

Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique

F.Z. Zerhouni*, M. Zegrar, S. Kaddour Brahim 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 08 Février 2008 – accepté le 30 Mars 2008)

Résumé - Une cellule photovoltaïque 'PV', ou cellule solaire est un semi conducteur capable faire la conversion de l'énergie lumineuse en courant électrique. Il existe pour un point (I_m, V_m) de la courbe courant - tension du générateur photovoltaïque 'GPV' ($I-V$), la puissance utile P_{max} qui est une puissance maximale. C'est le point de fonctionnement auquel on se propose de faire fonctionner le système en dépit des variations qui peuvent se produire (ensoleillement, température, charge). Dus au coût élevé du générateur photovoltaïque et à la désadaptation existante entre les caractéristiques $I-V$ du générateur PV 'GPV' et de la charge, une grande importance est donnée à leur utilisation optimale qui permet un fonctionnement fiable et économique. A cet effet, nous sommes intéressés par l'obtention d'un système qui présente une meilleure adaptation entre ses différents composants: générateur photovoltaïque 'GPV' et charge. Une cellule photovoltaïque éclairée est un générateur de puissance finie, cette puissance dépend de la valeur de la charge. On a développé une chaîne élémentaire avec une commande de suivi de point de puissance maximale MPPT. Le but du dispositif du tracking de puissance maximum (MPPT) est à forcer le système pour opérer à une puissance qui est la plus grande puissance de sortie du GPV à tout moment, sans tenir compte des contraintes extérieures (ensoleillement, température) et de la contrainte charge. Un dispositif MPPT introduit garantira un rendement énergétique maximal. La commande réalisée permet d'effectuer une recherche du point maximal de la puissance MPP sans la connaissance de la courbe caractéristique du GPV. La carte réalisée est à base de microcontrôleur. Les résultats expérimentaux obtenus sont avancés.

Abstract - A photovoltaic cell, or a solar cell is a semi conductor able to convert light energy into electrical current. There is a point of coordinates (I_m, V_m) in the photovoltaic generator 'GPV' current-voltage curve, which corresponds to P_{max} which is a maximum power. It is the operation point at which it is intended to make the system work otherwise the changes that may occur (insulation and temperature, load). Due to the high cost of photovoltaic generator and the mismatching existing between the characteristics of the 'GPV' and the load, great importance is given to their optimum use, which enables it to operate reliably and affordably. To this end, we are interested in obtaining a system which presents a better accommodation between its various components photovoltaic 'GPV' and the load. The operation point is the intersection between the GPV characteristic and the load's one. The operation point power depends on the value of the load. We developed a system based on a microcontroller with a monitoring point of maximum power MPPT. The purpose of the maximum power tracking (MPPT) is to force the system to operate with a power that is the GPV greatest power at any time, regardless of external constraints (insulation, temperature) and the charge. The MPPT device ensures maximum system efficiency. The command is developed to search the maximum power point MPP without the knowledge of the characteristics of GPV or the load. The experimental results obtained are advanced.

Mots clés: Energie verte - Générateur photovoltaïque - Puissance - Rendement, - Rapport cyclique - MPPT.

1. INTRODUCTION

A ce jour, le photovoltaïque a trouvé son utilité dans des applications à petites échelles et pour des systèmes de transmissions isolés. L'énergie photovoltaïque 'PV' est une source d'énergie

* zerhouni_fz@yahoo.fr _ aboudggenes@yahoo.com

intéressante. Elle est renouvelable, inépuisable et non polluante. Pour qu'elle soit utilisée sur une large plage d'applications et pour satisfaire les contraintes du coût, le système devrait présenter une bonne exploitation des cellules photovoltaïques.

