Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 (2013) 485 – 498

Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation

N. Aouchiche [1*], M.S. Aït Cheikh [2] et A. Malek [1]

[1] Division Energie Solaire Photovoltaïque
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340, Algiers, Algeria
[2] Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique
Avenue Hassen Badi, El Harrach, Algiers, Algeria

(reçu le 10 Mai 2013 – accepté le 30 Septembre 2013)

Résumé - *Ce travail a pour but d'étudier le comportement des composants de la chaîne photovoltaïque. Le type de convertisseur, utilisé dans le système, est un hacheur élévateur. Les méthodes de poursuite du point de puissance maximale 'MPPT' sélectionnées pour la simulation, sont l'incrémentation de la conductance et la méthode perturbation et observation 'P&O'. Une partie de ce travail consiste à effectuer une étude théorique des composants constituant le système photovoltaïque global à savoir: le module photovoltaïque, le hacheur, et le régulateur MPPT. La seconde étape est consacrée à la simulation du système photovoltaïque, sous différentes conditions atmosphériques.*

Abstract - *This work aims to study the behavior of the component elements photovoltaic chain. The type of converter used in the system is a lift chopper. The type of converter used in this photovoltaic system is a boost converter. The Methods for the pursuit of point of maximum power 'MPPT', selected for the simulation are incrementing the conductance method 'Inc-cond' and perturbation and observation 'P & O' method. Part of this work is to perform a theoretical study of the components comprising the overall PV system including: photovoltaic module, converter, and the MPPT controller. The second step is devoted to the simulation of photovoltaic system under different atmospheric conditions.*

Mots clés: Modules photovoltaïques – MPPT - Convertisseur élévateur - P&O - Inc-Cond.

1. INTRODUCTION

La consommation mondiale en matière d'énergie est assurée essentiellement par les énergies non renouvelables. Du au fait que celles-ci sont épuisables, des stratégies énergétiques sont mises en œuvre, visant à augmenter l'efficacité des systèmes électriques, à éviter le gaspillage mais également à se tourner vers les énergies renouvelables (hydraulique, vent, solaire, houle, biomasse, géothermie, marée). De nombreux pays se sont lancés récemment dans des programmes de développement des générateurs éoliens et photovoltaïques.

Ce travail a pour objectif de concevoir un banc d'essai photovoltaïque. Ce dernier est conçu principalement autour d'un convertisseur élévateur de tension statique DC/DC (Boost), qui relie le module photovoltaïque à la charge. La commande, de la recherche

[*] Aouch2@yahoo.fr

de point de puissance maximale choisie, maximise la puissance de sortie de ce générateur, pour différentes conditions de l'éclairement ou de la température.

Dans une première étape, un rappel sur le système photovoltaïque au complet, ainsi que ses caractéristiques et son fonctionnement est présenté. Un aperçu précis sur les régulateurs et les convertisseurs est effectué. La seconde étape est consacrée à la description des méthodes de poursuite du point de puissance maximale, choisies pour la simulation. Ensuite, des résultats de simulations sont présentés, effectuées avec le logiciel Matlab®/Simulink, avec les méthodes choisis, l'Incrémentation de la Conductance 'Inc-Cond', et la méthode Perturbe & Observe, 'P & O'.

2. LA CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

2.1 Générateur photovoltaïque

C'est un dispositif qui permet de convertir l'énergie solaire en une énergie électricité. Il est constitué d'un certain nombre de panneaux, selon la puissance crête souhaitée; ces derniers sont formés à partir des modules reliés entre eux en série et/ou en parallèle. Le module est un ensemble de cellules photovoltaïques.

2.1.1 Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque

La figure 1 montre un modèle électrique de la cellule photovoltaïque prenant en compte les différents facteurs limitatifs. On y retrouve le générateur de courant I_{ph}, correspondant au courant photo généré, ainsi que des résistances complémentaires, R_s et R_p, et deux diodes D_1 et D_2. R_c est la résistance de charge. La résistance série R_s est due à la résistivité des différentes couches de la cellule: émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semi-conducteur). [1, 2]

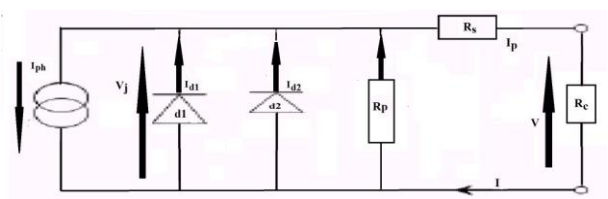

Fig. 1: Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Ce terme doit, idéalement, être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. La résistance parallèle ou de court-circuit R_p traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible.

