



Modélisation de la Caractéristique de Sortie d'un Module Photovoltaïque Installé à Ouargla

A.Djafour¹, M.S.Aida², B.Azoui³

¹Laboratoire LAGE, Faculté des Sciences Appliquées, Université Kasdi Merbah Ouargla
Ouargla, Algérie

¹E-mail: djafour.ah@univ-ouargla.dz

²Faculté des Sciences, Université de Constantine
Constantine, Algérie

²E-mail: aida_salah2@yahoo.fr

³Faculté des Sciences de L'Ingénieur, Laboratoire LEB, Université de Batna
Batna, Algérie

³E-mail: azoui_b@yahoo.com

Résumé — Dans le but d'étudier une approche intégrée du système solaire photovoltaïque. Dans ce travail nous avons réalisé une validation d'un modèle de la caractéristique de sortie d'un module photovoltaïque, 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.

Keywords — Modélisation, Simulation, Matlab, Module photovoltaïque, Validation expérimentale

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 différents 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'un double exponentiel 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'éclairement 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 PV 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 a été présentée. Une validation expérimentale du modèle est prouvée à des conditions non standard, enfin différents résultats de simulation sont mis en évidence.

II. INSTALLATION EXPERIMENTAL

Le site d'implantation de notre installation d'expérimentation est l'université d'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 de 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.
- Une 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 fig.1.

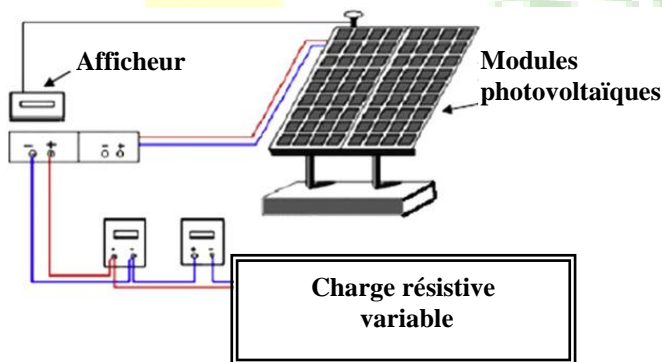


Fig.1 Installation d'expérimentations

III. TESTS ET MODELISATION DE MODULE PV

A. 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.

B. Modélisation

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 , R_s , respectivement la tension thermique, Le photocourant, 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, [10]-[11].

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

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

Avec: n_s , n , k , q , 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

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

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

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

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

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



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



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) ce fait par les équations suivantes [10]-[11]-[12].

Photo courant

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

Avec : E, L'éclairement, (W/m²)

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

$$\Delta T = T_{mod} - T_{mod\ ref} \quad (10)$$

T_{mod} : La température de module qui varie en fonction de la température ambiante et l'éclairement, selon la relation linéaire suivante, [13-14].

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

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/m², une température ambiante de 20°C et une vitesse moyenne du vent de 1m /s.

Courant de saturation de module

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

Avec: E_g , l'énergie de gap

Dans notre travail, on a utilisé le module photovoltaïque du type TE500. Les caractéristiques de ce module, dans les conditions standards (1000 W/m², 25 °C et Air masse 1,5), sont présenté dans le tableau I.

TABLEAU I

Spécification de Module TE500 (36 Cellules Connecté en Série)
Dans les Conditions Standard, [15]

Puissance maximale, P_{op}	55Wc
Tension de puissance maximale, V_{op}	17.5V
Courant de puissance maximale, I_{op}	3.14 A
Tension de circuit ouvert, V_{co}	22.20 V
Courant de court circuit, I_{cc}	3.5 A
Le coefficient de température de courant	0,95 mA/°C
La surface d'un module	1.003*0.462m ²

IV. VALIDATION DE MODELE DE TRANSLATION DE LA CARACTERISTIQUE (I-V)

Pour valider le modèle mathématique de translation des caractéristique (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.

A. Présentation des Résultats

1) *Translation des Points de Courant de Court Circuit et de Tension de Circuit Ouvert* : 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=1000W/m², T=25°C.

