

Nouvelle méthode d'extraction des paramètres électriques d'une cellule solaire

IRKETTOU Redwane¹, MOULAY TAJ Amine¹, EL HADI Chahid¹, ABOUHILAL Abdelmoula¹, MALAOUI Abdessamad¹

¹ Laboratoire Interdisciplinaire de recherche en sciences et techniques, Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal.

redwan.anzal@gmail.com, mytaj.amine@gmail.com, chahid_2003@yahoo.fr, abdelmoula.abouhilal@gmail.com, a.malaoui@usms.ma.

Résumé- L'électricité Photovoltaïque (PV) est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen des cellules Photovoltaïques. Le fonctionnement de ces composants optoélectroniques est souvent décrit par la caractéristique $I=f(V)$, cette dernière dépend de plusieurs paramètres électriques [1-4]. La détermination précise de ces paramètres reste un défi pour les chercheurs, en fait, cette détermination est essentielle pour la simulation, le contrôle de qualité et la mise en œuvre des dispositifs photovoltaïques répondant à des spécifications bien déterminées [5-7].

Dans le présent travail, une nouvelle méthode numérique d'extraction des paramètres électriques de ces cellules PV pour un modèle à deux diodes (I_{ph} , I_{s1} , I_{s2} , R_s , R_{sh} , η_1 et η_2) a été développée, celle-ci est basée sur la résolution d'un système d'équations non linéaires obtenues par l'exploitation de la totalité de mesures courant – tension issues directement à partir d'un module PV en utilisant une formule modifiée de Newton-Raphson [8]. Les résultats obtenus montrent un accord élevé entre les caractéristiques expérimentales et simulées.

I. INTRODUCTION

L'électricité Photovoltaïque connaît un intérêt potentiel ces dernières années sur le plan scientifique et économique. Cet intérêt est dû à la demande croissante d'énergie dans la plupart des secteurs industriels, mais aussi aux obligations environnementales. Les cellules photovoltaïques sont au cœur de la chaîne de production d'électricité. La concurrence sur l'optimisation et l'augmentation de l'efficacité des cellules photovoltaïques, conduit les chercheurs à trouver

des méthodes pour déterminer les paramètres intrinsèques de ces cellules [9].

Dans la littérature plusieurs méthodes ont été proposées pour l'extraction des paramètres, chacune de ces méthodes, présente des inconvénients, soit au niveau de la complexité de l'utilisation et la précision, soit au niveau de la convergence et la rapidité [10]. Elles peuvent être réparties comme suit :

- Méthodes Graphiques
- Méthodes Analytiques
- Méthodes numériques

Pour faire face à ce défi rencontré dans ce domaine, ce travail présente une nouvelle méthode numérique efficace pour l'estimation très précise des paramètres électriques pour le modèle à une diode et celui à deux diodes. La méthode a été testée sur une interface graphique que nous avons développée spécialement pour ce but à l'aide de l'environnement MATLAB.

II. MODELISATION DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

De nombreux circuits équivalents ont été proposés dans la littérature pour concevoir le comportement de la cellule photovoltaïque. Dans

notre cas, nous considérons le modèle à deux diodes qui est une description encore meilleure de la cellule solaire [11].

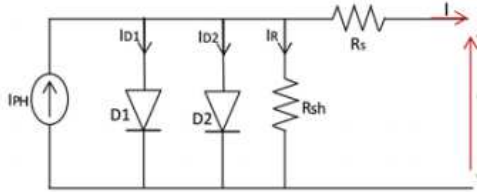


Fig. 1 : Circuit équivalent d'une cellule PV –Modèle 2-D

Dans le modèle à deux diodes représenté sur la Fig.1, en utilisant la première loi de Kirchhoff, le courant sortant de la cellule est donné par [12] :

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Ou,

$$I_{D,i=\{1,2\}} = I_{si} \exp\left(\frac{V + IR_s}{\eta_i V_T}\right) \quad (2)$$

Avec, $V_T = kT/q$ est la tension Thermique, (q) est la charge de l'électron, (k) est la constante de Boltzmann et (T) est la température de la jonction P-N.

