

Simulation sous MATLAB d'un Emulateur de Panneau Photovoltaïque à base d'un Convertisseur Buck commandé en mode PSM

Abdellah El jounaidi^{#1}, Abderrafia Sabir^{#2}, Abderraouf Aboudou^{#3}, Daoud Wassad^{#4}

[#]Department Génie Electrique, ESTC, Université Hassan II
BP 8012, Oasis, Casablanca, Maroc

¹eljounaidi@hotmail.com

²lakfaa@gmail.com

³abderraoufaboudou@gmail.com

⁴wassaddaoud@gmail.com

Résumé— Un émulateur de panneau photovoltaïque basé sur la commande en mode PSM (Pulse Skipping Modulation) d'un convertisseur statique Buck est proposé dans cette étude. Le fonctionnement de l'émulateur repose sur la comparaison entre le courant issu du modèle MATLAB du panneau photovoltaïque à émuler, pris comme référence, et le courant moyen réel prélevé aux bornes de la charge. Le régulateur PSM qui fonctionne en comparateur va agir sur le convertisseur dans le but de rapprocher le plus possible le courant de sortie au courant de référence en augmentant ou en diminuant la tension aux bornes de la charge. En régime établi, ce courant va osciller autour du courant de référence avec de très faibles ondulations. Ainsi le courant et la tension aux bornes de la charge seront à l'image de la tension et le courant fournis par le panneau dans les mêmes conditions.

Mots clefs— Emulateur, Modèle Matlab, Panneau photovoltaïque, Convertisseur Buck, Commande PSM.

I. INTRODUCTION

Les conditions atmosphériques auxquelles est soumis un panneau photovoltaïque (rayonnement, température,...) peuvent avoir une grande influence sur ses propriétés électriques et ses performances en général [1]-[3]. L'étude des propriétés et du comportement d'un panneau photovoltaïque sous certaines conditions atmosphériques réelles, souhaitées, n'est pas réalisable à volonté. La simulation des conditions atmosphériques au laboratoire est envisageable mais elle nécessite un matériel relativement coûteux. Il s'avère alors nécessaire de trouver un moyen permettant d'émuler le fonctionnement du panneau photovoltaïque avec la possibilité de simuler les variations de certaines conditions atmosphériques, à volonté [4],[5]. L'émulateur du panneau photovoltaïque (BP380), à travers lequel on va essayer d'atteindre cet objectif et qui fera l'objet de notre étude, sera conçu à base d'un convertisseur Buck [6],[7] commandé par un régulateur PSM [8],[9] (Pulse Skipping Modulation) afin de fournir à une charge R_L une puissance identique à la

puissance qui serait fournie par le panneau photovoltaïque réel, sous les mêmes conditions atmosphériques.

II. SCHÉMA DE PRINCIPE DE L'ÉMULATEUR

L'émulateur peut être considéré comme un circuit électrique qui va alimenter une charge, avec la possibilité de définir les paramètres reflétant les conditions atmosphériques souhaitées.

Les deux paramètres principaux liés aux conditions atmosphériques et qui seront pris en considération seront la puissance d'éclairement (G) et la température du panneau solaire (T).

Le schéma synoptique de la figure 1 montre les différents blocs constituant l'émulateur :

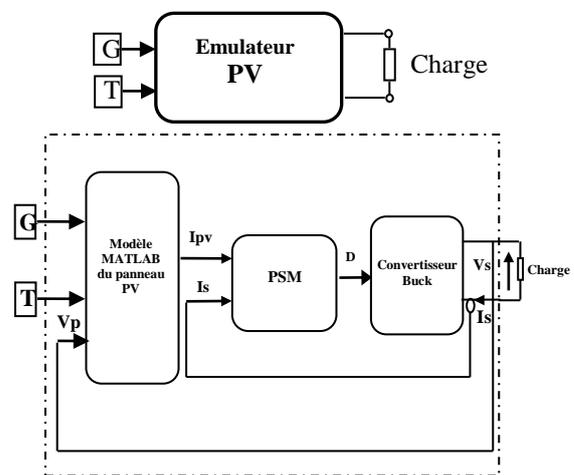


Fig.1 Schéma synoptique de l'émulateur PV

Il est constitué de trois blocs principaux: le modèle du panneau réalisé sous forme d'une fonction MATLAB qui va fournir le courant de référence I_{pv} calculé sur la base des caractéristiques réelles du panneau solaire (BP380) fournies par le constructeur. Le bloc PSM de contrôle et le convertisseur Buck qui va ajuster la tension V_s et le courant I_s

