet values" ; IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2007, 4-7 June 2007, pp. 2392 – 2396.
- [8] M. Buresch ; Photovoltaic energy systems ; New York: McGraw Hill Book Company; (1983).
- [9] F. Lasnier and T. Gan Eng; Photovoltaic engineering handbook, New York, USA: Adam Hilger; 1990.
- [10] R. Khezzar, M. Zereg and A. Khezzar ; "Comparative study of mathematical methods for parameters calculation of current-voltage characteristic of photovoltaic module" ; pp. I-24 - I-28, Electrical and Electronics Engineering, 2009.
- [11] T. U. Townsend; "A method for estimating the long term performance of direct- coupled photovoltaic systems"; MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [12] E. Lorenzo; "Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic System"; Progensa, Sevilla (1994).
- [13] T. Markvart ; Solar Electricity, John Wiley & Sons, England (1994).
- [14] "Fiche technique des modules TE500" ; disponible sur le site : [http://www.ecocalc.com/manufacturier\\_pv/41/TOTAL+ENERGIE/TE+500-55?ep=1](http://www.ecocalc.com/manufacturier_pv/41/TOTAL+ENERGIE/TE+500-55?ep=1).; Consulté le 02/09/2011.