

Modélisation et simulation d'un panneau solaire photovoltaïque par utilisation de la fonction W de Lambert et de Matlab-Simulink

Bati Ernest BOYA BI*, Prosper GBAHA, Mohamed Koita SAKO et Magloire Paul Ekoun KOFFI

Institut National Polytechnique Houphouët Boigny, Groupe Energies Nouvelles et Renouvelables, Laboratoire de Mécanique et Sciences des Matériaux, BP1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

* Correspondance, courriel : batiplus2014@gmail.com

Résumé

Dans ce document, une autre approche simple et précise pour reconstituer les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur photovoltaïque constitué de cellules solaires au silicium polycristallin en utilisant le modèle d'une diode à cinq paramètres est proposée. Cette approche est basée exclusivement sur les données du constructeur (méthode des trois points : courant de court-circuit, tension de circuit ouvert, point de puissance maximale). La détermination des paramètres (courant de saturation, résistance série, résistance parallèle, courant photonique) s'est fait par résolution d'un système de quatre équations à quatre inconnues et en fixant le facteur d'idéalité de la diode. La résolution de ce système d'équation a nécessité l'utilisation de la fonction W de Lambert. Ce qui nous a permis de modéliser et de simuler les caractéristiques électriques courant-tension et puissance-tension du générateur photovoltaïque. Nous avons analysé les paramètres électriques du générateur photovoltaïque et ses grandeurs électriques optimales (courant, tension et puissance) en fonction des variations météorologiques (température, éclairement).

Mots-clés : *modélisation, simulation, diode, générateur photovoltaïque, fonction W de Lambert.*

Abstract

Modeling and simulation of photovoltaic solar panel using the Lambert W-function and Matlab-Simulink

In this present paper, the model of one exponential of the photovoltaic cell is used for the reconstitution of the I-V and P-V characteristics of photovoltaic solar cells made of polycrystalline silicon. This approach is based exclusively on the manufacturer's data (three-point method : short circuit current, open circuit voltage, maximum power point). The determination of parameters (saturation current, series resistance, parallel resistance, photonic current) was done by solving a system of four equations with four unknowns and fixing the ideality factor of the diode. This allowed us to model and simulate the current-voltage and power-voltage electrical characteristics of the photovoltaic generator. We analyzed the electrical parameters of the photovoltaic generator and its optimal electrical quantities (current, voltage and power) according to meteorological variations (temperature, illumination). The expression of the current as a function of the voltage required the use of the Lambert W function.

Keywords : *modeling, simulation, photovoltaic generator, Lambert W function.*

1. Introduction

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter, mais avant de la consommer il aura fallu la produire. La production d'électricité photovoltaïque a connu ces dernières années un développement énorme [1]. Ce développement était accompagné par une valorisation des recherches visant l'optimisation de l'énergie fournie par les cellules solaires. La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs. Leurs différences se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes de détermination des différents paramètres inconnus [2 - 6]. Dans la littérature, on rencontre plusieurs modèles dont les précisions restent tributaires à la modélisation mathématiques des différents phénomènes physiques intrinsèques intervenant dans le processus de production d'électricité. Dans la plupart des travaux de la littérature, on trouve principalement le modèle équivalent à quatre paramètres basé sur la modélisation mathématique de la courbe tension-courant [2]. Mais ce modèle est plus simple et moins précis [7, 8]. L'objectif de notre travail, est la reconstitution des caractéristiques d'un panneau photovoltaïque à partir d'une de ces cellules, sa modélisation et sa simulation afin d'améliorer ses performances électriques. Pour le faire, nous utilisons le modèle équivalent à cinq paramètres [5, 6, 11 - 13], qui offre une meilleure précision par rapport au modèle à quatre paramètres et qui est moins complexe par rapport au modèle de la double diode [7, 14]. Par la suite, les courbes caractéristiques I-V et P-V ont été reconstituées et représentées graphiquement.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

Pour résoudre notre problème, nous utilisons une cellule solaire à une diode et à cinq paramètres dont nous mettrons un certain nombre en série et en parallèle pour obtenir un panneau solaire. La résolution de l'Équation résultante se fera par la fonction W de Lambert et ensuite nous ferons une simulation de notre panneau par utilisation du logiciel Matlab-Simulink. La fonction W de Lambert, nommée ainsi d'après *Jean-Henri Lambert*, et parfois aussi appelée la *fonction Oméga*, est la réciproque de la fonction de la variable complexe f définie par $f(W) = We^W$, c'est-à-dire que pour tous nombres complexes z et W, nous avons :

$$z = We^W \Leftrightarrow W = W(z) \quad (1)$$

Puisque la fonction f n'est pas injective, W est une fonction multivaluée (multiforme) qui comprend deux branches et définie pour $x \geq -\frac{1}{e}$ où x est une variable réelle.

