

Amélioration de l'adaptation d'un générateur photovoltaïque à une charge avec implémentation pratique

F.Z. Zerhouni, M. Zegrar et A. Boudghène Stambouli

Département d'Electronique, Faculté de Génie Electrique,
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran,
B.P. 1505, El M'Naouer, 31000 Oran, Algérie

(reçu le 20 Septembre 2007 – accepté le 25 Décembre 2007)

Résumé - Ce présent article présente une méthode qui puise le maximum de puissance d'un générateur photovoltaïque en temps réel et le transfère à la charge par changement de connexions des modules du générateur photovoltaïque. Des paramètres sont prélevés et la configuration adéquate est déterminée et adoptée. A tout instant, le générateur photovoltaïque est adapté à la charge qu'il alimente. L'avantage de la technique développée tient au fait que le générateur fonctionnera toujours en la meilleure des puissances fournies par les configurations, quelques soient les variations des conditions climatiques, et donc de bonnes performances du système sont garanties.

Abstract – This present article presents a method which extracts the maximum power of a photovoltaic generator in real time and transfers it to the load by modules connections change of the photovoltaic generator. Parameters are taken and the adequate configuration is determined and adopted. At any moment the photovoltaic generator is adapted to the load which it feeds. The advantage of the developed technique is due that the generator will always function in the best of the powers provided by the configurations whatever are the variations of the climatic conditions and thus good performances of the system are guaranteed.

Mots clés: Générateur photovoltaïque – Optimisation – Configuration – Rendement – Puissance.

1. INTRODUCTION

Il existe diverses méthodes de procéder pour recueillir le plus de puissance d'un générateur photovoltaïque (SCA: Solar Cells Array). Le plus de puissance est fourni au SCA, lorsque le flux lumineux est perpendiculaire à sa surface. On peut donc asservir la position du SCA à la course du soleil. Une autre solution pour rentabiliser notre système est de faire appel à des concentrateurs optiques du rayonnement solaire sur le SCA. Ceci permet de réduire le nombre de modules photovoltaïques. En couplant directement le SCA à une charge, le système global peut ne pas être performant dans certains cas. Le changement de configurations de modules du SCA permet une bonne utilisation des cellules solaires étant donné qu'on puise le plus de puissance du SCA. On augmentera de la sorte la performance de notre système.

Le couplage direct SCA-Charge implique un point d'opération dépendant particulièrement de la charge. Ici se pose le problème de pertes en puissance qui devient significatif à mesure que la puissance d'opération s'écarte de celle optimale et donc un mauvais usage des cellules solaires. On insiste sur l'extraction du plus de puissance possible des cellules solaires. On remarquera que la charge à approvisionner par le SCA est généralement imposée. Par notre présente étude, nous allons considérer la solution méthode de couplage par changement de configuration.

2. CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E , qui répond elle-même à la relation suivante [1]:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1)$$

dans laquelle: λ représente la longueur d'onde; h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière.

Une cellule photovoltaïque ne se comporte ni comme une source de tension idéale, ni comme une source de courant idéale. Elle peut être représentée par le schéma suivant [1-3]:

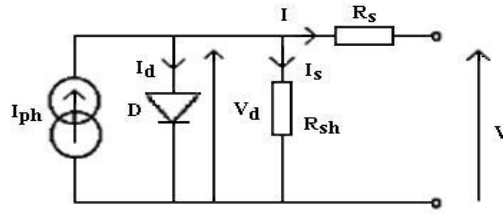


Fig. 1: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

I est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V est la tension aux bornes de cette même cellule, I_{ph} est le photocourant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température (c'est le courant de court-circuit noté I_{cc}), R_{sh} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_s la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

Lorsque la jonction est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur, en produisant un courant de court-circuit (Fig. 1), proportionnel à l'éclairement E_S .

Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique suivante:

$$I = I_{cc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{(V + R_s \cdot I)}{A \cdot U_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

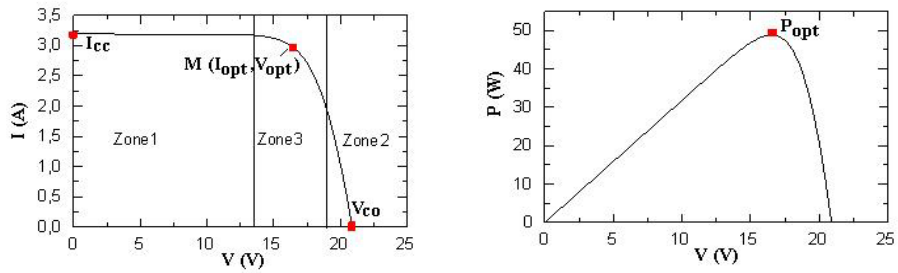
I_0 est le courant de saturation, A est le facteur d'idéalité de la jonction, $U_T = (k \cdot T) / q$ représente le potentiel thermodynamique, k la constante de Boltzman ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J}^\circ\text{K}$), T la température effective des cellules (K), e la charge de l'électron.

Pour notre cas, un module photovoltaïque est un groupement de 36 cellules photovoltaïques poly cristallines en série dont les caractéristiques électriques sont données en figure 2.

La figure 2 illustre la caractéristique I-V (courant-tension) pour des conditions climatiques données (E_S : éclairement, T : température). On y a représenté le courant pour une tension nulle. C'est I_{cc} : courant de court-circuit. La tension V_{co} en figure 2 correspond à un courant nul: c'est la tension en circuit ouvert. Le point M correspond à des coordonnées (I_{opt} - V_{opt}). C'est le point de puissance optimale qui est la plus grande des puissances extraites du SCA. En figure 2, la puissance notée P fournie par un module est nulle pour un courant nul; elle augmente quand le courant augmente, passe par un maximum, puis décroît jusqu'à s'annuler. Le point M en figure 2 représente le point de puissance maximale, puissance pouvant être fourni par le module. On voit bien que pour un éclairement et une température donnés, il existe une valeur de la tension et de courant qui maximise la puissance produite par le générateur notée P_{opt} dans la figure 2.

Les figures 3 et 4 présentent les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque pour différentes conditions d'éclairement E_S et de température T .

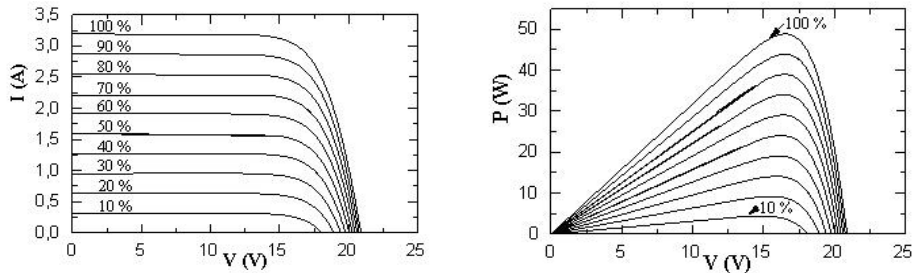
Quand l'éclairement croît pour une température donnée, l'intensité de court-circuit augmente, les courbes V-I se décalent vers les valeurs croissantes, permettant au module de produire une puissance électrique plus importante. En revanche, quand la température croît en ensoleillement constant, la tension du module en circuit ouvert V_{co} diminue et la conversion photovoltaïque est donc moins importante [2, 4].



Caractéristique courant – tension

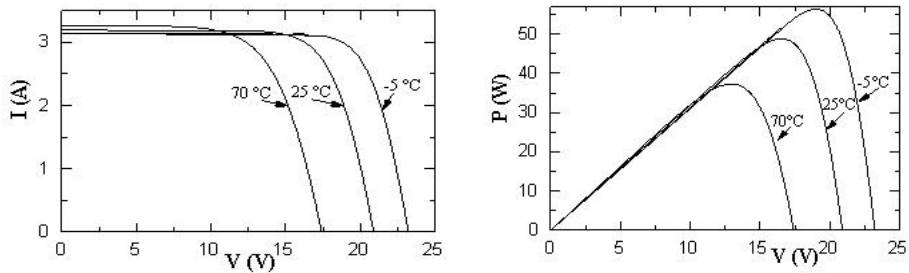
Caractéristique puissance – tension

Fig. 2: Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque



Caractéristique courant – tension

Caractéristique puissance – tension

Fig. 3: Caractéristiques du générateur photovoltaïque vis-à-vis de E_s 

Caractéristique courant – tension

Caractéristique puissance – tension

Fig. 4: Caractéristiques du générateur photovoltaïque vis-à-vis de la température T

