

Évaluation des différents modèles mathématiques pour caractériser les paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque

Nouar Aoun*, Mebrouk Bellaoui*, Farouk Meguellati*

* Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URERMS, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 01000, Adrar, Algeria

E-mail: nouar.aoun@gmail.com, bellaoui_meb@hotmail.com, farouksdz@yahoo.fr

Abstract

The different equivalent circuits of the photovoltaic cell are defined by the implicit nonlinear equations. In the literature several methods are available that help to solve these equations. This article examines and compares four different methods, i.e., four parameter (M4P), five parameters (M5P1, M5P2), and seven parameters (M7P) commonly used in solving nonlinear equations. The accuracy of these models is verified using three types of photovoltaic solar modules; monocrystalline, polycrystalline and thin layers. The successful results show that the five-parameter model (M5P1) is the most accurate model.

Keywords: methods, photovoltaic, monocrystalline, polycrystalline, thin layers

1. Introduction

La description mathématique de la caractéristique électrique de la cellule photovoltaïque est en général représentée par des systèmes des équations non linéaires. La plupart des modèles mathématiques développés dans la littérature sont basés sur les relations courant-tension qui résultent de simplifications au modèle de double diode proposé par [1]. Le modèle à une diode est supposé suffisant pour décrire les caractéristiques de la cellule photovoltaïque. De nombreuses chercheurs ont développé des méthodes pour résoudre ce modèle [2]. Fry [3] a développé une méthode explicite simplifiée en supposant que le courant photoélectrique est égal au courant du court-circuit. Zhou et al, dans [4] introduisent le concept du facteur de forme pour résoudre le point de puissance maximum. King [5] a développé un modèle à reproduire la courbe I-V en utilisant trois importants points: court-circuit, circuit ouvert, et le point de puissance maximale sur la courbe I-V. Do Soto et al. [6] décrivent une méthode pour trouver ces paramètres en utilisant seulement les données disponibles dans les fiches techniques du module PV. La fiche technique d'un module photovoltaïque fournit les données nécessaires pour la modélisation dans les conditions de test standard (STC). Ces points sont: le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le point de puissance maximale, les coefficients de température du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert. Villalva et al. [7] définirent explicitement le facteur d'idéalité γ , puis résolurent les autres paramètres itérativement.

Dans ce travail, Quatre différents modèles mathématiques pour extraire les paramètres électriques inconnus d'un circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque sont étudiés et comparent avec des mesures expérimentales extraites à partir de la fiche technique des modules photovoltaïques de différentes technologies.

2. Modélisation des modules photovoltaïques

Quatre différents modèles mathématiques sont étudiés et comparent avec des mesures expérimentales extraites à partir de la fiche technique des modules photovoltaïques à savoir :

2.1. Modèle à cinq paramètres (M5P1)

Les cinq paramètres inconnus sont: γ , I_0 , I_{ph} , R_s , et R_{sh} . Trois couples des points de la caractéristique courant-tension sont normalement fournis par le fabricant: le courant de court-circuit I_{sc} , la tension de circuit ouvert V_{oc} et le courant et la tension au point de puissance maximum (I_p , V_p , respectivement).

Courant de court-circuit: $I = I_{sc}$, $V = 0$

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qR_s I_{sc}}{\gamma k T_c} \right) - 1 \right] - \left(\frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}} \right) \quad (1)$$

Tension de circuit ouvert: $I = 0$, $V = V_{oc}$

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{\gamma k T_c} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \quad (2)$$

Point de puissance maximum: $I = I_p$, $V = V_p$

$$I_p = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T_c} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V_p + R_s I_p}{R_{sh}} \right) \quad (3)$$

Après quelques opérations mathématiques les paramètres I_{ph} , I_0 et R_{sh} sont calculent par les équations 4-10 [8].

$$I_{ph} = \det^{-1} \cdot (V_{oc} I_{sc} A - V_{oc} I_p B - V_p I_{sc} C) \quad (4)$$

$$I_0 = \det^{-1} \cdot (V_{oc} I_{sc} - V_{oc} I_p - V_p I_{sc}) \quad (5)$$

$$R_{sh}^{-1} = \det^{-1} \cdot [I_{sc} A - I_p B - (I_{sc} - I_p) C] \quad (6)$$

