

Conception, modélisation et réalisation d'un système photovoltaïque de moyenne puissance

T. Mrabti¹, M. El Ouariachi¹, K. Kassmi¹, F. Olivié² et F. Bagui³

¹ Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences,
Département de Physique, 'LEPAS', Oujda, Maroc

² Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, 'LAAS/CNRS',
7 avenue du Colonel Roche, 31077, Toulouse, France

³ Ecole d'Ingénieurs, Centre d'Etudes Supérieures Industrielles, 'CESI',
Mont Saint Aignan, France

(reçu le 25 Septembre 2008 – accepté le 25 Décembre 2008)

Résumé - Dans cet article, nous analysons la conception, la modélisation et la réalisation d'un système photovoltaïque (PV) de moyenne puissance (100 W). Puisque la tension optimale à la sortie du générateur PV dépend très peu de l'éclairement, alors nous avons utilisé une commande MPPT de type 'Boucle d'asservissement de la tension', dont le rôle est de fixer la tension optimale à la sortie du générateur PV. Les résultats obtenus montrent que le système PV ainsi conçu et réalisé fonctionne dans les conditions optimales indépendamment des changements météorologiques et de la variation de la charge. Les différents résultats expérimentaux obtenus sont en très bon accord à ceux obtenus dans le simulateur Pspice.

Abstract - In this paper we have analyzed the design, the modelling and the realization of a photovoltaic system (PV) of average power (100 W). Since the optimal tension on the outlet side of generator PV depends very little on illumination, and then we used a MPPT command of the type 'Loops control of the voltage'. The results obtained show that system statement thus conceived and carried functions under the optimal conditions independently of the variations weather and the load. The various experimental results obtained are in very good agreement with those obtained in the Pspice simulator.

Mots clés: Energie renouvelable - Système photovoltaïque - Panneaux photovoltaïques - Point de puissance maximale PPM - Commande MPPT - Convertisseurs d'énergie DC-DC.

1. INTRODUCTION

L'énergie photovoltaïque (PV) est une source d'énergie renouvelable, inépuisable et non polluante. Pour qu'elle soit utilisée pour différentes applications et pour satisfaire les contraintes économiques, la conception et la réalisation des systèmes PV sont nécessaires et posent actuellement de nombreux problèmes. Le système PV réalisé doit être robuste, fiable et présentant un rendement élevé.

Les systèmes PV requièrent peu d'entretien, sont silencieux et ne produisent aucune émission de polluants (Miller *et al.*, 2001). Dans les systèmes PV, les générateurs produisent la puissance qu'exige l'application à réaliser (Iskander *et al.*, 2002). Actuellement, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques sont des problèmes d'actualité (Salameh *et al.*, 1991; Enslin *et al.*, 1992; Shraif, 2002; Kassmi *et al.*, 2007; Mrabti *et al.*, 2008). Ces systèmes PV, générateurs d'électricité, peuvent être exploités dans différents lieux: électrification des sites isolés, installation dans les bâtiments, raccordement direct au réseau,...

Le problème majeur d'utilisation des panneaux PV, c'est leur caractère non linéaire (Kassmi *et al.*, 2007). Le module PV possède un point de fonctionnement optimum, appelé le point de puissance maximale (PPM) dépendant de l'intensité d'éclairement (Kassmi *et al.*, 2007; Knof *et al.*, 1999; Hussein *et al.*, 1995; Charles *et al.*, 1993; Aziz *et al.*, 2004). L'adaptation des panneaux PV à la charge s'avère donc nécessaire pour extraire du module PV le maximum de puissance. Ceci est effectué par le biais des convertisseurs d'énergies DC-DC contrôlés par une commande appelé commande MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) (Salameh *et al.*, 1991; Enslin *et al.*, 1992; Shraif, 2002; Kassmi *et al.*, 2007; Knof *et al.*, 1999; Hussein *et al.*, 1995).