Le générateur photovoltaïque (SCA) peut être constitué d'assemblages série/parallèle de modules photovoltaïques avec des diodes de protection. Le nombre total de ces modules est noté N_t avec:

$$N_t = N_s \cdot N_p \quad (3)$$

avec N_s et N_p respectivement, le nombre de modules en série dans une branche et le nombre de branches en parallèle.

Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive [5, 6]. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT) [7-10] ou par une autre technique qui fait l'objet de cet article.

3. PRINCIPE D'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ D'ADAPTATION SCA - CHARGE

3.1 Bonne adaptation

Nous prenons à titre d'exemple un SCA constitué de 2 modules disposés en configuration série $N_p=1$, $N_s=2$ alimentant une charge résistive $R_1 = 22 \Omega$ [2]. Ce choix de modules et de configurations se fait selon les besoins énergétiques de la charge. Des caractéristiques $P-V$ du SCA pour différents niveaux d'éclairement à température constante $T = 25^\circ\text{C}$ ont été tracées en figure 5. Sur la même figure, est représentée la caractéristique de la charge P_{fct1} et la courbe des points optimaux notés B1, B et B2. Les points d'opération du système SCA-charge sont déterminés par l'intersection de la courbe $I-V$ ($P-V$) de la charge et les caractéristiques $I-V$ ($P-V$) du SCA pour chaque éclairement. Pour un éclairement de 100 % par exemple, le point d'intersection du SCA avec R_1 est désigné par A en figure 5. Ce point n'étant pas fixe, il varie selon les conditions climatiques. On voit que cette résistance est optimale pour notre configuration à $E_S = 50\%$. En effet, son point d'opération noté B à cet éclairement correspond au point optimal.

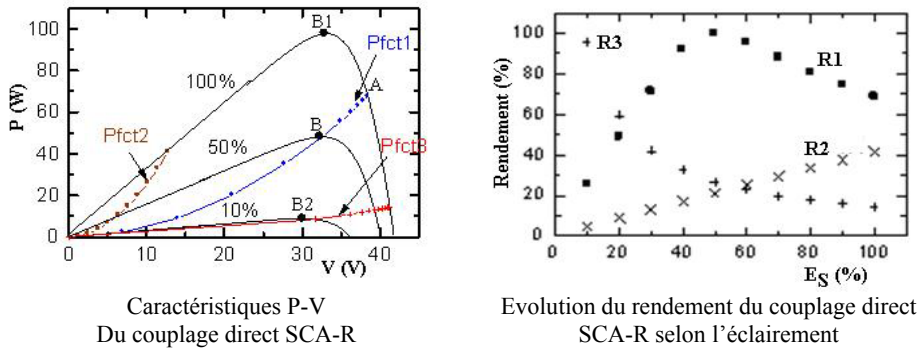


Fig. 5: Couplage direct SCA-R, $N_p=1$, $N_s=2$, $E_S=100\%$, $T = 25^\circ\text{C}$

La figure 5 illustre le rendement η_g défini par:

$$\eta_g = \frac{P_{fct}}{P_{opt}} \quad (4)$$

en fonction de l'éclairement pour R_1 . Le rendement maximal équivaut à 100 % pour 50 % d'éclairement. Ceci confirme le fait que R_1 est optimale pour ces conditions. On introduit la notion de rendement moyen. Ce facteur intervenant comme mesure de l'efficacité d'utilisation du SCA est dicté par:

$$\eta_g^{moy} = \int_{10\%}^{100\%} \eta_g(E_S) \cdot dE_S \quad (5)$$

Pour notre charge $R_1 = 22 \Omega$, nous avons calculé η_g^{moy} . Il est égal à 70 % pour $T = 25^\circ\text{C}$. C'est une valeur appréciable. A 25°C , on déduit que cette charge utilise, de façon acceptable, le SCA. La température n'étant pas constante et vu que sa variation a un impact direct sur la caractéristique du SCA, il est donc nécessaire d'analyser le comportement du système SCA- R_1 vis-à-vis de cette variation.

