

## Modélisation, optimisation des paramètres et prédiction de la production du module PV BYD255P6C-30 pour la Centrale Photovoltaïque de 33 MWc de Ségou

Ambadjigna Hervé SOMBORO<sup>1\*</sup>, Ousmane SOUMAORO<sup>1</sup> et Maliki GUINDO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ecole Nationale d'Ingénieurs Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT), Département de Génie Mécanique et Energie, Laboratoire d'Energie Solaire, 410, Av Vollenhoven, BP 242 Bamako, Mali

<sup>2</sup> Ecole Nationale d'Ingénieurs Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT), Département de Génie Electrique, Laboratoire d'Electrotechnique, d'Electronique et d'Automatique, 410, Av Vollenhoven, BP 242 Bamako, Mali

(Reçu le 20 Septembre 2021 ; Accepté le 13 Décembre 2021)

\* Correspondance, courriel : [somboro1@gmail.com](mailto:somboro1@gmail.com)

### Résumé

La production d'énergie propre et verte comme le photovoltaïque est une bonne alternative pour juguler le besoin en énergie électrique de source fossile de tout pays. La modélisation, la simulation et l'analyse du générateur solaire photovoltaïque (PV) sont des étapes cruciales avant la réalisation du système PV, qui aident à comprendre le comportement et les caractéristiques du module dans les conditions climatiques réelles du site. Cet article optimise les paramètres du module PV BYD255P6C-30 (Si-poly) pour la centrale photovoltaïque de 33 MWc de Ségou. L'objectif de l'optimisation est de permettre une prédiction de sa réelle puissance injectée sur le réseau interconnecté du Mali. L'approche méthodologique porte sur un algorithme mettant en œuvre un modèle à une diode du module PV et basé sur la méthode itérative de Newton Raphson qui est utilisée pour optimiser les valeurs des résistances série ( $R_S$ ) et parallèle ( $R_P$ ), le photo-courant ( $I_{pv}$ ) et le courant de saturation de la diode ( $I_0$ ). Les valeurs de  $R_S$ ,  $R_P$ ,  $I_{pv}$  et  $I_0$  obtenues pour le module BYD255P6C-30, à partir des données du site de Ségou sont respectivement  $0.25\ \Omega$ ,  $360.45\ \Omega$ ,  $8.9\ \text{A}$  et  $1.446\text{e-}07\ \text{A}$ . La puissance maximale du module calculée à partir des paramètres optimisés est de  $251.1\ \text{W}$ , proche des  $255\ \text{W}$  fournis par le constructeur, c'est-à-dire à  $1.53\ \%$  près. De plus les courbes P(V) et I(V) simulées à partir des valeurs des paramètres optimisés montrent une parfaite adéquation avec celles du constructeur. Notre démarche à travers l'algorithme peut être appliquée à n'importe quel module PV pour aider à un meilleur choix suivant la zone d'intervention.

**Mots-clés :** module PV, modèle à une diode, optimisation, paramètres, prédiction.

### Abstract

**Modeling, Parameter Optimization and Production Prediction of the BYD255P6C-30 PV Module for the 33 MWp Photovoltaic Power Plant in Segou**

The production of safe and green energy such as photovoltaics is a good alternative to reduce the need for fossil-based electrical energy in any country. The modeling, simulation and analysis of the solar photovoltaic (PV) generator are crucial steps before the realization of the PV system. This permits to understand the

behavior and characteristics of the module under actual climatic conditions of the site. It is in that context that this paper optimizes the parameters of the BYD255P6C-30 (Si-poly) PV module for the 33 MWp photovoltaic plant in Ségou. The optimization target is to better predict its power injected into interconnected grid of Mali. An algorithm implemented to a single-diode model of the PV module and based on Newton Raphson's iterative method is used to optimize the values of series ( $R_S$ ) and parallel ( $R_P$ ) resistors, photo-current ( $I_{pv}$ ) and current saturation of the diode ( $I_0$ ). The values of  $R_S$ ,  $R_P$ ,  $I_{pv}$  and  $I_0$  obtained for the BYD255P6C-30 module, from data for Ségou site are respectively  $0.25 \Omega$ ,  $360.45 \Omega$ ,  $8.9 \text{ A}$  and  $1.446e-07 \text{ A}$ . The maximum power of the module calculated from the optimized parameters is  $251.1 \text{ W}$ , close to the  $255 \text{ W}$  supplied by the manufacturer, that is to say within  $1.53\%$ . In addition, the P (V) and I (V) curves simulated from the values of the optimized parameters show a perfect match with those of the manufacturer. Our approach through the algorithm may be applied on any modules to help make a better choice according to the area of intervention.