Pour cela, il faut extraire le maximum de puissance du générateur PV, puissance disponible au niveau du générateur photovoltaïque 'GPV' et en général non puisée par la charge. Une bonne rentabilité du 'GPV' peut être réalisée si celui-ci travaille au maximum de puissance tout le temps. Or, le point de puissance maximum varie selon plusieurs paramètres comme l'irradiation solaire E_s , la température T et la nature de la charge. Ce type de variation est aléatoire. Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la charge, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (I_{opt} , V_{opt}). Le générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée, donc sa puissance optimale, le MPPT doit répondre à l'exigence de rechercher le MPP (maximum power point) et de maintenir un fonctionnement aux alentours de ce point.

2. FONCTIONNEMENT DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le régime photovoltaïque est un régime où aucun potentiel n'est appliqué, mais où un courant circule à travers une charge. Le système développe donc une puissance électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs. La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite:

- l'absorption des photons par le matériau (absorption optique) et la génération des porteurs de charges.
- la collecte des porteurs excités avant qu'ils ne reprennent leur énergie initiale (relaxation).

Une cellule photovoltaïque produit une tension de 0,5 V en circuit ouvert. L'intensité du courant fourni par cette cellule dépend des conditions environnantes et en fonction de la charge [1-3].

3. CIRCUIT EQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE

3.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode, délivrant un courant selon la figure 1, qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale. Les équations régissant ce modèle est [1]:

$$I = -I_S \left[\exp\left(\frac{qV}{n k T}\right) - 1 \right] + I_{ph} \quad (1)$$

$$i = I_S \left[\exp\left(\frac{qV}{n k T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

avec: I_S le courant de saturation inverse de la diode; q la charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C); k la constante de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K); n le facteur d'idéalité de la photopile; T la température de la jonction en K; i le courant circulant dans la diode; I le courant de sortie et V la tension de sortie.

En circuit ouvert, la charge tend vers l'infini et $V \rightarrow V_{oc}$, qui est la tension en circuit ouvert.

$$I = I_S \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{n k T}\right) - 1 \right] - I_{ph} = 0, \text{ soit } V_{oc} = \frac{n k T}{q} \text{Log}\left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1\right) \quad (3)$$

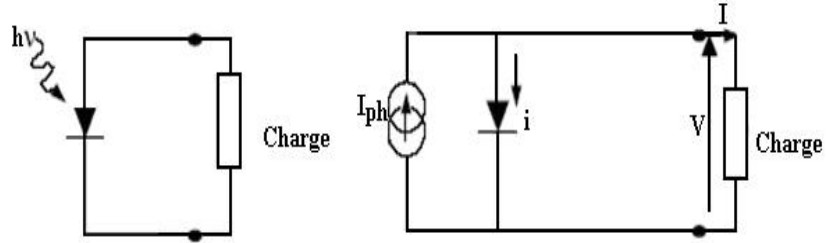


Fig. 1: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{cc} avec $V = 0$, courant de court-circuit obtenu en court circuitant la charge.

3.2 Cas d'une cellule photovoltaïque réelle

Lorsque les résistances de contacts et les pertes ohmiques sont prises en compte comme dans le cas réel, nous devons associer au schéma équivalent une résistance série (R_s), comme présenté en figure 2. Si on note V_j la tension à travers la jonction, la tension V à travers la cellule est réduite à: $V = V_j - I \times R_s$.

Nous avons [1]:

$$I = I_{ph} - I_S \left[\exp\left(\frac{q V_j}{n k T}\right) - 1 \right] = I_{ph} - I_S \left[\exp\left(\frac{q (V + I.R_s)}{n k T}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

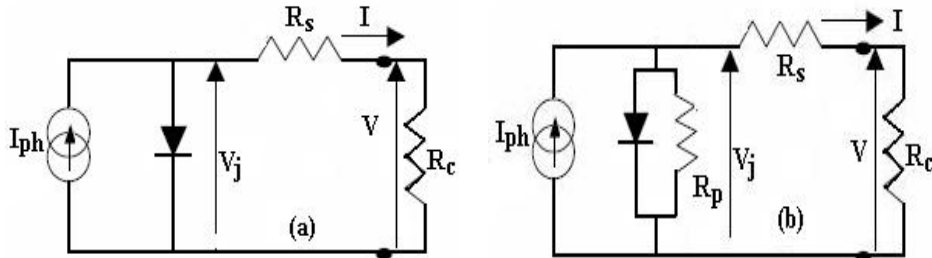


Fig. 2: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Il y a aussi le courant de fuite qui apparaît à travers la cellule, qui est symbolisé par une résistance parallèle ou shunt (R_p), telle que R_p tende vers l'infini lorsque ces courants de fuite i_p sont négligeables. Ainsi,