aux bornes de la charge. Le courant de sortie I_s sera comparé au courant de référence I_{pv} à l'entrée du bloc PSM. Cette commande repose sur l'envoi ou le blocage d'un signal rectangulaire D de rapport cyclique constant α , qui va commander le convertisseur selon que $I_s < I_{pv}$ ou $I_s > I_{pv}$. Le but étant de rapprocher le plus possible, grâce à la commande du convertisseur, la valeur du courant qui traverse la charge au courant de référence fourni par le modèle MATLAB du panneau considéré. Le courant de référence I_{pv} fourni par le modèle est lui-même fonction de la tension V_s aux bornes de la charge ($V_s = V_{pv}$).

III. MODÈLE MATLAB DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE BP380

A. Caractéristiques techniques du panneau

Le panneau photovoltaïque étudié, dont les spécifications techniques sont données sur le tableau 1 est constitué de 36 cellules élémentaires reliées en série. La modélisation d'une cellule élémentaire permet de remonter au modèle du panneau en supposant toutes les cellules identiques.

TABLEAU 1
LES CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU PANNEAU TESTÉ SOUS CONDITIONS STANDARDS (STC : ENSOLEILLEMENT DE 1000W/M², À TEMPÉRATURE DE 25°C, RÉPARTITION SPECTRALE DU RAYONNEMENT AM1.5)

Caractéristiques électriques (STC)	BP 380
Puissance nominale (Pmax)	80W
Puissance minimale garantie	76W
Tension à Pmax (Vmp)	17.6V
Courant à Pmax (Imp)	4.55A
Courant du court-circuit (Isc)	4.8A
Tension du circuit ouvert (Voc)	22.1V
Coefficient de température de Isc	(0.065±0.015)%/°C
Coefficient de température de Voc	-(80±10)mV/°C
Coefficient de température de Pmax	-(0.5±0.05)%/°C
NOCT	47±2°C

B. Modèle électrique simplifié d'une cellule

Le modèle électrique adopté sera celui du modèle simplifié à une diode sans résistance parallèle [10]. Ce modèle malgré sa simplicité donne de très bons résultats.

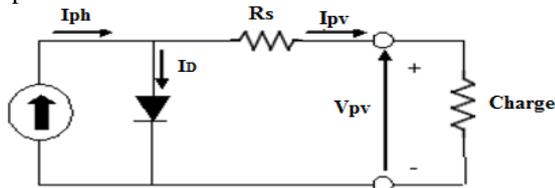


Fig. 2 Modèle électrique simplifié d'une cellule

Selon ce modèle, le courant I_{pv} fourni à la charge est exprimé par la relation (1)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D \quad (1)$$

I_D est le courant de la diode, exprimé sous la forme :

$$I_D = I_{so} \left[\exp \left(q \frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{nKT_c} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

Avec I_{so} : courant de saturation inverse de la diode
 T_c : température de la jonction en °K.
 N : facteur de qualité de la diode ($1 \leq n \leq 2$)
 q : charge de l'électron
 K : constant de Boltzman

I_{ph} est le photo courant produit par la cellule, sous la puissance d'éclairage G .

La résistance série R_s étant faible, on peut écrire que : $I_{ph} \approx I_{sc}$, I_{sc} désigne le courant du court circuit (charge nulle).

On montre que I_{sc} peut s'exprimer sous la forme [11] :

$$I_{sc} = \frac{G}{G_0} (I_{sc,0} + k_T (T_c - T_0)) \quad (3)$$

Avec

G : la puissance d'éclairage (w/m^2).

k_T : le coefficient de température du courant ($A/°C$).