**Keywords :** *PV module, single-diode model, optimization, parameters, prediction.*

## 1. Introduction

Depuis la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, dans les pays développés comme dans les pays émergents, les sujets sur la préservation de l'environnement et la question de réserve des énergies fossiles défraient la chronique [1 - 3]. Le constat est le même sur la question du changement climatique [4 - 6]. Vu l'industrialisation des pays, couplée à la croissance de la population mondiale, les énergies renouvelables tiennent une bonne place pour lutter contre les effets néfastes des énergies fossiles [7, 8]. La puissance installée dans le monde en matière d'énergie solaire est estimée à  $402 \text{ GW}$  entre 2007 et 2017 [9]. Les pays sahélo sahariens pourraient devenir de grand producteur d'énergie solaire car ils bénéficient de 7 à 10 heures d'ensoleillement par jour toute l'année avec une irradiation moyenne de  $5 \text{ à } 7 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{J}$  contre une moyenne mondiale estimée à  $4\text{-}5 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{J}$  [10]. Au Mali, malgré le faible taux d'électrification ( $17\%$  environ) [10, 11], la Société Energie du Mali (EDM-sa) à notre passage en septembre 2019 avait 26 projets de centrales solaires (raccordées au réseau) en étude avec une puissance installée estimée à  $2,02 \text{ GW}$ . Il n'en demeure pas moins qu'une seule centrale PV de  $50 \text{ Mwc}$  a été réalisée en 2020 à Kita. La production solaire PV est liée en plus des conditions climatiques à la nature des cellules solaires. Ces cellules sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière du soleil en électricité [12], et cela grâce à des matériaux semi-conducteurs [13]. Le matériau constitutif est dans la plupart des cas le silicium ( $70 \text{ à } 80\%$ ) [14, 15]. En fonction des procédés de fabrication, on obtient des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, polycristalline, ou monocristalline [16]. Les avantages liés à l'utilisation de l'énergie solaire à travers les systèmes photovoltaïques résident dans la rapidité de mise en œuvre d'un nouveau système, d'une longue durée de vie, et de leur nature statique et non polluante. La tendance mondiale actuelle vers l'installation de grandes centrales PV indique qu'une bonne prédiction de la production photovoltaïque aide à une meilleure planification de la demande et réduit les incertitudes du dispatching de la production. Ceci permettra à l'opérateur de maintenir la stabilité de son réseau. Cependant la prédiction de la production photovoltaïque est un challenge, à cause de sa nature aléatoire et intermittente [17, 18]. En effet, la production photovoltaïque est influencée par les paramètres tels que le photo-courant ( $I_{pv}$ ), le courant de saturation de la diode ( $I_0$ ), la résistance série ( $R_S$ ), la résistance shunt ( $R_P$ ), et le facteur d'idéalité ( $a$ ). La connaissance de ces paramètres, qui ne sont généralement pas fournis par le constructeur [19], est donc cruciale pour l'analyse des performances d'un système PV. Plusieurs recherches se sont intéressées à la question. BOUKEZATA B. (2014) [5] et AI-YASIR (2019) [8], ont respectivement travaillé sur les modules BP SX 150S PV et

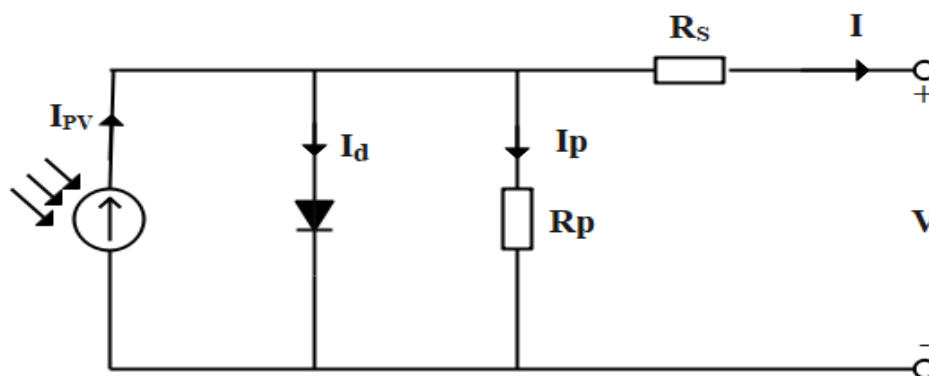
PV MSX 60W dans le but de simuler la poursuite du point de puissance maximale appelée en anglais Maximum Power Point Tracking (MPPT) à partir des paramètres optimisés. MERAHI-R (2010) [16], TAMRAKAR (2015) V. [20], M. THIAM (2016) [21] et VINOD (2018) [22] pour ne citer que ceux-ci, à leur tour se sont respectivement intéressés aux modules PW500 de PHOTOWATT, JAP6-72-320/4BB, BP MSX-120W et VPMS1-245 dans le but d'analyser le fonctionnement de ces modules sous différentes conditions climatiques avec les paramètres calculés au préalable. Le présent article optimise les valeurs des paramètres pour le module PV BYD255P6C-30 en vue d'une prédiction de sa production sur site.

## 2. Méthodologie

Pour l'atteinte de nos objectifs, nous modélisons la cellule PV à travers des formules mathématiques connues puis exécutons un algorithme à travers un programme que nous avons écrit sous Matlab en tenant compte des conditions climatiques du site. Dans ce programme la méthode itérative de Newton Raphson est utilisée pour optimiser les valeurs des résistances série ( $R_s$ ) et parallèle ( $R_p$ ), le photo-courant ( $I_{pv}$ ) et le courant de saturation de la diode ( $I_0$ ) du module BYD255P6C-30.

### 2-1. Modélisation d'un module PV

La modélisation et la simulation d'un système PV sont importantes pour comprendre ses caractéristiques de sortie, l'évaluation de ses performances et l'analyse de son comportement dans des conditions de températures et d'irradiation variables. Les cellules et modules photovoltaïques sont généralement représentés par des modèles à une, deux ou trois diodes, caractérisés par trois à huit paramètres [23]. Dans cet article, les cellules du module BYD255P6C-30 (Si-poly) sont représentées par un modèle à une diode dont le circuit est donné sur la **Figure 1** et qui offre un bon compromis entre simplicité et précision [24].



**Figure 1** : *Modèle à une diode d'une cellule photovoltaïque*

L'application de la loi des nœuds de Kirchhoff à la **Figure 1** permet d'écrire l'expression suivante du courant  $I$  débité par la cellule suivant **l'Equation (1)**[25] :

$$I = I_{pv} - I_d - I_p \tag{1}$$

$I$  étant le courant débité par la cellule,  $I_{pv}$  le photo-courant,  $I_d$  le courant traversant la diode et  $I_p$  le courant traversant la résistance shunt, tous en Ampère.