$$I = I_{ph} - i - i_p = I_{ph} - I_S \left[\exp\left(\frac{q V_j}{n k T}\right) - 1 \right] - \frac{V_j}{R_p} \quad (5)$$

En remplaçant V_j par $V_j = V + R_s \times I$, nous avons:

$$I = I_{ph} - I_S \left[\exp\left(\frac{q (V + R_s \cdot I)}{n k T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (6)$$

Dans le cas idéal, on a $R_s = 0$ et $R_p \rightarrow \infty$, ces résistances donnent dans le cas réel une évaluation des imperfections de la diode ; en considérant que R_s présente une valeur faible et que $R_s \ll R_p$, les pentes de la caractéristique $I(V)$ sous illumination, calculées en $I = 0$

(circuit ouvert) et $V = 0$ (court-circuit) donnent respectivement les valeurs inverses des résistances série et shunt.

4. INTERCONNEXION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

La puissance délivrée par une cellule n'est pas assez pour alimenter une charge. Il est nécessaire d'utiliser plusieurs cellules raccordées en série/parallèle pour former un module photovoltaïque et atteindre une puissance désirée. Dans notre cas, un module photovoltaïque est formé de 36 cellules polycristallines en série. L'interconnexion de modules entre eux - en série ou/et en parallèle - pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque [1, 3]. Au niveau de notre application, on a utilisé un module caractérisé par une tension de circuit ouvert $V_{oc} = 21$ V et un courant de court-circuit $I_{cc} = 3.25$ A aux conditions standards (température $T = 25$ °C et ensoleillement $E_s = 100$ % correspondant à 1000 W/m²).

Si on pose N_s , le nombre de modules connectés en série dans une branche et N_p , le nombre de branches connectées en parallèle. Le schéma équivalent du générateur photovoltaïque est alors le schéma ci-contre.

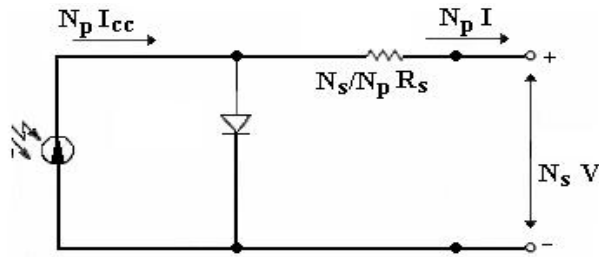


Fig. 3: Modélisation finale du générateur photovoltaïque

Des précautions sont prises par ajout de diodes de protection. La durée de vie d'un module sera essentiellement liée à la bonne encapsulation qui doit résister aux différents agents atmosphériques (température, humidité, brouillard, vent, etc.). Nous avons utilisé Matlab/Simulink dans notre travail de simulation. La modélisation courant-tension : ($I - V$) et puissance-tension : ($P - V$) est fournie selon la figure 4.