Où

$$A = \exp \left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T} \right) - 1 \quad (7)$$

$$B = \exp \left(\frac{q R_s I_{sc}}{\gamma k T} \right) - 1 \quad (8)$$

$$C = \exp \left(\frac{q V_{oc}}{\gamma k T} \right) - 1 \quad (9)$$

$$\det = (V_{oc} - R_s I_{sc}) \cdot A + (-V_{oc} + V_p + R_s I_p) \cdot B + (-V_p + R_s [I_{sc} - I_p]) \cdot C \quad (10)$$

La résistance série R_s peut calculer par la résolution de la fonction f_{Rs} [8]:

$$f_{Rs} = I_p - (V_p - R_s I_p) \left(\frac{q I_0}{\gamma k T} \exp \frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T} + \frac{1}{R_{sh}} \right) \quad (11)$$

Dans [9] les chercheurs ont modifié cette méthode pour calculer les quatre paramètres inconnus I_{ph} , I_0 , R_s et R_{sh} à différentes valeurs de facteur d'idéalité γ . Pour chaque itération, ils ont changé la valeur du facteur d'idéalité, pour choisir sa valeur qui donne une erreur relative minimale du point de puissance maximale. La résolution de l'équation (11) est possible et faite par l'utilisation de la fonction f_{solve} contenue dans la boîte à outils de MatLab@ [10].

2.2. Modèle à deux diodes (M7P)

Ishaque et al. [2] ont proposé une approche de modélisation pour le modèle à deux diodes et ils ont indiqué qu'une plus grande précision peut être obtenue en utilisant le modèle de sept paramètres, ce qui nécessite de calcul les paramètres: I_{ph} , I_{01} , I_{02} , R_{sh} , R_s , γ_1 et γ_2 . Pour simplifier cette méthode, ils proposent que le courant de saturation de recombinaison soit égal au courant de saturation de diffusion ($I_{01} = I_{02}$) et le facteur d'idéalité $\gamma_1 = 1$. Cependant, le facteur d'idéalité γ_2 peut être tiré à partir de l'équation 12:

$$\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{p} = 1, \text{ Où } p \geq 2.2 \quad (12)$$

La relation courant-tension du module photovoltaïque à deux diodes devient:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{k T} \right) + \exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{(p-1) k T} \right) + 2 \right] - \left(\frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right) \quad (13)$$

$$\text{Où } I_{01} = I_{02} = I_0 = \frac{(I_{sc,ref} + \mu I_{sc} \Delta T)}{\exp[q(V_{oc,ref} + \mu V_{oc} \Delta T) / ((\gamma_1 + \gamma_2)/p) \cdot k T] - 1} \text{ and } I_{ph} \approx I_{sc} \quad (14)$$

Egalement R_s et R_{sh} sont obtenus par une méthode itération simultanément, où l'expression de R_{sh} peut s'écrire:

$$R_{sh} = \frac{V_p + I_p R_s}{\{I_{ph} - I_0 [\exp(q(V_p + I_p R_s)/kT) + \exp(q(V_p + I_p R_s)/(p-1)kT) + 2] - P_{p,exp}/V_p\}} \quad (15)$$

Selon l'égalité de la puissance maximale calculée et expérimentale, ils calculent de manière itérative et simultanément la valeur de la résistance série R_s et parallèle R_{sh} .

2.3. Modèle à cinq paramètres (M5P2)

Villalva et al. [7] ont développé un modèle à une diode. Dans leur méthode, pendant le processus d'estimation des paramètres, l'un des cinq paramètres, i.e., Le facteur de qualité γ , est explicitement spécifié et choisi arbitrairement (Généralement $1 \leq \gamma \leq 1.5$). Le photo-courant I_{ph} et le courant de saturation I_0 sont exprimés par:

$$I_0 = \frac{(I_{sc} + \mu I_{sc} \Delta T)}{\exp(q(V_{oc} + \mu V_{oc} \Delta T)/\gamma k T) - 1} \quad (16)$$

$$I_{ph,ref} = \frac{R_{sh} - R_s}{R_{sh}} I_{sc,ref} \quad (17)$$

Les résistances R_s et R_{sh} sont calculées par une méthode itérative qui assure que la puissance maximale calculée par l'équation 18 est égale à la puissance maximale expérimentale donnée dans la fiche technique.