L'expression de  $I_d$  est donnée par l'**Equation (2)**[25] :

$$I_d = I_0 \left[ e^{\left( \frac{V + IR_S}{aV_t} \right)} - 1 \right] \quad (2)$$

$I_0$  étant le courant de saturation de la diode,  $a$  le facteur d'idéalité,  $R_S$  la résistance série en Ohm,  $V$  la tension en volts aux bornes de la diode et  $V_t$  la tension thermique représentée par l'**Equation (3)** [25] ci-dessous :

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad (3)$$

$K$  étant la constante de Boltzmann ayant pour valeur  $1,3806503e-23$  [J/K],  $q$  la charge de l'électron avec pour valeur  $1,60217646e-19$  Coulomb et  $T$  la température en Kelvin de la cellule.

L'expression de  $I_p$  est donnée par l'**Equation (4)**[25] :

$$I_p = \frac{(V + IR_S)}{R_p} \quad (4)$$

$R_p$  représente la résistance shunt en Ohm.

Le remplacement des **Equations (2)** et **(4)** dans **(1)**, conduit à une expression mathématique non linéaire qui permet le tracer de la courbe du courant en fonction de la tension (I-V) de la cellule. Cette expression est donnée suivant l'**Equation (5)**[26] ci-dessous :

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V + IR_S}{aV_t} \right)} - 1 \right] - \frac{(V + IR_S)}{R_p} \quad (5)$$

L'**Equation (5)** de la cellule PV ne permet pas le tracer de la caractéristique I-V d'un module. En effet un module est une association en série de  $N_s$  cellules PV et peut être modélisé par l'**Equation (6)**[24] suivante :

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V + IR_S}{aN_s V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{(V + IR_S)}{R_p} \quad (6)$$

Par ailleurs le photo-courant  $I_{pv}$  dépend linéairement de l'irradiation solaire et est également influencé par la température selon l'**Equation (7)**[25, 26] suivante :

$$I_{pv} = (I_{pv,n} - K_i \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (7)$$

$I_{pv,n}$  représente le photo-courant en ampère, généré dans les conditions standards de tests ou standard test conditions en abrégé STC (Température 25°C, Eclairement 1000W/m<sup>2</sup>, AM 1.5),  $K_i$  représente le coefficient de température du courant de court-circuit,  $\Delta T = T - T_n$  avec  $T$  et  $T_n$  représentant respectivement la température réelle de la cellule et la température nominale (STC),  $G$  et  $G_n$  représentent respectivement l'éclairement réel du site et l'éclairement standard en W/m<sup>2</sup>.

La dépendance du courant de saturation de la diode  $I_0$  à la température peut être exprimée comme indiqué dans l'Equation (8) [16, 27] :

$$I_0 = I_{0,n} \left( \frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{aK} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \tag{8}$$

$E_g$  est l'énergie de bande interdite qui correspond à 1,12 eV (électronvolt) pour le silicium (Si) à 25°C et  $I_{0,n}$  le courant de saturation à 25°C déterminé par l'Equation (9) [27] :

$$I_{0,n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp \left( \frac{V_{oc,n}}{aV_{t,n}} \right) - 1} \tag{9}$$

$I_{sc,n}$  représente le courant nominal en court-circuit,  $V_{oc,n}$  la tension nominale en circuit ouvert et  $V_{t,n}$  la tension thermique nominale.

Le facteur d'idéalité  $a$  des Equations (2), (5), (6) et (8) peut être pris entre 1 et 1,5 [28] ou choisi en fonction de la technologie PV comme indiqué dans le Tableau 1 [27].

**Tableau 1 : Valeur de  $a$  en fonction de la technologie utilisée par le constructeur PV**

Technologie	Si-mono	Si-poly	a-Si : H	a-Si : H tandem	a-Si : H triple	CdTe	CIS	AsGa
$a$	1,2	1,3	1,8	3,3	5	1,5	1,5	1,3

Beaucoup d'auteurs ont du mal à s'accorder sur les moyens d'estimation de la valeur exacte de cette constante  $a$ , surtout s'il s'agit d'une cellule modélisée par plusieurs diodes [23, 28]. Dans le but d'améliorer la courbe P-V (Puissance-Tension) du modèle à une diode, l'Equation (8) est remplacée par l'Equation (10) [26, 28] ci-dessous :

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_i \Delta T}{\exp \left( \frac{V_{oc,n} + K_v \Delta T}{aV_t} \right) - 1} \tag{10}$$

$K_v$  représente le coefficient de température de la tension en circuit ouvert.

La puissance maximale  $P_{max,e}$  produite par le module PV est alors donnée par l'Equation (11) [26] ci-dessous :

$$P_{\max,e} = V_{mp} \left\{ I_{pv} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V_{mp} + I_{mp} R_S}{a N_S V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{(V_{mp} + I_{mp} R_S)}{R_p} \right\} \quad (11)$$

Où  $V_{mp}$  et  $I_{mp}$  sont les valeurs optimales de la tension et du courant dans les conditions standards de tests (STC).

