

Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque: Cas du module polycristallin Ecoline LX-260P installé au dispensaire de Sévagan (Togo)

K. Kety¹, K.A. Amou¹, K. Sagna^{1*}, K. Tepe^{1,2}, Y. Lare¹ et K. Napo¹

¹ Laboratoire sur L'Energie Solaire, Département de Physique
Faculté Des Sciences, Université de Lomé, B.P. 1515, Lomé, Togo

¹ Centre Informatique et de Calcul, Université de Lomé, B.P. 1515, Lomé, Togo

(reçu le 20 Décembre 2016 - accepté le 25 Décembre 2016)

Résumé - Ce papier présente un modèle de simulation pour prédire la performance d'un système photovoltaïque (PV) fonctionnant dans les conditions météorologiques du site d'installation. Les systèmes photovoltaïques individuels sont largement utilisés dans les applications des sources d'énergie renouvelables et il est important d'avoir une capacité à évaluer la performance des systèmes installés. Les caractéristiques intensité-tension et puissance-tension d'un générateur photovoltaïque dépendent de l'irradiation solaire et de la température de fonctionnement des cellules. Nous avons effectué une caractérisation électrique et une modélisation d'un générateur photovoltaïque dans l'environnement Matlab. L'objectif principal de ce travail est de prédire la performance d'un système photovoltaïque. Le modèle de simulation a été validé à partir des données expérimentales d'un système individuel de 2.86 kW_c installé au dispensaire de Sévagan dans la préfecture de Vo (Togo). Les résultats du modèle de simulation ont été comparés aux résultats expérimentaux dans les mêmes conditions de fonctionnement et d'environnement climatique. Un bon accord a été observé avec des coefficients de corrélation acceptables. Les résultats de comparaison témoignent de la qualité du modèle proposé.

Abstract - In a general context of fight against global warming, renewable energies are promising and sustainable to concernate fossil energies. Photovoltaic systems are needed as a means of converting solar energy into electricity. The current-voltage and power-voltage characteristics of a photovoltaic generator depend on the solar irradiation and the operating temperature of the cells. It's important to have the means to evaluate the performance of the installed systems. In this work, we have carried out an electrical characterization and a modelling of a photovoltaic generator in the Matlab environment. The main objective of this work, is to predict the performance of a photovoltaic system. The simulation model, was validated using experimental data from an individual system of 2.86 kW_p installed at the hospital in the village of Sévagan (Togo). The results of the simulation model were compared to the experimental results under the same operating conditions and climatic environment. The results of comparison show the quality of the proposed model.

Key words: Modelling - Simulation - Photovoltaic generator - Characteristic I-V.

1. INTRODUCTION

Dans les pays africains, rendre disponible l'électricité dans les zones rurales a toujours été un enjeu socio-économique important. Or tout développement passe par l'accès à l'électricité. C'est donc un défi de mettre à la disposition des populations rurales une source d'énergie capable de stimuler l'activité économique et de conduire à une amélioration de leurs conditions de vie.

* ksagna@univ-lome.tg

Toutefois, le réseau national de distribution de l'énergie électrique ne couvre pas souvent ces zones rurales. Aussi, plusieurs difficultés sont à noter: la faible densité et la dispersion de la population, la faiblesse des revenus, l'inexistence ou la faiblesse de structures collectives au niveau villageois. Ainsi pour assurer une électrification rationnelle du monde rural, l'exploitation du potentiel solaire abondant dont disposent ces pays est une des solutions. L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités.

Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix et le plus performant avec le moindre coût possible.

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Mais les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système PV.

Les méthodes d'optimisation du générateur PV sont d'une grande utilité pour les fabricants n'ayant pas des informations détaillées sur les futurs sites d'implémentation de leurs produits.

L'objectif principal de cette étude est de simuler les performances d'une seule composante du système PV, à savoir, le générateur PV fonctionnant dans les conditions météorologiques du site. C'est l'élément le plus onéreux et le plus sensible aux conditions climatiques du site. Le modèle de simulation sera validé à partir des données expérimentales d'un système individuel de 2.86 kW_C installé au dispensaire de Sévagan dans la préfecture de Vo (Togo).

2. METHODOLOGIE

2.1 Matériels et méthode expérimentale

Le matériel expérimental est constitué d'un pyranomètre Ahlborn de type FL A613-GS, SN:15111835/15, d'un thermo hygromètre servant de capteur de température, d'une centrale d'acquisition Almeno et des multimètres pour la mesure de l'intensité et de la tension et d'un module solaire Eco Line Lx-260P.

Des mesures ont été effectuées au Laboratoire de l'Energie Solaire de l'Université de Lomé (LES-UL) sur le module Ecoline Lx-260p de même que l'irradiation solaire et la température ambiante.

Toutes ces mesures ont été faites avec une précision de 10^{-4} . Ces données ont été automatiquement enregistrées à l'aide de la centrale Almeno. L'intensité et la tension ont été mesurées par le multimètre.