$I_{sc,0}$: courant du court circuit à $T_0 = 298°K$ et à $G=G_0=1000W/m^2$ (Conditions de test Standard).

Le modèle du panneau photovoltaïque est introduit sous forme d'une fonction MATLAB qui va servir à résoudre l'équation de la relation (1) avec comme variable d'entrée la tension V_{pv} et comme paramètres le rapport G/G_0 et la température T_c , I_{pv} étant la variable de sortie. La résolution de cette équation permettra de tracer les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ avec comme paramètres G et T_c . La résolution est obtenue par la méthode de *Newton Raphson*, caractérisée par une convergence rapide [12],[13].

C. Simulation du modèle du panneau BP380

La simulation du modèle de la figure 3 réalisée sous MATLAB/SIMULINK en prenant en considération les spécifications techniques du panneau considéré nous permet d'obtenir les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ sous différentes conditions atmosphériques.

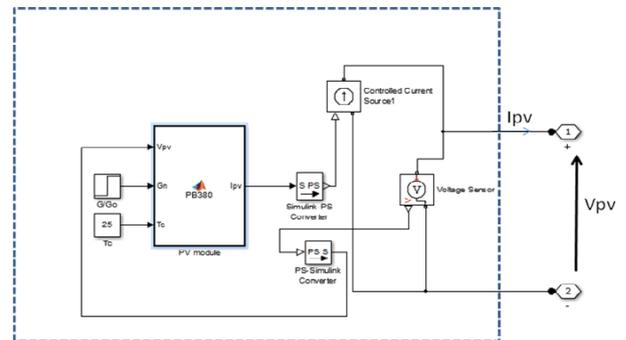


Fig. 3 Modele du panneau PV

La figure 4 montre le bon accord entre les caractéristiques simulées sous différentes températures et les caractéristiques fournies par le constructeur.

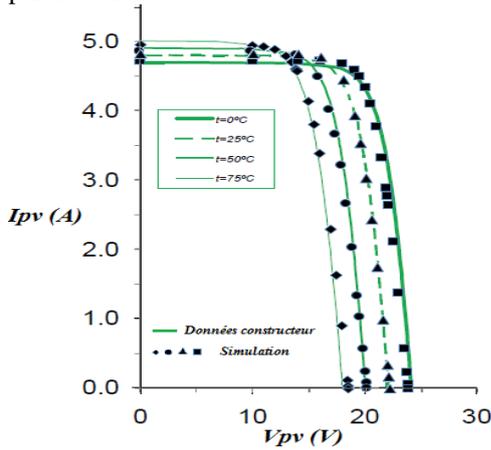


Fig. 4 Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$, Données constructeur et simulation.

IV. CONVERTISSEUR BUCK ET COMMANDE PSM

A. Convertisseur Buck

Le schéma électrique du convertisseur Buck utilisé est représenté sur la figure 5 :

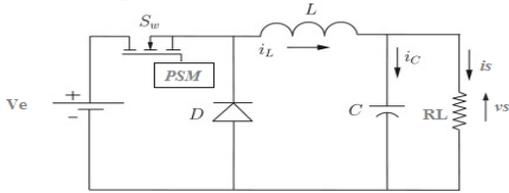


Fig. 5 Convertisseur Buck

Le mode de fonctionnement adopté est celui du régime de conduction continue [6],[14] (CCM).

Le convertisseur DC-DC utilisé dans la simulation sous MATLAB/SIMULINK est un convertisseur BUCK contrôlé par un dispositif à commande impulsionnelle de type PSM [8]. Le convertisseur est constitué d'un commutateur (transistor MOSFET), d'une diode, d'une inductance L et d'un condensateur C comme indiqué sur la figure 5. Le régulateur PSM qui va fournir les impulsions au commutateur va agir sur le convertisseur selon le résultat de comparaison du courant de référence I_{pv} calculé par le modèle du panneau photovoltaïque au courant I_s prélevé aux bornes de la charge. Il est introduit sous forme d'une fonction MATLAB qui aura pour rôle d'appliquer au commutateur (MOSFET) un signal d'horloge H de fréquence f_h et de rapport cyclique α , fixes. Lorsque le courant I_s prélevé aux bornes de la charge est inférieur au courant de référence I_{pv} , le train d'impulsions est envoyé vers le commutateur ce qui aura pour conséquence l'augmentation de la tension et du courant aux bornes de la charge, c'est la période de charge du condensateur. Lorsque I_s dépasse I_{pv} les impulsions sont bloquées et l'ouverture du commutateur provoque la décharge du condensateur et par conséquent la diminution de la tension aux bornes de la charge. Lorsque le