Le calcul du rendement moyen η_g^{moy} , pour cette charge à $T = 70^\circ\text{C}$, a entraîné une valeur importante de 71.7 %. Pour $T = -5^\circ\text{C}$, on a un rendement moyen η_g^{moy} égal à 68.3 %. Ces rendements moyens sont satisfaisants. On voit que le rendement moyen η_g^{moy} n'est pas fortement lié aux variations de la température. En conclusion, pour ce récepteur, la qualité d'adaptation s'annonce acceptable.

3.2 Mauvaise adaptation

A titre illustratif, nous allons considérer à présent deux résistances, $R_2 = 4 \Omega$ et $R_3 = 120 \Omega$. Leurs caractéristiques $P-V$ sont notées respectivement $P_{\text{fct}2}$, $P_{\text{fct}3}$ dans la figure 5. Chaque résistance sera connectée au SCA précité séparément. Les divers rendements vis-à-vis de E_S relatifs à R_2 et R_3 pour $T = 25^\circ\text{C}$ sont représentés en figure 5. Chaque charge introduit son point de fonctionnement pour des conditions de travail données (Fig. 5).

En reprenant le même procédé à $T = 25^\circ\text{C}$ pour $R_2 = 4 \Omega$, la valeur estimée du rendement moyen η_g^{moy} est égale à 20.8 %. Pour $T = -5^\circ\text{C}$, le rendement moyen η_g^{moy} pour R_2 a abouti à un rendement très faible de 17.4 %. Pour $T = 70^\circ\text{C}$, il est égal à 29 %. Ce rendement est aussi très faible.

Pour le cas de $R_3 = 120 \Omega$, à $T = 25^\circ\text{C}$, le rendement est égal à 27.7 %. Pour $T = -5^\circ\text{C}$, on a une valeur très faible, soit η_g^{moy} égal à 31.1 %. De même, pour $T = 70^\circ\text{C}$, $\eta_g^{\text{moy}} = 25,52\%$.

En somme à l'inverse de $R_1 = 22 \Omega$, pour $R_2 = 4 \Omega$ et $R_3 = 120 \Omega$, quelles que soient les conditions de travail, la mauvaise adaptation persiste. On est contraint d'écarter le couplage direct pour ces charges pour cette configuration du SCA. On doit donc adopter un autre moyen pour rentabiliser le système global.

4. PRINCIPE DU CHANGEMENT DE CONFIGURATION

Le principe du changement de configuration est relativement simple. Disposant d'une certaine charge à alimenter par le générateur photovoltaïque, cette méthode suppose un nombre total N_t fixe de modules photovoltaïques. On notera que ce nombre dépendra des besoins en puissance de la charge [2, 11, 12].

4.1 Changement de configuration selon l'éclairement

Pour un certain équipement à approvisionner par source photovoltaïque, et pour des conditions climatiques données, on procède de la manière suivante.

On teste en première partie la valeur de la puissance d'opération P_1 du système SCA-Charge pour la première configuration adoptée ($N_{p1} \times N_{s1}$).

La variation de cet arrangement de modules en adoptant une deuxième configuration $N_{p2} \times N_{s2}$, en une seconde partie découlera en une autre puissance d'opération P_2 qui différera de P_1 .

La différence entre ces puissances contribuera à désigner laquelle de ces configurations semble le mieux adaptable à notre charge pour telles conditions de travail.

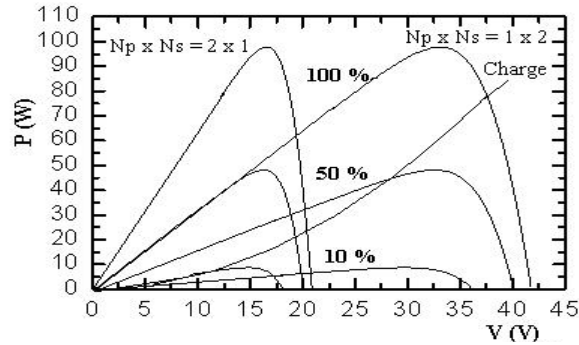


Fig. 6: Changement de configuration vis-à-vis de E_S

Pour illustrer ce principe, on suppose à titre d'exemple, que l'on dispose d'une charge résistive $R = 15\Omega$ alimentée par deux modules photovoltaïques configurés soit en parallèle (configuration1: $N_{p1} \times N_{s1} = 2 \times 1$), soit en série (configuration2: $N_{p2} \times N_{s2} = 1 \times 2$).