Les branches de la fonction étant exprimées en $W_0(x)$ pour

$$W(x) \geq -1 \text{ et } W_{-1}(x) \text{ pour } W(x) \leq -1 \quad (2)$$

Matlab est un logiciel de calcul numérique commercialisé par la société MathWorks. C'est un langage pour le calcul scientifique, l'analyse de données, leur visualisation, le développement d'algorithmes. Son interface propose, d'une part, une fenêtre interactive type console pour l'exécution de commandes, et d'autre part, un environnement de développement intégré (IDE) pour la programmation d'applications. Simulink est un logiciel muni d'une interface graphique pour la modélisation, la simulation et l'analyse des systèmes dynamiques. Etant intégré à MATLAB, les deux environnements sont parfaitement compatibles et les différentes

fonctionnalités de ce dernier sont alors directement accessibles. Simulink est basé sur une interface graphique qui permet une construction aisée et conviviale de schémas-blocs. Chaque bloc composant le système est sélectionné depuis un ensemble de bibliothèques prédéfinies.

2-2. Méthodes

2-2-1. Modélisation et procédure d'identification des paramètres électriques

2-2-1-1. Modèle à une diode et à cinq paramètres

Dans le cas idéal, la jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode. Sous obscurité, l'équation de la diode est donnée par [15] :

$$I_d = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \tag{3}$$

Sous éclaircissement on a :

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \tag{4}$$

I_0 étant le courant de saturation inverse de la diode, q la charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}C$), k constante de Boltzmann ($1.3805 \cdot 10^{-23}J / K$), n facteur d'idéalité de la photopile ($1 < n < 2$), T température de la jonction en K, I_d courant circulant dans la diode, I courant de sortie et V la tension de sortie. En circuit ouvert, la charge tend vers l'infini et V tend vers V_{co} (tension en circuit ouvert). Lorsque les résistances de contacts et les pertes ohmiques sont prises en compte comme dans le cas réel, nous devons associer au schéma équivalent une résistance série (R_s) et une résistance shunt (R_p), le modèle de la cellule devient alors le modèle de la **Figure 1** qui est un modèle à une exponentielle [16 - 22]. Ce modèle comporte :

- ✓ Un générateur de courant délivrant un photocourant I_{ph} généré par la lumière dans la cellule. Ce photocourant est proportionnel à la quantité de lumière et à la surface de la cellule ;
- ✓ Une diode, représentant la jonction P-N dans le silicium. Cette jonction induit une barrière de potentiel, laquelle absorbe un courant I_d ;
- ✓ Une résistance parallèle R_p et une résistance série R_s qui représente les pertes ohmiques dans la cellule.

Le courant I est celui qui est réellement fourni par la cellule solaire pour alimenter la charge R_c sous la tension V .

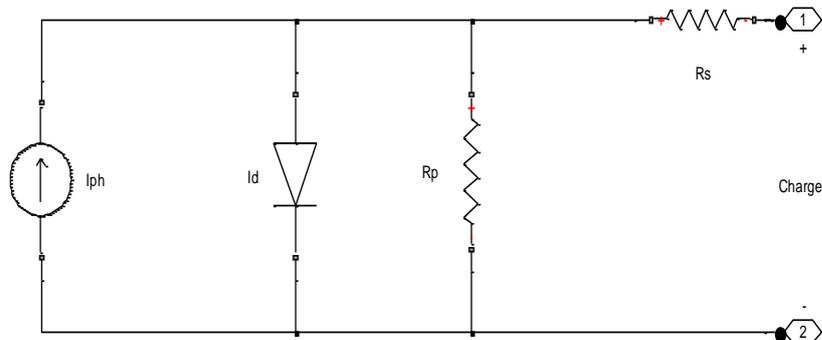


Figure 1 : Modèle cellule photovoltaïque à une diode

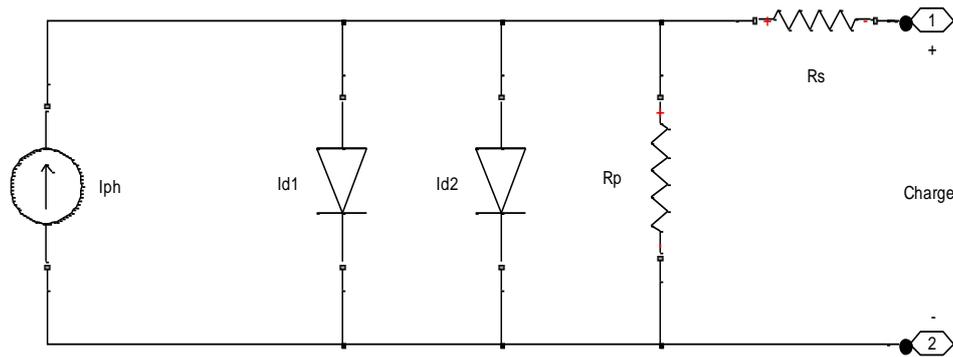


Figure 2 : Modèle cellule photovoltaïque à deux exponentielles

Ainsi, l'**Équation (4)** devient :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{R_p} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V+IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (5)$$

