

Conception et réalisation d'un système photovoltaïque muni d'une commande MPPT numérique

Mohamed Faysal Yaden, Mostafa El Ouariachi, Tarik Mrabti ,
Kamal Kassmi, Belkassem Tidhaf, Elhassane Chadli et Khalil Kassmi*

Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences, Laboratoire LEPAS, Oujda, Maroc

(reçu le 15 Novembre 2010 – accepté le 25 Juin 2011)

Résumé – *Le travail présenté dans ce papier concerne la conception et la réalisation d'un système photovoltaïque, muni d'une commande MPPT numérique. Plus particulièrement, nous présentons le fonctionnement et l'amélioration des performances d'un système PV adapté par une commande MPPT numérique, suites aux brusques variations des conditions radiométriques (éclairagements,...) et de la charge. Ceci est obtenu par l'implémentation d'une commande MPPT extrémale numérique à base d'un microcontrôleur PIC. Le rôle de cette commande est de suivre le point de puissance maximale (PPM) du module photovoltaïque indépendamment à des perturbations du système (variation de l'éclairement,...). Nous avons expérimenté ce système réalisé pendant des journées nuageuses, où l'éclairement présente des variations brusques. Les résultats obtenus montrent l'oscillation instantanée du point de fonctionnement du module photovoltaïque autour du PPM indépendamment à des variations de l'éclairement. Le bon fonctionnement du convertisseur DC-DC Boost (rendement de l'ordre de 90 %) et les faibles pertes de puissances fournies par ce module (inférieures à 10 %) nous ont permis de conclure le bon fonctionnement et les performances satisfaisantes du système PV réalisé au cours de ce travail.*

Abstracts - *The work presented in this paper concerns the conception and the realization of a photovoltaic system (PV) provided with a digital MPPT command. Particularly, we present the functioning and the improvement of the performances of a photovoltaic system adapted by a digital MPPT command further to the sudden variations of the weather conditions (irradiation,...) and the load. This is obtained by the implementation of a extremal digital MPPT command (microcontroller PIC). The role of this command MPPT is to follow the maximal power point (MPP) of the PV module independently to disturbances of the system (variation of the irradiation). We have experimented the PV system during days, when the irradiation presents sudden variations. The obtained results show the oscillation of the panel functioning point around the MPP independently of the irradiation variations. The good functioning of the DC-DC converter (in order of 90 %) and the low energy power losses by the panel PV (lower than 10 %) allowed us to conclude the good functioning and satisfactory performances of the PV system realized in this work.*

Mots clés: Energies renouvelables (photovoltaïque) - Systèmes photovoltaïques - Point de puissance maximale (PPM) - Microcontrôleur PIC - MPPT numérique - Algorithme MPPT extrémale - Convertisseur DC-DC.

1. INTRODUCTION

Avec le développement industriel, le problème de l'insuffisance d'énergie est de plus en plus aggravant. Les technologies du système photovoltaïque (PV) se développent rapidement et ont un rôle croissant dans la technologie électrique et se

* khkassmi@yahoo.fr

considère comme l'énergie verte du nouveau siècle. Actuellement, des travaux sont réalisés sur les cellules (ou modules) et sur les systèmes PV afin d'améliorer les performances électriques des panneaux PV et réduire les pertes d'énergies dans les installations PV [1-3]. Ceci réduit considérablement le coût des installations PV et encourage les citoyens à utiliser l'énergie verte.

La cellule (ou module) photovoltaïque a un point de puissance maximale (PPM) qui varie en fonction de l'ensoleillement et de la température [3]. Ceci est obtenu par le biais des commandes MPPT, 'Maximum Power Point Tracking' analogiques ou numériques [4-9].

Un nombre important de systèmes de contrôle MPPT ont été élaborées depuis des années, en commençant par des techniques simples comme la tension ou le courant [10]. Actuellement, des commandes MPPT, analogiques et numériques, sont proposées [2-9]. Dans le cas des commandes MPPT analogiques, se pose le problème de la divergence de l'encombrement des composants électronique utilisés [5-9].

Dans le cas des commandes MPPT numériques, plusieurs algorithmes ont été utilisés dans la littérature [1, 2] à savoir: la méthode de la conductance incrémentale, 'I.C.' [11], la méthode de la logique floue (Fuzzy Logic Control) [12], celle à base des réseaux de neurones (Neural Network) [13] et la méthode perturbation et observation (P&O) traditionnelle qui présente des problèmes de précisions sur la régulation autour du PPM [14].

Dans ce cadre, l'équipe 'Composants Electroniques, Energies Renouvelables CEER' du Laboratoire LEPAS, vise à concevoir, réaliser et améliorer les performances des systèmes PV pour les deux types de commandes MPPT (analogique et numérique).

Une implémentation analogique de cette commande a été mise au point et testé. Les qualités du suivi du PPM et du rendement du système PV global ont été démontrées expérimentalement indépendamment aux variations de l'éclairement et de la charge [7-9].

Dans ces derniers travaux, nous avons conçu et réalisé un prototype qui tient compte de la détection du dysfonctionnement et de convergence du système PV autour du PPM sans le redémarrer [15]. Par contre, ce type de commande analogique présente quelques inconvénients:

- Coût élevé de la commande MPPT analogique,
- Niveau d'encombrement élevé de composants utilisés,
- Consommation de la commande,
- Difficulté de la maintenance et la mise à jour du circuit.

Ainsi, afin de contourner ces inconvénients, une solution numérique a été étudiée dans l'équipe CEER en se basant sur un microcontrôleur PIC. L'objectif est la réalisation électronique, d'une commande MPPT extrême numérique basée sur la commande analogique déjà développé par l'équipe. La méthode employée dans cette commande est celle de perturbation et observation (P&O), vue la facilité de sa mise en œuvre et sa réaction rapide.

Dans ce travail, nous montrons la faisabilité d'un système PV muni de cette commande MPPT numérique extrême. Nous montrons la possibilité de poursuivre le PPM indépendamment à des variations des conditions radiométriques, météorologiques et de la charge. Une attention particulière sera attachée à la précision de la recherche du PPM.

2. SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Pour qu'un module photovoltaïque fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie DC-DC. Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le PPM du panneau PV [1-3]. La figure 1 représente le schéma synoptique du système PV qui comprend les blocs suivants:

- Un module photovoltaïque, constitué de 36 cellules, délivrant dans les conditions standard de test 'CST', une puissance de 65 W, un courant de 4 A sous une tension optimale de 13.2 V [3].
- Un quadripôle d'adaptation, qui est un convertisseur d'énergie DC-DC de type 'boost' pour des applications nécessitant des tensions supérieures à celle optimales (Fig. 2) [3]. Les éléments constituant ce quadripôle (Inductance L, capacités Ce et Cs, diode de roue libre DI, transistor MOSFET) sont dimensionnés pour que le convertisseur fonctionne à une fréquence de hachage de 10 kHz [6-9].
- Une commande MPPT numérique permettant de suivre le PPM du panneau PV, par variation automatique du rapport cyclique du signal commandant l'interrupteur du convertisseur (signal PWM).

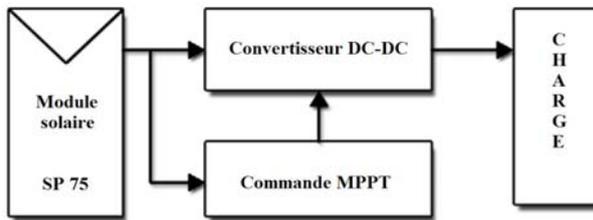


Fig. 1: Schéma synoptique du système PV adapté par un convertisseur DC/DC muni d'une commande MPPT numérique

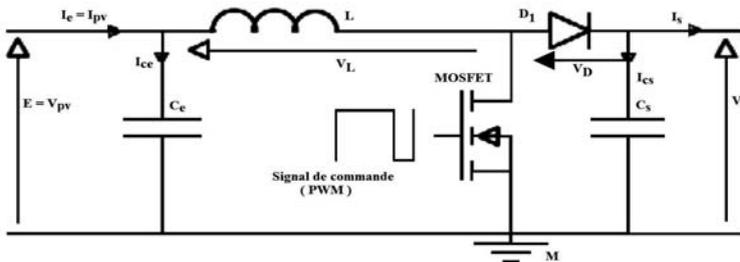


Fig. 2: Structure du convertisseur d'énergie DC-DC de type Boost

3. OPTIMISATION DES MODULES

La modélisation fine du fonctionnement électrique des modules photovoltaïques est indispensable dans le domaine de l'énergie PV. Ceci est nécessaire afin de concevoir et de réaliser les systèmes photovoltaïques adéquats permettant la poursuite du PPM.

Dans les travaux présentés dans [3], nous avons analysé d'une manière approfondie le fonctionnement électrique des modules (Fig. 3) au silicium actuellement commercialisés en fonction de l'éclairement et de la température. Plus particulièrement,

nous avons étudié, à partir du banc de mesure entièrement automatisé (Fig. 4), le modèle électrique, le PPM et le vieillissement des modules photovoltaïques.

Les résultats obtenus montrent que les grandeurs électriques optimales du module dépendent de l'éclairement. Lorsque l'éclairement varie de 300 W/m^2 à 1000 W/m^2 , la tension optimale V_{opt} des modules photovoltaïques varie de 14 % (Fig. 5).



Fig. 3: Modules photovoltaïques SP75 installés à la Faculté des Sciences d'Oujda



Fig. 4: Banc de mesure mis en place: Caractérisation modules et systèmes PV

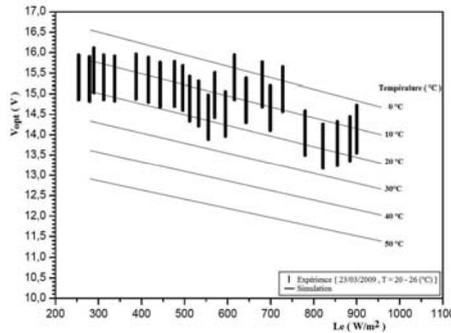


Fig. 5: Tension optimale du module PV (V_{opt}) en fonction de l'éclairement et de la température

4. SYSTEME PV MUNI D'UNE COMMANDE MPPT NUMERIQUE MANUELLE

4.1 Description et fonctionnement du microcontrôleur

Dans ce paragraphe, nous décrivons la structure et le fonctionnement du microcontrôleur qui constitue la commande MPPT numérique. Celui-ci commande manuellement l'interrupteur de puissance du convertisseur DC-DC. Ceci permettra de s'assurer d'une part du bon fonctionnement du convertisseur DC-DC et d'autre part de la recherche du point de puissance maximale par le microcontrôleur.

Le schéma synoptique du microcontrôleur (PIC) qui a fait l'objet de notre étude est représenté sur la figure 6. Les différents modules du PIC utilisés pour cette étude sont:

- Le module CAN, permettant la conversion de 8 entrées analogiques en numérique avec une résolution de 10 bits.

- Le module PWM, servant à générer un signal modulé en largeur d'impulsion (PWM), dont le rapport cyclique (α) est modifiable par le programme du PIC.