Pour une température maintenue constante $T = 25^\circ\text{C}$, à chaque éclairage, on calcule les points d'intersection (puissance d'opération) de la charge $R = 15\Omega$ avec la caractéristique $P-V$ du SCA pour la première configuration, puis pour la deuxième. On représente les puissances d'opération P_1 et P_2 sur un même graphe vis-à-vis des conditions considérées (ici, variations d'éclairage). Ces deux puissances se croisent en un point d'iso puissance. Ainsi, en figure 7, on a représenté la puissance d'opération P_1 du SCA-R pour la configuration 1 et P_2 pour la configuration 2.

Ces deux courbes présentent la même puissance d'opération pour $E_S = 40\%$. Comme visible en figure 7, la puissance P_1 est supérieure à P_2 pour $E_S < 40\%$. Par contre, pour $E_S > 40\%$, ceci s'inverse. Si on tolère un changement de configuration, en adoptant la configuration 1 pour tout $E_S < 40\%$ et la configuration 2 pour tout $E_S > 40\%$, l'apport en puissance sera meilleur pour notre charge et l'exploitation de notre SCA sera bonne.

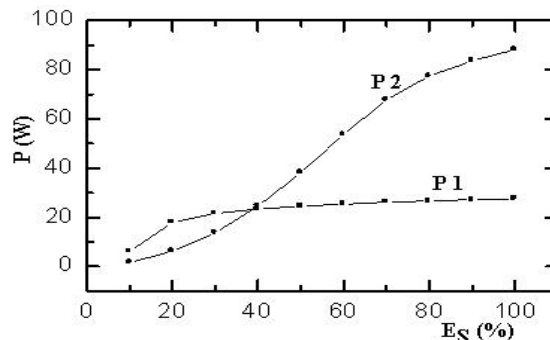


Fig. 7: Puissances obtenues pour les deux configurations selon E_S , pour $R = 15\Omega$

On observe que pour un même nombre de modules, une même charge, la puissance d'opération pour notre récepteur varie suivant la manière de connecter les modules. Donc pour une certaine charge, on décidera d'un changement de connexions de modules solaires suivant la variation de l'éclairage. La même étude est reprise pour des températures extrêmes. Un éclairage moyen sera celle réalisant la commutation.

4.2 Changement de configuration selon la charge

La commutation peut aussi se faire, suivant la variation de la charge à alimenter pour des conditions de travail fixes. Ceci est illustré par la figure ci-dessous, représentant les caractéristiques puissance - tension, à des conditions de travail données, pour les configurations choisies précédemment.

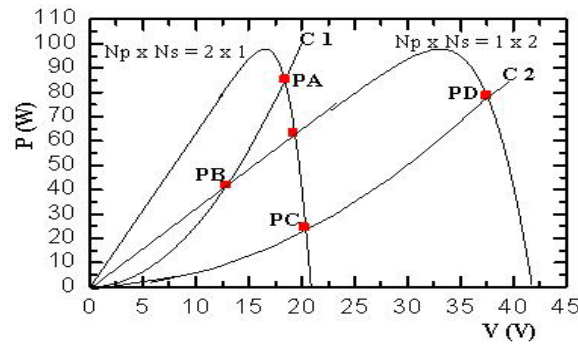


Fig. 8: Commutation par variation de charge

En effet, si la caractéristique de la charge est C1, on voit que la configuration $N_p \times N_s = 2 \times 1$, lui apporte plus de puissance que celle $N_p \times N_s = 1 \times 2$ ($P_A > P_B$). Si cette charge varie ('C2'), la puissance d'opération devient P_C . Si, on tolère en ce moment un changement de configuration, on passe à $N_p \times N_s = 1 \times 2$, la puissance d'opération devient P_D et $P_D > P_C$, $P_D > P_C$. On aura un gain en puissance et en rendement.