2.2 Modélisation et simulation d'un générateur solaire photovoltaïque

2.2.1 Présentation du modèle à une diode

L'utilisation des circuits équivalents est convenable pour simuler les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque. Deux modèles sont principalement utilisés: le modèle à une diode (figure 2) et le modèle à deux diodes (figure 3) [1].

Le modèle idéal (figure 1) d'une cellule est une source de courant en parallèle avec une diode. Pour tenir compte des effets dissipatifs, deux résistances ont été introduites: la résistance série et la résistance shunt [2, 3].

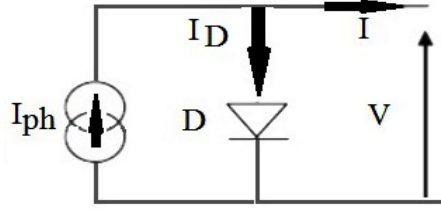
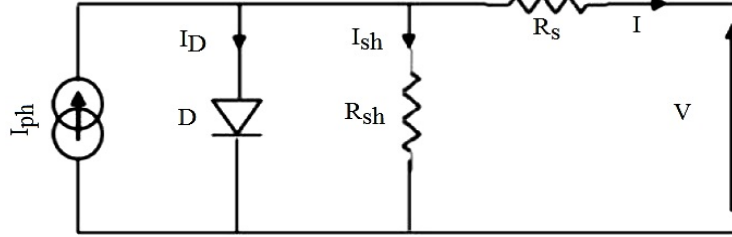


Fig. 1: Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction [4].

Le modèle à une diode est basé sur l'hypothèse selon laquelle, les pertes par recombinaison des porteurs de charge dans la zone de déplétion sont absentes.

Fig. 2: Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque
Modèle à une diode

Ce modèle consiste en un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode, une résistance série R_s et une résistance parallèle (résistance shunt) R_{sh} . Il est représenté par le circuit équivalent de la figure 2. Ce circuit peut être utilisé pour une seule cellule, de même que pour un module constitué de plusieurs cellules ou pour un champ constitué de plusieurs modules. Le courant généré par un module photovoltaïque constitué de N_s cellules en série, en fonction de la tension V aux bornes est donné par la relation:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{(V + R_s I)}{n V_t} - 1 \right) \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

Avec: I_{ph} , Photo-courant du module; I_0 , Courant de saturation inverse de la diode; n , Facteur d'idéalité de la jonction ($1 \leq n \leq 1.5$); q , Charge de l'électron; k , Constante de Boltzmann; T , Température des cellules variant en fonction de l'éclairement et de la température ambiante par la relation:

$$T - T_a = G / 800 \times (NOCT - 20) \quad (2)$$

Avec: T_a , Température ambiante; NOCT, Tension nominale de fonctionnement de la cellule (Nominal Operating Cell Temperature) dans les conditions suivantes, $G = 800 \text{ W/m}^2$; AM1.5; $T_a = 20^\circ\text{C}$; Vitesse de vent supérieure à 1 m/s.

V_t est la tension thermique du module pour un nombre N_s de cellules en série et définie par:

$$V_t = \frac{N_s k T}{q} \quad (3)$$

Les paramètres du modèle sont: la résistance série R_s , la résistance shunt R_{sh} , le photocourant I_{ph} , le courant de saturation inverse de la diode I_0 et le facteur d'idéalité de la diode n .

Dans le cas du modèle à une diode avec résistance série et résistance shunt, plusieurs algorithmes numériques ont été proposés pour modéliser la courbe $I-V$. Ces algorithmes incluent 'la méthode résistive d'accompagnement' (Resistive companion method [2]), l'optimisation non linéaire des moindres carrées (non-linear least square optimisation dans Ishaque *et al.* [5]), et d'autres solutions itératives décrites dans [5] et [3].

Tout récemment, plusieurs auteurs, ont utilisé l'intelligence artificielle comme par exemple la logique fuzzy [9], et les réseaux de neurones artificiels [10] (artificial neural network) pour modéliser la courbe $I-V$. C'est une approche logique dans le cas où nous considérons la dépendance des cellules solaires aux variations environnementales.

Malgré les résultats précis obtenus, les techniques d'intelligence artificielle exigent d'importants calculs. De plus, les réseaux de neurones artificiels requièrent une grande quantité de données pour pouvoir tourner. Il vient donc que, parmi les différentes méthodes susmentionnées, la technique itérative proposée par Villalva [6] est la plus promotrice. Le **Tableau 1** montre les paramètres fournis par le fabricant du module Ecoline LX-260P.