Nous avons également tenu compte d'un modèle plus rigoureux au niveau des différents courants en faisant appel à deux diodes. Le terme I_{s2} correspond au courant de diffusion avec: [2, 3]

$$I(V) = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - V_j / R_p \quad (1)$$

$$I(V) = I_{ph} - I_{s1}[\exp(n_1 V_j) - 1] - I_{s2}[\exp(n_2 V_j) - 1] - V_j / R_p \quad (2)$$

$$V_j = V + I \times R_s \quad (3)$$

I_{D1} et I_{D2} sont les courants de saturation des diodes, n_1 et n_2 les facteurs de pureté de la diode, R_s et R_p respectivement la résistance série et la résistance parallèle et T la température absolue.

L'équation contient également la charge élémentaire constante q (1.602×10^{-19} C) et la constante de Boltzmann k (1.380×10^{-23} J/K). Le photo-courant $I_{ph,max}$ est atteint à une insolation maximum, souvent nous avons ($I_{ph} = S \times I_{ph,max}$) avec S, le pourcentage d'insolation. Il est évident, de l'équation (2), que la caractéristique courant-tension dépend fortement de l'insolation et de la température. La dépendance, vis-à-vis de la température, est encore amplifiée par les propriétés du photo-courant I_{ph} et les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnés par:

$$I_{ph}(T) = I_{ph}\Big|_{(T=298K)} \left[1 + (T - 298) \times (5\times10^{-4})\right] \tag{4}$$

2.1.2 Circuit équivalent et modèle mathématique d'un module photovoltaïque

Le modèle mathématique, qui caractérise le module photovoltaïque, est donné par l'équation suivante: [2, 3]

$$I = I_{ph} - I_{d1}\left[e^{\frac{q(V+I.N_s.R_s)}{N_s.n_1.k.T}} - 1\right] - I_{d2}\left[e^{\frac{q(V+I.N_s.R_s)}{N_s.n_2.k.T}} - 1\right] - \frac{V+I.N_s.R_s}{N_s\times R_p} \tag{5}$$

2.1.3 Influence de l'ensoleillement et de la température

Le courant produit par la cellule I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire E. Par contre, la tension V aux bornes de la jonction varie peu, car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même. La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec l'éclairement. Il en résulte que [4, 5], - la puissance optimale de la cellule (P_M) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement et - les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