5. IMPLEMENTATION PRATIQUE ET RESULTATS PRATIQUES OBTENUS

Les configurations que nous avons adoptées pour notre SCA sont la configuration série $N_p \times N_s = 1 \times 2$ et la configuration parallèle $N_p \times N_s = 2 \times 1$. Nous avons pris une charge fixe et opéré la commutation en temps réel on line automatiquement. D'après la variation de E_S , d'après les résultats obtenus de la simulation, nous sommes passés à la pratique.

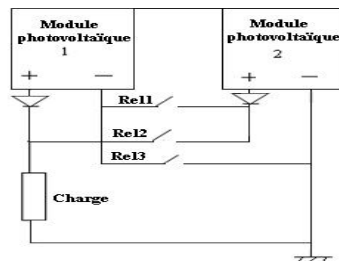


Fig. 9: Connexions réalisées du SCA

Pour passer d'une configuration à une autre au moment propice (passer par exemple de la configuration série à celle parallèle) ou inversement selon la puissance procurée à la charge, on ouvre d'après une logique de commande élaborée en temps réel Re1 (série) et on ferme Re2 et Re3 (configuration parallèle). Pour notre réalisation, les interrupteurs sont des Mosfets.

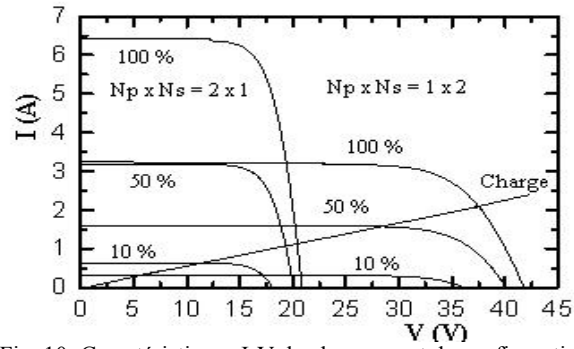


Fig. 10: Caractéristiques I-V du changement de configurations

Afin de valider cette méthode, un système expérimental qui permet le changement de configuration a été réalisé suivant le schéma synoptique en figure 11.

Cette carte d'acquisition en figure 11 permet le relevé de l'éclairement grâce à un capteur d'éclairement qui est une cellule pilote court-circuitée soumise aux mêmes conditions de travail que le SCA. La comparaison est effectuée afin d'attribuer au SCA la meilleure configuration. D'après le résultat obtenu, un signal est fourni aux interrupteurs statiques pour permettre, soit la configuration 1, soit la configuration 2. Le traitement se fait en temps réel.

Le courant de court-circuit est directement proportionnel à E_S selon la relation suivante:

$$I_{cc} = C \cdot E_S \quad (6)$$

C : constante = $0.032 \text{ Am}^2/\text{W}$.

Nous avons disposé au sein de cette cellule en court-circuit un shunt afin de prélever la tension à ses bornes V_{ES} qui détermine le courant de court circuit dont découlera l'éclairement.

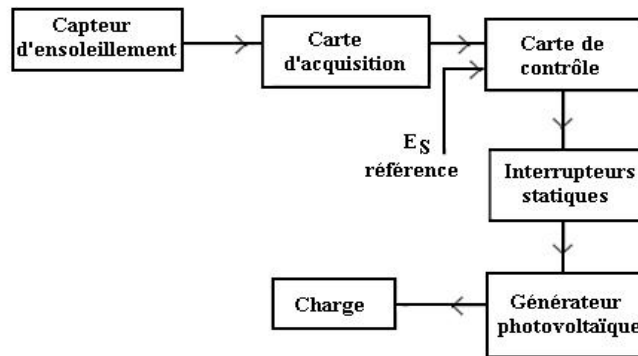


Fig. 11: Synoptique du système réalisé

La tension issue de ce shunt attaquera un amplificateur de tension ayant un gain de 10. Cette amplification a été réalisée afin d'avoir une grandeur comparable avec la tension de référence V_{ref} . Cette dernière correspond à un éclairement de référence qui varie selon la charge.