Tableau 1: Caractéristiques électriques du module Ecoline LX 260P dans les conditions standards (irradiance 1000 W/m², température 25°C, AM1.5)

Puissance maximale du module P_m	260 W
Tension de circuit ouvert V_{co}	37.94 V
Courant de court-circuit I_{cc}	8.66 A
Tension maximale V_m	31.28 V
Courant maximal I_m	8.32 A
Coefficient de température de la tension de circuit ouvert K_V	-0.32 %/°C
Coefficient de température du courant de court-circuit K_I	0.05 %/°C
NOCT, Nominal Operating Cell Temperature)	45+/- 2°C
Nombre de cellules en série N_s	60

Pour démarrer le processus itératif les valeurs initiales de R_s et R_{sh} sont nécessaires. La résistance série est initialisée à zéro. La valeur initiale de la résistance shunt est donnée par la relation:

$$R_{sh0} = \frac{V_m}{I_{cc,n} - I_m} - \frac{V_{co,n} - V_m}{I_m} \quad (4)$$

Détermination des paramètres pour le modèle à une diode

La figure 3 montre l'organigramme simplifié du programme développé pour la détermination des paramètres. Le code script a été écrit sous le logiciel Matlab.

La figure 4 montre les courbes $I-V$ et $P-V$ du module Ecoline LX-260P qui passent exactement par les trois points expérimentaux fournis par le fabricant sur la fiche technique. Ces courbes montrent la relation non linéaire qui existe entre l'intensité et la tension du module d'une part, et d'autre part entre la puissance et la tension du

module. Elles permettent de comprendre le fonctionnement d'un module photovoltaïque soumis à un éclairement et à une température de fonctionnements donnés.

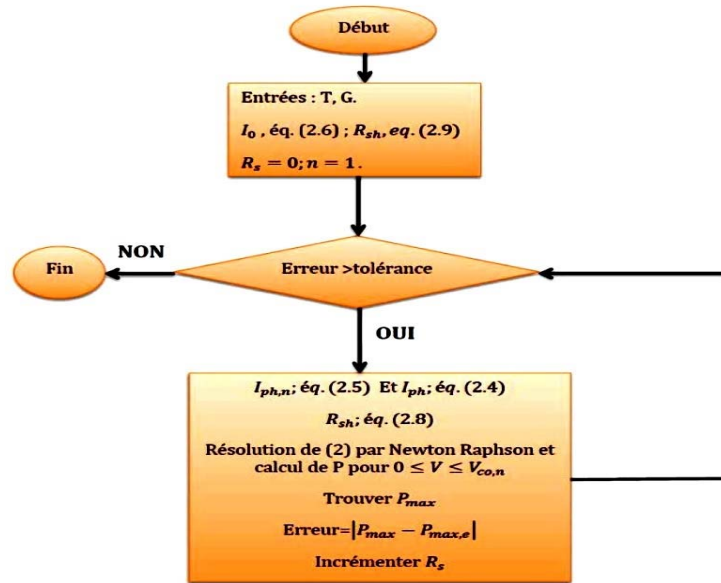


Fig. 3: Algorithme de la méthode utilisée pour ajuster le modèle I – V

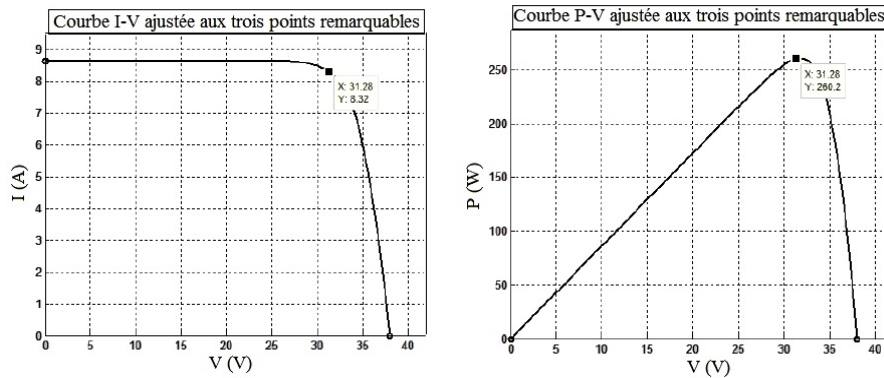


Fig. 4: Courbes I – V et P – V ajustées aux trois points remarquables

Les paramètres ajustés et les constantes du modèle sont listés dans le **Tableau 2**.

Tableau 2: Paramètres du module Ecoline LX-260P dans les conditions de référence: cas du modèle à une diode

I_m	V_m	I_{cc}	V_{co}	I_0	I_{ph}	a	R_s	R_{sh}
8.32A	31.28V	8.66A	37.94V	3.8510^{-10}	8.66002A	1.3	7003.4	0.182

2.2.2 Modèle à deux diodes

Dans une cellule solaire réelle, le phénomène de recombinaison représente des pertes importantes; lesquelles ne peuvent pas être convenablement modélisées en utilisant le modèle à une diode. La considération de ces pertes conduit à introduire une diode supplémentaire [5, 8].