où, la tension aux bornes de la diode est :

$$V_d = I_p R_p = V + IR_s \quad (6)$$

Les courants qui passent dans la résistance shunt et la diode sont respectivement :

$$I_{R_p} = \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (7)$$

$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{(V+IR_s)}{nV_T} \right] - 1 \right\} \quad (8)$$

avec, V_T est la tension thermique de la cellule, définie comme :

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (9)$$

Pour représenter la caractéristique, on considère une valeur donnée de V et on détermine le courant I correspondant et vice-versa. Les valeurs des cinq paramètres de l'**Équation (5)** doivent être déterminées pour reproduire la courbe I-V d'un système PV. Cela nécessite cinq équations contenant cinq inconnues qui doivent être résolues simultanément pour obtenir les valeurs des paramètres [11, 20 - 24]. Pour déterminer les cinq paramètres (n , I_0 , I_{ph} , R_s et R_p) de référence de notre modèle, cinq données aux conditions de référence sont nécessaires. Ces données sont le courant de court-circuit ($I = I_{cc}$ et $V_{cc} = 0$), la tension de circuit ouvert ($V = V_{co}$ et $I_{co} = 0$), le courant et la tension du point de puissance maximale ($I = I_{pm}$ et $V = V_{pm}$), respectivement. Ces trois points mentionnés ci-dessus permettent de définir trois **Équations** qui nous permettent d'identifier la valeur des paramètres mentionnés ci-dessus. La quatrième **Équation** requise pour le calcul des cinq paramètres est obtenue en réalisant que la pente de la courbe tension-puissance au point de puissance maximale est égal à zéro ($(dP/dV)_{pm} = 0$). Cela nous donne ainsi, le système d'**Équation** suivant :

$$\begin{cases} I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{I_{cc} R_s}{n V_T} \right] - 1 \right\} - \frac{I_{cc} R_s}{R_p} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} 0 = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{V_{co}}{n V_T} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{co}}{R_p} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} I_{pm} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{V_{pm} + I_{pm} R_s}{n V_T} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{pm} + I_{pm} R_s}{R_p} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} -\frac{I_{pm}}{V_{pm}} = -\frac{I_0}{n V_T} \left(1 - R_s \frac{I_{pm}}{V_{pm}} \right) \exp \left[\frac{V_{pm} + I_{pm} R_s}{n V_T} \right] - \frac{1}{R_p} \left(1 - R_s \frac{I_{pm}}{V_{pm}} \right) \end{cases} \quad (13)$$

Par estimation du facteur d'idéalité n (généralement de 1,2 pour le silicium monocristallin et 1,3 pour le polycristallin [25]) [11], et par résolution du système précédent, nous déterminons les valeurs des paramètres du circuit équivalent de manière simple, direct, et avec assez de précision. **L'Équation (10)** donne :

$$I_{cc} + \frac{I_{cc} R_s}{R_p} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{I_{cc} R_s}{n V_T} \right] - 1 \right\} \Rightarrow \frac{I_{cc}}{I_{ph}} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) = 1 - \frac{I_0}{I_{ph}} \left\{ \exp \left[\frac{I_{cc} R_s}{n V_T} \right] - 1 \right\}$$

$$\text{or, } \frac{I_0}{I_{ph}} \left\{ \exp \left[\frac{I_{cc} R_s}{n V_T} \right] - 1 \right\} \text{ tend vers zero, d'où: } I_{ph} = \left(\frac{R_p + R_s}{R_p} \right) I_{cc} \quad (14)$$

Les **Équations (11) et (14)** donnent :

$$I_0 \left\{ \exp \left[\frac{V_{co}}{n V_T} \right] - 1 \right\} = I_{ph} - \frac{V_{co}}{R_p} = \frac{(R_p + R_s) I_{cc} - V_{co}}{R_p}$$

En négligeant le courant de saturation I_0 devant le terme $I_0 \exp \left[\frac{V_{co}}{n V_T} \right]$, on obtient finalement :

$$I_0 = \frac{(R_p + R_s) I_{cc} - V_{co}}{R_p \exp \left[\frac{V_{co}}{n V_T} \right]} \quad (15)$$