courant I_s devient inférieur au courant de référence I_{pv} , le train d'impulsions est appliqué de nouveau au commutateur et le courant I_s croît. Ainsi, lorsque le régime permanent sera établi, le courant I_s va osciller périodiquement autour du courant de référence avec une ondulation dont l'amplitude sera plus au moins importante selon la valeur de la résistance de charge R_L .

B. Modélisation de la fonction PSM

Le principe de fonctionnement de la commande PSM est résumé dans l'organigramme de la figure 6.

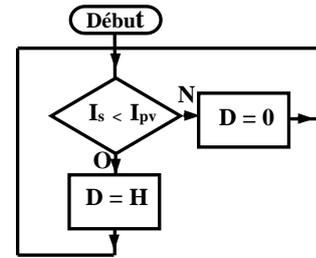


Fig. 6 Organigramme de la fonction PSM

La fonction PSM est programmée sous forme d'une fonction MATLAB $D = f(I_{pv}, I_s, H)$ dont la sortie D va envoyer vers le convertisseur le signal d'horloge H (Fig.7) tant que $I_s < I_{pv}$ et le bloquer pour $I_s > I_{pv}$.

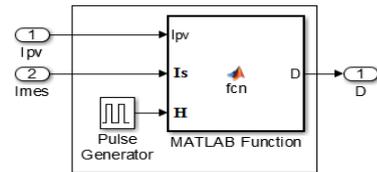


Fig. 7 Fonction PSM

Lorsque le régime permanent est établi après une phase transitoire, le signal d'horloge de période T_h et de rapport cyclique α , sera appliqué au transistor MOSFET lorsque $I_s < I_{pv}$ (période de charge du condensateur) et bloqué dans le cas contraire (période de décharge). Durant la période de charge, le transistor MOSFET sera passant pendant le temps αT_h et bloqué pendant le temps $(1-\alpha)T_h$. Si on considère p le nombre de cycles ou le signal d'horloge est appliqué au transistor et q le nombre de cycles où le signal d'horloge est absent comme indiqué sur la figure 8, on peut exprimer la fréquence f_c de commutation du MOSFET en fonction de la fréquence d'horloge f_h par la relation [16] :

$$f_c = \frac{p}{p+q} f_h \quad (4)$$

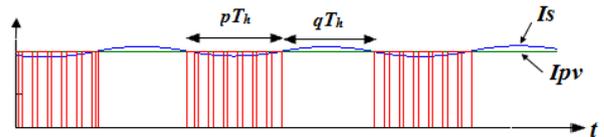


Fig. 8 Evolution de I_s et du signal de contrôle PSM en régime établi

Le facteur de modulation M est défini par la relation :

$$M = \frac{q}{p+q} = 1 - \frac{f_c}{f_h} \quad (5) \quad (0 \leq M \leq 1)$$

Et on montre que dans le cas du régime de conduction continue [15] (CCM), la valeur moyenne de la tension V_s aux bornes de la résistance R_L est donnée par:

$$V_s = (1 - M)\alpha V_e \quad (6)$$

avec α le rapport cyclique du signal d'horloge.

A partir de la relation (6) on déduit le courant moyen I_s circulant dans R_L :

$$I_s = \frac{V_s}{R_L} = (1 - M)\alpha V_e / R_L \quad (7)$$

On voit que seul le facteur de modulation M peut varier puisque les autres paramètres sont constants. C'est cette variation qui va permettre d'ajuster le courant de sortie I_s à I_{pv} .