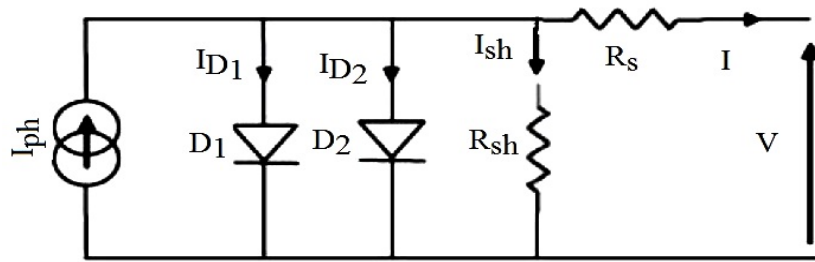


Fig. 5: Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque
Modèle à deux diodes

Le modèle à une diode est facile à mettre en œuvre, mais moins précis que le modèle à deux diodes. La méthode itérative décrite dans [4] est la meilleure. Cependant, sa précision se détériore pour des faibles irradiations, notamment aux voisinages de la tension de circuit ouvert [5].

L'introduction de la seconde diode dans le circuit fait augmenter le nombre de paramètres à sept (7): le courant de saturation inverse et le facteur d'idéalité de la seconde diode viennent s'ajouter. La détermination de tous les paramètres du modèle constitue le problème majeur.

Pour le modèle à deux diodes, la technique d'ajustement de Levenberg - Merquardt est appliquée pour construire la courbe $I-V$ [11, 12]. Selon les travaux de Chowdury *et al.* [13], un circuit équivalent de Thévenin est utilisé pour estimer les paramètres du modèle, tandis que selon les travaux de Hovinen [14]. Les paramètres sont calculés comme une fonction de la résistance série.

Cependant, dans toutes ces techniques, plusieurs nouveaux coefficients supplémentaires sont introduits dans les équations. De plus, des difficultés se posent dans la détermination des valeurs initiales des paramètres. Une autre approche pour décrire le modèle à deux diodes, est d'examiner ses caractéristiques physiques telles que, le coefficient de diffusion des électrons, la durée de vie des porteurs minoritaires, la densité intrinsèque des porteurs et d'autres paramètres semi-conducteurs.

Les travaux les plus importants dans ce domaine sont : Méthode de décomposition de l'irradiation d'analyse des cellules solaires [15] (the irradiance decay cell analysis method), zone de prédominance du courant de diffusion [16], modèle à deux diodes modifié [17] et le modèle à trois diodes modifié [18].

Bien que ces modèles soient utiles pour comprendre le comportement physique d'une cellule solaire, les informations sur les paramètres semi-conducteurs ne sont pas toujours disponibles sur les fiches techniques des cellules photovoltaïques commercialisées. De plus, dans la plupart de ces travaux, les valeurs suivantes ont été considérées pour les facteurs d'idéalité: $n_1 = 1$ et $n_2 = 2$. Cette supposition est largement utilisée mais n'est pas toujours vraie [19].

Aux vues de ces discussions, nous pouvons conclure que, bien que le modèle à deux diodes soit préférable en termes de précision, sa mise en œuvre demande plus de calcul comparé au modèle à une diode. De plus la modélisation utilisant l'approche semi-conductrice comme décrit dans [15-18], n'est pas adaptée à cause des informations insuffisantes sur les fiches techniques. La méthode proposée par Ishaque *et al.* [5] a le mérite de simplifier l'équation de courant: seulement quatre paramètres ont été calculés.

Le circuit électrique équivalent du modèle est représenté à la figure 2.

Le courant de sortie est donné par l'équation 5.

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(\exp \left(\frac{(V + R_s I)}{n_1 V_t} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{(V + R_s I)}{n_2 V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (5)$$

Où I_{01} et I_{02} sont les courants de saturation inverse de la diode D_1 et de la diode D_2 respectivement. n_1 et n_2 représentent les facteurs d'idéalité des diodes. Le terme contenant I_{02} dans l'équation (5) compense la perte par recombinaison dans la zone de charge d'espace comme décrit dans [8]. Pour la détermination des paramètres, nous nous basons sur le modèle proposé par Ishaque *et al.* [5] inspiré de celui de Villalva *et al.* [6].

Le photocourant est donné par l'équation (6). Une modification de l'équation (6) donne les courants de saturation inverse I_{01} et I_{02} qui sont pris égaux.

$$I_{01} = I_{02} = I_0 = \frac{I_{cc,n} + K_I \Delta T}{\exp \left(\frac{V_{co,n} + K_V \Delta T}{[(n_1 + n_2) / p] \times V_t} \right) - 1} \quad (6)$$

Les facteurs n_1 et n_2 représentent les composantes du courant de diffusion et de recombinaison respectivement. En accord avec la théorie de la diffusion de Shockley, n_1 doit être égale à l'unité [8, 20]. La valeur de n_2 peut varier. On obtient une meilleure compatibilité entre le modèle proposé et l'expérience si $n_2 \geq 1.2$.