## 2-2. Algorithme d'optimisation des paramètres du module PV

Les paramètres régissant les performances d'un module PV sont entre autres le photo-courant ( $I_{pv}$ ), le courant de saturation inverse de la diode ( $I_0$ ), la résistance série ( $R_S$ ), la résistance shunt ( $R_p$ ), et le facteur d'idéalité ( $a$ ). Dans l'**Equation** transcendante (5), une fois les paramètres  $I_{pv}$ ,  $I_0$  et  $a$  connus, il ne reste comme inconnus que  $R_S$  et  $R_p$ . Plusieurs méthodes d'estimation de ces deux paramètres sont proposées dans la littérature. Celle utilisée dans le présent article est basée sur l'optimisation de la puissance produite par le module, en établissant l'équilibre entre les puissances expérimentale  $P_{\max,C}$  fournie par le constructeur et estimée  $P_{\max,e}$ . En faisant  $P_{\max,C} = P_{\max,e}$ , nous obtenons la **Relation (12)** [26, 28, 29] entre  $R_S$  et  $R_p$ :

$$R_p = \frac{V_{mp} + I_{mp} R_S}{\left\{ I_{pv} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V_{mp} + I_{mp} R_S}{a N_S V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{P_{\max,c}}{V_{mp}} \right\}} \quad (12)$$

L'algorithme de la méthode d'optimisation décrite ci-dessus et qui utilise la méthode itérative de Newton Raphson pour le calcul du courant  $I$  de l'**Equation (6)**, est donné sur la **Figure 2**. L'algorithme utilise pour valeurs initiales  $R_S = 0$  et  $R_p$  de l'**Equation (13)** [26, 28]:

$$R_p = \frac{V_{mp}}{I_{sc,n} - I_{mp}} - \frac{V_{oc,n} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (13)$$

Le  $R_p$  de l'**Equation (13)** est le coefficient directeur de la droite passant par les points de court-circuit et de puissance maximale.

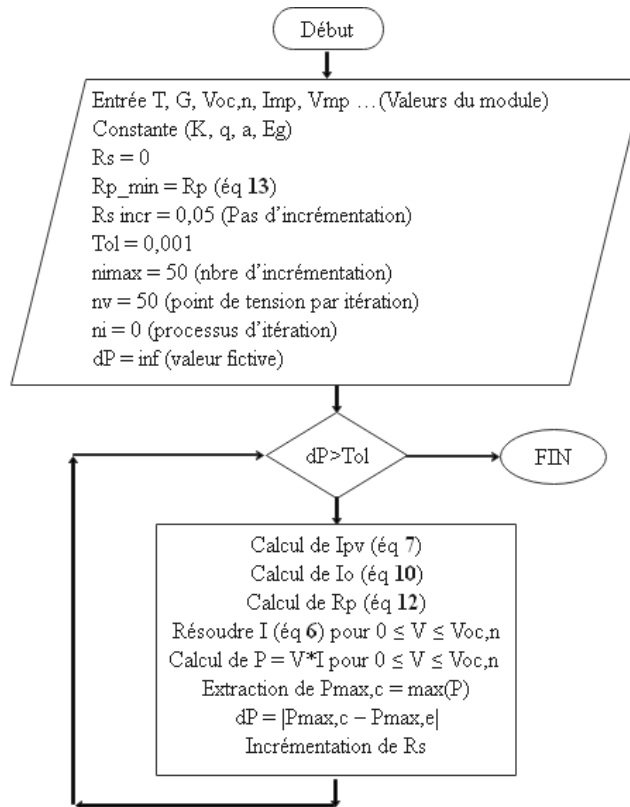


Figure 2 : Algorithme d'optimisation des paramètres

2-3. Données géographiques de Ségou

Les données constructeur et le rayonnement solaire sur le site de Ségou (extrait de la base de données du logiciel de dimensionnement solaire RETScreen) utilisés dans l'optimisation des paramètres du module solaire BYD255P6C-30 sont donnés respectivement dans le **Tableau 2** et à la **Figure 3**. En terme de température sur le site, selon le centre météorologique du Mali, la température la plus élevée enregistrée ces 10 dernières années à Ségou est de 45,3°C (mai 2011). Les coordonnées géographiques utilisées sont les suivantes :

- Latitude : 12°24' Nord
- Longitude : 6°13' Ouest

Tableau 2 : Caractéristiques du Module **BYD255P6C-30** à 25°C sous 1000 W/m<sup>2</sup>

Puissance maximale $P_{max,C}$	255W
Tension à $P_{max,C}$ $V_{mp}$	30.40V
Courant à $P_{max,C}$ $I_{mp}$	8,39A
Tension à circuit ouvert $V_{oc,n}$	38,07V
Courant de court-circuit $I_{sc,n}$	8,89A
Coefficient de température du courant de court-circuit $K_i$	0,046 %/°C
Coefficient de température de tension en circuit ouvert $K_V$	-0,31 %/°C
Température nominale de fonctionnement de la cellule	43°C +/- 2°C
Nombre de cellules en série $N_S$	60
Tolérance de la puissance	0-5W



Figure 3 : Rayonnement solaire journalier pour le site de Ségou

### 3. Résultats et discussion

L'algorithme de la **Figure 2** a été programmé dans l'environnement Matlab et les résultats d'optimisation des 4 paramètres du module sont donnés dans la **Figure 4** et le **Tableau 3**.

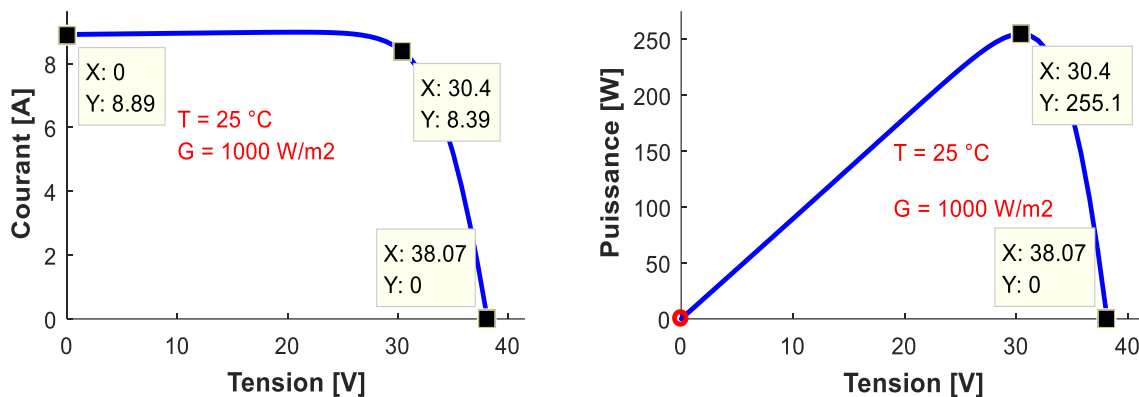


Figure 4 : Courbes I-V et P-V pour la détermination des paramètres du module BYD255P6C-30