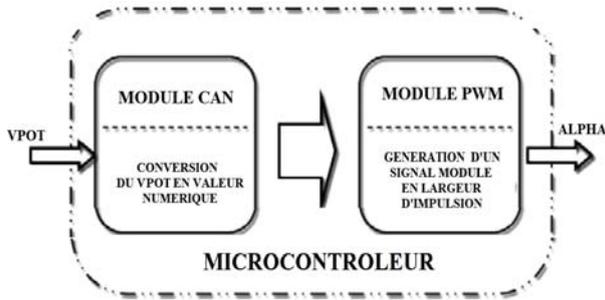


Fig. 6: Schéma synoptique des modules utilisés dans le microcontrôleur

4.2 Schéma synoptique du système

La commande manuelle numérique conçue au cours de ce travail a pour rôle la génération d'un signal PWM du PIC, commandant le convertisseur DC-DC, à partir d'une tension de référence contrôlée par un potentiomètre (Fig. 7). Les principaux blocs qui constituent cette commande ainsi que le système PV sont :

- Un variateur de tension de référence (potentiomètre). Il fournit une tension de référence qui va être exploitée par le microcontrôleur comme paramètre d'entrée.
- Un microcontrôleur PIC qui va exécuter un programme dont l'algorithme est le suivant:
 - L'acquisition de la tension de référence par le Port A.
 - La conversion de la valeur de la tension en une valeur numérique par le module CAN du microcontrôleur.
 - La génération d'un signal PWM, dont le rapport cyclique varie en fonction de la tension fournie par le potentiomètre, par le Port C.
- Un étage d'amplification qui amplifie le signal PWM généré à la sortie du microcontrôleur.
- Un Driver qui améliore la forme du signal fourni par l'amplificateur afin d'avoir un signal PWM pratiquement rectangulaire.

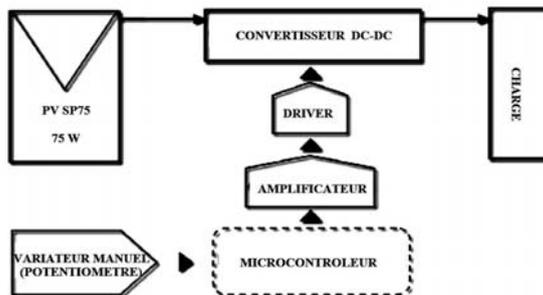


Fig. 7: Schéma synoptique de la commande manuelle numérique du système PV

4.3 Résultat de simulation

Nous avons simulé le fonctionnement du PIC et celui du système de la figure 7 dans le progiciel de simulation de circuits électroniques et les dispositifs programmables

‘Proteus Isis’. En variant les niveaux de la tension appliquée au PIC, nous avons simulé le signal généré à la sortie PWM.

Les résultats obtenus (Fig. 8), pour une tension V_{pot} donnée, montrent un signal rectangulaire de fréquence 10 kHz, de rapport cyclique de l’ordre de 0.6 et d’amplitudes 4.6 V à la sortie du PIC (Fig. 8 A). Afin d’atteindre des niveaux importante, nous avons inséré entre le PIC et le Driver un amplificateur.

Les résultats obtenus montrent bien des amplitudes améliorées: 5.8V à la sortie de l’amplificateur (Fig. 8 B) et 9.4 V à la sortie du Driver (Fig. 8 C). L’amplitude de ce dernier signal est largement suffisante pour commander l’interrupteur du convertisseur DC-DC à la fermeture et à la l’ouverture [7-9].



Fig. 8: Signal PWM généré: par le PIC (A), à la sortie de l’amplificateur (B) et à la sortie du driver (C)

4.4 Résultats expérimentaux

Nous avons expérimenté le système photovoltaïque, représenté à la figure 7, en fonction de l'éclairement (Fig. 9). Nous avons analysé le fonctionnement du PIC, pour un éclairement donnée ($L_e = 700 \text{ W/m}^2$) en variant la tension V_{pot} appliquée au PIC.

Les formes typiques concernant le signal PWM à la sortie du PIC, de l'amplificateur et du Driver sont représentées sur la figure 10. Il apparaît un signal rectangulaire de fréquence de l'ordre de 10 kHz et d'amplitude 4.6V à la sortie du PIC, 5.8 V à la sortie de l'amplificateur et 10 V à la sortie du Driver. La forme de ces signaux est en très bon accord à ceux simulés dans 'Proteus Isis' (Fig. 8).

Pour s'assurer du bon fonctionnement du convertisseur DC-DC nous avons relevé les signaux typiques (Figure 11): PWM généré par le PIC, supportées par l'inductance et la diode, à l'entrée et à la sortie du convertisseur.



Fig. 9: Photo de la commande manuelle numérique expérimentée au laboratoire

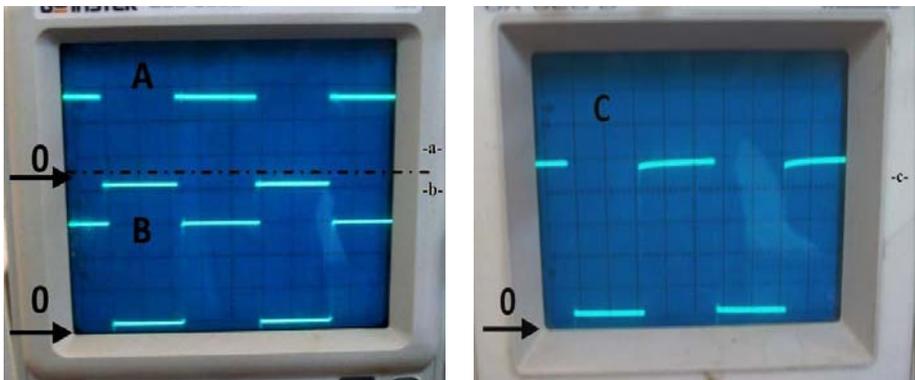


Fig. 10: Signal PWM expérimental, généré par:
le PIC (A), l'amplificateur (B) et le driver (C)
(Echelles : 2 V/Div, 20 $\mu\text{s}/\text{Div}$)