On montre aussi que pour rester dans le régime de conduction continue, la résistance de charge R_L doit satisfaire la condition:

$$R_L \leq \frac{2Lf_h}{1-\alpha} \quad (8)$$

Pour une charge R_L donnée, L'inductance L doit satisfaire la condition:

$$L \geq \frac{R_L}{2f_h}(1 - \alpha) \quad (9)$$

Dans notre simulation, on prend la charge R_L comprise entre 1 et 50Ω , $\alpha = 0,9$ et $f_h = 100kHz$, $V_e = 30V$, on déduit d'après (9) la valeur minimale de L :

$$L_{min} = 25\mu H$$

Lors de la simulation nous avons pris $L=200\mu H$ et $C = 100\mu F$.

La figure 9 montre l'évolution du courant de sortie (I_s) et le signal de commande PSM.

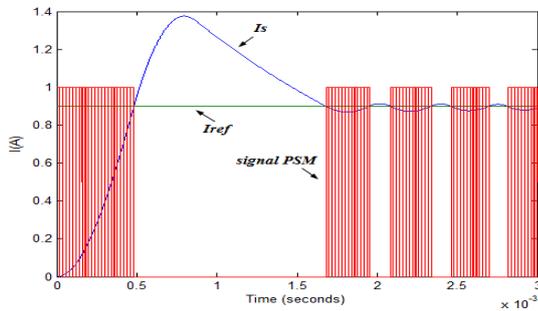


Fig. 9 Evolution de I_s et du signal PSM en fonction du temps

V. SIMULATION DE LA RÉPONSE DU CONVERTISSEUR COMMANDÉ PAR LA FONCTION PSM

La simulation sous MATLAB/SIMULINK du convertisseur commandé par le signal PSM, avec un courant d'excitation (I_{pv}) sous forme d'un échelon comme indiqué sur la figure10, montre que la réponse du système (évolution du courant I_s aux bornes de R_L) est influencée par la valeur de la charge.

La figure 12a montre un temps de réponse de l'ordre de 0.5ms pour une charge $R_L = 1\Omega$ alors que pour une charge $R_L = 50\Omega$ le temps de réponse est de l'ordre de 2,3ms(fig.12b).

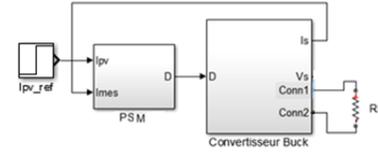


Fig. 10 Convertisseur Buck et commande PSM

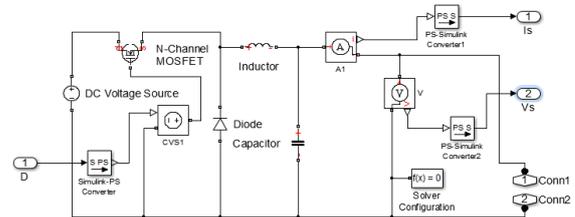


Fig.11 Convertisseur Buck sous SIMSCAPE

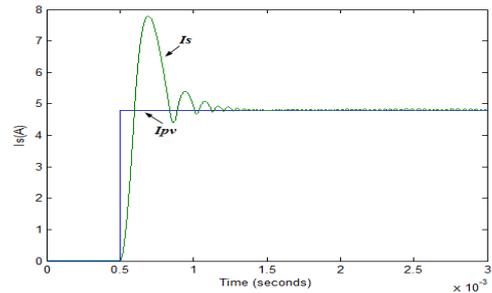


Fig.12a Evolution de I_s pour $R_L=1\Omega$

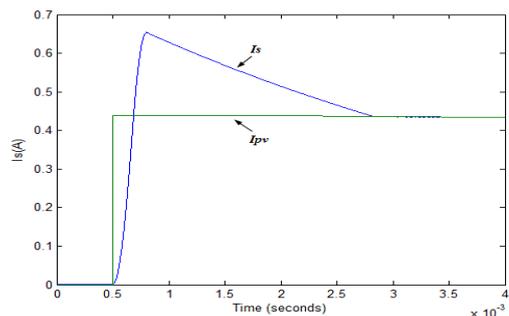


Fig.12b Evolution de I_s pour $R_L=50\Omega$

VI. RÉSULTATS DE SIMULATION DE L'ÉMULATEUR

A. Vitesse de réponse de l'émulateur

Le courant de référence I_{pv} est maintenant fourni par le modèle MATLAB du panneau PV comme indiqué sur la figure 13.

