

L'équation qui décrit son comportement à température et rayonnement solaire fixés est [1 à 13]:

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{a}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

Pour une irradiation et une température données, l'équation (1) admet différentes combinaisons de a , de R_s et de R_{sh} permettant le passage à proximité des mêmes points, I_{SC} , I_M , V_M et V_{OC} de la courbe I-V.

Prises séparément, ces valeurs de a , de R_s et de R_{sh} ne sont pas appropriées. Ce qui les rend vraiment significatives est le rapport constitué par les trois paramètres.

La relation de la puissance pour un module photovoltaïque est donnée par :

$$P = IV \quad (2)$$

La tension thermique est exprimée par:

$$a = \frac{N_s K T}{q} A \quad (3)$$

où:

q: charge électrique élémentaire $1,607 \cdot 10^{-19}$ C

A: coefficient d'idéalité de la cellule; il dépend du matériau.

K: constante de Boltzmann = $1,380 \cdot 10^{-23}$ J/k

T: température en degré Kelvin

R_s : résistance série de la cellule (Ω).

R_{sh} : résistance shunt (Ω).

N_s est le nombre de cellules reliées en série.

En appliquant les conditions de court-circuit à l'équation (1), I_{ph} peut être obtenu par:

$$I_{ph} = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_s \left(\exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{a}\right) - 1 \right) \quad (4)$$

De la même manière les conditions de circuit ouvert appliquées à l'équation (1) donne :

$$I_{ph} = I_s \left(\exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{a}\right) - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (5)$$

les équations (4) et (5) induisent

$$I_s = \frac{I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{a}\right) - \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{a}\right)} \quad (7)$$

$\exp(V_{oc}/a) \gg \exp(I_{sc} R_s/a)$, l'équation (7) se simplifie en:

$$I_s = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \exp\left(-\frac{V_{oc}}{a}\right) \quad (8)$$

I_{sc} et V_{oc} représentent respectivement le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

3. Analyse théorique

Les effets des résistances sur la caractéristique I-V sont intensivement étudiés dans plusieurs travaux [1 à 8]. Bien que les études soient différentes, elles montrent que les deux résistances contribuent à la dégradation de la courbe I-V. En général le courant dérivé par la résistance shunt est très importante sur la partie de la courbe I-V située entre le court-circuit (I_{sc}) à la proximité du point de puissance maximum (I_m). Au contraire l'effet de chute de la tension due à la résistance série est plus grand aux tensions comprises entre le circuit ouvert (V_{oc}) et la puissance maximum (P_{max}). En conformité avec ces dernières observations, le point de puissance maximum se situe dans la zone transitoire où les effets des deux résistances sont plus élevés.

La dérivé de la puissance (Equ.2) est :

$$\frac{\partial P}{\partial I} = \frac{\partial}{\partial I} (IV) = V + I \frac{\partial V}{\partial I} = 0 \Rightarrow \frac{\partial V}{\partial I} = -\frac{V}{I} \quad (9)$$

Par ailleurs, en dérivant I par rapport à V dans l'équation (1), on obtient :

$$\frac{\partial I}{\partial V} = - \frac{\left[1 + \frac{I_s R_s}{a} \exp\left(\frac{V + R_s I}{a}\right) \right] + \frac{R_s}{R_{sh}}}{\frac{I_s}{a} \exp\left(\frac{V + R_s I}{a}\right) + \frac{1}{R_{sh}}} \quad (10)$$

En comparant (9) et (10) au point de puissance maximale on a :

$$V_m = I_m \frac{a \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_s R_s \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{a}\right)}{I_s \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{a}\right) + \frac{a}{R_{sh}}} \quad (11)$$

Néanmoins, en raison du terme en exponentielle présent dans l'expression de la tension, la forme peut être déduite de l'équation (1) évaluée au point de puissance maximum, PPM.

$$I_s \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{a}\right) = I_{ph} - I_m - \frac{V_m + R_s I_m}{R_{sh}} \quad (12)$$

L'équation (11) devient:

$$V_m = I_m \frac{a + R_s \left(\left[I_{ph} - I_m - \frac{V_m + R_s I_m}{R_{sh}} \right] + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)}{\left(I_{ph} - I_m - \frac{V_m + R_s I_m}{R_{sh}} \right) + \frac{a}{R_{sh}}} \quad (13)$$