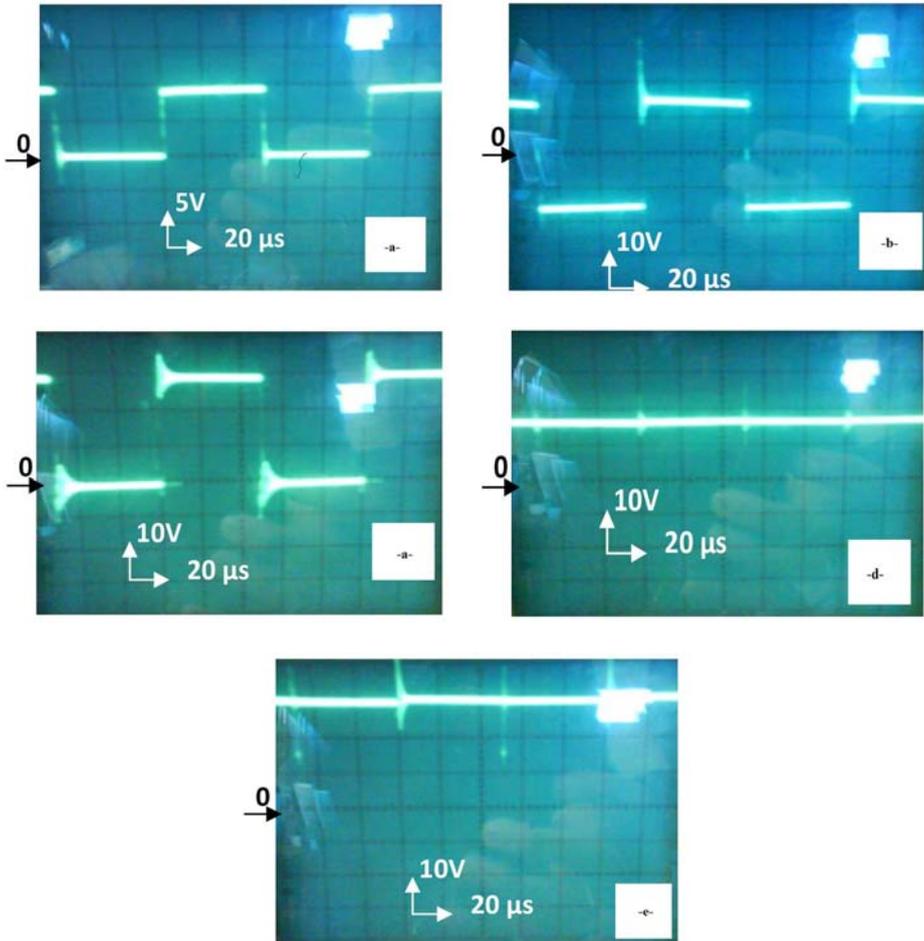


Fig. 11: Signal expérimental: PWM (-a-), aux bornes de l'inductance (-b-), aux bornes de la diode (-c-), à l'entrée du convertisseur DC-DC (V_{pv} , -d-), à la sortie du convertisseur DC-DC (V_s , -e-), $R_s = 25 \Omega$, $T = 25^\circ C$

Les résultats obtenus montrent que:

- le PIC génère un signal rectangulaire de fréquence de l'ordre de 10 kHz et de rapport cyclique α de 50 %.
- lorsque l'interrupteur est ouvert (PWM à l'état bas): l'inductance restitue son énergie à la charge, {la différence de potentiel aux bornes est celle entre le panneau et la charge ($V_{pv} - V_s = -15 V$)}.

Pendant cette phase, la diode est conductrice et la différence de potentiel aux bornes est celle de seuil (0.3 V).

- lorsque l'interrupteur est fermé (PWM à l'état haut), l'inductance stocke de l'énergie fournie par le module PV, (la différence de potentiel aux bornes est pratiquement celle du module 15 V).

Pendant cette phase, la diode est bloquée (la différence de potentiel aux bornes est $V_D = -30\text{ V}$).

- les tensions du panneau et de la charge se stabilisent aux valeurs 15 V et 30 V. Ceci vérifie bien la relation régissant le fonctionnement du convertisseur Boost:

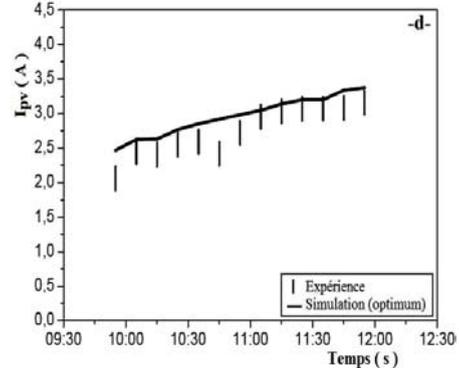
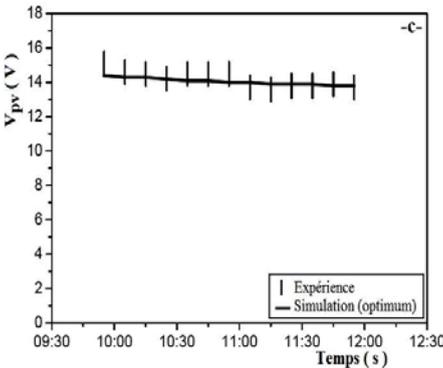
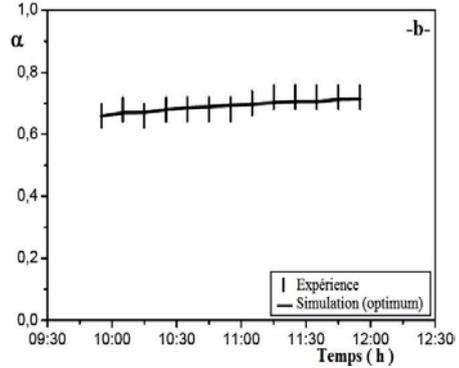
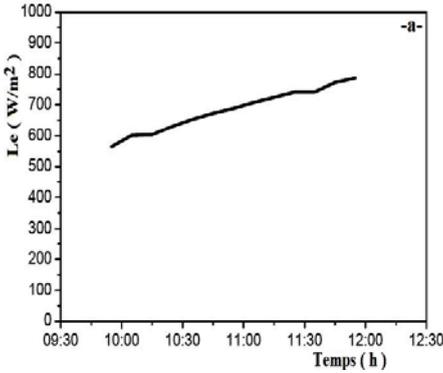
$$V_s = V_{ps} / (1 - \alpha) \tag{1}$$