D'où, la caractéristique I-V est définie par :

$$I = \left\{ \begin{array}{l} I_{ph} - I_{s1} \cdot \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{\eta_1.V_T}\right) - 1 \right] \\ - I_{s2} \cdot \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{\eta_2.V_T}\right) - 1 \right] \\ - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \end{array} \right\} \quad (3)$$

I_{ph} , I_{s1} , I_{s2} , η_1 , η_2 , R_s , R_{sh} sont respectivement le Photo-courant, le courant de saturation de la diode 1, le courant de saturation de la diode 2, le facteur d'idéalité de la diode 1, le facteur d'idéalité de la diode 2, la résistance

série et la résistance parallèle. Ce sont les paramètres que nous cherchions à extraire.

III. METHODE PROPOSEE

Il est noté que l'équation (3) est une équation non linéaire qui implique le courant de sortie global produit par la cellule solaire dans les deux côtés de l'équation et qui n'a pas de solutions analytiques explicites pour I ou V. En fait, différentes méthodes d'optimisation numérique sont souvent utilisées pour résoudre de telles équations, les plus utilisées sont : la méthode d'analyse graphique [13], la méthode de Newton-Raphson [14], la méthode polynomiale [1] et la méthode de Levenberg Marquardt [15].

Pour former la fonction objective, l'équation $I=F(V)$ données dans l'expression (3) est réécrite sous la forme suivante:

$$F(I, V, I_{ph}, I_{s1}, I_{s2}, \eta_1, \eta_2, R_s, R_{sh}) = \left\{ \begin{array}{l} I_{ph} - I_{s1} \cdot \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{\eta_1.V_T}\right) - 1 \right] \\ - I_{s2} \cdot \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{\eta_2.V_T}\right) - 1 \right] \\ - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} - I \end{array} \right\} = 0 \quad (4)$$

Donc, en exploitant toutes les mesures du courant et tension issues directement à partir d'une cellule / modèle PV, on construit un système de N équations et de sept inconnues.

$$\begin{cases} F(I_{m1}, V_{m1}, I_{ph}, I_{s1}, I_{s2}, \eta_1, \eta_2, R_s, R_{sh}) = 0 \\ F(I_{m2}, V_{m2}, I_{ph}, I_{s1}, I_{s2}, \eta_1, \eta_2, R_s, R_{sh}) = 0 \\ F(I_{m3}, V_{m3}, I_{ph}, I_{s1}, I_{s2}, \eta_1, \eta_2, R_s, R_{sh}) = 0 \\ \vdots \\ F(I_{mN}, V_{mN}, I_{ph}, I_{s1}, I_{s2}, \eta_1, \eta_2, R_s, R_{sh}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Où, I_{mi}, V_{mi} sont respectivement l' $i^{\text{ème}}$ courant et l' $i^{\text{ème}}$ tension mesurés.

La formule de Newton-raphson permet de trouver la solution d'un système d'équations non-linéaires en partant d'une valeur initiale X_0 , elle s'écrit comme suit :

$$X_{n+1} = X_n - J^{-1}(X_n)F(X_n) \quad (6)$$

Avec,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial I_{ph}} & \frac{\partial F_1}{\partial I_{s1}} & \frac{\partial F_1}{\partial I_{s2}} & \frac{\partial F_1}{\partial \eta_1} & \frac{\partial F_1}{\partial \eta_2} & \frac{\partial F_1}{\partial R_s} & \frac{\partial F_1}{\partial R_{sh}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial I_{ph}} & \frac{\partial F_2}{\partial I_{s1}} & \frac{\partial F_2}{\partial I_{s2}} & \frac{\partial F_2}{\partial \eta_1} & \frac{\partial F_2}{\partial \eta_2} & \frac{\partial F_2}{\partial R_s} & \frac{\partial F_2}{\partial R_{sh}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial I_{ph}} & \frac{\partial F_N}{\partial I_{s1}} & \frac{\partial F_N}{\partial I_{s2}} & \frac{\partial F_N}{\partial \eta_1} & \frac{\partial F_N}{\partial \eta_2} & \frac{\partial F_N}{\partial R_s} & \frac{\partial F_N}{\partial R_{sh}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Et,

$$X = \begin{bmatrix} I_{ph} \\ I_{s1} \\ I_{s2} \\ \eta_1 \\ \eta_2 \\ R_s \\ R_{sh} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Le problème qui se pose ici c'est qu'on ne peut pas résoudre le système d'équations (5) en utilisant la formule normal de Newton-Raphson (6) car dans notre cas, le nombre des inconnus est différent du nombre des équations ce que pose l'impossibilité de calculer l'inverse de la matrice jacobienne J . Nous avons opté pour une formule modifiée de Newton-Raphson [8], celle-ci est donnée par l'expression suivante.

$$X_{n+1} = X_n - J^+(X_n)F(X_n) \quad (9)$$

Où, J^+ est l'inverse généralisé de la matrice jacobienne J .