Dans Salameh *et al.*, 1991; Enslin *et al.*, 1992; Knof *et al.*, 1999, des commandes MPPT analogique et numérique ont été proposées. Ces commandes sont caractérisées par leurs coûts élevés et des difficultés de réalisation. Puisque, la tension optimale des générateurs PV dépend très peu de l'éclairement, une commande MPPT simple de type 'Boucle d'asservissement de la tension' pourrait, au cours d'une journée, maintenir la tension à la sortie du générateur PV à sa valeur optimale et donc à la puissance optimale.

Dans cet article, nous analysons l'adaptation des modules SP75 (<http://sunwize.com>; Aziz *et al.*, 2006) par le convertisseur DC-DC Boost en fonction de l'éclairement et de la charge. Ensuite, nous examinons l'adaptation de ces modules à partir de la commande MPPT de type 'Boucle d'asservissement de la tension', conçue et réalisée au cours de ce travail. Les différents résultats obtenus seront validés par les résultats obtenus à partir du simulateur Pspice.

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1 Système photovoltaïque

Sur la figure 1, est représenté le schéma synoptique d'un système PV. Ce système est formé par:

- un générateur PV (module SP75), symbolisé dans Orcad-Pspice (Aziz *et al.*, 2006),
- un convertisseur d'énergie DC-DC de type Boost (Shraif, 2002; Kassmi *et al.*, 2007), fonctionnant à une fréquence de 10 kHz. L'interrupteur est un transistor MOSFET IRF540, commandé par un signal de rapport cyclique (α) variable et de fréquence 10 kHz.
- une commande MPPT de type 'boucle d'asservissement de la tension' dont le rôle est de fixer instantanément la tension optimale à la sortie du générateur PV. Ceci est réalisé en variant, d'une manière automatique, le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur IRF540 du convertisseur.
- une charge résistive de valeur variable.

2.2 Analyse du fonctionnement du système PV dans Orcad-Pspice

2.2.1. Influence du rapport cyclique sur le fonctionnement du convertisseur Boost

Nous avons implanté le système PV de la figure 1 dans Pspice, puis analysé son fonctionnement en fonction de l'éclairement et du rapport cyclique α . Sur la figure 2, nous avons représenté les résultats typiques concernant la puissance électrique à l'entrée et à la sortie du convertisseur boost. Il apparaît que:

- les puissances électriques sont sensibles aux variations de l'éclairement et du rapport cyclique. Pour un rapport α donné, elles augmentent avec l'éclairement.

- lorsque le rapport cyclique augmente, le point de fonctionnement du générateur PV se déplace des conditions du circuit ouvert vers celles du court circuit.
- pour un éclairement donné, lorsque le rapport cyclique augmente les puissances à la sortie du générateur PV et à la sortie du convertisseur passent par un maximum. Lorsque l'éclairement varie de 200 W/m^2 à 1200 W/m^2 , le rapport cyclique optimal varie de 0.3 à 0.75. Lorsque l'éclairement est de 1000 W/m^2 , ce rapport cyclique est de l'ordre de 0.73. Aussi, à partir des tracés de la figure 2, nous estimons la valeur du rendement du convertisseur boost à 95 %.