Aussi, les mesures des courants à l'entrée ($I_{pv} = 2.42\text{ A}$) et à la sortie ($I_s = 1.13\text{ A}$) vérifie bien la relation:

$$I_s = I_{pv} \times (1 - \alpha) \tag{2}$$

Par ailleurs, nous avons expérimenté le système pendant une demi-journée. Après chaque ajustement de la tension V_{pot} du PIC afin d'optimiser le fonctionnement du panneau PV, nous avons relevé l'éclairement, le rapport cyclique du signal PWM, ainsi que les grandeurs électriques à l'entrée et à la sortie du convertisseur DC-DC.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 12. Sur les figures {12 (-b-)} à {12 (-f-)}, nous avons tracé les résultats de simulation (optimum) obtenus dans Pspice. Il apparaît d'une part un très bon accord entre l'expérience et la simulation, et d'autre part un rendement du convertisseur DC-DC très satisfaisant qui de l'ordre de 90%. En conséquence le PIC permet bien la régulation et l'optimisation de la puissance fournie par le module photovoltaïque.



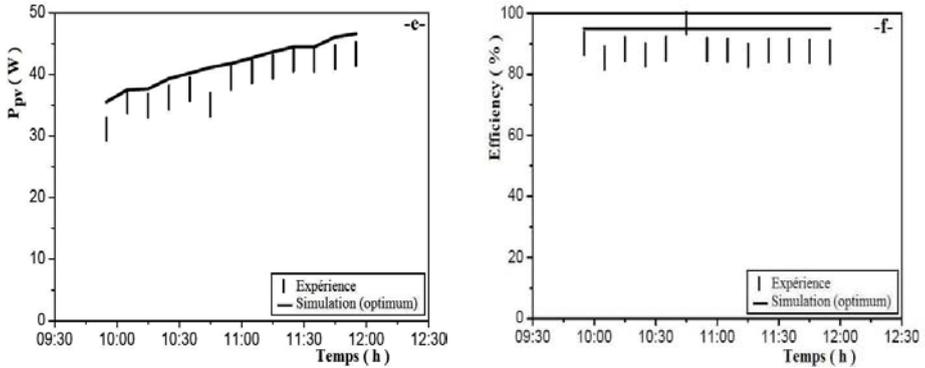


Fig. 12: Relevé des données: de l'éclairement (-a-), du rapport cyclique expérimental et simulé (-b-), des grandeurs électriques optimales, expérimentales et simulées du module photovoltaïque $\{V_{pv}$, (-c-); I_{pv} (-d-); P_{pv} , (-e-)}, du rendement expérimental et simulé du convertisseur DC-DC (-f-)
 (|) Expérience, (—) Simulation (optimum), $R_s = 25 \Omega$, $T = 24^\circ C$

5. SYSTEME PV MUNI DE LA COMMANDE NUMERIQUE

5.1 Schéma synoptique et fonctionnement

Le schéma synoptique du système PV muni de la commande MPPT numérique est représenté sur la figure 13. Dans ce travail, nous présentons les résultats concernant la numérisation d'une partie de la commande MPPT analogique, conçue, optimisée et réalisée dans les travaux présentés dans [7, 8, 15]. Plus particulièrement, nous utilisons le PIC pour réaliser la multiplication et la comparaison entre la puissance instantanée et celle retardée [7, 8, 15].

Les différents blocs de la commande MPPT sont:

- Bloc numérique (PIC) qui est formé par:
 - l'acquisition et la conversion de la tension et du courant du module PV en valeur numérique pour obtenir une information sur la puissance réelle extraite du module PV.
 - la multiplication de ces deux paramètres afin d'obtenir une image de la puissance fournie par le panneau PV.
 - le calcul de la puissance moyenne à partir de huit mesures de puissance afin d'obtenir une valeur plus précise et sans l'effet des bruits de la commutation du transistor MOSFET.
 - le calcul de la dérivée de la puissance par rapport au temps à partir de la puissance moyenne. Ceci permettra de connaître les variations de la puissance du panneau PV.
 - Ainsi, nous pouvons déduire avec exactitude l'évolution du système PV (diminution ou augmentation de la puissance du panneau PV) et en particulier le PPM.
 - la détermination du sens de la recherche du PPM (défini par le paramètre α) à l'aide de l'algorithme MPPT (paragraphe 5.2).

- Bloc analogique [5, 7, 8, 15] qui est formé par:
 - Un intégrateur qui fournit une tension de référence lentement variable. Si le système évolue vers une augmentation (diminution) de la puissance alors le PIC fournit à l'intégrateur un signal de 5 V (0 V). En conséquence la tension à la sortie de l'intégrateur augmente (diminue).
- Un comparateur qui compare un signal triangulaire, de fréquence 10 kHz, et la tension de référence fournie par l'intégrateur, afin de générer un signal rectangulaire modulé en largeur (PWM). Ce signal est amplifié puis appliqué au Driver commandant l'interrupteur du convertisseur.

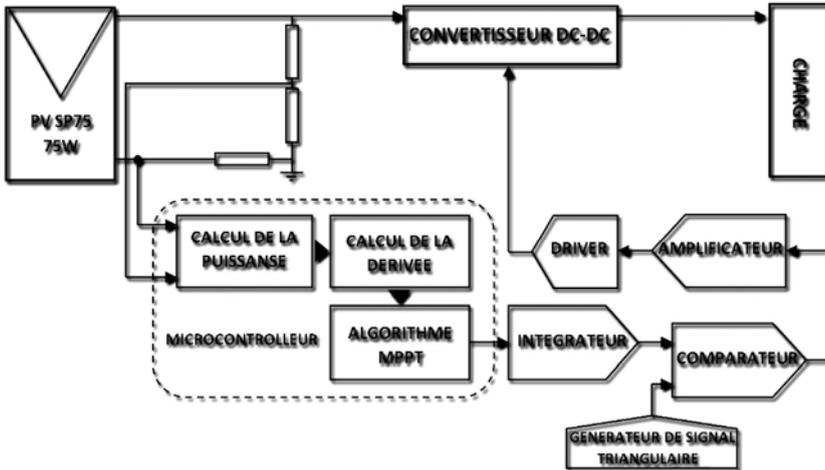


Fig. 13: Schéma synoptique de la commande MPPT numérique et analogique

5.2 Structure de l'algorithme MPPT

Dans le système PV muni de la commande MPPT numérique, la régulation de la puissance fournie par le panneau est effectuée par le microcontrôleur (PIC).