Les **Équations (12), (14) et (15)** nous donnent :

$$I_{pm} = I_{cc} - \left(I_{cc} - \frac{(V_{co} - R_s I_{cc})}{R_p} \right) \times \left\{ \exp \left[\frac{V_{pm} + I_{pm} R_s - V_{co}}{n V_T} \right] - \exp \left(-\frac{V_{co}}{n V_T} \right) \right\} - \frac{V_{pm} + I_{pm} R_s - I_{cc} R_s}{R_p}$$

$$\text{or, } \exp \left(-\frac{V_{co}}{n V_T} \right) \text{ tend vers zéro}$$

Ce qui nous donne :

$$I_{pm} = I_{cc} - \left(I_{cc} - \frac{(V_{co} - R_s I_{cc})}{R_p} \right) \times \exp \left(\frac{V_{pm} + I_{pm} R_s - V_{co}}{n V_T} \right) - \frac{V_{pm} + I_{pm} R_s - I_{cc} R_s}{R_p}$$

Et ensuite donne :

$$\exp \left(\frac{V_{pm} + I_{pm} R_s - V_{co}}{n V_T} \right) = \frac{(R_s + R_p)(I_{pm} - I_{cc}) + V_{pm}}{V_{co} - I_{cc}(R_p + R_s)} \quad (16)$$

Cette **Équation (16)** associée aux **Équations (13) et (15)** nous donnent :

$$R_p = \frac{(V_{pm} - R_s I_{pm})(V_{pm} - R_s(I_{cc} - I_{pm}) - nV_T)}{(V_{pm} - R_s I_{pm})(I_{cc} - I_{pm}) - nV_T V_{pm}} \quad (17)$$

En remplaçant R_p par son expression (17) dans l'Équation (16), on obtient :

$$\frac{nV_T V_{pm}(2I_{pm} - I_{cc})}{(V_{pm} I_{cc} + V_{co}(I_{pm} - I_{cc}))(V_{pm} - I_{pm} R_s) - nV_T (V_{pm} I_{cc} - V_{co} I_{pm})} = \exp\left(\frac{V_{pm} + I_{pm} R_s - V_{co}}{nV_T}\right) \quad (18)$$

L'Équation (18) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{-V_{pm}(2I_{pm} - I_{cc})}{(V_{pm} I_{cc} + V_{co}(I_{pm} - I_{cc}))} = \left(\frac{I_{pm} R_s - V_{pm}}{nV_T} + \frac{V_{pm} I_{cc} - V_{co} I_{pm}}{V_{pm} I_{cc} + V_{co}(I_{pm} - I_{cc})}\right) \times \exp\left[\frac{V_{pm} + I_{pm} R_s - V_{co}}{nV_T}\right] \quad (19)$$

En multipliant les deux membres de l'Équation (19) par $\exp\left[-\frac{2V_{pm} - V_{co}}{nV_T} + \frac{V_{pm} I_{cc} - V_{co} I_{pm}}{V_{pm} I_{cc} + V_{co}(I_{pm} - I_{cc})}\right]$, on obtient :

$$\frac{-V_{pm}(2I_{pm} - I_{cc})}{(V_{pm} I_{cc} + V_{co}(I_{pm} - I_{cc}))} \exp\left[-\frac{2V_{pm} - V_{co}}{nV_T} + \frac{V_{pm} I_{cc} - V_{co} I_{pm}}{V_{pm} I_{cc} + V_{co}(I_{pm} - I_{cc})}\right] = \left(\frac{I_{pm} R_s - V_{pm}}{nV_T} + \frac{V_{pm} I_{cc} - V_{co} I_{pm}}{V_{pm} I_{cc} + V_{co}(I_{pm} - I_{cc})}\right) \times \exp\left[\frac{I_{pm} R_s - V_{pm}}{nV_T} + \frac{V_{pm} I_{cc} - V_{co} I_{pm}}{V_{pm} I_{cc} + V_{co}(I_{pm} - I_{cc})}\right] \quad (20)$$

Le caractère implicite de l'Équation (5) et son évaluation informatiquement lourde a cependant abouti à l'utilisation croissante d'une expression alternative basée sur la fonction W de Lambert [1, 3, 4, 26, 27]. À l'aide de la fonction W de Lambert, le courant peut être exprimé comme une fonction explicite de la tension. Le résultat est un calcul plus commode et efficace de calcul du courant. L'Équation (18) est une équation implicite pour R_s que nous résolvons ici à l'aide de la fonction W de Lambert. La méthode générale d'application de la fonction W de Lambert dans la résolution des équations est d'utiliser l'équivalence suivante :

$$X = Y e^Y \Leftrightarrow Y = W(X) \quad (21)$$

En se référant à l'Équation (21), l'Équation (20) s'écrit :