2.1.3.1 Influence de l'ensoleillement sur les courbes $P(V)$ et $I(V)$

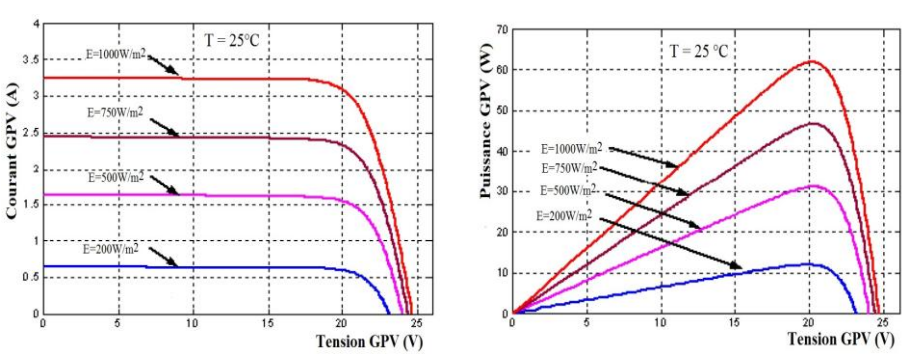

Fig. 2: Influence de l'ensoleillement E sur la courbe $I=f(V)$ et $P=f(V)$

2.1.3.2 Influence de la température sur les courbes $P(V)$ et $I(V)$

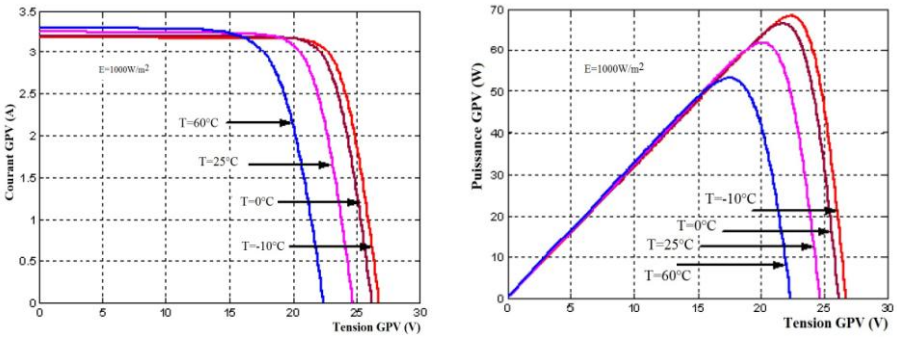

Fig. 3: Influence de la température sur la courbe $I=f(V)$ et $P=f(V)$

2.2 Régulateurs

Un régulateur de charge, qu'il soit de conception simple ou compliqué, constitue toujours le cœur d'une installation photovoltaïque et doit assurer la fiabilité et la performance. Le régulateur de charge assure donc deux fonctions principales:

- La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation d'un transfert d'énergie du générateur photovoltaïque à l'utilisation.

Le régulateur accomplit les fonctions suivantes: le contrôle de la charge, le contrôle de la décharge, l'égalisation, la compensation thermique.

Les régulateurs de charge peuvent se caractériser en groupes suivants: régulateur série, régulateur shunt, régulateur PWM, régulateur MPPT. [6]

2.3 Convertisseur DC/DC

Le convertisseur DC/DC transforme la tension de la batterie ou du module en une tension DC différente pour alimenter la charge. Il permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. On distingue trois types de convertisseurs: boost, buck – boost, buck. Le modèle que nous avons choisi dans notre étude est le boost.

2.3.1 Le convertisseur élévateur (boost)

Ce convertisseur Boost fonctionne comme suit: lorsque l'interrupteur S est fermé, l'inductance se charge et le courant $i(t)$, provenant du module solaire, augmente progressivement et ce durant $t \in [0, dT_s]$. Quand S s'ouvre, la rupture du courant provoque une surtension d'où l'utilité de la diode qui protège S en empêchant le retour du courant.

Le condensateur sert à lisser la tension de sortie. L'inductance L libère une énergie qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge via la diode D durant $t \in [dT_s, T_s]$.

Le rapport de conversion $M(d)$ est donc écrit sous la forme suivante: [2, 7, 8]

$$M(d) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{d'} = \frac{1}{1-d} \tag{6}$$

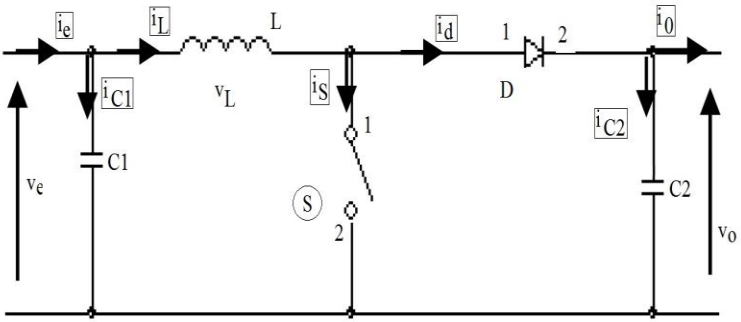

Fig. 4: Circuit électrique du convertisseur élévateur

3. DESCRIPTION DES COMMANDES MPPT

3.1 Introduction

De nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.

Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant V_{PV}, lorsque dP_{PV}/dV_{PV} est positif ou en diminuant V_{PV}, lorsque dP_{PV}/dV_{PV} est négatif.

Lors du régime transitoire ou permanent, ces commandes doivent estimer et comparer la puissance avec celle de l'instant précédent. Les performances de celles-ci sont liées à la rapidité avec laquelle le point MPP est atteint, à la manière d'osciller autour de ce même point, mais aussi à la robustesse pour éviter une divergence lors de changements brutaux d'ensoleillement ou de charge. Parmi les techniques, on a:

3.2 Méthode perturbation et observation (P&O)

La méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée.

La figure 5 montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après la figure 5, la tension et le courant V et I, sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante $P(k)$ de la rangée. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur $P(k-1)$ de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle, [2, 9].

- Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{mp} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple C_p.

- Si C_p est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.
- Si C_p est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

La valeur C_p idéale dépend du système. Elle doit être déterminée expérimentalement, [2].