L'évolution du système PV, vers les conditions du circuit-ouvert ou fermé, est réalisé par l'algorithme MPPT (Fig. 14) qui se base sur la dérivée de la variation de la puissance P calculé par le PIC.

Les principales étapes de cet algorithme sont:

- Calcul de la puissance P , ainsi que la dérivée sa variation,
- Si la dérivée est positive, et la variable α est à niveau haut '1', cette dernière reste identique, puisque le signe positif de la dérivée indique que nous nous approchons du PPM.
- Si la dérivée est négative, nous pouvons conclure à un dépassement du PPM. Dans ce cas, nous testons la valeur de la variable H qui indique si le Timer 0 a débordé.

Ainsi, si la variable H vaut '1', nous inversons le sens de la recherche en changeant la valeur de la variable α et nous réinitialisons le Timer 0 et la variable H .

Par contre, si la dérivée est négative et que la variable H vaut '0', l'algorithme va attendre que le Timer 0 déborde ($H=1$) pour inverser le sens de poursuite (α).

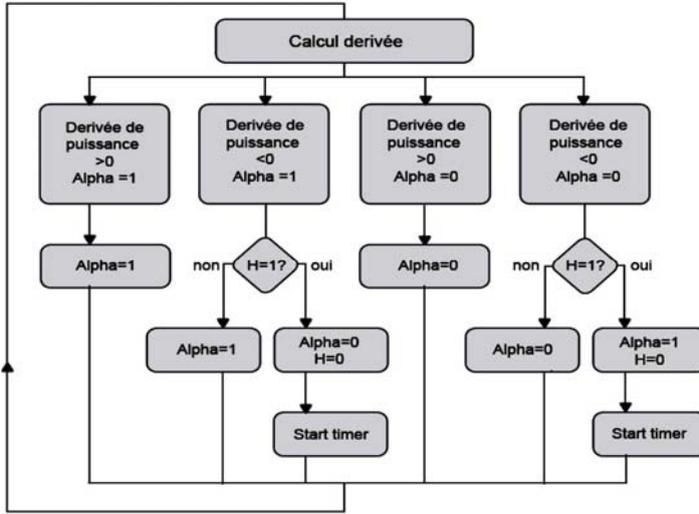


Fig. 14: Algorithme MPPT utilisé pour converger les systèmes PV vers PPM

5.3 Résultats expérimentaux

Le système photovoltaïque muni de la commande MPPT, réalisé et expérimenté est représenté sur la figure 15. En utilisant l'algorithme de la figure 14, au bout de quelques millisecondes, le système converge vers le PPM. Les signaux typiques générés, pour un éclairement de 780 W/m^2 , par le PIC, l'oscillateur, l'intégrateur R_0C_0 , le comparateur, le driver, à l'entrée (V_{pv}) et à la sortie (V_s) du convertisseur DC-DC sont représentés sur la figure 16.

Il apparaît un signal PWM (sortie du driver) d'amplitude 10 V, de fréquence 10 kHz et de rapport cyclique 0.56. Les tensions à l'entrée et à la sortie du convertisseur sont de l'ordre de 14 et 32 V. Ces résultats sont en bon accord à ceux optimaux déduits par l'analyse optimale des grandeurs électriques du module photovoltaïque [3, 7]. En conséquence, le système photovoltaïque réalisé oscille bien autour du point de puissance maximale.

Afin de s'assurer du bon fonctionnement du système réalisé et d'estimer les pertes de puissances fournies par le module photovoltaïque, nous avons caractérisé le système réalisé sur une journée entière nuageuse, présentant ainsi des éclaircissements variables. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 17. Il apparaît:

- un bon accord entre l'expérience et la simulation (optimum).
- Le PIC génère un signal PWM permettant d'osciller le point de fonctionnement du générateur PV autour du PPM,
- le rendement du convertisseur est très satisfaisant et de l'ordre de 90 %.
- l'algorithme utilisé (Fig. 14) assure le suivi du point de puissance maximale, sans que le système photovoltaïque diverge. Malgré les variations rapides de l'éclairement, au cours de cette journée, aucune divergence n'a été décelée.

Cependant, au cours de la même journée, l'expérimentation de ce système, muni de la commande analogique a bien montré des divergences du système, lorsque l'éclairement varie [15].

L'ensemble des résultats obtenus montre bien le bon fonctionnement du système PV réalisé. Le PIC et l'algorithme utilisés assurent bien un fonctionnement optimal indépendamment des variations de l'éclairement. Au cours de cette journée, l'énergie produite est de l'ordre de 200 Wh.

A partir des résultats de simulation dans Pspice, les pertes de la puissance fournie par le module photovoltaïque sont estimées inférieures à 10 %. Donc, le système PV conçu et réalisé peut être utilisé dans une installation, afin d'optimiser le fonctionnement électrique des panneaux PV et par conséquent, minimiser les pertes de puissances.