La tension de référence est prélevée aux bornes d'une résistance ajustable faisant partie d'un diviseur de tension. La tension de référence V_{ref} et la tension V_{ES} amplifiée V_{ES}^* attaquent deux comparateurs. La tension V_{ES}^* attaque l'entrée non inverseuse alors que la tension V_{ref} attaque l'entrée inverseuse du 1^{er} comparateur. Par contre en ce qui concerne le deuxième comparateur, l'entrée V_{ES}^* attaque l'entrée inverseuse et V_{ref} l'entrée non inverseuse.

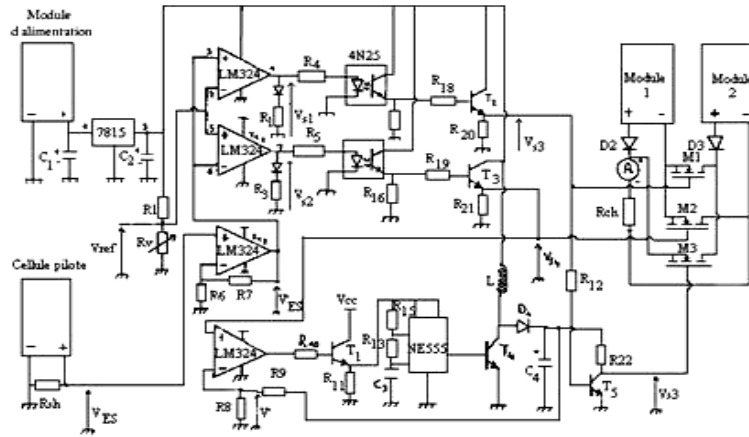


Fig. 12: Carte réalisée permettant le changement de configuration

Si $V_{ref} > V_{ES}^*$, on aura un niveau bas de la sortie du 1^{er} comparateur V_{S1} à l'inverse de la sortie V_{S2} du 2^{ème} comparateur qui sera à un niveau haut.

Si $V_{ref} < V_{ES}^*$, les deux sorties V_{S1} et V_{S2} auront des niveaux haut, bas respectivement. Chacune des tensions V_{S1} et V_{S2} attaquera séparément deux photos coupleurs afin de réaliser une isolation galvanique. La sortie issue de chaque photo coupleur se retrouve à l'entrée d'un amplificateur de courant pour fournir un courant suffisant pour l'amorçage de Mosfet qui joue le rôle de l'interrupteur.

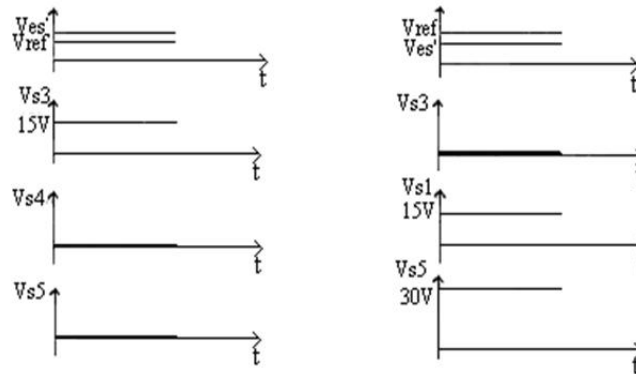


Fig. 13: Résultats obtenus

La sortie V_{S3} issue d'un amplificateur de courant sera la tension grille – source V_{GS} du Mosfet01. La sortie V_{S4} de l'autre amplificateur de courant attaquera la grille du Mosfet02. Afin d'amorcer le Mosfet03 qui doit être actionné en même temps que le 02, nous devons appliquer une tension aux environs de 30 V. Pour ce faire, nous avons utilisé un hacheur survolté.

La sortie de ce dernier est prélevée aux bornes d'un condensateur et sera comparée à travers un diviseur de tension à la tension V_{S4} . Si $V_{S4} > V$, la sortie du comparateur est au niveau haut dans le cas contraire elle basculera au niveau bas. Nous avons utilisé un générateur d'impulsions à base de NE555 qui fournira la tension d'attaque de la base du transistor du hacheur utilisé.