$$\left(\frac{I_{pm} R_s - V_{pm}}{nV_T} + \frac{(V_{pm} I_{cc} - V_{co} I_{pm})}{(V_{pm} I_{cc} + V_{co}(I_{pm} - I_{cc}))}\right) = W_{-1}\left(-\frac{V_{pm}(2I_{pm} - I_{cc})}{(V_{pm} I_{cc} + V_{co}(I_{pm} - I_{cc}))} \exp\left(-\frac{2V_{pm} - V_{co}}{nV_T} + \frac{(V_{pm} I_{cc} - V_{co} I_{pm})}{(V_{pm} I_{cc} + V_{co}(I_{pm} - I_{cc}))}\right)\right) \quad (22)$$

où, W_{-1} est la branche négative de la fonction W de Lambert (comme la partie gauche de l'Équation (21) est inférieure à (-1) pour les cellules typiques et les panneaux solaires). Une expression explicite de R_s est :

$$R_s = \alpha \times (W_{-1}(\beta \exp(\gamma)) - (\gamma + \delta)) \quad (23)$$

$$\text{avec, } \alpha = \frac{nV_T}{I_{pm}}; \quad \beta = -\frac{V_{pm}(2I_{pm} - I_{cc})}{(V_{pm} I_{cc} + V_{co}(I_{pm} - I_{cc}))};$$

$$\gamma = -\frac{2V_{pm}-V_{co}}{nV_T} + \frac{(V_{pm}I_{cc}-V_{co}I_{pm})}{(V_{pm}I_{cc}+V_{co}(I_{pm}-I_{cc}))}; \quad \delta = \frac{V_{pm}-V_{co}}{nV_T}$$

Ensuite, les paramètres du circuit équivalent peuvent être obtenus. Généralement, la relation (21) est directement appliquée à l'Équation (5) pour obtenir des équations explicites pour le courant ou la tension de sortie de la cellule solaire.

3. Résultats et discussion

L'objectif de ce travail est d'obtenir un circuit équivalent qui reproduit le comportement du panneau solaire pour les niveaux d'irradiation et de température. La première étape consiste à estimer le facteur d'idéalité a . Certains auteurs proposent une valeur générique dans la parenthèse (1, 1.5) pour chaque type de cellule [28]. Dans le **Tableau 1** sont regroupées les caractéristiques du panneau solaire qui nous a permis de résoudre l'Équation (5).

Tableau 1 : Caractéristiques du KC200GT solar [29]

KC200GT	
I_{pm} (A)	7.61
V_{pm} (V)	26.3
I_{cc} (A)	8.21
V_{co} (V)	32.9
T_r (K)	298

Par résolution de l'Équation (5), on obtient les valeurs des différents paramètres de notre panneau photovoltaïque, qui sont regroupées dans le **Tableau 2** suivant :

Tableau 2 : Caractéristiques du KC200GT solar

Paramètres du circuit	Méthode présente
R_s (Ω)	0.221
R_{sh} (Ω)	415.405
I_{pv} (A)	8.214
I_0 (A)	9.825×10^{-8}
n	1.3

Pour vérifier la validité de notre modèle, nous procédons à des simulations pour obtenir les courbes I-V et P-V du champ PV [30]. Nous donnons sur les **Figures 3 et 4** l'évolution des deux principales caractéristiques I-V et P-V pour différents éclaircissements. De même nous donnons sur les **Figures 5 et 6** Les mêmes caractéristiques sur l'effet de différentes températures.

- Effets de la variation du rayonnement solaire

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croit, et cette croissance permet au module de produire une puissance électrique plus importante. Comme on peut le voir sur les **Figures 3 et 4**, le courant du module PV dépend fortement de l'ensoleillement. Cependant, la tension a une augmentation de 6V lorsque le rayonnement solaire est passé de 200 W / m² à 1000 W / m².