L'algorithme basé sur la méthode de Newton-Raphson modifiée pour la détermination des paramètres électriques est présenté sur la figure suivante.

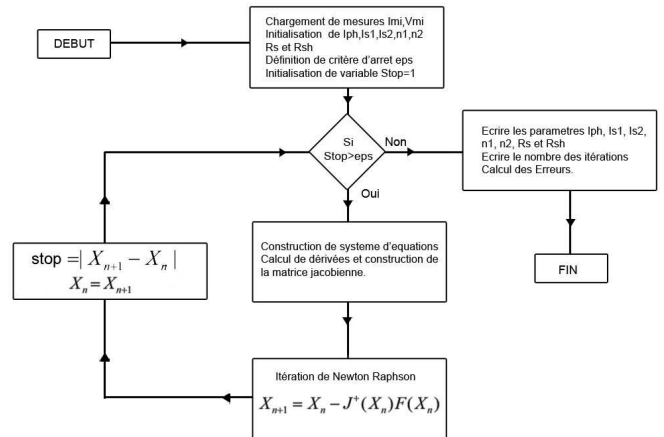


Fig. 2: Algorithme d'extraction (méthode de Newton-Raphson modifiée).

En résumé, on part des valeurs initiales de X et en utilisant toutes les mesures, à chaque itération on calcule la matrice Jacobienne J et le vecteur F selon les nouvelles valeurs de X_n , et on met à jour le variable $Stop$, les itérations s'arrêtent dans le cas où le critère d'arrêt est supérieur au variable

Stop, ou bien lorsque le nombre d'itérations atteint une valeur déterminée initialement.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

Pour valider l'approche proposée, une base de données expérimentales I-V utilisées dans la simulation de ce document ainsi pour la comparaison des résultats obtenus par rapport à d'autres algorithmes qui implémente la même base de données I-V, cette dernière est adoptée à partir de [16] qui correspondent à une cellule solaire de silicium commercial de 57 mm de diamètre à 33° C.

Au cours de ces dernières années, selon les progrès réalisés dans le domaine des algorithmes d'optimisation méta-heuristique, ces méthodes sont également largement utilisées pour l'estimation de paramètres de modèles de cellules solaires. Par exemple, l'application de l'algorithme génétique (GA), l'optimisation des essaims de particules (PSO), le recuit simulé (SA), l'évolution différentielle (DE), oiseau optimiseur d'accouplement (BMO), l'optimisation de l'alimentation des oiseaux (BFO), la recherche d'harmonie (HS), l'optimisation des essaims d'abeilles artificiels (ABSO), colonie d'abeilles artificielle (ABC), l'algorithme d'optimisation basé sur la biogéographie avec des stratégies de mutation (BBO-M), l'optimisation basée sur l'enseignement et l'apprentissage (TLBO), recherche de motifs (PS) [16].

Tableau 1 : les valeurs de paramètres obtenus par l'algorithme proposé

I_{ph}	0.761958
I_{s1}	4.06313e-007
I_{s2}	7.97529e-008
η_1	1.60004
η_2	1.39998
R_s	0.0365315
R_{sh}	60.4

Le Tableau 1 contient les valeurs de 7 paramètres obtenus en exécutant l'algorithme présenté dans ce travail. La fig.4 contient les valeurs du courant mesurées et calculées ainsi que la valeur absolue de l'erreur entre ces deux valeurs.