$$P_{p,cal} = P_{p,exp} = V_p \left\{ I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_p + I_p R_s)}{\gamma k T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V_p + I_p R_s}{R_{sh}} \right) \right\} \quad (18)$$

Au cours du processus itératif, la résistance série R_s doit être incrémenté lentement à partir de $R_s = 0$ et pour chaque itération la valeur de R_{sh} est calculée simultanément par équation 19.

$$R_{sh} = \frac{V_p + I_p R_s}{\left\{ I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_p + I_p R_s)}{\gamma k T} \right) - 1 \right] - \frac{P_{p,exp}}{V_p} \right\}} \quad (19)$$

2.4. Modèle à quatre paramètres (4P)

Le modèle à quatre paramètres est fondé sur l'hypothèse que la résistance shunt est suffisamment élevée et alors considéré comme infinie et négligée, les quatre paramètres inconnus sont: R_s , I_{ph} , I_0 et γ . Les chercheurs dans [11] utilisent la méthode de bisection pour extraire la valeur de la résistance série R_s puis les trois autres paramètres inconnus.

$$R_{s,sup} = \frac{1}{I_p} \left[V_{oc} - V_p + \frac{kT_c}{q} \ln \left(1 - \frac{I_p}{I_{sc}} \right) \right] \quad (20)$$

$$I_{ph} \approx I_{sc} \quad (21)$$

$$\gamma_{inf} = \frac{q(V_p - V_{oc})}{kT_c \cdot \ln \left[1 - \left(\frac{I_p}{I_{sc}} \right) \right]} \quad (22)$$

$$I_0 = I_{sc} \cdot \exp \left(\frac{-qV_{oc}}{\gamma_{inf} kT_c} \right) \quad (23)$$

La méthode de bisection a utilisé les deux coefficients de la température de tension de circuit ouvert mesurés de façon expérimentale et théorique pour la convergence.

$$\mu_{V_{oc}} = \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} = \frac{\gamma k}{q} \left[\ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right) + \frac{\mu_{I_{sc}} \cdot T}{I_{sc}} - \left(3 + \frac{qE_g}{\gamma kT} \right) \right] \quad (24)$$

3. Résulta and Discussion

Pour vérifier et comparer les modèles précédents (i.e., M4P, M5P1, M5P2 et M7P), trois modules photovoltaïques de différentes technologies (i.e., monocristallin, poly-cristallin et amorphe) sont étudiés. Les spécifications paramètres et les paramètres calculés des modules à STC sont résumés dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1. Les spécifications photovoltaïques paramètres.

Modules	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_p (A)	V_p (V)	$a_{I_{sc}}$ (mA/°C)	$a_{V_{oc}}$ (mV/°C)	N_s
Shell S70	4.5	21.2	4.12	17	2	-76	36
Shell ST40	2.68	23.3	2.41	16.6	0.35	-100	36
Shell SQ150	4.8	43.4	4.4	34	1.4	-128	60

Tableau 2. Paramètres électriques calculés par les quatre modèles

	S70				ST40				SQ150-PC			
	4P	5P1	5P2	7P	4P	5P1	5P2	7P	4P	5P1	5P2	7P
I_{ph}	4.5	4.502	4.5	4.5	2.68	2.682	2.696	2.68	4.8	4.808	4.815	4.8
γ	1.653	1.43	1.3	1.40	1.614	1.55	1.3	1.3	1.873	1.5	1.3	1.3
R_s	0.102	0.186	0.25	0.35	1.358	1.395	1.51	1.71	0.505	0.731	0.84	1.05
R_{sh}	—	353.49	311.81	173.168	—	1659.9	266.547	198.941	—	452.736	276.279	210.736
I_0	$4.29e^{-6}$	$4.89e^{-7}$	$9.89e^{-8}$	$4.98e^{-10}$	$4.47e^{-7}$	$2.35e^{-7}$	$1.03e^{-8}$	$3.08e^{-11}$	$1.43e^{-6}$	$3.35e^{-8}$	$1.89e^{-9}$	$2.85e^{-12}$

Figures. 1-2 montrent une comparaison entre les quatre modèles présentés au-dessus et les tests expérimentaux pour trois modules photovoltaïques (i.e. S70, ST40 et SQ150 PC) à différentes technologies de fabrication. Les tests sont effectués à différents éclairagements ou/et températures. Il faut noter que les données expérimentales sont obtenues à partir des fiches de données des modules. Les courbes I-V pour une température et éclairement constant présentent une analogie acceptable entre les résultats obtenus par les quatre modèles et les données expérimentales en particulier pour les modules poly-cristallin et monocristallin, et sur les trois points importants, I_{sc} , V_{oc} et P_p .