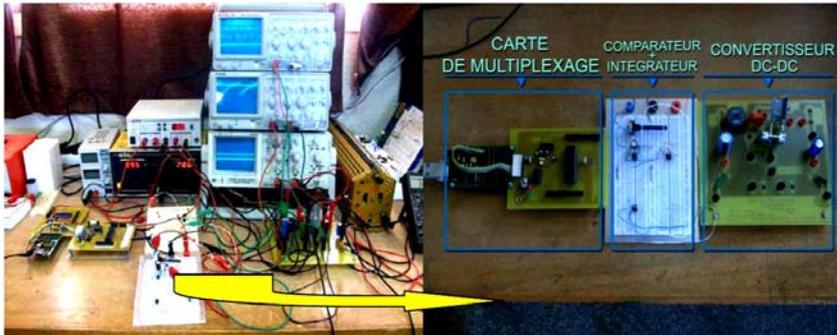


Fig. 15: Vue du banc de mesures et système PV muni de la commande MPPT numérique, réalisé et expérimenté au laboratoire

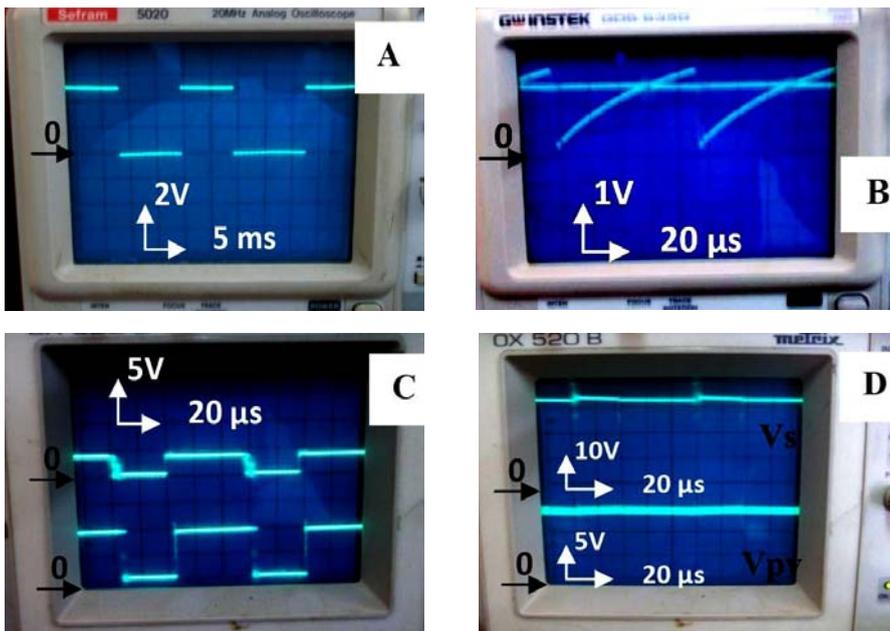
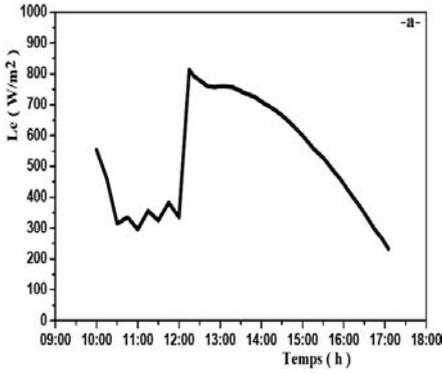
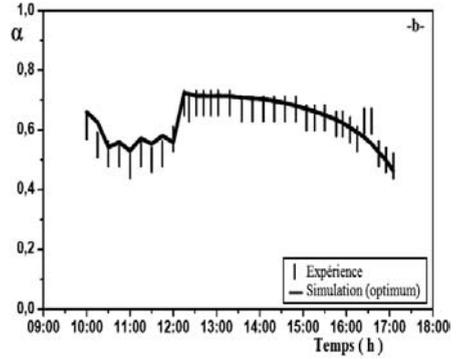


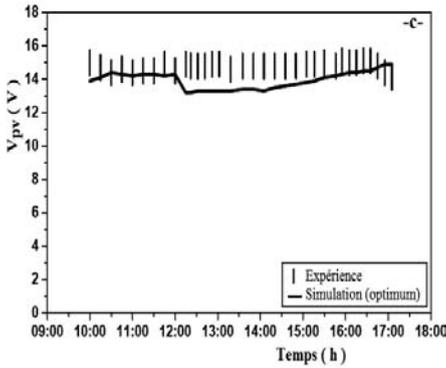
Fig. 16: Signaux expérimentaux typiques: Sortie du PIC 16F877 (A); Sorties du générateur de signal triangulaire et de l'intégrateur (B); Sortie du comparateur et driver (C); Entrée (V_{pv}) et sortie (V_s) du convertisseur (D)



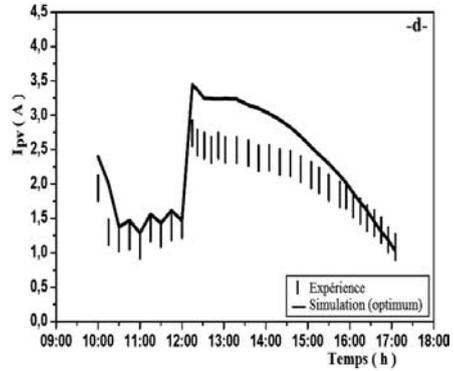
-a- Eclairage



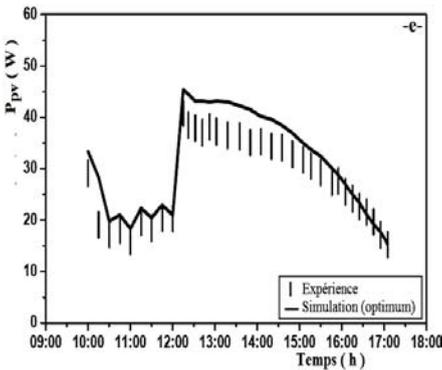
-b- Rapport cyclique α expérimental et simulé



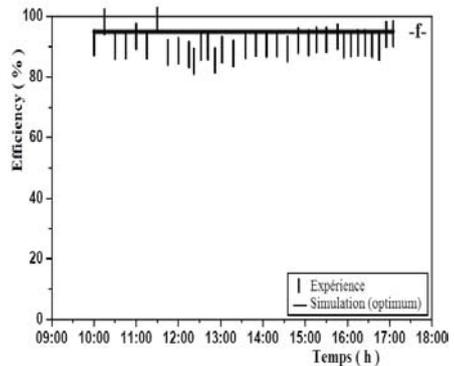
-c- Grandeur électrique (V_{pv}) expérimentale et simulée du module



-d- Grandeur électrique (I_{pv}) expérimentale et simulée du module



-e- Grandeur électrique (P_{pv}) expérimentale et simulée du module



-f- Rendement expérimental et simulé du convertisseur DC-DC

Fig. 17: Relevé des données au cours d'une journée
 (|) Expérience, (—) Simulation (optimum), $R_s = 25\Omega$, $T = 24^\circ C$

6. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons montré la faisabilité d'un système photovoltaïque (PV), de moyenne puissance (100 W), muni d'une commande MPPT numérique utilisant un microcontrôleur (PIC). En se basant sur les résultats d'optimisation des modules photovoltaïques, nous avons expérimenté le système réalisé pendant des journées entières nuageuses où l'éclairement subissait des variations brusques.