Tableau 2 : Valeurs mesurées et calculées du courant en utilisant l'algorithme proposé

N°	$V_m(V)$	$I_m(A)$	$I_{cal}(A)$	Erreur
1	-0.2057	0.7640	0.7666	0.0026
2	-0.1291	0.7620	0.7646	0.0026
3	-0.0588	0.7605	0.7627	0.0022
4	0.0057	0.7605	0.7611	0.0006
5	0.0646	0.7600	0.7595	0.0005
6	0.1185	0.7590	0.7581	0.0009
7	0.1678	0.7570	0.7568	0.0002
8	0.2132	0.7570	0.7555	0.0015
9	0.2545	0.7555	0.7542	0.0013
10	0.2924	0.7540	0.7525	0.0015
11	0.3269	0.7505	0.7501	0.0004
12	0.3585	0.7465	0.7460	0.0005
13	0.3873	0.7385	0.7389	0.0004
14	0.4137	0.7280	0.7265	0.0015
15	0.4373	0.7065	0.7064	0.0001
16	0.4590	0.6755	0.6752	0.0003
17	0.4784	0.6320	0.6312	0.0008
18	0.4960	0.5730	0.5726	0.0004
19	0.5119	0.4990	0.5000	0.0010
20	0.5265	0.4130	0.4138	0.0008
21	0.5398	0.3165	0.3172	0.0007
22	0.5521	0.2120	0.2119	0.0001
23	0.5633	0.1035	0.1024	0.0011
24	0.5736	-0.0100	-0.0095	0.0005
25	0.5833	-0.1230	-0.1244	0.0014
26	0.5900	-0.2100	-0.2089	0.0011

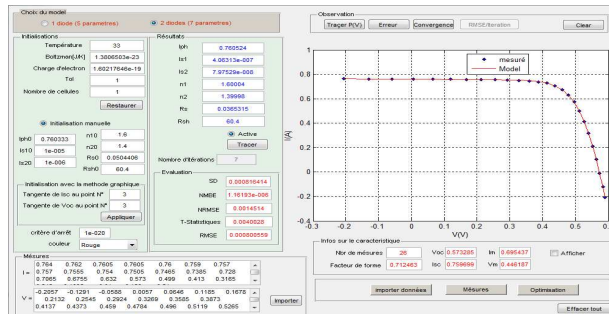


Fig. 2 : L'interface graphique de caractérisation des paramètres électriques d'un panneau photovoltaïque.

Les différentes simulations faites avec cette interface en utilisant des données expérimentale ont prouvé que la méthode proposée peut améliorer fortement la précision et la vitesse d'obtention des paramètres électriques. Ainsi que les résultats obtenus sont comparés à partir des différents travaux connexes récemment développées.

Tableau 3 : Valeurs estimées pour les paramètres inconnus du modèle à double diode (en utilisant sept algorithmes différents) et les indices RMSE correspondants

Paramètre	HS	PS	SA	IGHS	ABSO	GGHS	ABC	Proposée
I_{ph} (A)	0.76176	0.7602	0.7623	0.7608	0.7608	0.76056	0.7608	0.760524
I_{s1} (μA)	0.12545	0.9889	0.4767	0.9731	0.2671	0.37014	0.0407	0.406313
R_s (Ω)	0.03545	0.0320	0.0345	0.0369	0.0366	0.03562	0.0364	0.0365315
R_{sh} (Ω)	46.82696	81.3008	43.1034	56.8368	54.6219	62.7899	53.7804	60.4
η_1	1.49439	1.6000	1.5172	1.9213	1.4651	1.49638	1.4495	1.60004
I_{s2} (μA)	0.25470	0.0001	0.0100	0.1679	0.3819	0.13504	0.2874	0.0797529
η_2	1.49989	1.1920	2.000	1.4281	1.9815	1.92998	1.4885	1.39999
RMSE	0.00126	0.01518	0.01664	9.8635e-4	9.8344e-4	0.00107	9.861e-4	8.00559e-4

Les indices RMSE correspondants sont également présentés dans le tableau 3 à des fins de comparaison, en fait l'algorithme qui conduit à une plus petite valeur pour l'indice RMSE est considéré comme plus efficace.

Comme on peut l'observer la méthode proposée extrait des valeurs précises des paramètres électriques, ainsi l'indice RMSE à une valeur minimal par rapport aux autres algorithmes.

V. CONCLUSION

Il y a une attention croissante à l'énergie solaire partout dans le monde, les cellules solaires sont souvent utilisées pour obtenir l'énergie de la lumière du soleil, surtout quand l'énergie électrique est nécessaire, il résulte du fait que l'analyse et la prédiction du comportement des cellules solaires à différentes conditions de travail avec une grande précision est une grande importance dans la pratique.