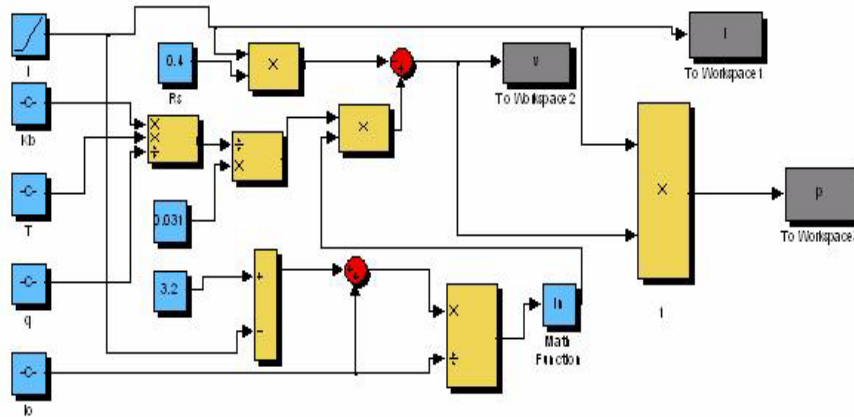


Fig. 4: Modèle Simulink établi

La caractéristique $I - V$ aux conditions standards obtenue est illustrée en figure 5. Le point M est le MPP maximum power point. Ses coordonnées sont les suivants: $I_{opt} = 2.95$ A et $V_{opt} = 17$ V. Cette caractéristique est tributaire des conditions environnementales (E_s et T).

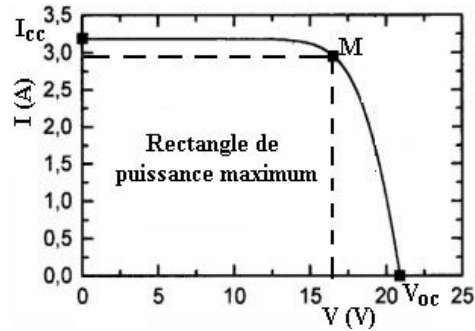


Fig. 5: Caractéristique I-V

5. INFLUENCE DE L'ENSOLEILLEMENT E_s

Une température constante de 25 °C est maintenue constante. L'insolation E_s varie. Les courbes obtenues sont illustrées en figure 6.

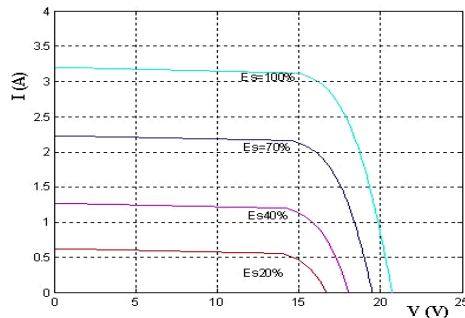


Fig. 6: Influence de l'insolation sur la caractéristique du 'GPV'

On remarque que l'influence due à la baisse de l'éclairement fait diminuer fortement la valeur du courant de court-circuit. Par contre la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue faiblement. Le point de puissance optimale chute.

6. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE T

Pour un ensoleillement maintenu de 1 kW/m² (100 %) constant, nous varions la température. La figure 7 représente les résultats de notre simulation obtenue pour des températures de - 5 °C, 70 °C, 40 °C et 25 °C.

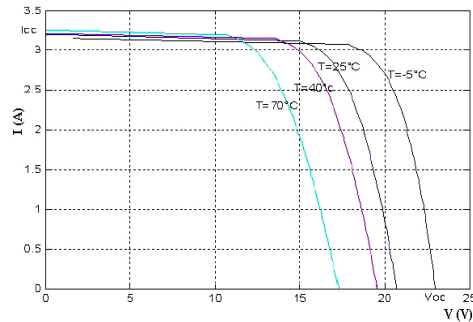


Fig. 7: Influence de la température sur la caractéristique du 'GPV'

On remarque I_{cc} est faiblement dépendant de la température alors que V_{oc} est très sensible à la variation de la température. L'augmentation de la puissance optimale va dans le sens inverse de T .

7. LE DISPOSITIF MPPT

Pour avoir la meilleure connexion entre le 'GPV' une source non linéaire et une charge et produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est développé. Il forcera le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système. En effet, lorsque le GPV est connecté à une charge, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique $I-V$ avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient ou/et la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale [1, 4-7].

8. PRINCIPE DU MPPT

Dans notre cas, ce dernier est constitué d'un hacheur dont la commande intègre le système MPPT (Maximum Power Point Tracker). Cette commande à base d'un microcontrôleur contrôle les variations de l'intensité du courant I et de la tension V et calcule la puissance P . Afin d'optimiser le transfert d'énergie électrique fournie par les panneaux, le système MPPT cherche à faire débiter ces panneaux à leur puissance maximale en agissant sur le rapport cyclique K . Le principe du contrôleur MPPT est souvent basé sur une méthode par tâtonnement, comme le montre la figure suivante qui illustre le principe de recherche du MPP.