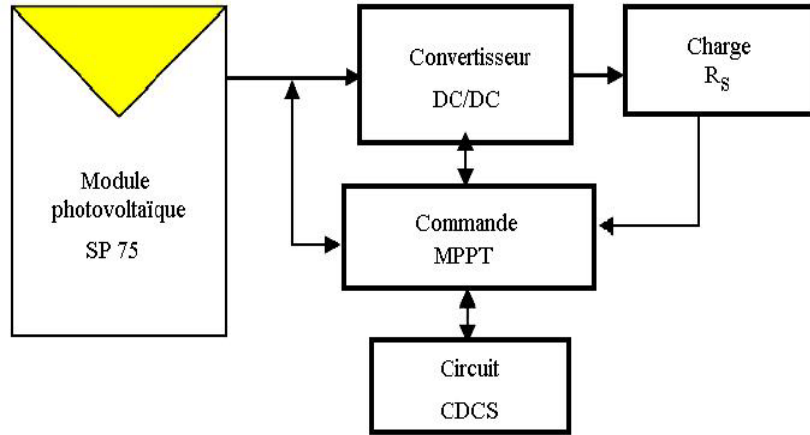


Fig. 1: Schéma synoptique d'un système PV adapté par un convertisseur DC-DC

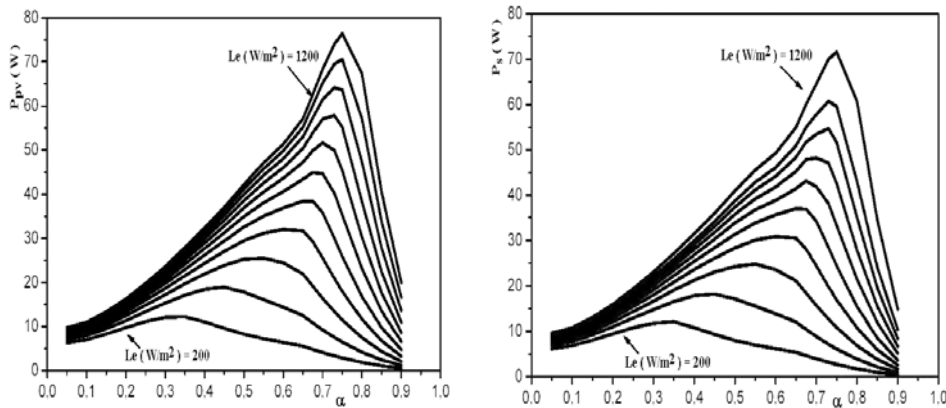


Fig. 2: Influence du rapport cyclique α et de l'éclairement Le sur les puissances électriques (P_{pv} , P_s) à l'entrée et à la sortie du convertisseur boost

Les courbes comprises entre 200 W/m^2 et 1200 W/m^2 correspondent à celles dont l'éclairement (W/m^2) est: 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 et 1100.

2.2.2 Fonctionnement optimal du générateur PV

A partir de la figure 2, nous avons déterminé les caractéristiques optimales du générateur PV en fonction de l'éclairement: la tension (V_{opt}) et la puissance (P_{max}). Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 3. Il apparaît que:

- lorsque l'éclairement varie de 300 W/m^2 à 1000 W/m^2 , la tension optimale est pratiquement constante et elle est de l'ordre de 15 V .
- la puissance P_{max} augmente avec l'éclairement. Lorsque l'éclairement est de l'ordre de 1000 W/m^2 , la puissance P_{max} est de 65.305 W . Pratiquement 10 à 15 % de puissance est perdue, suite aux dégradations des panneaux SP75 (Kassmi *et al.*, 2007).

Donc, puisque la tension optimale du générateur PV varie très peu avec l'éclairement. Nous pouvons considérer qu'au cours d'une journée, la tension optimale est de l'ordre de 15 V . Une commande MPPT dont le rôle est de fixer instantanément la tension du générateur PV à la tension 15 V peut être envisagée.

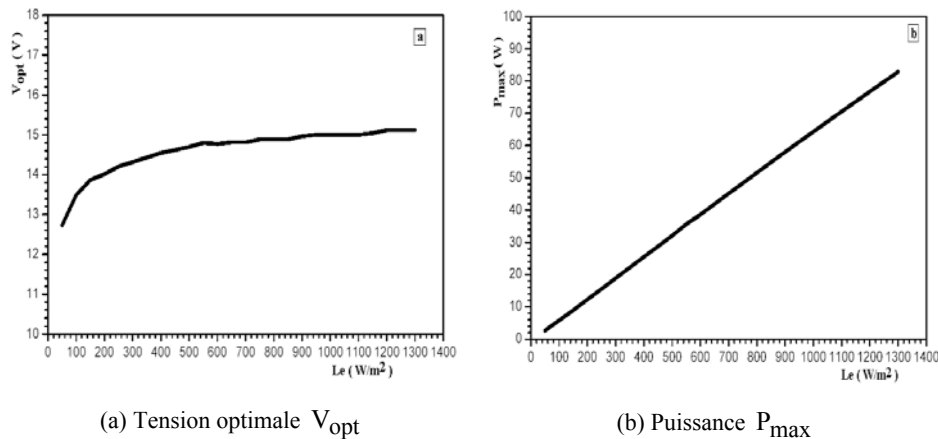


Fig. 3: Fonctionnement optimal du générateur PV SP75 en fonction de l'éclairement