En substituant les équations (6) et (8) dans l'équation (13), nous obtenons:

$$V_m = I_m \frac{a + R_s \left(\left[I_{sc} - I_m - \frac{V_m + R_s(I_m - I_{sc})}{R_{sh}} \right] + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)}{\left(I_{sc} - I_m - \frac{V_m + R_s(I_m - I_{sc})}{R_{sh}} \right) + \frac{a}{R_{sh}}} \quad (14)$$

Puisque $V_m \gg R_s (I_{sc} - I_m)$, l'équation (14) se réduit à:

$$V_m = I_m \frac{a + R_s \left(\left[I_{sc} - I_m - \frac{V_m}{R_{sh}} \right] + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)}{\left(I_{sc} - I_m - \frac{V_m}{R_{sh}} \right) + \frac{a}{R_{sh}}} \quad (15)$$

On pose

$$X = \left(I_{sc} - I_m - \frac{V_m}{R_{sh}} \right) \quad (16)$$

$$V_m = I_m \frac{a + R_s \left(X + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)}{X + \frac{a}{R_{sh}}} \quad (17)$$

la résistance shunt s'exprime par la relation dérivée de l'équation (16):

$$R_{sh} = \frac{V_m}{I_{sc} - I_m - X} = \frac{V_m}{\Delta I - X} \quad (18)$$

que nous substituons dans l'équ. (17), on déduit l'expression de la résistance série:

$$R_s = V_m \left(\frac{1}{I_m} - \frac{a}{X(V_m - a) + a\Delta I} \right) \quad (19)$$

La tension au PPM se déduit implicitement du modèle de l'équ. (1) et est donnée par:

$$V_m = V_{oc} - R_s I_m + a \log \left(\frac{I_{sc} - I_m - \frac{V_m + R_s(I_m - I_{sc})}{R_{sh}}}{I_{sc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}}} \right) \quad (20)$$

En substituant (19) dans l'équ. (20), nous obtenons:

$$\frac{V_{co} - 2V_m}{a} - \frac{V_m I_m}{X(V_m - a) + a\Delta I} + \log \left[\frac{X}{\left(I_{cc} - \frac{\Delta I V_{oc}}{V_m} - \frac{V_{oc}}{V_m} X \right)} \right] = 0 \quad (21)$$

Cette équation comporte les principaux paramètres : I_{sc} , V_{oc} , I_m et V_m . Sa solution exige seulement les données apparaissant dans le catalogue des modules PV aux conditions d'essai standards (STC.), ou celles obtenues dans d'autres conditions ou par des essais. La résolution de cette équation peut s'effectuer à l'aide de logiciels de calcul, comme Matematica et Matlab. La solution de l'équation impose que X soit toujours positif, ce qui est évident d'où $X < I_{sc} - I_m$.

Afin d'obtenir les cinq paramètres en utilisant l'équ. (21), il est nécessaire de savoir la valeur de la tension thermique "a". La tension thermique "a" peut être obtenue en utilisant le coefficient de température de la

tension de circuit ouvert et le coefficient de court-circuit donnés par les fabricants aux conditions standards STC. L'équation suivante est employée pour calculer le courant de saturation de la diode sous des conditions différentes [11]:

$$I_s(T) = I_{sref} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left(\frac{N_s E_g}{a} \left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \right) \quad (22)$$

Où E_g est l'énergie de passage de bande (en eV), N_s est le nombre de cellules en série dans un module et I_{sref} est le courant de saturation aux conditions standards STC.

La tension de circuit ouvert peut être rapprochée par l'équation suivante:

$$V_{oc} = a \log \left(\frac{I_{cc}}{I_s} \right) \quad (23)$$

Le coefficient de température du circuit ouvert est dérivé de la tension de circuit ouvert V_{co} en respectant la température:

$$\beta_{V_{co}} = \frac{\partial V_{co}}{\partial T} = -\frac{N_s A K}{q} \left[\log \left(\frac{I_{sc}}{I_s} \right) + \frac{T \alpha_{I_{sc}}}{I_{sc}} - \left(3 + \frac{q E_g}{A K T} \right) \right] \quad (24)$$

La combinaison entre les équations (23) et (24) évaluée aux conditions de référence nous donne l'équation thermique de tension (a_{ref}) [12]:

$$a_{ref} = \frac{\beta_{V_{co}} T_{ref} - V_{ocref} - N_s E_g}{\frac{\alpha_{I_{sc}} T_{ref}}{I_{scref}} - 3} \quad (25)$$

Où $\beta_{V_{co}}$ et $\alpha_{I_{sc}}$ sont les coefficients de température en circuit ouvert V_{co} et en court-circuit I_{sc} .