L'erreur relative est calculée par la relation suivante :

$$Er_{,x}(\%) = \frac{X_{cal} - X_{mes}}{X_{mes}} * 100 \quad (13)$$

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

X_{mes} : La valeur mesurée

X_{cal} : La valeur calculée

$Er_{,x}$: 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 (W/m ²)	219	347	527	603	633	737
T_{mod} °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
$Er_{I_{cc}}$ (%)	1.65	1.64	-1.52	-0.88	-0.45	0.55
$Er_{V_{co}}$ (%)	-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'éclairages et de température à partir des conditions initiales de référence 1000W/m^2 , 25°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.

2) *Comparaison des Caractéristiques Expérimentales et Simulées de Sortie PV* : Les caractéristiques (I-V) et de (P-V) du panneau TE500 expérimentales et simulés 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 se manifeste dans la figure(4.5) avec un écart de 4,7 %.

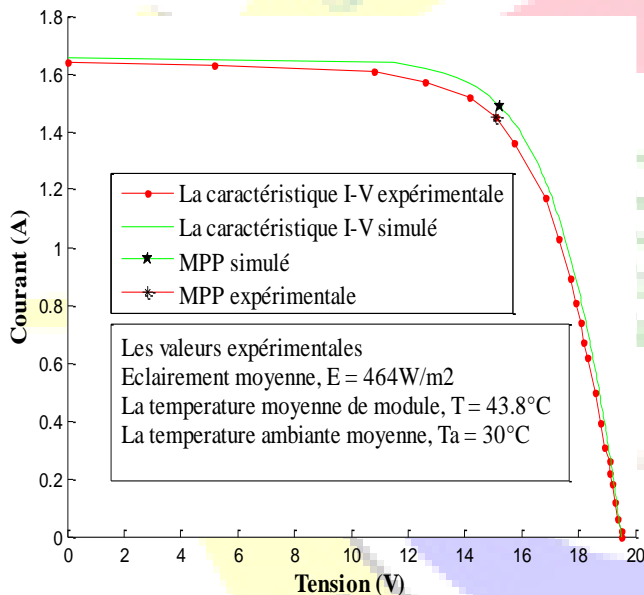


Fig.2 La courbe de la caractéristique I-V expérimentale et simulé de module PV TE500

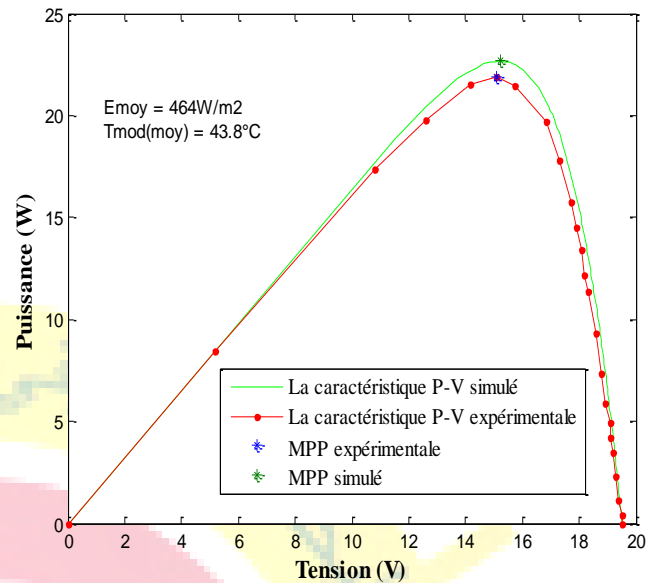


Fig3.La courbe de la caractéristique P-V expérimentale et simulé de module PV TE500

Les modules PV TE500 utilisés pour cette analyse ont été caractérisés expérimentalement en utilisant la procédure détaillée qui a été expliquée 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 W/m^2 et 30°C respectivement pendant le temps de la prise de mesures ont été prises comme entrées dans le programme de simulation.

B. 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°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°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, fig.4 et fig.5.