Tableau 3 : Valeurs d'optimisation des quatre (4) paramètres du module BYD255P6C-30

$I_{pv}$ (A)	$a$	$I_0$ (A)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	$P_{max,C}$ (W)	$P_{max,e}$ (W)	$\Delta P$ (W)
8.903	1.3	1.446e-07	0.25	360.4497	255	255.05	0.05

L'analyse du **Tableau 3** permet d'observer l'exactitude des paramètres optimisés. En effet l'algorithme de calcul de ces paramètres a convergé avec une puissance calculée (estimée)  $P_{max,e}$  de 255,05 W, contre une puissance fournie par le constructeur  $P_{max,C}$  de 255W dans les conditions standards de tests. Soit une erreur absolue  $\Delta P$  à 0,05 près.

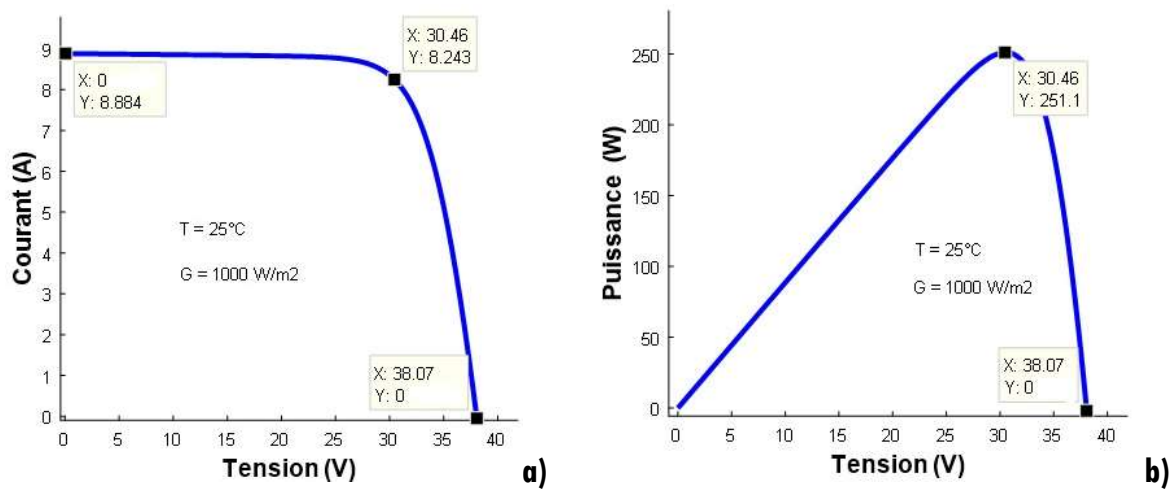


Dans la suite, avec les paramètres optimisés, nous simulons les caractéristiques du module dans des conditions de température et d'éclairement variables et comparons les valeurs et courbes obtenues avec celles du constructeur. Ces résultats sont donnés dans le **Tableau 4** et les **Figures 5, 6, 7** et **8**. La puissance nominale du PV, fournie par le constructeur est de  $255 \pm 5$  Wc, donc avec une tolérance de 2 %, ce qui démontre l'acceptabilité de l'erreur relative la plus élevée de 1,53 % obtenue par simulation.

**Tableau 4** : Comparaison des valeurs du constructeur avec celles simulées dans les conditions standards de tests

Grandeurs	Constructeur	Simulées	Erreur relative
$I_{sc}$ (A)	8,89	8,884	0,07 % inférieure à la tolérance
$I_{mp}$ (A)	8,39	8,243	1,8 % inférieure à la tolérance
$V_{mp}$ (V)	30,4	30,46	0,197 % inférieure à la tolérance
$V_{oc}$ (V)	38,07	38,07	0 % inférieure à la tolérance
$P_{max}$ (W)	255	251,1	1,53 % inférieure à la tolérance

La **Figure 5a** présente la courbe du courant en fonction de la tension I(V) du module choisi (**Figure 1**) pour la simulation. Elle présente son caractère non linéaire conformément à la littérature sur les cellules PV [25]. La courbe de la **Figure 5b** représente la variation de la puissance de sortie du module en fonction de la tension.



**Figure 5** : Courbe I-V du module BYD255P6C-30 (a) et (b) celle de P-V dans les STC

Les **Figures 6** et **7** représentent respectivement la courbe I(V) fournie par le constructeur et celle tracée par simulation avec Matlab en utilisant les paramètres optimisés du **Tableau 3**, dans les mêmes conditions d'ensoleillement et de température. Dans les deux cas, la cellule est soumise à cinq (5) rayonnements différents. Nous observons que le courant produit par la cellule est quasi identique dans trois cas sur les cinq ( $200$  à  $600$  W/m<sup>2</sup>). Dans les deux autres cas, les valeurs sont très proches. En termes de tension, les valeurs sont presque les mêmes. Un accord acceptable s'observe entre les courbes expérimentales données par le constructeur et les résultats de simulation.