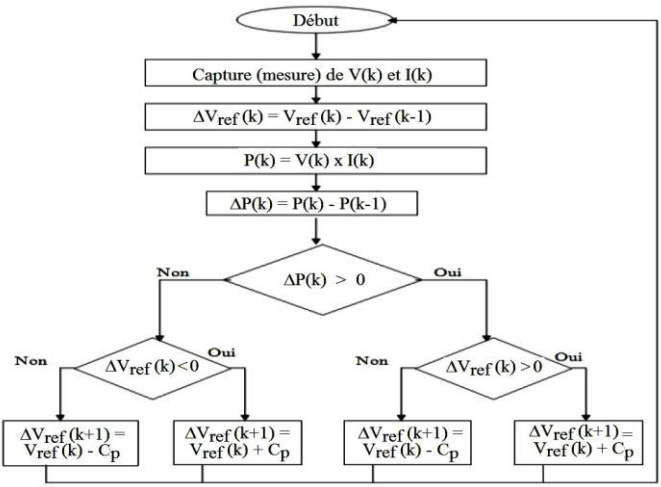

Fig. 5: Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & observation

3.3 Méthode d'incrémentation de la conductance

L'algorithme d'incrémentation de la conductance est basé sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint que si dP/dV est nulle. Les caractéristiques du module photovoltaïque sur la figure 6 prouvent plus loin que la dérivée est supérieure à zéro à gauche du MPP et inférieure à zéro à droite du MPP. Ceci mène à l'ensemble d'équations suivant: [10]

$$(dP/dt) = 0 \quad \text{pour} \quad V = V_{mp} \tag{7}$$

$$(dP/dt) > 0 \quad \text{pour} \quad V < V_{mp} \tag{8}$$

$$(dP/dt) < 0 \quad \text{pour} \quad V > V_{mp} \tag{9}$$

Sachant que $P = I \times V$, la dérivée du produit par rapport à la tension V donne la relation suivante:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \times I)}{dV} = I \times \frac{dV}{dI} + V \times \frac{dI}{dV} = I + V \times \frac{dI}{dV} \tag{10}$$

Ce qui revient à écrire:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \tag{11}$$

Les changements par accroissement nécessaires dV et dI sont obtenus en comparant les valeurs mesurées les plus récentes pour V et I à ceux mesurées durant le cycle précédent:

$$dV(k) \approx V(k) - V(k-1) \tag{12}$$

$$dI(k) \approx I(k) - I(k-1) \tag{13}$$

La fonction centrale pour trouver le MPP utilise les conditions suivantes:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \tag{14}$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \tag{15}$$

Si la relation (14) est vraie, le MPP est atteint et aucun changement de la tension $V(k)$ n'est nécessaire. Si la relation (14) est fausse, selon que $V(k)$ est supérieure ou inférieure à V_{mp}, la tension $V(k)$ est ajustée en conséquence.

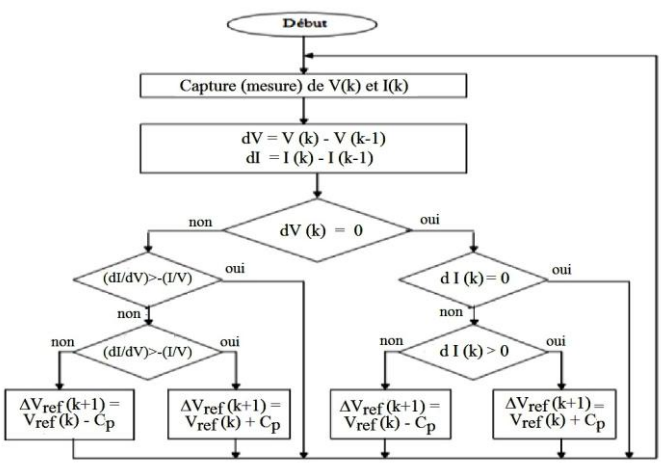

Fig. 6: Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance

Si le système fonctionnait au MPP pendant le cycle précédent, le changement par accroissement de la tension de fonctionnement sera zéro ($dV(k) = 0$). Ceci mènerait à une division par l'erreur zéro. Si $dI = 0$, l'ajustement de la tension du système est évité. Si $dI \neq 0$, les équations (8) et (9) sont employées pour déterminer si le système fonctionne au-dessus ou au-dessous de V_{mp} et un ajustement correspondant à la tension de fonctionnement sera réalisé en conséquence.