Dans le cas où, $I_{sc} - I_m - X < 0$, ce résultat n'a pas de sens physique parce que V_m / R_{sh} est toujours positif, ce qui laisse seulement une possibilité que R_{sh} est infinie (valeur élevée), donc la relation $I_{sc} - I_m - X$ tend vers zéro. En conséquence l'expression de la tension maximale s'écrit:

$$V_m = V_{oc} - R_s I_m + a \log \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \quad (26)$$

La résistance série se calcule par la formule suivante:

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_m + a_{ref} \log \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right)}{I_m} \quad (27)$$

Dans le cas où la résistance shunt R_{sh} a une valeur infinie, nous développons une autre équation pour calculer la résistance série R_s en visant à obtenir les meilleurs paramètres du modèle simple-diode. Cette méthode est comme suit :

$$V_m = V_{oc} + C V_{oc} \log \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \quad (28)$$

où

$$C = \frac{\frac{V_m}{V_{oc}} - 1}{\log \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right)} \quad (29)$$

Dans le cas où la résistance shunt est infinie; la tension thermique est déduite de l'équation (15):

$$a = (I_{sc} - I_m) \left(\frac{V_m}{I_m} - R_s \right) \quad (30)$$

De la combinaison des équations (28) et (30) nous déduisons la relation de R_s :

$$R_s = \frac{(V_m(I_{sc} - I_m) - C I_m V_{oc}) \log \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right)}{I_m \left(I_m + (I_{sc} - I_m) \log \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right)} \quad (31)$$

La tension thermique, pour laquelle R_{SH} est infinie, est calculée par l'équation (30) ou par l'équation (32) ci-après:

$$a = \frac{R_s I_m}{\log \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right)} + C V_{oc} \quad (32)$$

4. Validation des modèles

Pour évaluer la conformité des équations proposées pour l'estimation des paramètres des panneaux solaires on utilise les données des caractéristiques I-V fournies par les fabricants dans les conditions d'essai standard (STC.) comprenant la simulation numérique et les essais sur le terrain.

Le tableau I, ci-dessous, contient les données des catalogues de trois modules PV utilisés dans cette étude et le tableau II contient les valeurs des coefficients de température. Les modules ont été choisis différents dans l'intention de faire de cette étude un cas aussi général que possible. Les modules choisis sont les suivants : le SM55 monocristallin, le 72-SMS Tianneng TN et le modèle de Solarex MSX110 polycristallin, qui ont une puissance maximum de 55W " b 5%, de 185W " b 3% et de 110W " b 5% à STC, respectivement.

TABLEAU I: Données STC des fabricants des modules

spécification électrique	Nombre de cellules	Isc (A)	Voc (V)	Im (A)	Vm (V)
Modules PV monocristallins					
SM55	36	3.45	21.7	3.15	17.4
TN-72-5M	72	5.43	45.0	5.08	32.4
Module PV Polycristallin					
MSX110	72	3.69	41.2	3.34	32.9

TABLEAU II: Coefficients de température des modules

Coefficients température	α mA/°C	β mV/°C	γ %/°C	Eg eV
SM55	1.400	-76.0	-0.45	1.12
TN-72-SM	2.172	-148.5	-0.24	1.12
MSX110	2.030	-160.0	-0.50	1.14

Les courbes courant-tension publiées par les fabricants des trois panneaux aux conditions d'essai standard: irradiation 1000 W/m², température 25°C, AM 1,5 sont représentées sur les figures.2 (a), (b) et (c) ; Nous en reproduisons seulement 2 ici.