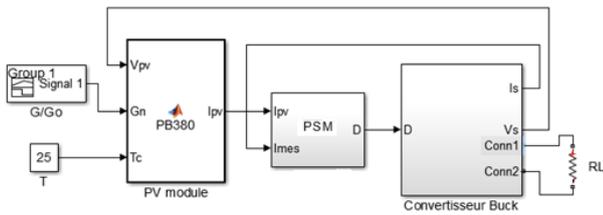


Fig.13 Schéma bloc complet de l'émulateur

Le courant I_{pv} est fonction de la tension V_{pv} ($V_{pv} = V_s$) introduite à l'entrée du module PV. V_s étant la tension prise aux bornes de R_L .

Les figures 14a et 14b montrent l'évolution du courant I_s en fonction du temps pour $R_L=1\Omega$ et pour $R_L=50\Omega$ en réponse à une valeur de G/Go qui passe instantanément de 0 à 1 à l'instant $t = 0.5s$. On remarque que les temps de réponse restent dans les mêmes ordres de grandeur (0.5ms pour $R_L=1\Omega$ et 2,3ms pour $R_L=50\Omega$). Ces valeurs restent largement suffisantes comparées aux vitesses de variation normales des grandeurs atmosphériques considérées.

Le calcul du taux d'ondulation nous donne aussi une valeur de 0.3% pour $R_L=1\Omega$ et 0.8% pour $R_L=50\Omega$.

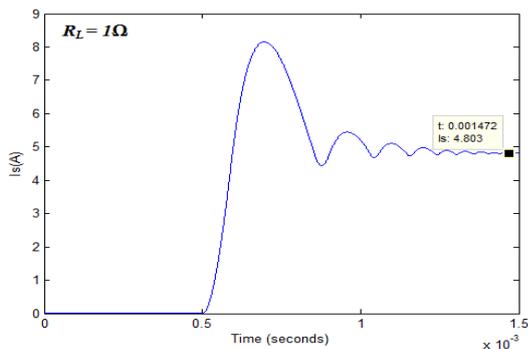


Fig. 14a Evolution de I_s pour $R_L=1\Omega$

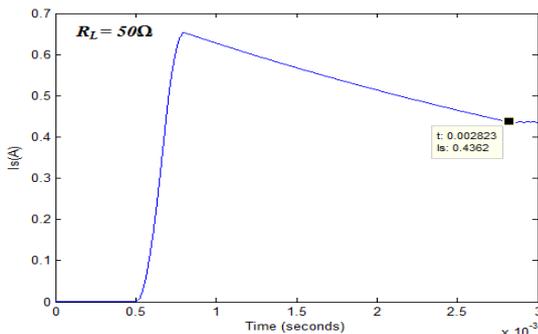


Fig. 14b Evolution de I_s pour $R_L=50\Omega$

B. Variations de V_s et I_s en fonction de G/Go

Les figures 15a et 15b montrent l'évolution de V_s et I_s à $T_c = 25^\circ C$ et $R_L=10\Omega$ pour G variant sur quatre paliers (0; $200W/m^2$; $600W/m^2$; $1000W/m^2$).

En comparant les valeurs de V_s et I_s issues de la simulation aux valeurs obtenues à partir des caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ du

modele MATLAB du panneau pour une charge identique comme indiqué sur la figure 16, on remarque une forte similitude entre les valeurs simulées et les valeurs calculées.