Puisque $(n_1 + n_2)/p = 1$, il vient que ≥ 2 . Cette généralisation élimine l'ambiguïté dans le choix des valeurs de n_1 et n_2 . L'équation (7) peut être simplifiée en terme de p comme:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{(V + R_s I)}{V_t} \right) + \exp \left(\frac{(V + R_s I)}{(p-1) V_t} \right) - 2 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (7)$$

R_s et R_{sh} sont calculés simultanément de façon similaire à la procédure proposée par Villalva *et al.* [6]; la puissance maximale calculée par le modèle $I - V$ en utilisant l'équation (7), $P_{max,m}$ est égale à la puissance maximale expérimentale $P_{max,e}$ fournie par le fabricant sur le datasheet.

Ainsi $P_{max,m} = P_{max,e} = V_m \times I_m$ nous donne la relation (8) pour la résistance shunt:

$$R_{sh} = \frac{V_m + I_m R_s}{\left\{ I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{(V_m + R_s I_m)}{V_t} \right) + \exp \left(\frac{(V_m + R_s I_m)}{(p-1) V_t} \right) - 2 \right] \frac{P_{max,e}}{V_m} \right\}} \quad (8)$$

La résistance série est initialisée à zéro et la résistance shunt par l'équation (9). La méthode itérative de détermination de R_s et R_{sh} est représentée par l'organigramme de la figure 3 à condition de remplacer l'expression de R_{sh} par l'équation (8); la méthode de Newton Raphson sera appliquée à l'équation (9).

La variable p , quant à elle peut prendre n'importe quelle valeur supérieure à 2.2.

Malgré le nombre élevé de paramètres (7 paramètres), le modèle proposé par Kashif *et al.* nous permet seulement d'en calculer quatre puisque $I_{01} = I_{02} = I_0$; $n_1 = 1$ et la valeur de p peut être choisi arbitrairement, c'est-à-dire ≥ 2.2 . On montre également sur

la figure 2 les courbes $I-V$ et $P-V$ obtenues par la méthode d'ajustement qui permet d'avoir les paramètres à la sortie du programme.

Détermination des paramètres du modèle à deux diodes

La figure 3 montre l'organigramme simplifié du programme développé pour la détermination des paramètres. Le code script a été écrit sous le logiciel Matlab comme dans le cas du modèle à une diode.

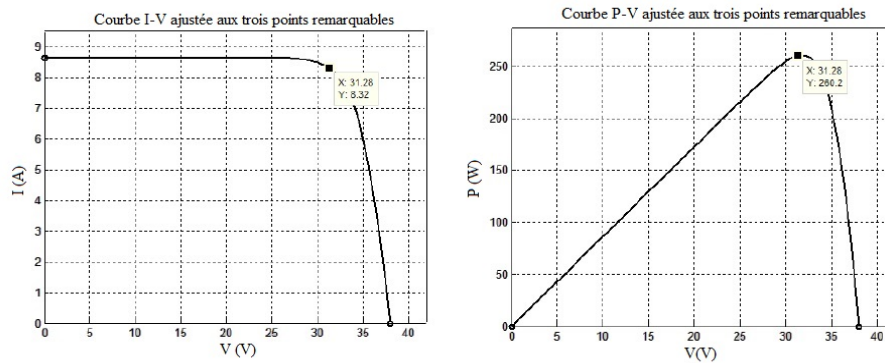


Fig. 6: Courbe $I-V$ et $P-V$ ajustée aux trois points remarquables
Cas du modèle à deux diodes

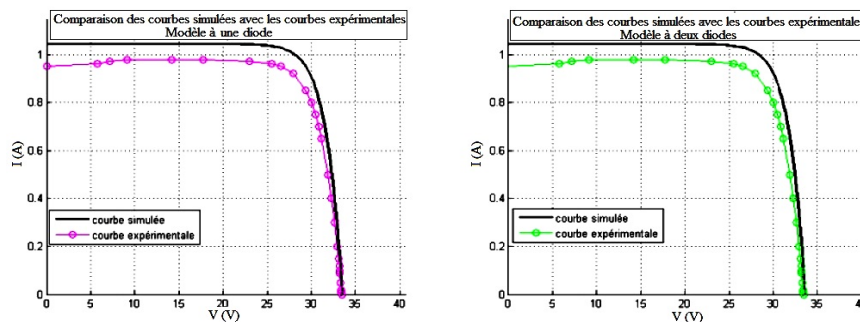
Les paramètres calculés sont consignés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3: Paramètres du module Ecoline LX-260P dans les conditions de référence
Cas du modèle à deux diodes

I_m	V_m	I_{cc}	V_{co}	$I_{01} = I_{02}$	I_{ph}	R_{sh}	R_s
8.32A	31.28V	8.66A	37.94V	$1.744 \cdot 10^{-10}$	8.66A	1217.3	0.201

3. RESULTATS DES MESURES ET COMPARAISON DES COURBES SIMULEES AVEC LES COURBES EXPERIMENTALES

Les figures suivantes présentent les courbes comparées des valeurs simulées et expérimentales pour différentes gammes de l'irradiation solaire. Ces comparaisons ont été effectuées pour les modèles à une et à deux diodes de la cellule photovoltaïque. L'irradiation solaire et la température aux voisinages du module n'étant pas constante, une moyenne de ces grandeurs sur la durée de l'expérience a été considérée dans le programme de validation des modèles.