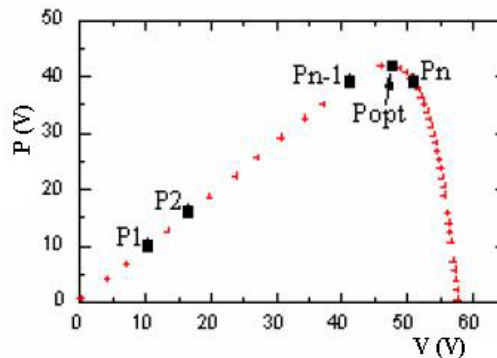


Fig. 8: Principe de recherche du MPPT

La charge va imposer son point de fonctionnement ($P1$) par exemple. Le programme développé choisit un sens d'ajustement de α par pas $+dK$ ou $-dK$. Il compare si la valeur du point suivant en puissance est supérieure ou non à celui qui précède. Si oui, on se déplace au point suivant ($P2$) avec le même sens de variation de K , jusqu'au moment où le terme suivant (Pn) devienne inférieur au précédent ($Pn-1$). A ce moment, on prend le sens opposé d'ajustement de K et l'on recommence la même procédure, jusqu'à obtenir un système qui va basculer entre 3 points qui englobent le MPP (P_{opt}). La figure 9 représente l'algorithme de poursuite du point de puissance maximum développé.

9. MISE EN OEUVRE

Le synoptique de la réalisation pratique effectuée est présenté en figure 10.

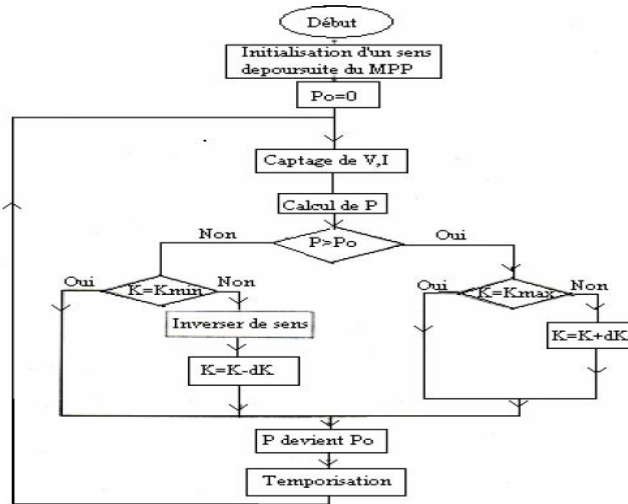


Fig. 9: Algorithme de poursuite du MPP

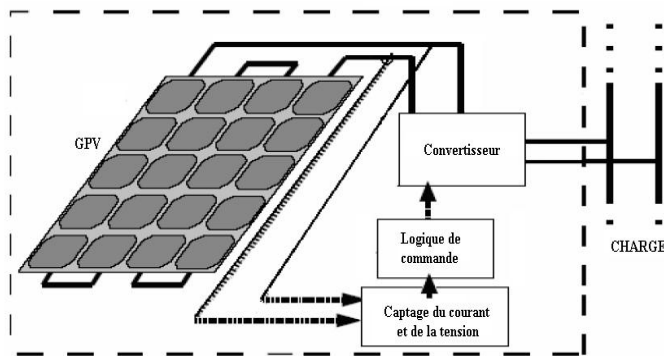


Fig. 10: Synoptique de la réalisation

Le GPV est constitué de 03 modules en série pour les tests expérimentaux. Le **tableau 1** regroupe les valeurs expérimentales relevées du GPV aux conditions standards. La figure 11 illustre les caractéristiques P-V à T = 25°C et Es variable, ainsi que la caractéristique des points optimaux ' P_{opt} '.