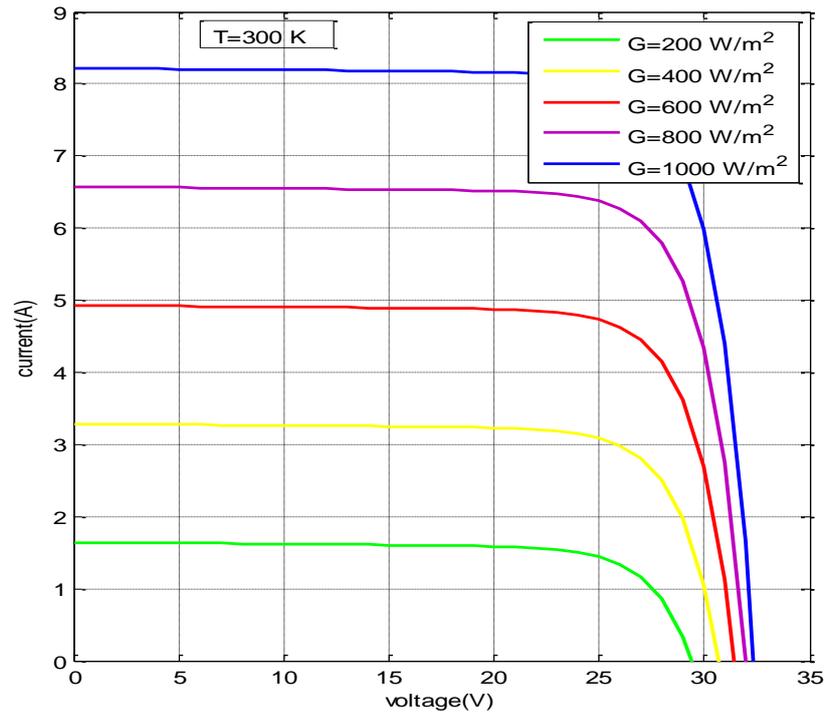


Figure 3 : Caractéristiques I-V d'un module PV pour différentes irradiances solaires à 27°C

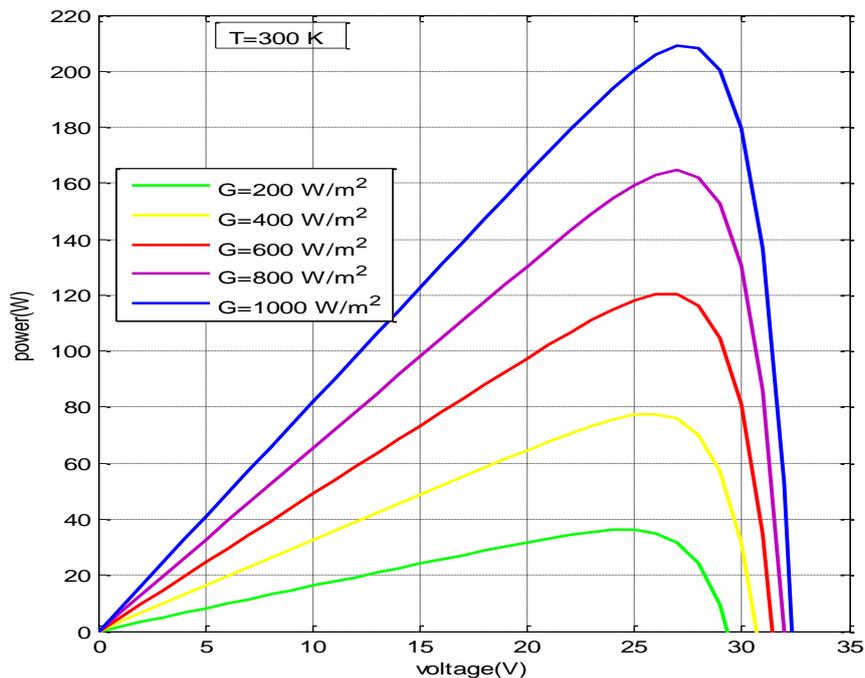


Figure 4 : Caractéristiques P-V d'un module PV pour différentes irradiances solaires à 27°C

- Effet de la variation de la température de cellules

L'évolution de la caractéristique I-V en fonction de la température montre que le courant augmente très rapidement lorsque la température s'élève et engendre une décroissance moins prononcée de la tension de circuit ouvert V_{co} , tandis que le courant de court-circuit I_{cc} augmente légèrement. Ce comportement est validé et présenté sur les **Figures 5 et 6**.