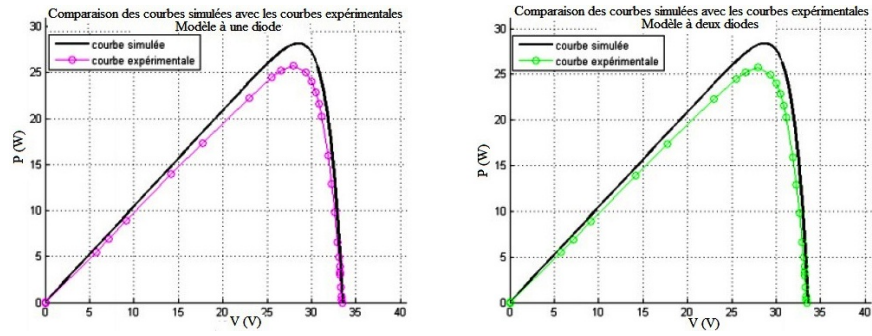


Fig. 7: Courbes théoriques et expérimentales $I(V)$ et $P(V)$ du module Ecoline LX-260P: $G=125 \text{ W/m}^2$, $T=29.51^\circ\text{C}$

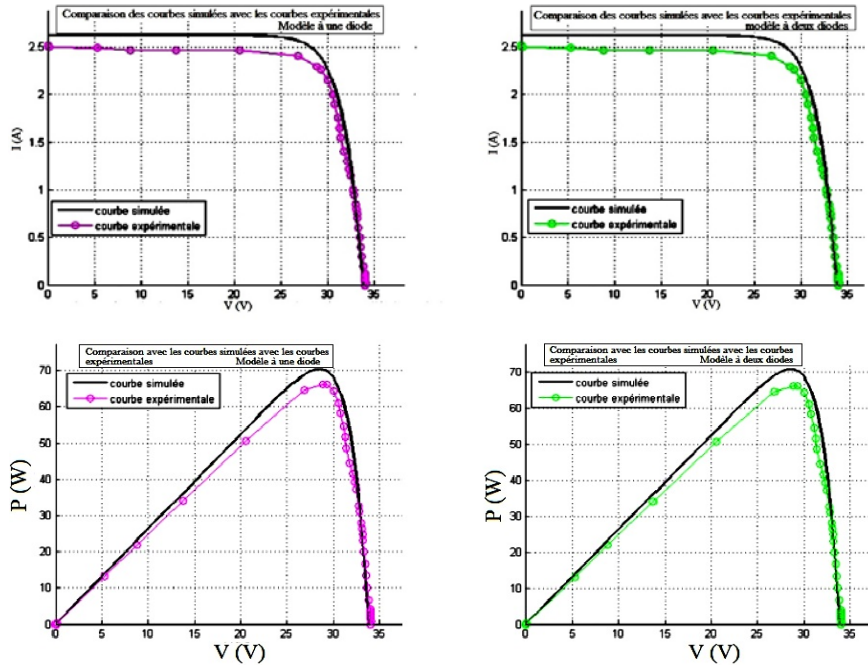
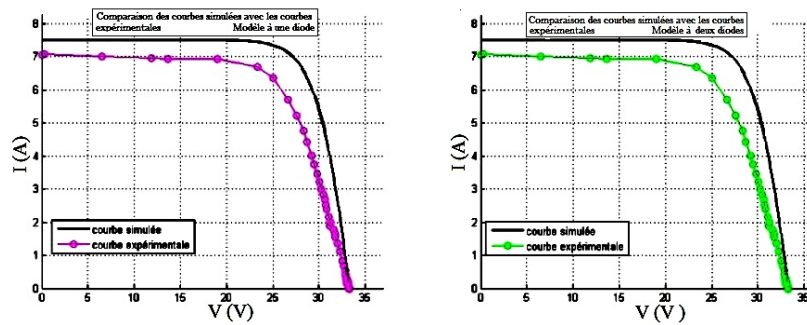


Fig. 8: Courbes théoriques et expérimentales $I(V)$ et $P(V)$ du module Ecoline LX-260P: $G=310 \text{ W/m}^2$, $T=33.3^\circ\text{C}$