2.2.3 Conception et simulation électrique d'un système PV

Le schéma synoptique du système PV complet ainsi implanté dans Pspice est représenté sur la figure 4. La régulation de la puissance fournie par le générateur PV est réalisée par la commande MPPT de type boucle d'asservissement, dont le rôle est de réguler la tension de sortie du générateur PV à la valeur 15 V .

Les différents blocs de cette commande sont:

- un amplificateur de différence qui calcule l'erreur entre la tension réelle aux bornes du panneau solaire et une tension de référence (15 V);
- un amplificateur non inverseur de gain K qui amplifie l'erreur;
- un amplificateur inverseur qui change le signe de l'erreur. En effet, si la tension aux bornes du panneau tend vers une augmentation, la sortie de cet amplificateur évolue dans le sens inverse pour diminuer cet effet et vis versa;
- un intégrateur RC, de constante de temps τ_0 , qui fournit à sa sortie une tension lentement variable;
- un comparateur qui compare la tension lentement variable (intégrateur RC) à un signal triangulaire de fréquence 10 kHz pour générer un signal modulé en largeur

d'impulsion et de fréquence 10 kHz. Ce signal est injecté sur la grille du transistor MOSFET du convertisseur à travers un driver de MOS.

Sur la figure 5, nous avons représenté les puissances typiques à l'entrée et à la sortie du convertisseur Boost en tenant compte de la commande MPPT. Les différents paramètres de cette commande sont calculés pour réguler la tension à la sortie du générateur PV à la valeur 15V.

Les résultats obtenus montrent que:

- le système converge vers les conditions optimales au bout de 45 ms,
- les grandeurs électriques oscillent autour de leurs valeurs optimales: la puissance d'entrée (sortie) du convertisseur oscille autour de 64 W (56 W).

Aussi, nous avons vérifié que la tension d'entrée (sortie) du convertisseur oscille autour de 15 V (55 V), et le courant d'entrée (sortie) du convertisseur oscille autour de 4.13 A (1.1 A).

Pour s'assurer de la convergence du système autour des conditions optimales, nous avons vérifié qu'à la sortie du comparateur, le signal obtenu a une fréquence de 10 kHz et un rapport cyclique de 0.72. Cette dernière valeur est en bon accord à celle obtenue lors de l'analyse du fonctionnement optimal du convertisseur boost (Fig. 2). Ceci montre bien le fonctionnement optimal du système PV.

Donc, la commande MPPT utilisée régule bien le fonctionnement du générateur PV autour des conditions optimales. Les oscillations obtenues dépendent fortement de la constante du temps τ_0 : lorsque τ_0 augmente (diminue), le système devient lent (rapide) et l'amplitude des oscillations diminue (augmente).