On remarque que chaque méthode présentait des avantages et des inconvénients. [1]

4. SIMULATION DES METHODES MPPT

4.1 Introduction

Dans le cadre de cette étude, la simulation est réalisée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

La chaîne de conversion photovoltaïque a été entièrement modélisée et étudiée à l'aide du logiciel Matlab-Simulink. Elle est composée de blocs fonctionnels programmés et simulés qui sont:

- 'GPV', simulant le fonctionnement d'un module et/ou d'un panneau photovoltaïque,
- 'Boost', simulant le fonctionnement d'un convertisseur de type Boost,
- 'Commande', simulant la commande MPPT appliquée au convertisseur,
- La charge est égale à 100 Ω.
- 'Paramètres météo', définissant les conditions d'ensoleillement et de température extérieure.

On applique pour chacune des méthodes, les opérations suivantes:

- Le cas stable 1000 W/m^2 et 25 °C.
- Le changement linéaire de la température.
- Le changement linéaire lent de l'ensoleillement.
- Le changement linéaire brusque de l'ensoleillement.

Les méthodes proposées pour la simulation:

- La méthode de l'incrémentation de la conductance, 'Inc-cond'.
- La méthode de la perturbation et observation, 'P & O'.

Les opérations à effectuer dans le changement de l'environnement lors de la simulation sont:

1- Conditions stables- $T = 25°C$ et $E = 1000\ W/m^2$

2- Changement linéaire et lent de l'ensoleillement-

$$\begin{cases} [0, 1500] & E = 400\ W/m^2 \\ [1500, 2500] & E \text{ varie linéairement de } 400\ W/m^2 \text{ à } 1000\ W/m^2 \\ [2500, 3000] & E = 1000\ W/m^2 \end{cases}$$

3- Changement linéaire et rapide de l'ensoleillement-

$$\begin{cases} [0, 350] & E = 400\ W/m^2 \\ [350, 500] & E \text{ varie linéairement de } 300\ W/m^2 \text{ à } 900\ W/m^2 \\ [500, 3000] & E = 900\ W/m^2 \end{cases}$$

4- Changement linéaire de la température-

$$\begin{cases} [0, 1000] & T = 0°C \\ [1000, 1300] & T \text{ varie linéairement de } 0°C \text{ à } 20°C \\ [1300, 2000] & T = 20\ °C \end{cases}$$

4.2 Modélisation de la chaîne photovoltaïque

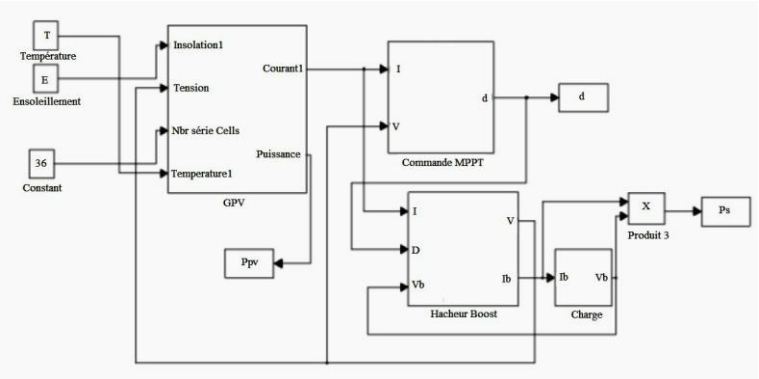

Fig. 7: Block diagramme de modèle de système photovoltaïque

4.3 Simulation des méthodes MPPT

4.3.1 Méthode de l'incrémentation de la conductance

Cette méthode calcule la dérivée de la puissance dP à partir de la tension V du module et de sa dérivée dV, ainsi que du courant I et de sa dérivée dI.

- La conductance de la source- $G = (I / V)$.
- L'incrémentation de la conductance- $\Delta G = (dI / dV)$.
- Le point MPP est atteint lorsque- $\Delta G = G$.

Cet algorithme permet d'atteindre le MPP en réduisant au maximum le taux d'ondulations.

4.3.1.1 Simulation sous un environnement stable

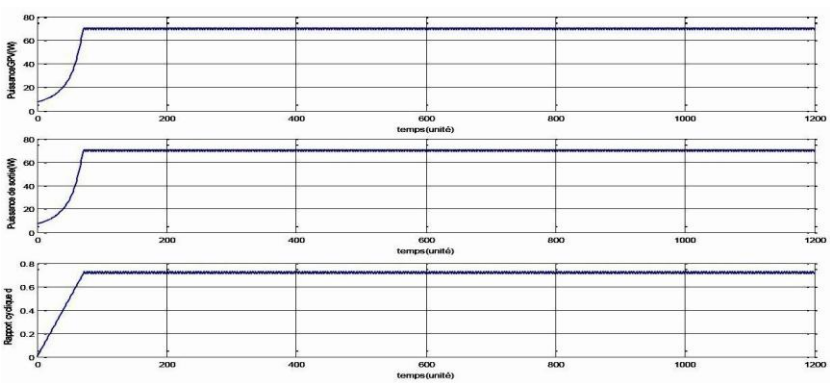

Fig. 8: Courbes du rapport cyclique d, de la puissance photovoltaïque P_{PV} et de la puissance de sortie P_S pour une insolation E et une température T constantes