La figure 13 donne une représentation des différents signaux obtenus de la carte d'expérimentation. Nous avons effectué des tests pratiques en utilisant la carte réalisée. Pour une

charge résistive et une éclaircissement de commutation approprié, la commutation s'est faite et nous avons observé que réellement plus de puissance a été fournie à la charge prise comme le montre le résultat pratique suivant dans la figure ci-dessous.

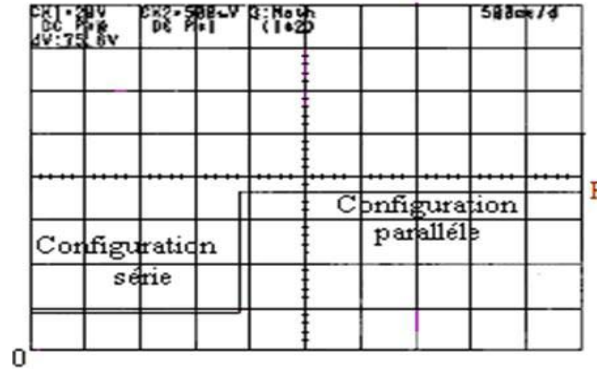


Fig. 14: Résultat obtenu de la variation de la puissance en fonction du temps

6. CONCLUSION

Ce présent travail a permis d'optimiser le fonctionnement du système global. Nous avons adopté la méthode de changement de configuration. Le fonctionnement se fait au fil du soleil. Nous contrôlons le fonctionnement du système photovoltaïque afin que la charge puise le maximum de puissance du SCA. Il est montré par les résultats pratiques obtenus que le fonctionnement du système est optimisé, d'où un bon usage des cellules photovoltaïques.

REFERENCES

- [1] L. Protin et S. Astier, 'Convertisseurs Photovoltaïques', Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie Electrique, D3-360, pp. 1 - 18.
- [2] F.Z. Zerhouni, 'Adaptation Optimale d'une Charge à un Générateur Photovoltaïque', Mémoire de Magister, Institut d'Electronique, USTO, 1996.
- [3] K. Khouzam, 'Optimum Load Matching in Direct Coupled PV Power Systems - Application to Resistive Loads', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, N°2, pp. 265 - 270, June 1990.
- [4] F.Z. Zerhouni, 'Etude de l'Influence de Différents Agents sur les Caractéristiques d'un Générateur Photovoltaïque', Revue Technologique et Scientifique 'COST', ENSET, N°4, Oran, Janvier 2006.
- [5] J. Appelbaum, 'The Operation of Loads Powered by Separate Sources or by a Common Source of Photovoltaic Cells', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, N°3, pp. 351 - 357, September 1989.
- [6] F.Z. Zerhouni, M. Zegrar et A. Midoun, 'Optimisation des Systèmes Photovoltaïques par Différentes Méthodes de Couplage', Bulletin de l'ENSET, N°5, Oran, Avril 1998.
- [7] V. Salas, E. Olias, A. Barrado and A. Lazaro, 'Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems', Solar Energy and Materials & Solar Cells, Vol. 90, pp. 1555 - 1578, 2006.
- [8] F.Z. Zerhouni, M.T. Benmessaoud et A. Boudghene Stambouli, 'Nouvelle Démarche d'Optimisation de Fonctionnement d'un Système Vert à Energie non Polluante', Conférence Internationale de Génie Electrique 'CIGE', Centre Universitaire de Béchar, Novembre 2006.
- [9] M. Enrique, E. Duran, M. Sidrach-de-Cardona and J.M. Andu, 'Theoretical Assessment of the Maximum Power Point Tracking Efficiency of Photovoltaic Facilities with Different Converter Topologies', Solar Energy, Vol. 81, pp. 31 - 38, 2007.
- [10] F.Z. Zerhouni, 'Contribution dans l'Amélioration du Fonctionnement d'un Système Photovoltaïque', International Conference, ICEL'05, USTMBO, 2005.
- [11] Z.M. Salameh and L. Chaozi, 'Optimum Switching Points for Array Reconfiguration Controller', 21st IEEE Photovoltaic Conference, pp. 971 - 976.
- [12] Z.M. Salameh, A.K. Mulpur and F. Dagher, 'Two Stage Electrical Array Reconfiguration Controller', Photovoltaic Energy, Vol. 44, pp. 51 - 55, 1990.