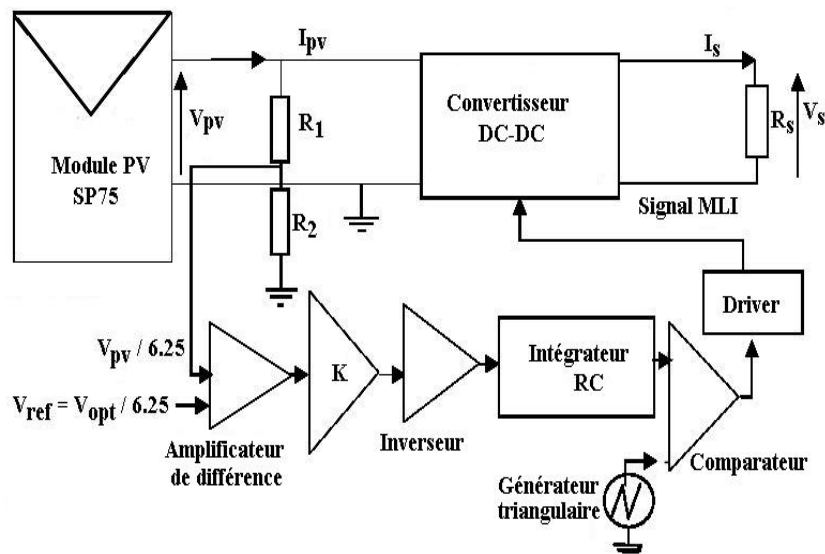


Fig. 4: Schéma du système photovoltaïque complet implémenté dans Orcad-Pspice (R_1 et R_2 , résistances permettant de prélever une fraction de la tension V_{pv})

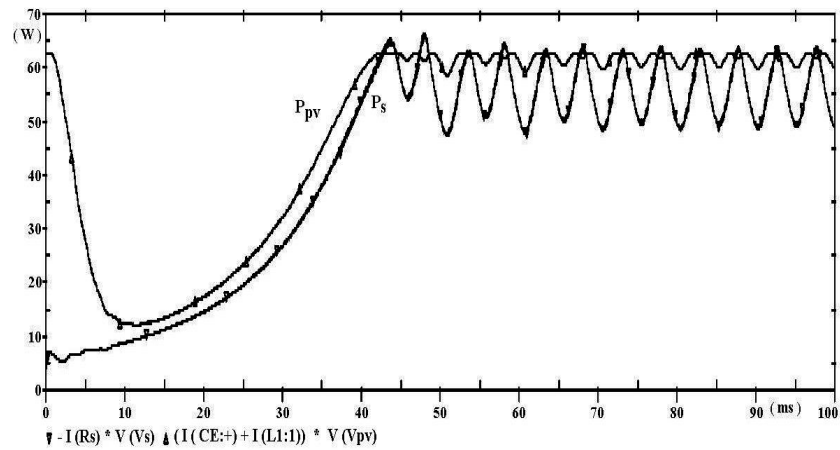


Fig. 5: Simulation dans Orcad-Pspice des puissances électriques à l'entrée (P_{pv}) et à la sortie (P_s) du convertisseur

$$L_e = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot \tau_0 : 4.7 \text{ k}\Omega * 10 \text{ }\mu\text{F} = 47.0 \text{ ms}$$

2.3 Résultats expérimentaux

2.3.1 Procédures expérimentales

Les panneaux PV (SP75) utilisés et le banc de mesure sont ceux représentés sur les figures 6 et 7. Les différents blocs du système (Convertisseur, commande MPPT) ont été réalisés sur des maquettes d'essai (Fig. 8).



Fig. 6: Panneaux photovoltaïques SP75 installés à la Faculté des Sciences d'Oujda



Fig. 7: Banc de mesure mis en place pour caractériser les panneaux et les systèmes photovoltaïques

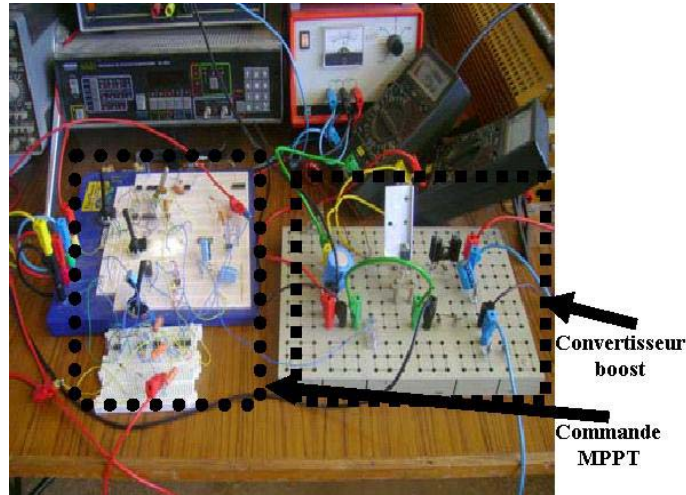


Fig. 8: Convertisseur boost et commande MPPT
'Boucle d'asservissement de la tension'

2.3.2 Système photovoltaïque régulé par la commande MPPT

Afin de valider les résultats de simulation dans Pspice et de monter la régulation de la puissance électrique fournie par le générateur photovoltaïque, nous avons réalisé le système PV proposé en la figure 4. Nous avons fixé les paramètres de la commande MPPT pour qu'elle asservisse la tension du générateur photovoltaïque à la valeur 15 V. Les différentes mesures sont effectuées lors d'une journée où l'éclairement est de 850 W/m² (Kassmi *et al.*, 2007).