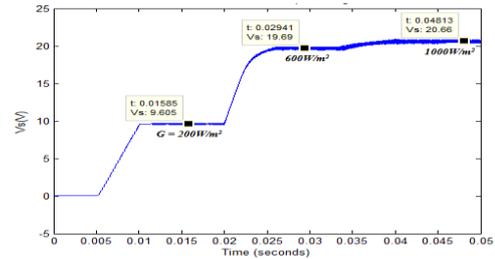


Fig. 15a Variation de la tension de sortie V_s pour $R_L=10\Omega$

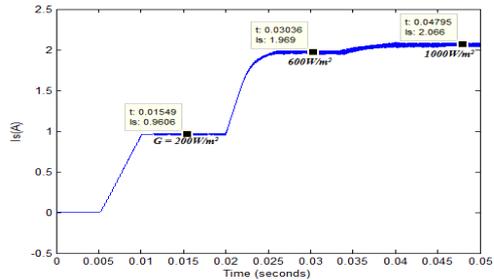


Fig. 15b Variation du courant de sortie I_s pour $R_L=10\Omega$

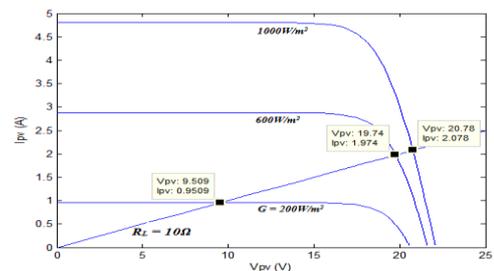


Fig. 16 Points de fonctionnement sous différentes puissances pour $R_L=10\Omega$

C. Variation de I_s en fonction de la température à éclairement constant ($G=Go$)

Lors de cette simulation on fait varier la température en fonction du temps à éclairement constant ($G = Go = 1000W/m^2$) sur des paliers allant de $0^\circ C$ à $75^\circ C$.

En comparant les valeurs Simulées de I_s comme indiqué sur la figure 17 aux valeurs obtenues à partir des caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ du modèle (Figure18), on trouve encore un bon accord entre les valeurs simulées et les valeurs calculées, ce qui montre la validité du modèle choisi pour l'émulateur.

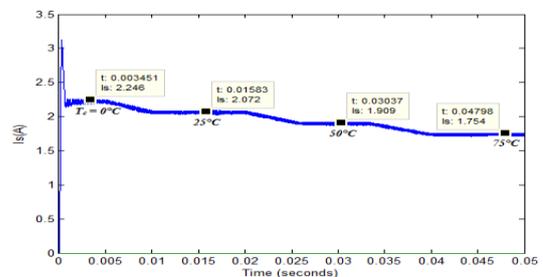


Fig. 17 Variation du courant de sortie I_s pour $R_L=10\Omega$

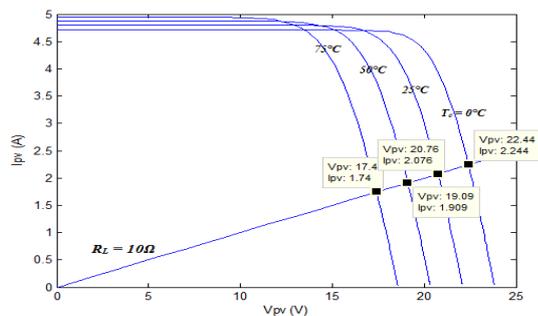


Fig. 18 Points de fonctionnement sous différentes températures pour $R_L=10\Omega$

D. Comparaison entre les valeurs simulées et les caractéristiques constructeur

Sur la figure 19, nous avons reporté sur le même graphe les valeurs simulées du courant de sortie pour des charges allant de 1Ω à 50Ω et les caractéristiques fournies par le constructeur pour des températures allant de 0°C à 75°C . Les résultats montrent une fois de plus le bon accord entre la simulation et les caractéristiques réelles.