Cet article présente une nouvelle méthode d'extraction des paramètres électriques, les résultats obtenus montrent que cette méthode est efficace pour une estimation très précise des paramètres électriques d'une cellule ou module photovoltaïque.

Références

- [1] A. Malaoui et A. Elmansouri, 'Deux nouvelles méthodes complémentaires pour l'extraction optimale des paramètres électriques des jonctions', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 13 N°2, 199 – 212, 2010.
- [2] S.M. Sze, 'Physics of Semiconductor Devices', JohnWiley, New York, 1981.
- [3] Abdessamad Malaoui, 'Implementation and tests of an automatic system to improve electrical energy in photovoltaic installations,' *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 8, no. 1, pp. 328–340, September 2014.
- [4] A. Schenk and U. Krumbein, 'Coupled Defect-Level Recombination: Theory and Application to Anomalous Diode Characteristics', *Journal of Applied Physics*, Vol. 78, N°5, pp. 3185–3192, 1995.
- [5] Abdessamad Malaoui, 'New method for improving the quality of electrical measurements: application to the extraction of the intrinsic parameters of the photovoltaic cells,' *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 15, no. 2, pp. 375–386, April 2016.
- [6] A. Sertap Kavasoglu, F. Yakuphanoglu, N. Kavasoglu, O. Pakma, O. Birgi and S. Oktik, 'The Analysis of the Charge Transport Mechanism of n-Si/MEH-PPV Device Structure Using Forward Bias I-V-T Characteristics', *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 492, N°162, pp. 421 – 426, 2010.
- [7] O. Aomari, A. Malaoui, M. Mabrouki, E. Bendada, A. Elmansouri, S.Yadir, S. Assal, M. Benhmida, 'Implementation of a new analytical technique to determine the electrical parameters of junction models,' *Global Journal of Physical Chemistry*, vol. 2, no. 2, pp. 68–72, 2011.
- [8] Adi Ben-Israel 'A Newton-Raphson Method for the Solution of Systems of Equations', *Journal of mathematical analysis and applications*, 15, 243-252, 1966.
- [9] Abdessamad Malaoui, EL Mahdi BARRAH, and Jilali ANTARI, 'Implementation of a new approach for modeling and determining the electrical parameters of solar cells,' *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 15, no. 2, pp. 329–338, April 2016
- [10] A. Ortiz-Conde, Y. Ma, J. Thomson, E. Santos, J.J. Liou, F.J. García Sánchez, M. Lei, J. Finol, and P. Layman, 'Direct Extraction of Semiconductor Device Parameters Using Lateral Optimization Method', *Solid-State Electron.*, Vol. 43, N° , pp. 845 – 848, 1999.
- [11] R. Kadri, H. Andrei, J.P. Gaubert, T. Ivanovici, G. Champenois and P. Andrei, 'Modeling of the Photovoltaic Cell Circuit Parameters for Optimum Connection Model and Real-Time Emulator with Partial Shadow Conditions', *Energy*, Vol. 42, N°1, pp. 57 – 67, 2012.
- [12] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri and Syafaruddin, 'Modeling and Simulation of Photovoltaic (PV) System During Partial Shading Based on a Two-Diode Model', *Simulation Modeling Practice and Theory*, N°19, N°7, pp. 1613 - 1626, 2011
- [13] A. Oueriagli, H. Kassi, S. Holchandani and R.M. Leblanc, 'Analysis of Dark Current-Voltage Characteristics of Al/chlorophyll a/Ag Sandwich Cells', *Journal of Applied Physics*, Vol. 71, N°11, pp. 5523 – 5530, 1992.
- [14] WH. Press, WT. Vetterling and SA. Teukolsky, 'Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing', 2nd Ed. Cambridge University Press, Vol. 9, pp. 362 – 367, 2002.
- [15] D. Marquardt, 'An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters', *SIAM Journal of Applied Math*, Vol. 11, pp. 431 – 441, 1963.
- [16] M., Jamadi,F., Merrikh-Bayat, M., Bigdeli 'Very accurate parameter estimation of single- and double-diode solar cell models using a modified artificial bee colony algorithm', *Energy Environ Eng* 7:13–25, 2015.