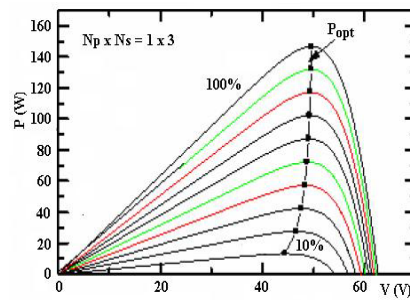


Fig. 11: Caractéristique P-V des 3 modules en série à T = 25°C

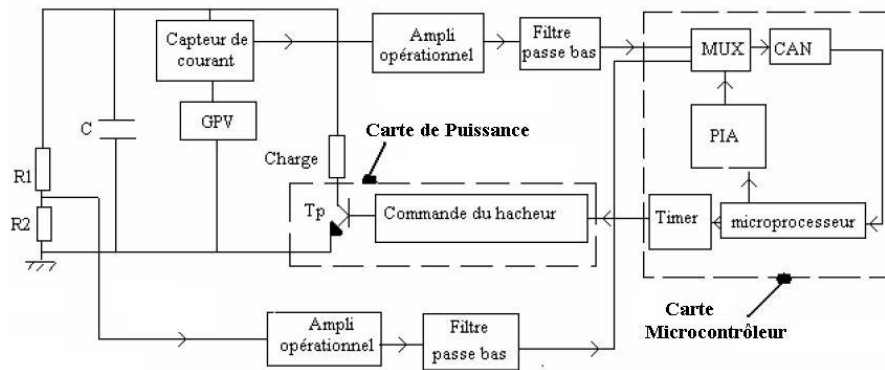
Tableau 1: Valeurs expérimentales obtenues
 $V_{oc} = 18.8 \text{ V}$ $I_{cc} = 3.19 \text{ A}$ $V_{opt} = 50 \text{ V}$ $I_{opt} = 2.95 \text{ A}$ $P_{opt} = 140.41 \text{ W}$


Fig. 12: Carte réalisée

Pour concrétiser la recherche du MPP par comparaison de puissances, la carte d'acquisition développée comporte deux voies pour capter le courant et la tension. La tension est recueillie à partir du pont diviseur de tension (R1, R2). Le courant est obtenu grâce à un capteur de courant. Ces grandeurs attaquent des filtres passe-bas et des ampli-opérationnels montés en suiveurs. Chacune de ces deux sorties se retrouve multiplexée à l'entrée de la carte à base du microcontrôleur. Elle sera sélectionnée et se retrouvera à l'entrée du convertisseur numérique. Le résultat de la conversion du courant et de la tension servira au calcul de la puissance selon le principe vu en figure 9. En suivant l'écart entre la puissance actuelle et la puissance précédente, le programme élaboré ajustera le rapport cyclique. Il sera fourni à la carte de commande. La sortie du timer attaque la carte de puissance. Le hacheur disposant du signal de commande est prêt pour sa tâche finale.