Sur les figures 9 et 10, nous avons représenté les formes d'onde typique des tensions à l'entrée et à la sortie du convertisseur, ainsi que le signal commandant l'interrupteur du convertisseur pour une charge de 50 Ω. Il apparaît que la commande MPPT converge instantanément le système photovoltaïque vers les conditions optimales et que toutes les grandeurs électriques oscillent autour des valeurs optimales. La tension d'entrée (sortie) du convertisseur oscille autour de 15 V (45 V), et la valeur du rapport cyclique oscille autour de la valeur 0.6875.

Sur le même système photovoltaïque, nous avons mesuré les courants à l'entrée (I_{pv}) et à la sortie (I_s) du convertisseur, et déduire les puissances à l'entrée (P_{pv}) et à la sortie du système (P_s) de ce convertisseur. Les résultats obtenus sont:

$$I_{pv} = 2.99 \text{ A}, \quad I_s = 0.91 \text{ A}, \quad P_{pv} = 53 \text{ W}, \quad P_s = 47 \text{ W}$$

A partir des puissances expérimentales, nous avons déduit le rendement du convertisseur. Lorsque la charge varie de 10 Ω à 50 Ω, il est satisfaisant et il est égal à 90 %.

La comparaison de l'ensemble de résultats à ceux obtenus dans Orcad-Pspice, nous déduisons d'une part un très bon accord entre l'expérience et la simulation, et d'autre part le bon fonctionnement de la commande MPPT. En conséquence, le système photovoltaïque conçu, au cours de ce travail, permet bien d'optimiser le fonctionnement électrique du générateur photovoltaïque.

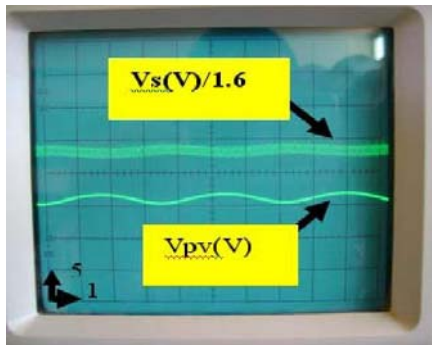


Fig. 9: Tension à l'entrée (V_{pv}) et à la sortie (V_s) du convertisseur boost
 $L_e=850 \text{ W/m}^2$
 $\tau_0 = 10\mu\text{F} \times 4.7\text{k}\Omega = 47 \text{ ms}$

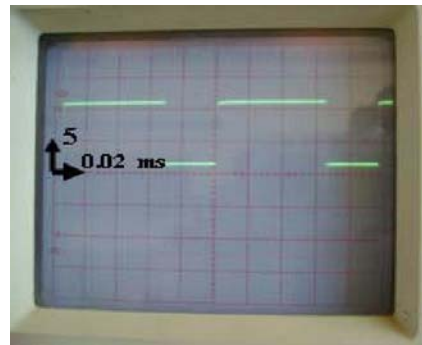


Fig. 10: Forme d'onde du signal commandant l'interrupteur IFR540 du convertisseur boost $L_e=850 \text{ W/m}^2$
 $\tau_0 = 10\mu\text{F} \times 4.7\text{k}\Omega = 47 \text{ ms}$

3. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons montré que la commande MPPT conçu au cours de ce travail effectue correctement son rôle. Elle régule la puissance fournie par le générateur photovoltaïque à sa valeur optimale. Les mesures des différentes grandeurs électriques montrent que la tension à la sortie du panneau est de 15 V et la puissance est optimale et elle est égale à 56 W. Aussi, le rendement du convertisseur boost est de 90 %. Les différents résultats obtenus sont en très bon accord à ceux simulés dans Orcad-Psice.