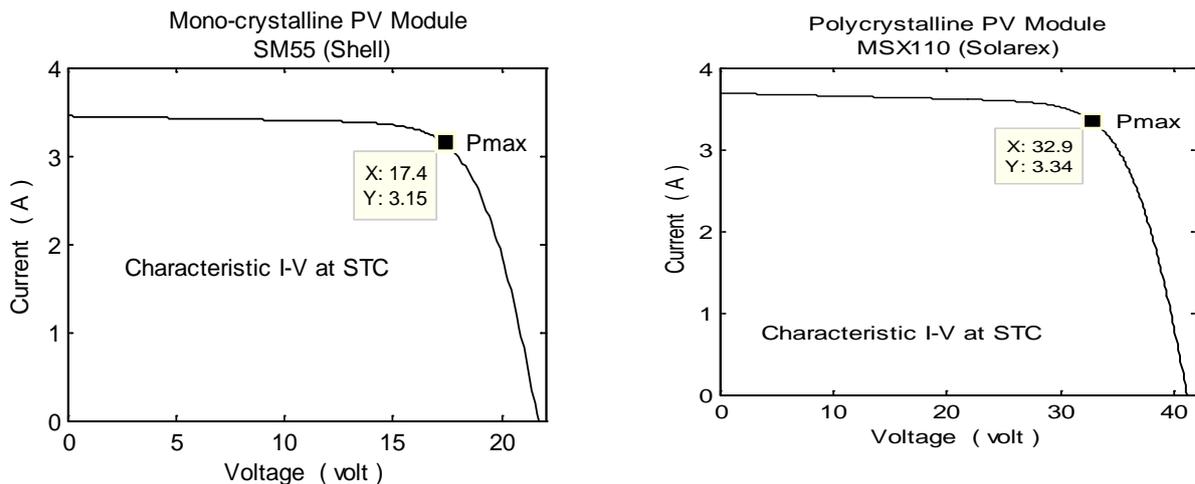


Fig.2 Courbes I-V publiées par les fabricants des modules SM55 et MSX110 aux conditions d'essai standard.

Le tableau III énumère les valeurs des résistances de pertes calculées pour les mêmes modules PV de sorte que leurs courbes I-V contiennent les points donnés. Ces paramètres ont été calculés en utilisant les équations proposées.

TABLEAU III: Paramètres calculés à STC /

Modules	Im (A)	Vm (V)	Rs (Ω)	Rsh (Ω)	a (V)
SM55	3.148	17.350	0.4383	219.4176	1.1490
TN-72-5M	5.078	36.300	0.4184	infinity	2.4000
MSX110	3.341	32.795	0.6801	301.703	2.2791

TABLEAU IV: Erreurs relatives absolues entre publié et calculé

PV Panels	issued Pmax	Calculated Pmax	relative errorIm %	relative error Vm %
SM55	54.8100	54.146	0.0635	0.29
TN72/5M	184.912	184.331	0.0394	0.27
MSX110	109.886	109.551	0.0299	0.32

La comparaison entre les courants Im et les tensions Vm, calculés au point de puissance maximale au moyen des paramètres extraits Rs, Rsh et la tension thermique "a" du tableau III avec ceux qui sont publiés par les fabricants aux conditions STC des différents panneaux, reportés au Tableau I, montrent une différence très faible parfaitement acceptable (voir Tableau IV).