Les conditions atmosphériques sont fixées à 25 °C et 1000 W/m^2. Selon la figure 8, on note que la courbe de la puissance du générateur photovoltaïque P_{PV} coïncide avec celle qui est transmise à la charge P_S. Au régime permanent, la puissance

photovoltaïque P_{PV} oscille autour de 70 W et la puissance de sortie P_S est égale à 70 W. Cette figure reflète la rapidité du système à converger au régime permanent. On constate que le rapport cyclique oscille autour de 0.72. L'efficacité est égale à 100 %.

4.3.1.2 Simulation avec changement linéaire lent de l'ensoleillement E

Pour cette simulation, la température est maintenue à une température constante égale à 25 °C. On remarque que lors d'un changement lent de l'ensoleillement E, sur la période (1500 – 2500 s), les réponses des signaux de la puissance d'entrée P_{PV} et de la puissance de sortie P_S, ainsi que ceux du rapport cyclique d suivent la variation du E avec une fluctuation autour du point MPP.

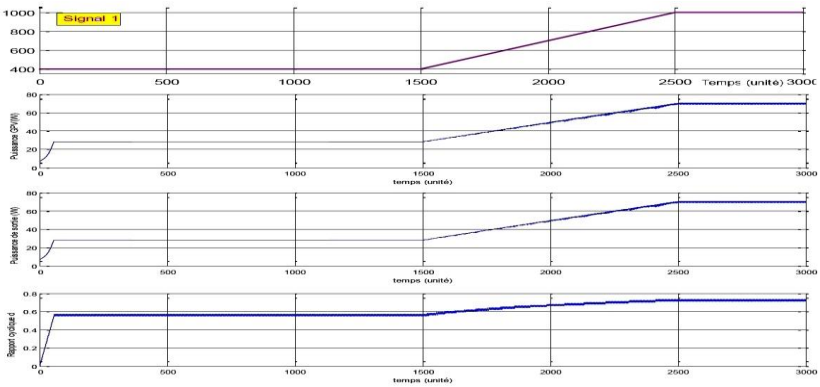

Fig. 9: Courbes du rapport cyclique d, de la puissance photovoltaïque P_{PV} et de la puissance de sortie P_S pour variation lente de l'ensoleillement E

4.3.1.3 Simulation avec variation linéaire rapide de l'ensoleillement E

La figure 10 montre que le système répond immédiatement à la variation rapide de l'ensoleillement, sans qu'il y est une chute de puissance, ni du retard.

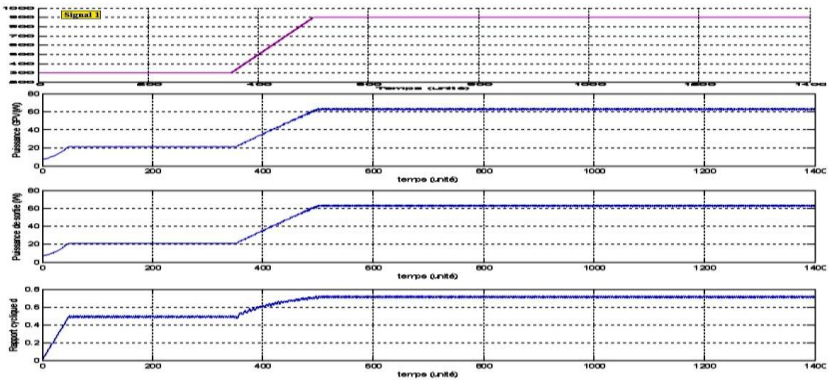

Fig. 10: Courbes du rapport cyclique d, de la puissance d'entrée P_{PV} et de la puissance de sortie P_S pour variation brusque de l'ensoleillement E

Toutefois, on remarque que les signaux des puissances respectives d'entrée P_{PV} et de sortie P_S et ceux du rapport cyclique d présentent une oscillation lors de cette

variation. Lorsque E se stabilise à 1000 W/m^2, la puissance de sortie P_S présente un taux d'ondulation plus élevé par rapport au cas précédent.