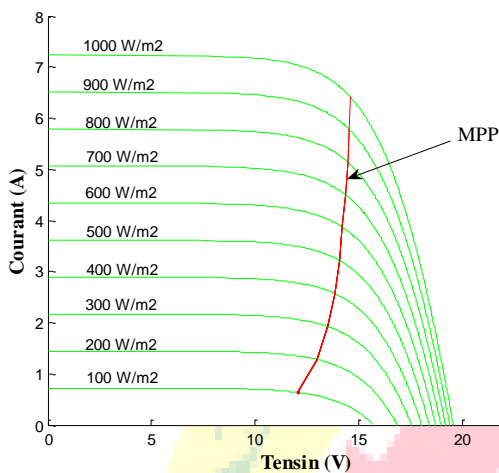


Fig4. Les caractéristiques (I-V) pour deux modules TE500 en parallèle à $T_{mod} = 60^{\circ}C$

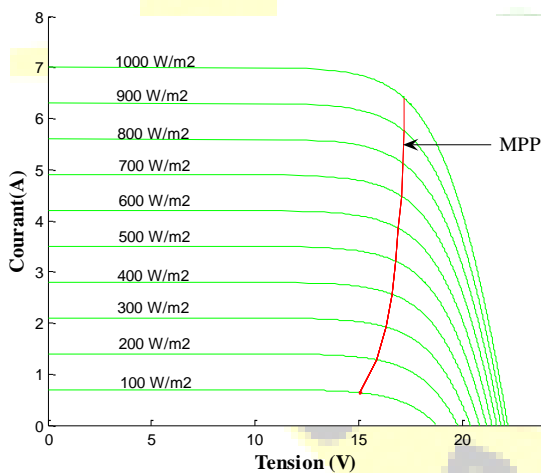


Fig5. Les caractéristiques (I-V) pour deux modules TE500 en parallèle à $T_{mod} = 25^{\circ}C$

C. Application des résultats de simulation

Dans la figure 6 on montre 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.

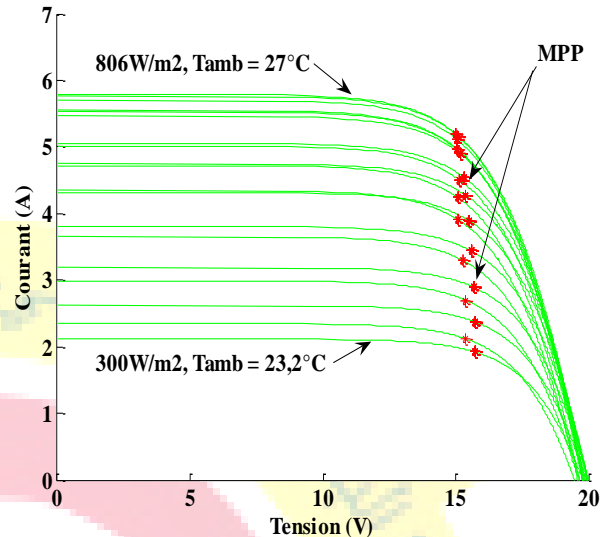


Fig6. Les caractéristiques (I-V) pour deux modules TE500 en parallèle avec les différentes valeurs d'éclairement et de température pour une journée à Ouargla

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 utilisation électriques (différentes charges) en fonction des données météorologiques du site et donc une meilleure gestion des systèmes Photovoltaïques.



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014**



REFERENCES

- [1] Y. Pankow, "Étude 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 lr.pdf". Disponible sur : <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2011/Final%20SolarGeneration%20VI%20full%20report%20lr.pdf>. visité le 20/12/2011.
- [3] J.A. Gow, C.D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 146, No.2, March 1999, pp.193-200.
- [4] S. Liu, R.A. Dougal, "Dynamic Multiphysics Model for Solar Array", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 17, No. 2, June 2002, pp. 285- 294.
- [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, W.G. A. Capel, "A novel modeling method for photovoltaic cells", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 2004.
- [7] S. Sera, R. Teodorescu, 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, T. Gan Eng, *Photovoltaic engineering handbook*, New York, USA: Adam Hilger; 1990.
- [10] W. Xiao, G. William Dunford, A. Capel, "A Novel Modeling Method for Photovoltaic Cells", 35th Annual *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany. 2004.
- [11] R. Khezzar, M. Zereg, A. Khezzar, A., "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.
- [12] 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.
- [13] E. Lorenzo, "Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic System", *Progensa, Sevilla*, 1994.
- [14] T. Markvart, *Solar Electricity*, John Wiley & Sons, England, 1994.
- [15] "Fiche technique des modules TE500", disponible sur le site http://www.ecocalc.com/manufacturier_pv/41/TOTAL+ENERGIE/TE+500-55?ep=1... Visité le 02/09/2011.