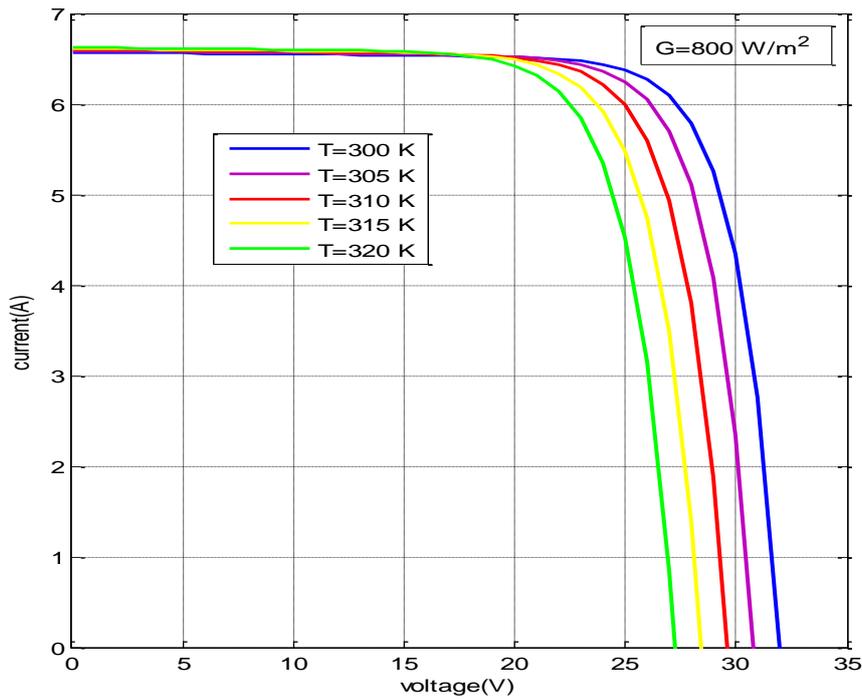


Figure 5 : *Caractéristiques I-V d'un module PV pour différentes températures*

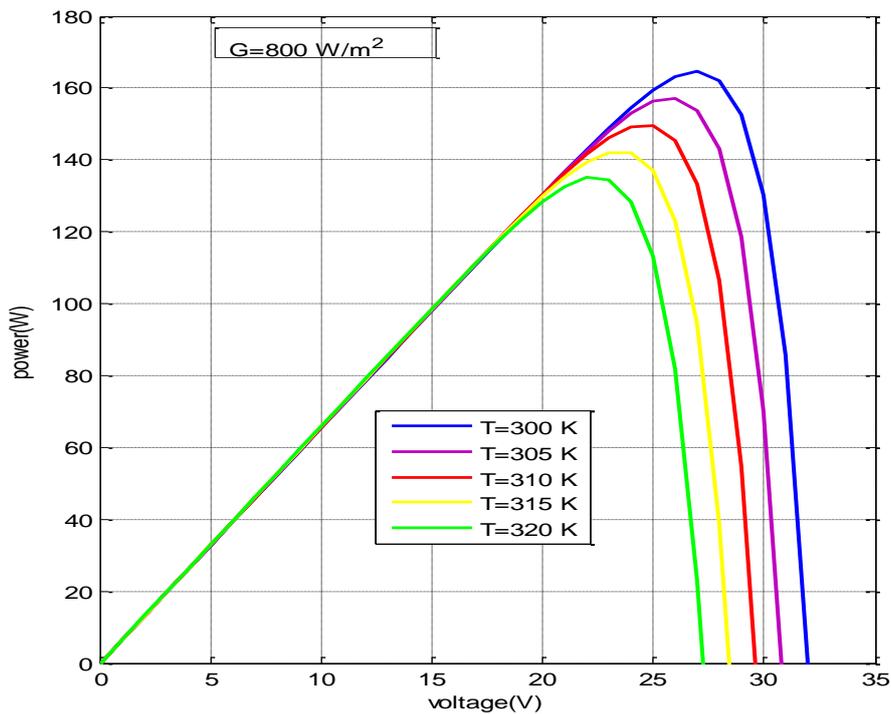


Figure 6 : *Caractéristiques P-V d'un module PV pour différentes températures*

Dans cette étude, le modèle Matlab / SIMULINK contribue non seulement à prédire le comportement de toute cellule photovoltaïque dans différentes conditions physiques et environnementales, mais aussi peut être considéré comme un outil intelligent pour extraire les paramètres internes de toute cellule PV solaire, y compris le facteur d'idéalité, la résistance série et shunt. Certains de ces paramètres ne sont pas toujours fournis par les fabricants.

4. Conclusion

Nous avons utilisé le modèle de la cellule photovoltaïque à une diode pour reconstituer les caractéristiques I-V et P-V à l'aide de la méthode des trois points qui sont fournis par le constructeur. Nous avons exprimé le courant en fonction de la tension qui a nécessité l'utilisation de la fonction W de Lambert et ensuite la puissance en fonction de la tension avant de procéder aux différentes simulations. Cette méthode proposée (Fonction de Lambert) permet d'utiliser toutes les caractéristiques I-V, P-V et produit des résultats sans véritable approximation. Les résultats obtenus (R_s , R_p , I_0 , I_{ph}) par cette méthode analytique sont très précis et sont en accord avec d'autres méthodes établies. La méthode est basée sur la détermination analytique des paramètres d'un circuit équivalent. Par utilisation de cette méthodologie présentée, il est possible de construire un modèle réaliste d'un panneau solaire qui reproduit les données expérimentales fournies par le fabricant dans la fiche technique, y compris les variations à différentes températures et irradiations. La méthode est explicite, non itérative et simple; pas d'itérations ni de valeurs initiales nécessaires pour les paramètres. Seules les données des fiches techniques des fabricants sont nécessaires. Il existe plusieurs applications possibles de ce procédé. La procédure décrite dans ce présent document semble être très appropriée pour une analyse qui implique des calculs abondants de circuits équivalents ou pour la détermination de valeurs initiales pour des méthodes numériques.