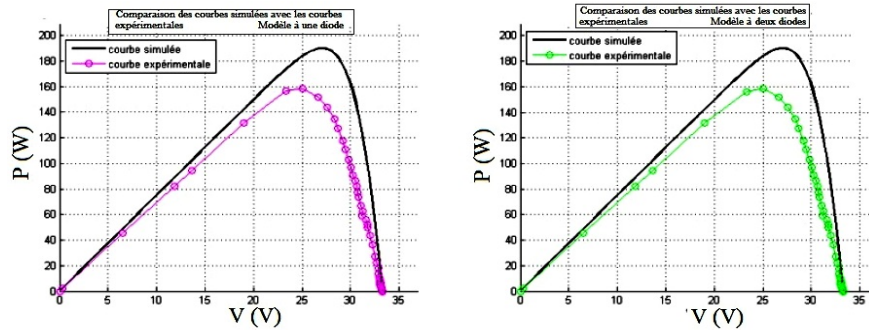


Fig. 9: Courbes théoriques et expérimentales $I(V)$ et $P(V)$
du module Ecoline LX-260P: $G = 850 \text{ W/m}^2$, $T = 34.6^\circ\text{C}$

De façon générale, un bon accord est observé entre les courbes expérimentales et les résultats de simulation (figures 7, 8 et 9).

Notons que pour de faibles irradiances solaires, la puissance produite par le module dans ces conditions est relativement faible. Pour un ensoleillement de 125 W/m^2 , la puissance est d'environ 25 W. De même pour un ensoleillement de 310 W/m^2 , cette puissance a augmenté et a atteint la valeur de 65 W. Pour ces deux valeurs de l'ensoleillement, la marge d'erreur est relativement faible. Lorsque l'ensoleillement a augmenté, la puissance produite par le module a atteint la valeur de 160 W dans le cas des deux modèles.

Cependant des écarts plus ou moins prononcés sont observés surtout pour une valeur élevée de l'ensoleillement. Ces écarts peuvent s'expliquer par:

- La variation du flux lumineux reçu par le module au cours d'une expérience. En effet le flux lumineux reçu par le module influence énormément le photo courant {Eq. (2)}. Ce problème peut être résolu au laboratoire en utilisant, soit une maquette de caractérisation des modules photovoltaïques comme décrit dans les travaux de Gelis *et al.* [21], soit un simulateur solaire qui permet de fixer l'éclairement par unité de surface reçu par le module photovoltaïque.

- Une mauvaise estimation de la température de fonctionnement des cellules à l'aide de la température ambiante {Eq. (2)}. Le phénomène de convection de l'air ambiant, l'inertie thermique du capteur de température utilisé, peuvent entraîner un retard entre la température ambiante utilisée pour prévoir la température de fonctionnement des cellules et la température réelle.

Des maquettes de caractérisation disposent d'une sonde de température permettant de mesurer directement la température des cellules et donc d'éviter ce problème [21].

- L'augmentation de la température aussi a influencé la marge d'erreur pour l'ensoleillement $G = 850 \text{ W/mm}^2$, car plus la température augmente plus les performances du module se dégradent. Aussi plus l'ensoleillement augmente ($G = 850 \text{ W/mm}^2$, $T = 34.6^\circ\text{C}$), plus la puissance produite est grande et la marge d'erreur devient significative.

- Le rendement du module dans les conditions réelles: souvent le rendement du module dans les conditions réelles d'utilisation ne correspond pas à ceux fournis par le fabricant.

■ Pour toutes les gammes d'irradiations, les figures ci-dessus présentées montrent qu'il n'y a pas de différence en termes de précision entre le modèle à une diode et le modèle à deux diodes.

Ceci permet de conclure que, le modèle à une diode suffit pour décrire le comportement du module Ecoline LX-260P. Ce résultat est en accord avec la littérature [22].

Le modèle à une diode est l'approche la plus simple pour construire un modèle de cellule solaire parce qu'il peut décrire suffisamment les caractéristiques de la plupart des cellules photovoltaïques.

Il peut donc être appliqué dans la majorité des modèles, particulièrement dans le cas des rapides variations des conditions climatiques.

Cependant pour des applications dans les conditions météorologiques réelles, le modèle à deux diodes est préférable parce qu'il tient compte de tous phénomènes physiques au niveau de la cellule photovoltaïque et est de ce fait plus précis par rapport au modèle à une diode [22].

4. CONCLUSION

Les performances d'un générateur photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module.

Dans cet article, le modèle à deux diodes est utilisé pour simuler le fonctionnement du module photovoltaïque pour différentes conditions d'ensoleillement et de température. Nous avons confronté nos résultats de simulation à des données provenant de trois jours de mesures sur le module Ecoline LX-260P du générateur photovoltaïque installé au dispensaire de Sévagan.

Un bon accord entre les données expérimentales mesurées et les données simulées a été observé pour ces trois journées. Ce constat témoigne de la qualité du modèle proposé.

Remerciements- Nous présentons toutes nos reconnaissances à la Coopération Allemande pour le don et l'installation d'un générateur photovoltaïque à partir du module Ecoline LX-260P et ceci en association avec le Laboratoire sur l'Energie Solaire de l'Université de Lomé.