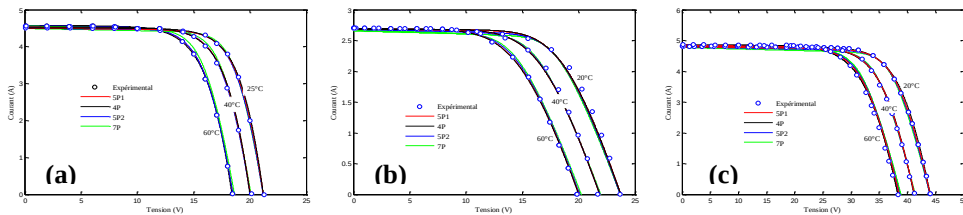


Fig 1. Caractéristiques I-V pour différents températures des modules: a) S70, b) ST40 and c) SQ150PC.

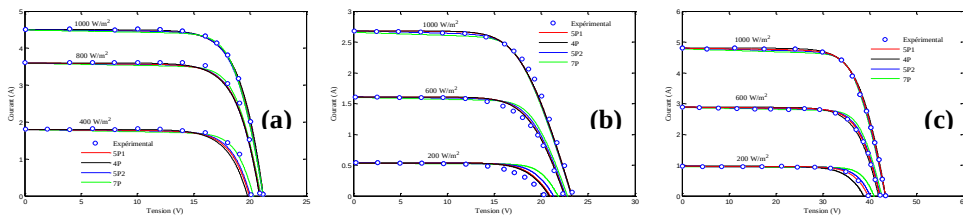


Fig 2. Caractéristiques I-V pour différents éclairagements des modules: a) S70, b) ST40 and c) SQ150PC.

Figures. 3-5 présentent l'erreur relative de P_p , I_{sc} et V_{oc} pour différentes températures et à éclairement constant (1000 W/m²). Nous remarquons, que le modèle à deux diodes (M7P) et le modèle à cinq paramètres (M5P2) sont les modèles les moins précis aux trois points remarquables à 40 et à 60°C par rapport aux deux autres modèles. Cette remarque est logique, parce que la valeur du facteur d'idéalité est supposée fixe dans le modèle à cinq paramètres et le modèle à deux diodes d'une part et d'autre part, les valeurs du courant de saturation de recombinaison et de diffusion sont supposées égales dans le modèle à deux diodes. Par conséquent, la valeur de facteur d'idéalité influe sur le point de puissance maximale et la valeur du courant de saturation influe dans la zone de tension et particulièrement sur le point de tension de circuit ouvert. Pour cela on remarque une déviation intéressante suivant ces deux modèles. Le modèle à cinq paramètres (M5P1) et le modèle à quatre paramètres (M4P) sont les modèles les plus précis. L'erreur relative du point de puissance maximum, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert pour les trois modules est inférieure de 1%. L'erreur relative du P_p , I_{sc} et V_{oc} à l'éclairement de référence (1000 W/m²) est inférieure de 0.16% pour tous les modules photovoltaïques sauf celle du module S70 qui présente une erreur relative de P_p égale 1.18%.

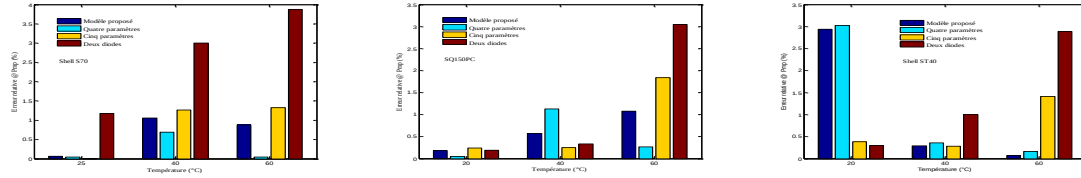


Fig 3. L'erreur relative pour P_p pour différentes températures et à éclairement constant 1000 W/m².