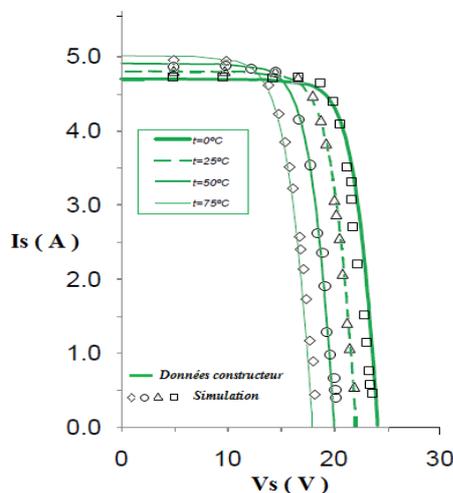


Fig. 19 Résultats de simulation et caractéristiques constructeur

VII. CONCLUSION

Dans cette étude nous avons proposé un montage émulateur de panneau PV. Nous avons proposé aussi un modèle du panneau BP380 sous forme d'une fonction MATLAB et nous avons montré la validité de ce modèle en comparant les résultats de simulation du modèle aux caractéristiques fournies par le constructeur. Nous avons montré aussi que l'utilisation de la technique de régulation PSM (**P**ulse **S**kiping **M**odulation) pour la régulation de la puissance aux bornes de la charge s'est avérée efficace et a donnée de bons résultats. Nous avons montré également que le taux d'ondulation de la tension de sortie ne dépasse pas 0.8%. Le temps de réponse de l'émulateur ne dépasse pas 2,5ms, ce qui représente une bonne performance en comparaison avec les vitesses de variation habituelles des conditions atmosphériques étudiées.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Pradhan, S. Ali, and J. Chitrakleha, "Analysis of Solar PV cell Performance with Changing Irradiance and Temperature," *International Journal Of Engineering And Computer Science*, vol.2 Issue 1, pp. 214-220, Jan. 2013.
- [2] E. Skoplaki, and J. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical Performance," *A review of efficiency/power correlations. Solar Energy Mater. Solar Cells*, vol.83 Issue 5, pp. 614-624, May 2009.
- [3] D. Faïman, "Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules," *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol.16 Issue 4, pp. 307-315, June 2008.
- [4] A. Koran, K. Sano, R.Y. Kim, and L. J.S. Lai, "Design of a photovoltaic simulator with a novel reference signal generator and two-stage LC output filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.25 Issue 5, pp. 1331-1338, May 2010.
- [5] R. González-Medina, I. Patrao, G. Garcerá, E. Figueres, "A low-cost photovoltaic emulator for static and dynamic evaluation of photovoltaic power converters and facilities," *Prog. Photovolt. Res. Appl.* Vol.22 Issue 2, pp. 227-241, Feb. 2014.
- [6] N. Mohan, M. Undeland and P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, Ed. New York: Wiley, 2002.
- [7] S. Zich, "Analysis and Design of Continuous Input Current Multiphase Interleaved Buck Converter," M. Eng thesis, California Polytechnic State University, USA, Jan. 2009.
- [8] S. Angkititrukul and H. Hu, "Design and analysis of buck converter with pulse-skipping modulation," *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, 2008, pp. 1151-1156.
- [9] N. Lokesh and R. Thangam, "Computerized Soft-Start PSM Buck Converter," *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, Special Issue 5, pp. 151-155, October 2016.
- [10] T.Yetayew, and T.R. Jyothsna, "Improved single-diode modeling approach for photovoltaic modules using data sheet," *India Conference (INDICON), Annual IEEE*, 2013, pp. 13-15.
- [11] A.H. Besheer, and A.Y. Abdelaziz, "A comparative analysis for different kinds of single diode model photovoltaic module," *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, 2014, pp.41-46.
- [12] V. Quaschnigt, and R. Hanitscht, "numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells," *Solar Energy* vol. 56 Issue 6, pp. 513-520, June 1996.
- [13] A. Awodugba, Y. Sanusi, and J. Ajayi, "Photovoltaic solar cell simulation of shockley diode parameters in matlab," *International Journal of Physical Sciences*, vol. 8 Issue 22, pp. 1193-1200, June 2013.
- [14] S. Kasat, "Analysis, Design and Modeling of DC-DC Converter Using Simulink," M. Eng thesis, Oklahoma State University, USA, Dec. 2004.
- [15] R. Srinivasan, and P. Vanaja Ranjan, "Pulse Skipping Modulated Buck Converter - Modeling and Simulation," *Circuits and Systems* vol.1 Issue 2, pp. 59-64, Oct. 2010.
- [16] P. Luo, L.Y. Luo, and Z. Li, "Skip Cycle Modulation in Switching DC-DC Converter," *ICCCAS.2002, Chengdu, China*, June 2002, pp. 716-719.