Références

- [1] - J. CUBAS and al, "Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function," *Energies*, Vol. 7, (2014) 4098 - 4115
- [2] - R. KHEZZAR and al, "Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque," *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 13, N° 3 (2010) 379 - 388
- [3] - L. PENG and al, "A new method for determining the characteristics of solar cells," *J. Power Sources*, Vol. 227 (2013) 131 - 136
- [4] - L. PENG and al, "An improved model and parameters extraction for photovoltaic cells using only three state points at standard test condition," *J. Power Sources*, Vol. 248, (2014) 621 - 631
- [5] - A. ORIOLI and A. DI GANGI, "A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data," *Appl. Energy*, Vol. 102, (2013) 1160 - 1177
- [6] - J. MA and al, "Approximate single-diode photovoltaic model for efficient I-V characteristics estimation," *Sci. World J.* 2013, (2013) 230471 : 1 - 230471 : 7
- [7] - F. GHANI and al, "Numerical calculation of series and shunt resistances and diode quality factor of a photovoltaic cell using the Lambert W-function," *Solar Energy*, Vol. 91, (2013) 422 - 431
- [8] - F. GHANI and al, "Numerical determination of parasitic resistances of a solar cell using the Lambert W-function," *Solar Energy*, Vol. 85, (2011) 2386 - 2394
- [9] - S. LIU and R. DOUGAL, "Dynamic multiphysics model for solar array," *Energy Conversion, IEEE Transaction on*, Vol. 17, (2002) 285 - 294
- [10] - A. LAUDANI and al, "High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I—V curves by using reduced forms," *Solar Energy*, Vol. 103, (2014) 316 - 326
- [11] - J. MA and al, "Parameter Estimation of Photovoltaic Models via Cuckoo Search," *J. Appl. Math.* 2013, (2013) 362619 : 1 - 362619 : 8

- [12] - Y. LI and al, "Evaluation of methods to extract parameters from current–voltage characteristics of solar cells," *Solar Energy*, Vol. 90, (2013) 51 - 57
- [13] - S. B. DONGUE and al., "Modeling of Electrical Response of Illuminated Crystalline Photovoltaic Modules Using Four- and Five-Parameter Models," *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, Vol. 2, (2012) 612 - 619
- [14] - P. M CUCE and E. CUCE, "A novel model of photovoltaic modules for parameter estimation and thermodynamic assessment," *Int. J. Low-Carbon Technol*, Vol. 7, (2011) 159 - 165
- [15] - S. NDOYE et al, "Modélisation et simulation sous Matlab/Simulink de la chaîne d'alimentation d'une station relais de télécommunications en énergie solaire photovoltaïque dans une zone isolée du réseau électrique," *Journal des Sciences*, Vol. 9, N°2 (2009) 45 - 55
- [16] - S. N. KHAN and M. SWAMINATHAN, "Modelling and simulation of energy forecaster for grid connected & standalone pv systems," *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol. 10, N°2 (2014) 466 - 475
- [17] - G. WALKER, "Evaluating mppt converter topologies using a matlab pv model," *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Vol. 21, N°1 (2001) 4956
- [18] - D. SERA and al, "PV panel model based on datasheet values," *Industrial Electronics, ISIE 2007, IEEE International Symposium Volume*, (2007) 2392 - 2396
- [19] - E. YA. SHVETS and al, "Investigation of Methods Used in Calculations of Solar Cell Parameters," *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 52, N°1 (2009) 16 - 23
- [20] - S. LINEYKIN and al, "An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 30, (2014) 282 - 289
- [21] - D. T. COTFAS and al, "Methods to determine the DC parameters of solar cells," *A critical review. Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 28, (2013) 588 - 596
- [22] - D. T. COTFAS and al, "The methods to determine the series resistance and the ideality factor of diode for solar cells-review," *In Proceedings of the 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Brasso, Romania, (2012) 966 - 972
- [23] - M. CHEGAAR and al, "Determination of Solar Cells Parameters under Illuminated Conditions," *J. of Electron Devices*, Vol. 2, (2003) 17 - 21
- [24] - K. KENNERUD, "Analysis of performance degradation in cds solar cells," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 5, 6, (1969) 912 - 917
- [25] - H. BELLIA and al, "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB," *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, Vol. 3, (2014) 53 - 61
- [26] - A. JAIN and A. KAPOOR, "Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function", *Solar Energy & Materials*, Vol. 81, (2004) 269 - 277
- [27] - D. PICAULT and al, "Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses," *Solar Energy*, Vol. 84, (2010) 1301 - 1309
- [28] - M. G. VILLALVA and al, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 24, (2009) 1198 - 1208
- [29] - A. A. EL TAYYAN, "PV system behavior based on datasheet," *Journal of Electron Devices*, Vol. 9, (2011) 335 - 341
- [30] - T. T. GUINGANE and al, "Modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension (boost) avec le logiciel MATLAB/SIMULINK," *Journal internationale de technologie, de l'innovation, de la physique, de l'énergie et de l'environnement*, Vol. 2, N°1 (2016) 1