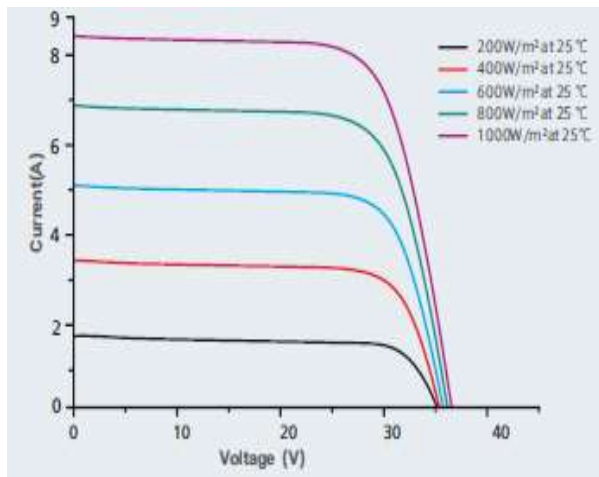


Figure 6 : Courbes I-V du constructeur [30]

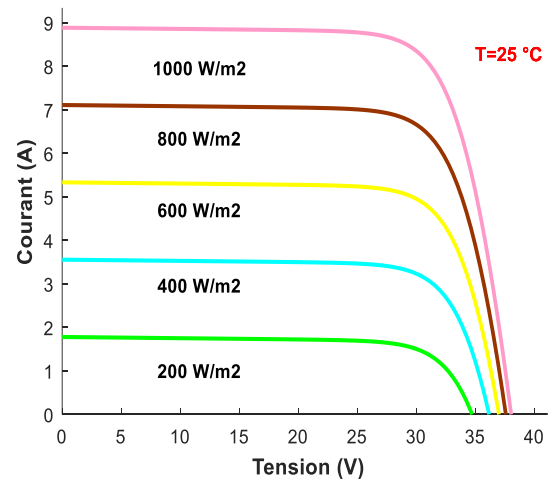


Figure 7: Courbes I-V par simulation

La **Figure 8** présente l'influence de l'ensoleillement sur la production électrique pour une température fixe. La puissance délivrée par le module de 255 Wc tourne autour de 150 W lorsque l'éclairement du site avoisine les 600 W/m<sup>2</sup>. Soit une chute de production de 41 % pour une chute d'éclairement de 40 %. Elle peut descendre jusqu'à 50 W lorsqu'il avoisine les 200 W/m<sup>2</sup>. Soit une chute de production de 80 % pour une chute d'éclairement de 80%. Or l'ensoleillement est fonction de la saison et des moments de la journée et aura un impact sur la production électrique de la centrale. Nous observons que la puissance produite va au même rythme que l'irradiation reçue par le module. Par contre la tension en circuit-ouvert augmente légèrement de moins de 4 V quand l'éclairement passe de 200 à 1000 W/m<sup>2</sup>. Les études menées sur d'autres modules sont arrivées à la même conclusion [27, 31, 32]. La littérature retient que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [33].

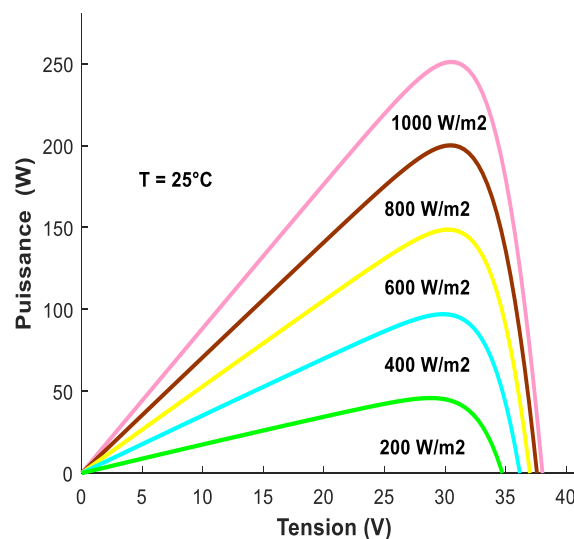
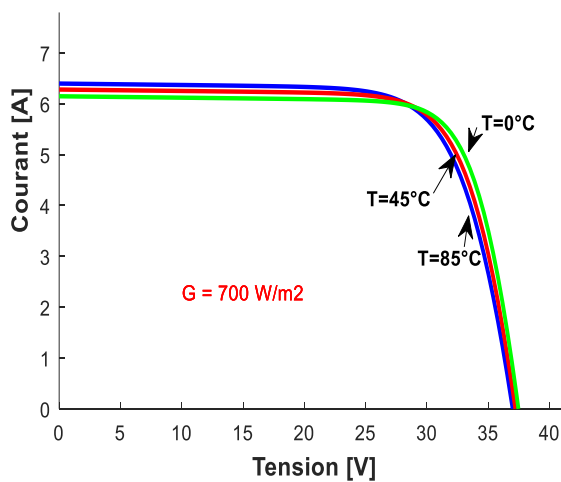


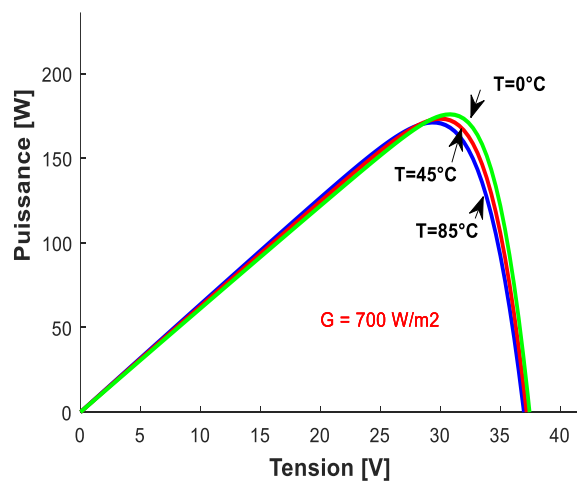
Figure 8 : Courbe P-V pour différents ensoleillements