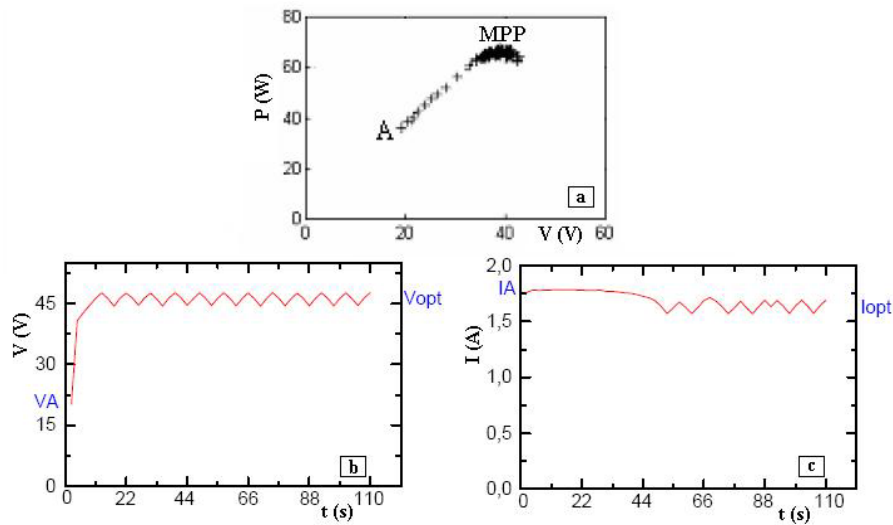


Fig. 13: Résultats expérimentaux obtenus

La caractéristique de recherche du MPP est illustrée par la figure 13, (a) dans le plan puissance-tension ($P-V$), (b) dans le plan (tension-temps) ($V-t$) et (c) dans le plan (courant-temps) ($I-t$).

Le programme de balayage commence à prélever le courant et la tension de fonctionnement au point A avec $V_A \approx 20.06 \text{ V}$, $I_A \approx 1.76 \text{ A}$, $P_A \approx 35.411 \text{ W}$. On corrige au fur et à mesure le rapport de transformation jusqu'à approcher le plus possible le point MPP. A ce niveau, notre système oscille dans la zone du MPP.

Le point MPP a pour coordonnées $V_{\text{opt}} \approx 46.68 \text{ V}$, $I_{\text{opt}} \approx 1.65 \text{ A}$, $P_{\text{opt}} \approx 76.92 \text{ W}$. Dans cette fenêtre restreinte est localisé le point de puissance optimale.

La progression vers le MPP s'est faite d'une manière graduelle. On a pu ainsi transformer le point de fonctionnement réel A au point de fonctionnement optimal MPP. De la sorte, on a pu ramener le fonctionnement de notre charge dans la zone de puissance maximale pour une utilisation efficace du GPV.

Différents essais ont été réalisés au laboratoire à différentes conditions de travail. Le dispositif et le programme réalisés assurent tout le temps la recherche et le maintien à un fonctionnement aux alentours du MPP de notre système.

10. CONCLUSION

Pour avoir la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque 'GPV' et la charge et produire une puissance optimale, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) a été conçu et réalisé. Il force le générateur GPV à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion électrique. Comme perspective, nous envisageons de solutionner le phénomène de shading, lorsque la caractéristique P-V du générateur peut avoir plusieurs points maximums.

REFERENCES

- [1] F.Z. Zerhouni, 'Adaptation Optimale d'une Charge à un Générateur Photovoltaïque', Mémoire de Magister, Institut d'Electronique, USTO, 1996.
- [2] K. Khouzam, L. Khouzam, P. Groumos, 'Optimum Matching of Ohmic Loads to the PV Array', Solar Energy, Vol. 46, N°2, pp. 101 – 108, 1991.
- [3] F.Z. Zerhouni, M. Zegrar et A. Boudghène Stambouli, 'Amélioration de l'Adaptation d'un Générateur Photovoltaïque à une Charge avec Implémentation Pratique', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°4, pp. 551 – 560, 2007.
- [4] S.S. Singer and A.A. Baunstein, 'A General Model of Maximum Power Point Trackers', Solar Energy, Vol. IV, IEEE 1985, pp. 147 – 151, 1985.
- [5] Nobuyoshi Mutoh and Takayoshi Inoue, 'A Control Method to Charge Series-Connected Ultra Electric Double-Layer Capacitors Suitable for Photovoltaic Generation Systems Combining MPPT Control Method', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, N°1, pp. 374 - 383, 2007.
- [6] Weidong Xiao, W.G. Dunford, P.R. Palmer and A. Capel, 'Application of Centered Differentiation and Steepest Descent to Maximum Power Point Tracking', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, N°5, pp. 2539 - 2549, 2007.
- [7] K.K. Tse, B.M.T. Ho, H.S.H. Chung and S.Y.R. Hui, 'A Comparative Study of Maximum-Power-Point Trackers for Photovoltaic Panels Using Switching-Frequency Modulation Scheme', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51, N°2, pp. 410 - 418, 2004.