4.3.1.4 Simulation avec variation de la température T

Dans ce cas, l'ensoleillement est maintenu à 1000 W/m^2. La figure 11 montre que le système répond convenablement à la variation de la température T, sans qu'il y ait de chute de puissance, ni de retard. Le rapport cyclique d présente des fluctuations, qui ont leur effet sur l'apparition des ondulations dans le signal de puissance de sortie P_S. On constate que les puissances P_{PV} et P_S chutent au fur et à mesure que la température augmente.

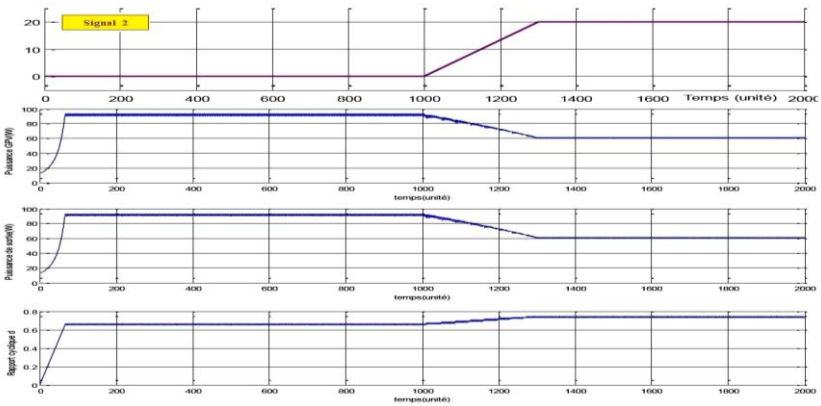

Fig. 11: Courbes du rapport cyclique d, de la puissance d'entrée P_{PV} et de la puissance de sortie P_S pour une augmentation de la température T

4.3.2 Méthode de perturbation et d'observation 'P&O'

4.3.2.1 Simulation sous un environnement stable

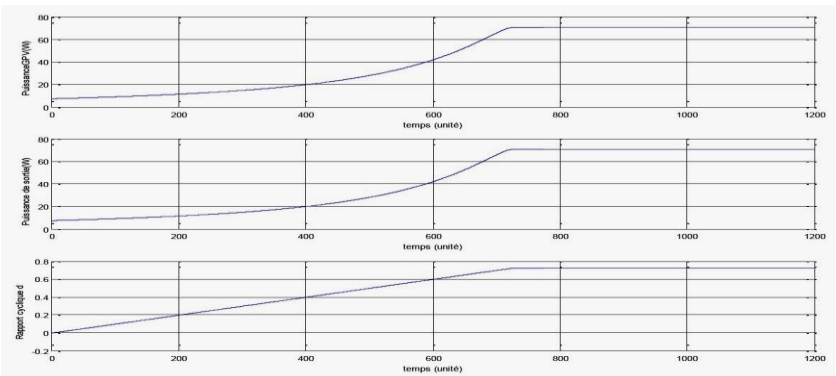

Fig. 12: Courbes du rapport cyclique d, de la puissance photovoltaïque P_{PV} et de la puissance de sortie P_S pour une insolation E et une température T constantes

D'après cette figure, on note que la courbe de la puissance du générateur photovoltaïque P_{PV} correspond exactement avec celle qui est transmise à la charge P_S.

Cela est du au fait qu'on a implémenté un modèle idéal pour le hacheur boost. L'état transitoire indique la rapidité du contrôleur, sa longueur est fonction de la largeur du pas de perturbation de la tension V_{ref} . A l'état permanent, la valeur de la puissance se stabilise autour de 70 W, qui reflète le MPP du module solaire de 36 cellules montées en série pour les conditions normales d'insolation et de température.

4.3.2.2 Simulation avec une variation linéaire lente de l'ensoleillement E

Pour ce test, la température est fixée à 25 °C. On remarque que lors d'une variation lente de l'ensoleillement E , sur la période (1500 – 2500 s), les réponses des signaux de puissance d'entrée P_{PV} et de sortie P_S , ainsi que les réponses du rapport cyclique suivent la variation de l'ensoleillement E avec une fluctuation autour du point MPP .