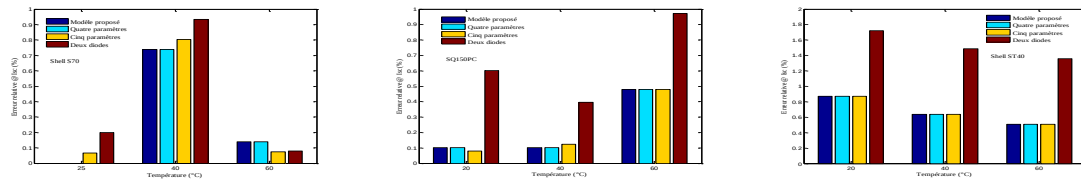


Fig 4. L'erreur relative pour I_{sc} pour différentes températures et à éclairement constant 1000 W/m².

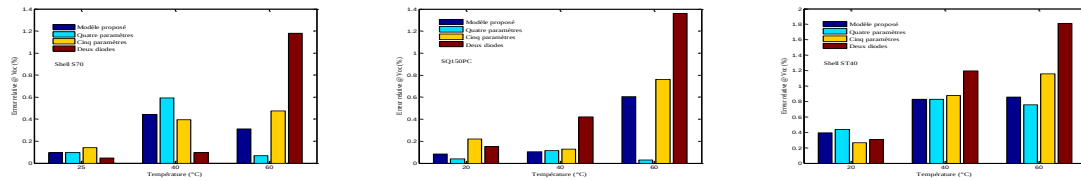


Fig 5. L'erreur relative pour V_{oc} pour différentes températures et à éclairement constant 1000 W/m².

Cependant, comme l'éclairement est réduit, les quatre modèles donnent un écart significatif de P_p pour les trois technologies, particulièrement pour le module amorphe, (figure. 6-8). En général, le modèle à cinq paramètres (M5P1) est le modèle le plus précis dans le calcul de la puissance maximale pour les modules poly et monocristallin à toutes les valeurs de l'éclairement. Également, l'erreur relative de P_p est inférieure de 2.5 %. Cependant, à éclairement réduit l'erreur est très remarquable et pourrait atteindre de 17% pour le module amorphe. En outre, les quatre modèles sont précises pour calculer le courant de court-circuit pour les différentes techniques en particulier à éclairement de référence, mais à différents éclaircements les précisions diminuent, mais restent acceptables et inférieures de 1.3%. La précision du modèle à cinq paramètres (M5P1) à la tension de circuit ouvert est présentée dans la figure. 10. L'erreur relative de V_{oc} est inférieure de 0.15 % à la température de référence 25°C. En outre, à différents éclaircements la précision du modèle reste acceptable, elle est inférieure à 0.6%, 0.06% et 3.3% pour les modules S70, SQ150PC et ST40, respectivement.

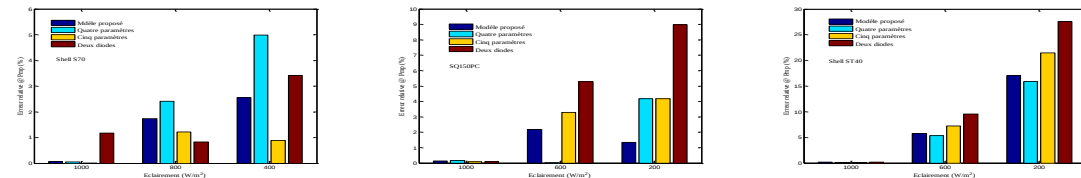


Fig 6. L'erreur relative pour P_p pour différents éclaircements et à température constant 25°C.

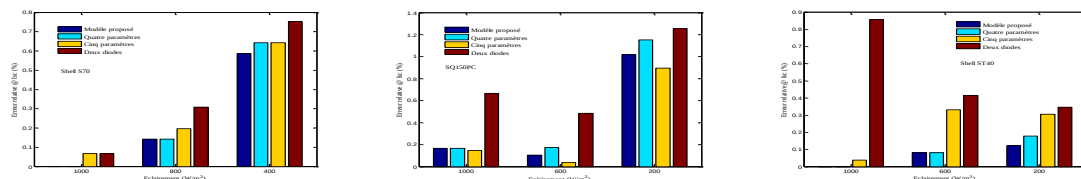


Fig 7. L'erreur relative pour I_{sc} pour différents éclaircements et à température constant 25°C.