Les **Figures 9** et **10** montrent l'effet de la variation de la température sur les caractéristiques du module BYD255P6C-30 pour un éclairement donné (700 W/m<sup>2</sup>). Selon la littérature, pour un rayonnement solaire donné, lorsque la température augmente, la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  diminue légèrement (axes des abscisses), tandis que le courant de court-circuit augmente (axes des ordonnées) [27, 31, 32]. Ce comportement est observé et présenté dans les **Figures 9** et **10** ci-dessous. Il est à noter que le module BYD255P6C-30 qui

est l'objet de notre étude est moins sensible à la variation de la température que les modules PW500 de PHOTOWATT, JAP6-72-320/4BB, BP MSX-120W et VPMS1-245 cités dans l'introduction. PW500 de PHOTOWATT fait déplacer son MPP (Maximum Power Point) ou Point de Puissance maximale de 60 à 52 W ( $\Delta P = 8W$ ) lorsque la température monte de 30 à 70°C ( $\Delta T = 40^\circ C$ ); JAP6-72-320/4BB fait déplacer son MPP de 350 à 200W ( $\Delta P = 150W$ ) lorsque la température monte de 10 à 70°C ( $\Delta T = 60^\circ C$ ); BP MSX-120W fait déplacer son MPP de 120 à 80.5 W ( $\Delta P = 39,5W$ ) lorsque la température monte de 25 à 100°C ( $\Delta T = 75^\circ C$ ) et VPMS1-245 fait déplacer son MPP de 250 à 240 W ( $\Delta P = 10W$ ) lorsque la température monte de 25 à 45°C ( $\Delta T = 20^\circ C$ ). Par contre BYD255P6C-30 fait déplacer son MPP de 175.9 à 171.1 ( $\Delta P = 4,8W$ ) lorsque la température monte de 0 à 85°C ( $\Delta T = 85^\circ C$ ). Cela prouve à suffisance que notre module est bien adapté au climat chaud et sec du Mali où la température peut dépasser les 45°C à l'ombre (et donc la cellule solaire à une température supérieure à 60°C) à une certaine période de l'année. La valeur 4.8 W est inférieure à la tolérance 5 W donnée par le constructeur du module BYD255P6C-30.



**Figure 9 :** Influence de la température sur la courbe I-V (module BYD255P6C-30)



**Figure 10 :** Influence de la température sur la courbe P-V (module BYD255P6C-30)

Au-delà du module BYD255P6-30, notre méthodologie permet de caractériser n'importe quel module solaire PV pourvu que sa puissance crête et la nature du semi-conducteur de la cellule solaire soient disponibles.

#### 4. Conclusion

Dans cet article, les résistances série ( $R_s$ ) et parallèle ( $R_p$ ), le photo-courant ( $I_{pv}$ ) et le courant de saturation de la diode ( $I_0$ ), du module photovoltaïque BYD255P6C-30 ont été estimés. Un algorithme basé sur le modèle à une diode et la méthode itérative de Newton Raphson, implémenté dans Matlab est utilisé pour obtenir les valeurs de  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $I_{pv}$  et  $I_0$  à partir des données du site de Ségou, respectivement 0.25  $\Omega$ , 360.45  $\Omega$ , 8.9 A et 1.446e-07 A. La puissance maximale du module calculée à partir des paramètres optimisés est de 251.1 W, contre 255 W fournie par le constructeur, ce qui est une bonne prédiction car l'erreur relative maximale est de 1.53 %. L'objectif de disposer d'un outil permettant de déterminer les caractéristiques essentielles d'un module PV a été atteint. Son application au module BYD255P6C-30 permet en effet de prédire la production électrique de la centrale de 33MWc de Ségou en république du Mali. La démarche à travers l'algorithme peut aider tous les acteurs du domaine à un meilleur choix de module suivant la zone d'intervention.