Les résultats obtenus nous ont permis de conclure que notre algorithme implémenté au PIC assure, d'une part, un très bon accord entre l'expérience et la simulation (optimum) et d'autre part, la convergence instantanée du point de fonctionnement du module photovoltaïque autour du point de puissance maximale.

Durant le fonctionnement du système PV, aucune divergence n'a été observée. Le bon rendement du convertisseur DC-DC (Boost), qui est de l'ordre de 90 %, et les faibles pertes de puissance occasionnées par le module (inférieures à 10%) montrent bien le bon fonctionnement du système photovoltaïque réalisé au cours de ce travail et en conséquence son utilisation dans des installations PV pour la réduction des pertes d'énergies au niveau des modules photovoltaïques.

En perspective, ce travail sera poursuivi afin d'améliorer les pertes d'énergies fournies par le module PV, ainsi que le programme intégré au microcontrôleur (PIC) pour qu'il puisse effectuer des fonctions de supervision, tels que: le contrôle de l'état de charge de la batterie, le suivi du soleil,...

REMERCIEMENTS

Ce travail rentre dans le cadre :

- Programme Thématique d'Appui à la Recherche Scientifique (PROTARS III) 'D43/06',
- Coopération Maroc-Belge, 'Commission Universitaire Institutionnelle', CUI-Oujda 2008-2012, (Activité Eau et Environnement / sous-activité Energies Renouvelables),
- Programme Global de Recherche de l'Université Mohammed Premier d'Oujda, PGR.

REFERENCES

- [1] V. Salas, E. Olias, A. Barrado and A. Lazaro, 'Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 90, N°11, pp. 1555 – 1578, 2006.
- [2] T. Esmam and P.L. Chapman, 'Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, N°2, pp. 439 – 449, 2007.
- [3] T. Mrabti, M. El Ouariachi, K. Kassmi, B. Tidhaf, 'Characterization and Modeling of the Optimal Performances of the Marketed Photovoltaic Panels', Moroccan Journal of Condenser Mater MJCM, Morocco, Vol. 12, N°1, pp. 7 – 13, 2010.
- [4] Z.M. Salameh, F. Dagher and W.A. Lynch, 'Step-Down Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems', Solar Energy, Vol. 46, N°5, pp. 279 - 282, 1991.

- [5] M.F. Shraif, '*Optimisation et Mesure de Chaîne de Conversion d'Energie Photovoltaïque en Energie Electrique*', Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2002.
- [6] K. Kassmi, M. Hamdaoui and F. Olivie, '*Caractérisation des Panneaux Photovoltaïques. Conception et Optimisation d'un Système Photovoltaïque pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire*', Energies Renouvelables, Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture, Bureau de l'UNESCO à Rabat, Bureau Multi Pays pour le Maghreb, Les Energies Renouvelables au Maroc, Le débat est lancé. ISBN9954_8068_2_2, Rabat, Maroc, pp. 87 - 110, 2007.
- [7] M. El Ouariachi, T. Mrabti, B. Tidahf, Ka. Kassmi and K. Kassmi, 'Regulation of the Electric Power Provided by the Panels of the Photovoltaic System', *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 4, N°5, pp. 294 – 309, May 2009.
- [8] T. Mrabti, M. El Ouariachi, M.F. Yaden, Ka. Kassmi and K. Kassmi, '*Characterization and Modeling of Electrical Performance of the Photovoltaic Panels and System*', *Journal of Electrical Engineering: Theory and Application*, Vol. 1, N°2, pp. 100 - 110, 2010.
- [9] M. El Ouariachi, T. Mrabti, M.F. Yaden, Ka. Kassmi and K. Kassmi, '*Analysis, Optimization and Modelling of Electrical Energies Produced by the Photovoltaic Panels and Systems*', 18th Mediterranean Conference On Control and Automation (MED), IEEE, 23-25 June, 2010, pp. 1614 – 1619, Marrakech, Morocco, 2010.
- [10] N. Toshihiko, S. Togashi and N. Roy, '*Short-current Pulse-based Maximum-Power-Point Tracking Method For Multiple Photovoltaic-and-Converter Module System*', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49, N°1, February 2002.
- [11] K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino and M. Osakada, '*Maximum Photovoltaic Power Tracking: An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions*', *IEE Proceedings Transmission and Distribution*, Vol. 142, N°1, pp. 59 – 64, Januar 2005.
- [12] A. Cocconi and W. Rippel, '*Lectures from GM Sunracer Case History, Lecture 3-1: the Sunracer Power Systems*', Number M-101, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA, 1990.
- [13] M. Veerachary, T. Senjyu and K. Uezato, '*Neural-Network-Based Maximum-Power-Point Tracking of Coupled-Inductor-Interleaved-Boost-Converter-Supplied PV System Using Fuzzy Controller*', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 50, N°4, pp. 749 – 758, Aug. 2003.
- [14] A.B.G. Bahgat, N.H. Helwa, G.E. Ahmad and E.T. El Shenawy, '*Maximum Power Point Tracking Controller for PV Systems Using Neural Networks*', *Renewable Energy*, Vol. 30, N°8, pp. 1257 – 1268, 2005.
- [15] T. Mrabti, M. El Ouariachi, M.F. Yaden, Ka. Kassmi, B. Tidhaf, K. Kassmi, en cours de publication.