REFERENCES

- [1] Tanvir Ahmad, Sharmin Sobhan and Md Faysal Nayan, '*Comparative Analysis Between Single Diode and Double Diode Model of PV Cell: Concentrate Different Parameters Effect On its Efficiency*', Journal of Power and Energy Engineering, Vol. 4, N°3, pp. 31 - 46, 2016.
- [2] Shengyi Liu and Roger A. Dougal, '*Dynamic Multiphysics Model for Solar Array*', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, N°2, pp. 285 – 294, 2002.
- [3] D. Sera, R. Teodorescu and P. Rodriguez, '*PV Panel Model Based On Data Sheet Values*', In IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 2392 - 2396, 2007.

- [4] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud et I. Youm', *Etude et Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque*, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°3, pp. 473 - 483, 2008.
- [5] K. Ishaque, Z. Salam and H. Taheri, 'Simple, Fast and Accurate Two-Diode Model for Photovoltaic Modules', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 95, N°2, pp. 586 - 594, 2011.
- [6] M.G. Villalva, J.R. Gazoli and E.R. Filho, 'Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, N°5, pp. 1198 - 1208, 2009.
- [7] T. Desrues, 'Développement de Cellules Photovoltaïques à Hétérojonctions Silicium et Contacts en Face Arrière', Thèse de Doctorat, Lyon, 2009.
- [8] C-T Sah, R.N. Noyce and W. Shockley, 'Carrier Generation and Recombination in Pn Junctions and Pn Junction Characteristics', Proceedings of the IRE, Vol. 45, N°9, pp. 1228 - 1243, 1957.
- [9] T.F. El-Shatter, M.E. Elhaggee, Aboi Eldahab and A.A. Elkousry, 'Fuzzy Modelling and Simulation of Photovoltaic System', In Proceedings of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 1999.
- [10] F. Almonacid, C. Rus, L. Hontoria and F.J. Muñoz, 'Characterisation of PV CIS module by Artificial Neural Networks. A Comparative Study With Other Methods', Renewable Energy, Vol. 35, N°5, pp. 973 - 980, 2010.
- [11] J.A. Gow and C.D. Manning, 'Development of a Model for Photovoltaic Arrays Suitable for Use in Simulation Studies of Solar Energy Conversion Systems', In Power Electronics and Variable Speed Drives, 1996. Sixth International Conference on (Conf. Publ. N°429), pp. 69 - 74, IET, 1996.
- [12] J.A. Gow and C.D. Manning, 'Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies', IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 146, N°2, pp. 193 -200, 1999.
- [13] S. Chowdhury, G.A. Taylor, S.P. Chowdhury, A.K. Saha and Y.H. Song, 'Modelling, Simulation and Performance Analysis of a PV Array in an Embedded Environment', In Universities Power Engineering Conference, 42nd International, pp. 781 - 785, IEEE, 2007.
- [14] A. Hovinen, 'Fitting of the Solar Cell I-V Curve to the Two Diode Model', Physica Scripta, (T54), 175, 1994.
- [15] J. Hyvarinen and J. Karila, 'New Analysis Method for Crystalline Silicon Cells', In Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on, Vol. 2, pp. 1521 - 1524, IEEE, 2003.
- [16] K. Kurobe and H. Matsunami, 'New Two-Diode Model for Detailed Analysis of Multicrystalline Silicon Solar Cells', Japanese journal of Applied Physics, Vol. 44, Part 1, N°12R, pp. 8314, 2005.
- [17] K. Nishioka, N. Sakitani, K. Kurobe, Y. Yamamoto, Y. Ishikawa, Y. Uraoka and T. Fuyuki, 'Analysis of the Temperature Characteristics in Polycrystalline Si Solar Cells Using Modified Equivalent Circuit Model', Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 42, N°12R, pp. 71 - 75, 2003.

- [18] K. Nishioka, N. Sakitani, Y. Uraoka and T. Fuyuki, '*Analysis of Multi Crystalline Silicon Solar Cells By Modified 3-Diode Equivalent Circuit Model Taking Leakage Current Through Periphery into Consideration*', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 91, N°13, pp. 1222 - 1227, 2007.
- [19] K.R. McIntosh, P.P. Altermatt and G. Heiser, '*Depletion-Region Recombination in Silicon Solar Cells: When Does $M_{dr}=2$* ', In: Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 251 - 254, 2000.
- [20] Chih-Tang Sah, '*Fundamentals of Solid-State Electronics*', World Scientific, 1991.
- [21] B. Gélis, V. Creuze, C. Glaize, F. Lecat et V. Thomas, '*Travaux Pratiques de Caractérisation de Panneaux Photovoltaïques*', In CETSIS: 10^{ième} Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, pages 001 - 006, 2013.
- [22] A.M. Humada, M. Hojabri, S. Mekhilef and H.M. Hamada, '*Solar Cell Parameters Extraction Based on Single and Double-Diode Models: A Review*', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 56, pp. 494 – 509, 2016.