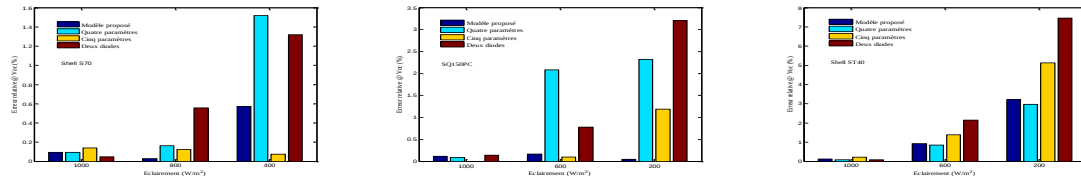


Fig 8. L'erreur relative pour V_{oc} pour différents éclaircissements et à température constant 25°C.

4. Conclusion

Dans ce travail, une approche générale concernant la modélisation des modules photovoltaïques est présentée. Trois types de modules photovoltaïques ont été modélisés et évalués (i.e., monocristallin, poly-cristallin et couche mince). Les précisions des quatre modèles existant dans la littérature sont analysées par la comparaison avec les données expérimentales fournies par le constructeur des modules photovoltaïques. En effet, les paramètres caractéristiques du matériau peuvent influencer fortement sur la courbe I - V de telle sorte qu'une approximation fixée pour une technologie donnée peut ne pas être adaptée à une autre. Par conséquent, quelques hypothèses sont remarquées: - L'hypothèse qui suppose la valeur de facteur d'idéalité constant comme indiqué dans le modèle à deux diodes (M7P) et le modèle à cinq paramètres (M5P2) n'est pas toujours vraie et la précision du modèle va diminuer dans la zone de puissance. En outre, L'hypothèse qui suppose $I_{01}=I_{02}$, serait incorrecte parce que la recherche montre que I_{02} est plus grand de trois à quatre fois que I_{01} et la précision du modèle va diminuer dans la zone de tension. Par conséquent, il faut calculer tous les paramètres inconnus sans fixer l'un des paramètres. En général, les modèles à quatre paramètres (M4P) et à cinq paramètres (M5P1) sont les modèles les plus précises.

References

1. Chan DSH, Phang JCH (1987) Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I - V characteristics. IEEE Trans Electron Devices 34:286–293. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1987.22920>
2. Ishaque K, Salam Z, Taheri H (2011) Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. Sol Energy Mater Sol Cells 95:586–594. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2010.09.023>
3. Fry BA (1998) Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems. University of Wisconsin-Madison
4. Zhou W, Yang H, Fang Z (2007) A novel model for photovoltaic array performance prediction. Appl Energy 84:1187–1198. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2007.04.006>
5. King DL (1997) Photovoltaic module and array performance characterization methods for all system operating conditions. In: AIP Conference Proceedings. AIP, pp 347–368
6. De Soto W, Klein SA, Beckman WA (2006) Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. Sol Energy 80:78–88. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2005.06.010>
7. Villalva MG, Gazoli JR, Filho ER (2009) Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Trans Power Electron 24:1198–1208. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>
8. Belarbi M (2006) Modélisation et Simulation D'un Système de Pompe Photovoltaïque. Mohamed Boudiaf, Oran
9. Aoun N, Chenni R, Nahman B, Bouchouicha K (2014) Evaluation and Validation of Equivalent Five-Parameter Model Performance for Photovoltaic Panels Using Only Reference Data. Energy Power Eng 06:235–245. <https://doi.org/10.4236/epe.2014.69021>
10. Quarteroni A, Saleri F, Gervasio P (2010) Calcul scientifique : cours, exercices corrigés et illustrations en MATLAB et Octave. Springer-Verlag
11. Chenni R, Makhoulouf M, Kerbach T, Bouzid A (2007) A detailed modeling method for photovoltaic cells. Energy 32:1724–1730. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2006.12.006>