## Références

- [1] - STEPHANE VIGHETTI, "Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion", Thèse de Doctorat, Université de Grenoble : Institut Polytechnique, Grenoble (2010) 1p.
- [2] - M. A. HAMOUDA, M. SAÏDI, A. LOUCHENE, C. HAMOUDA et A. MALEK, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 14, N°2 (2011) 187 - 202.
- [3] - AHMED OUSMANE BAGRE, "*Couplage de centrales photovoltaïques aux réseaux publics instables : Application au réseau national du Burkina Faso*", Thèse de Doctorat, Université du Havre : U.F.R Sciences Techniques, Havre (2014) 7 p.
- [4] - CAROLE JOUBERT GARNAUD, "Les énergies renouvelables dans l'agriculture de la Charente-Maritime. L'émergence en milieu rural d'un nouveau moteur du développement économique et social non dépourvu d'incidences sur l'environnement local.", Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle : Ecole Doctorale Sciences pour l'environnement Gay Lussac, La Rochelle (2010) 11 p.
- [5] - BOUALEM BOUKEZATA, ABDELMADJID CHAOUI, JEAN PAUL GAUBERT et MABROUK HACHEMI, "Système solaire photovoltaïque connecté au réseau électrique et associé à un filtre actif parallèle", Symposium de Génie Electrique, Cachan (juillet 2014).
- [6] - FRANTZ SINAMA, "Etude de la production d'électricité à partir de l'Energie Thermique des Mers à l'île de La Réunion : Modélisation et optimisation du procédé", Thèse de Doctorat, Université de La Réunion : Ecole Doctorale Sciences STS, La Réunion (2011) 6p.
- [7] - JULIEN BRUSCHI, "Caractérisation du phénomène d'ilotage non-intentionnel dans les réseaux de distribution", Thèse de Doctorat, Communauté Université Grenoble Alpes: École Doctorale d'Électronique, Électrotechnique, Automatique et Traitement du Signal (EEATS), Grenoble (2016) 13 p.
- [8] - WALEED I. HAMEED, AMEER L SALEH, BAHA A. SAWADI, YASIR I. A. AL-YASIR, AND RAED A ABD-ALHAMEED, *Rev. Inventions*, 4(3) (2019) 33.
- [9] - SARA CHERIFI ET MOHAMED HADDAD, *Rev. Les Cahiers du Cread*, 35(03) (2019)
- [10] - BOUBOU CISSE, "Cadre stratégique pour la relance économique et le développement durable du Mali (CREDD) 2016-2018 ", Plan triennal du Ministère de l'Economie et des Finances du Mali, Bamako (2016) 78p.
- [11] - IBRAHIM ZITOUNI, "Energie solaire et développement durable : cas du Mali", Thèse de Doctorat, Groupe Universitaire GEMENI, Bamako (2014) 25p
- [12] - THOMAS MAMBRINI, "Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies", Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud : École Doctorale STITS, Paris (2014) 46p.
- [13] - ANOUAR BELLABACI, "Contribution à la modélisation du rayonnement solaire comme un paramètre climatologique pour des applications photovoltaïques en Algérie", Thèse de Doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle, Université Mohamed Boudiaf, M'Sila (2021) 47 p.
- [14] - DIB WASSILA Née KAZI-TANI, "Modélisation des structures photovoltaïques : Aspects fondamentaux et appliqués", Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkîd de Tlemcen : Faculté des Sciences, Tlemcen (2011) 6p.
- [15] - BATI ERNEST BOYA BI, PROSPER GBAHA, MAGLOIRE PAUL EKOUN KOFFI et KAMENAN BLAISE KOUA, *European Scientific Journal*, 14(3) (2018) 1857 - 7881.
- [16] - R. MERAHI, R. CHENNI et M. HOUBES, *Journal of Scientific Research*, Vol. 1 (2010)
- [18] - K. KADDA TOUATI-BERGHEUL, M. BOUDOUR, A. HADJ ARAB et A. MALEK, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 17, N°2 (2014) 309 - 322
- [19] - IOAN-VIOREL BANU et MARCEL ISTRATE, *Rev Buletinul AGIR*, Vol. 3 (2012) 161 - 166

- [20] - VIVEK TAMRAKAR, S.C. GUPTA and YASHWANT SAWLE, *Electrical & Computer Engineering : An International Journal (ECIJ)*, Vol. 4 N° 2 (2015)
- [21] - MOUHAMADOU THIAM, OUMAR DIA, MOUSTAPHA DIOP, GUSTAVE SOW, LAMINE THIAW, DOROTHE AZILINON et OUSSEYNOU DIAO, *Afrique SCIENCE*, 12(3) (2016) 77 - 83, <http://afriquescience.info>
- [22] - VINOD, RAJ KUMAR and S. K. SINGH, *Rev. Energy Reports*, Vol. 4, (2018) 701-712.
- [23] - K. N UKOIMA and O. A EKWE, *Umudike Journal of Engineering and Techn. (UJET)*, 5(1) (2019) 108 - 116, <https://www.researchgate.net/publication/335910508>
- [24] - ABDELAZIZ YOUCEF, "Contribution à l'Optimisation des Performances d'un Générateur Photovoltaïque en Présence d'Ombrage Partiel", Thèse de Doctorat d'électrotechnique, Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbès (2017) 31p.
- [25] - OUADA MEHDI, TARFAYA ANIS, DR M.S. MERIDJET et DR DIB DJALEL, "Etude et Caractérisation sous Matlab/Simulink d'un Générateur Photovoltaïque", 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Renouvelables, Ghardaïa (2012).
- [26] - S. SUMATHI, L. ASHOK KUMAR et P. SUREKHA, In: *Solar PV and wind energy conversion systems*, Ed. Springer International Publishing, Cham (2015) 72 p.
- [27] - H. ESSAKHI and S. FARHAT, "Modélisation et simulation d'un module photovoltaïque", 5<sup>ème</sup> Journées internationales matériaux et environnement, Agadir, Vol. 33 (2019).
- [28] - K. KETY, K.A. AMOU, K. SAGNA, K. TEPE, Y. LARE et K. NAPO, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 19, N° 4 (2016) 633 - 645.
- [29] - N. FEMIA, G. PETRONE, G. SPAGNUOLO and M. VITELLI, "Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems", Ed. Taylor and Francis Group, New York (2012) 15p.
- [30] - « BYD P6C-30 Module.pdf », Consulté le: sept. 07, 2021, [En ligne] Disponible sur: [https://cdn.ensolar.com/Product/pdf/Crystalline/54c7421538795.pdf?\\_ga=2.255517324.526703851.1626175909-2028397717.1591903052](https://cdn.ensolar.com/Product/pdf/Crystalline/54c7421538795.pdf?_ga=2.255517324.526703851.1626175909-2028397717.1591903052)
- [31] - SAAD MOTAHHIR, ABDELAZIZ EL GHZIZAL et AZIZ DEROUICH, "Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM (Modeling and Control of a Photovoltaic Panel in the PSIM Environment)", 2<sup>ème</sup> édition du congrès international du génie industriel et management du systemes, Fès (2015).
- [32] - MD ABU BAKR SIDDIQUE et SM REZAUL KARIM, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 179, N° 7 (2017) 4 - 10.
- [33] - E. KECHAR, E. AZZAG et I. TOUAÏBIA, *International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET)*, Vol.3 (2015) 71 - 77.