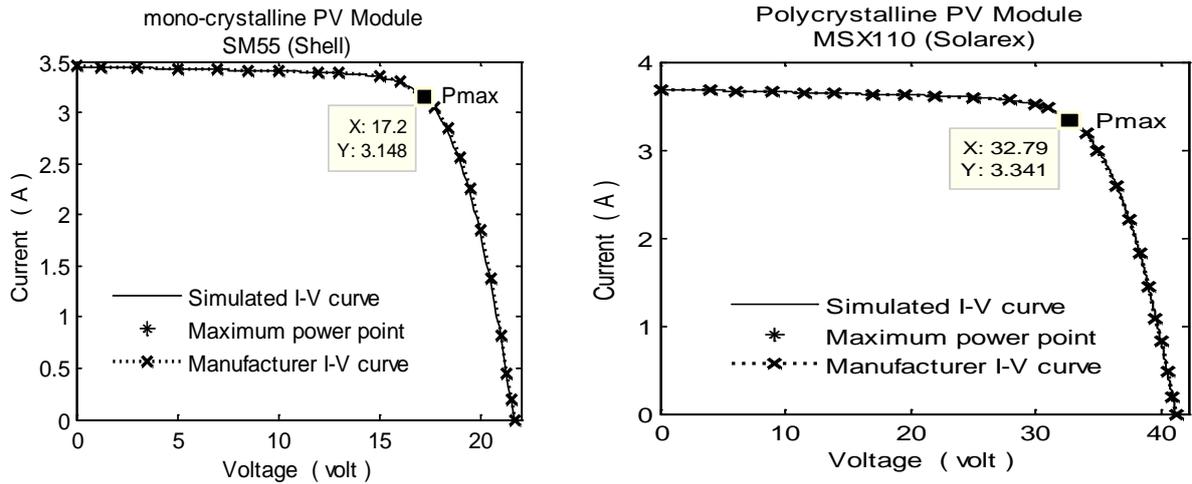


Fig.3. Courbes approximées en utilisant le modèle à une diode, comparées aux courbes des catalogues à STC.

1. Conclusion

Une nouvelle procédure de calcul, simple et claire, pour estimer cinq paramètres de modules photovoltaïques est présentée dans cet article en utilisant le modèle standard simple diode. Les équations proposées ont l'avantage supplémentaire d'exiger seulement les valeurs de I_{SC} , V_{OC} , I_m et V_m . Ces valeurs sont généralement disponibles dans les catalogues des fabricants sous conditions standards (STC.), mais elles peuvent aussi être données sous des conditions différentes ou obtenues par des essais.

Les paramètres des circuits équivalents des modules PV étudiés ont été obtenus avec succès par les équations proposées. La caractérisation de différents modules PV du commerce ont été estimés par cette méthode et leurs paramètres se sont avérés très proches de ceux fournis dans les catalogues.

Nomenclature

q: charge électrique élémentaire $1,607 \cdot 10^{-19}$ Cb
A: coefficient d'idéalité de la cellule; il dépend du matériau.
K: constante de Boltzmann = $1,380 \cdot 10^{-23}$ J/k

T: température en degré Kelvin
Rs: résistance série de la cellule (Ω) .
Rsh: résistance shunt (Ω) .
a : tension thermique

Références

- [1] M.Haouari-Merbaha, M. Belhamel, I. Tobías, J. M. Ruiz, "Extraction and analysis of solar cell parameters from the illuminated current-voltage curve", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 87, pp. 225-233 (2005).
- [2] A.Ortiz-Conde, J.Francisco, G. Sánchez and J. Muci. "New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I-V characteristics", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 90 pp. 352-361 (2006).
- [3] M.Priyanka, M. Lal and S.N. Singh, "A new method of determination of series and shunt resistances of silicon solar cells", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 91, pp. 137-142 (2007).
- [4] Z.Ouennoughi and M.Chegaar, "A simpler method for extracting solar cell parameters using the conductance method", Solid-State Electron., Vol. 43, pp. 1985-1988 (1999).
- [5] M. Tivanov, A. Patryn, N. Drozdov and A. Mazanik, "Determination of solar cell parameters from its current-voltage and spectral characteristics", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 87, pp. 457-465 (2005).
- [6] J. Thongpron, K. Kirtikaraa, C. Jivacate, "A method for the determination of dynamic resistance of photovoltaic modules under illumination", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 90, pp. 3078-3084 (2006).
- [7] Q.Erees, B. Macabebe and E. Ernest van Dyk. "Parameter extraction from dark current-voltage characteristics of solar cells", S.Afr. J. Sci., Vol. 104, pp. 401-404 (2008). Electronic document available in: <http://www.scielo.org.za/pdf/sajs/v104n9-10/a1710410.pdf>. Accessed in August 18, 2010.
- [8] J. Salinger, "Measurement of Solar Cell Parameters with Dark Forward I-V Characteristics". Acta Polyt., Vol. 46 No. 4, pp. 25-27 (2006).
- [9] E. Radziemska. "Dark I-U-T measurements of single crystalline silicon solar cells", Energy Convers. Manage., Vol. 46, pp. 1485-1494 (2005).
- [10] R. Hussein, D. Borchert, G. Grabosch and W.R. Fahrner. "Dark I-V-T measurements and characteristics of (n) a-Si(p) c-Si heterojunction solar cells", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 69, pp. 123-129 (2001).
- [11] W.De Sto, S.A.Klein, W.A.Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", Solar energy, vol 80(2006), pp 80-81.