L'ensemble des résultats obtenus montre que le système photovoltaïque conçu et réalisé dans ce travail peut être utilisé dans une installation afin d'optimiser le fonctionnement des générateurs photovoltaïques.

Remerciements

Ce travail est supporté par:

- le Programme Thématique d'Appui à la Recherche Scientifique (PROTARS III), N°D43/06.
- la Coopération Marocco - Belge, 'Commission Universitaire pour le Développement, CUD', Energies renouvelables (Photovoltaïque).
- le Programme Global de Recherche de l'Université Mohammed Premier d'Oujda, PGR.

REFERENCES

- [1] T. Mrabti, M. El Ouariachi, K. Kassmi, F. Olivié and F. Bagui, 'Amélioration Du Fonctionnement des Systèmes Photovoltaïques suite aux Brusques Variations des Conditions Météorologiques et de la Charge', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°1, pp. 107 - 117, 2008.
- [2] A. Aziz, Ka. Kassmi, K. Kassmi, F. Olivié, R. Maimouni, G. Sarrabayrouse et A. Martinez, 'Modélisation des Panneaux Solaires dans l'Environnement Orcad', CDROM du Deuxième Congrès Francophone MAJECSTIC'04, Calais, France, 13 - 15 Octobre 2004.

- [3] A. Aziz, K. Kassmi, R. Maimouni, F. Olivié, G. Sarrabayrouse and A. Martinez, 'Symbolization of the Electric Diagram of the Marketed Solar Panels in the Orcad - Pspice Environment', Moroccan Journal of Condensed Mater, Vol. 7, N°1, pp. 38 - 41, Jan. 2006,
- [4] R. Charles, Sullivan and J.P. Matthew, 'High-Efficiency Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays in a Solar-Powered Race Vehicle', Proceedings of the 1993 IEEE 24th Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, pages 574 - 580, Seattle, WA, USA, June 1993. IEEE, IEEE Piscataway, NJ, USA.
- [5] J.H.R. Enslin, 'Maximum Power Point Tracking: a Cost Saving Necessity in Solar Energy Systems', Renewable Energy, Vol. 2, N°6, pp. 543 - 549, 1992.
- [6] K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino and M. Osakada, 'Maximum Photovoltaic Power Tracking: an Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions', IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 142, N°1, pp. 59 - 64, Jan. 1995.
- [7] http://sunwize.com/info_center/pdfs/shell_SP75_PC.pdf.
- [8] C.Y. Iskander, 'Recent Developments of Applying Solar Photovoltaic Technologies in Malta', Proceedings of the 'Enemalta' 25th Anniversary Conference on Energy Efficiency, Mediterranean Conference Centre, 18th-19th October, Valetta, Malta, 2002.
- [9] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, 'Caractérisation des Panneaux Photovoltaïques. Conception et Optimisation d'un Système Photovoltaïque pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire', Energies Renouvelables, Edité par l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la culture, Bureau de l'UNESCO à Rabat, Morocco, 2005.
- [10] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, 'Conception, Optimisation et Réalisation des Systèmes Photovoltaïques pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire', Maîtrise de l'Energie dans la Construction et la Rénovation des Bâtiments, Centre d'Etudes Supérieures Industrielles, 'CESI', Rouen, France, 8 Novembre 2007.
- [11] H. Knopf, 'Analysis, Simulation and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle', Thesis, Portland State University, 1999.
- [12] C. Miller and P.N. Edwards, 'Changing the Atmosphere Expert Knowledge and Environmental Governance', Cloth / June 2001.
- [13] Z.M. Salameh, F. Dagher and W.A. Lynch, 'Step-Down Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems', Solar Energy, Vol. 46, N° 4, pp. 279 - 282, 1991.
- [14] M.F. Shraïf, 'Optimisation et Mesure de Chaîne de Conversion d'Energie Photovoltaïque en Energie Electrique', Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 2002.