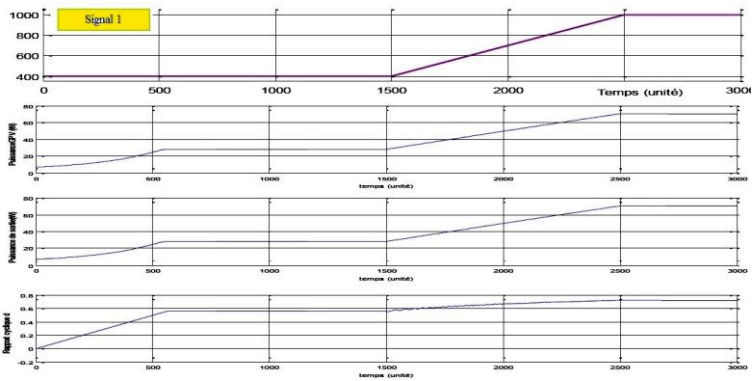

Fig. 13: Courbes du rapport cyclique d , de la puissance d'entrée P_{PV} et de la puissance de sortie P_S pour une variation lente de l'ensoleillement E

4.3.2.3 Simulation avec une variation rapide linéaire de l'ensoleillement E

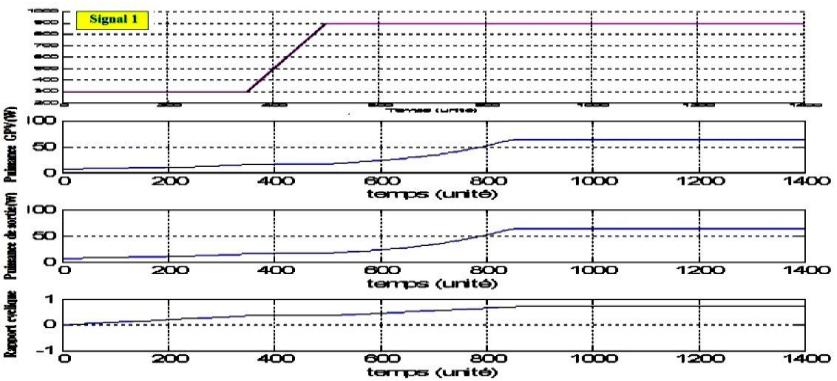

Fig. 14: Courbes du rapport cyclique d , de la puissance d'entrée P_{PV} et de la puissance de sortie P_S pour une variation brusque de l'ensoleillement E

La figure 14 montre qu'il y a un retard entre la réponse du système par rapport au changement rapide de E , mais sans qu'il y est de chute de puissance. On note qu'il n y a pas de linéarité dans le changement des puissances P_{PV} et P_S , donc leurs variations ne suivent pas fidèlement le changement rapide de l'ensoleillement.

4.3.2.4 Simulation avec variation linéaire de la température T

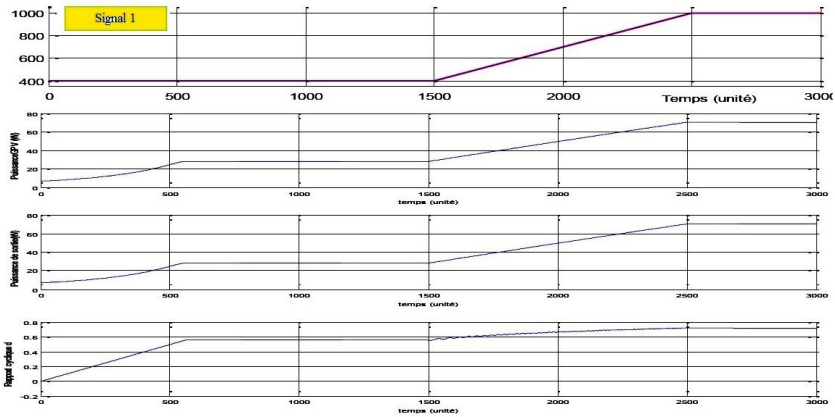

Fig. 14: Courbes du rapport cyclique d, de la puissance d'entrée P_{PV} et de la puissance de sortie P_S pour une variation linéaire de la température T

Dans ce cas, l'ensoleillement est maintenu à 1000W/m^2. La figure 15 montre que le système présente un temps de réponse important avant d'atteindre le régime permanent, mais il répond convenablement au changement de la température T, sans qu'il y ait une chute de puissance ni de retard.

4.4 Tableau de comparaison

Les résultats de la simulation révèlent que:

	Inc-Cond	P&O
Variation lente de l'ensoleillement E	- Faible retard de réponse - Poursuite correcte changement de S - Ondulation pour P_S du à la fluctuation du rapport cyclique	
Variation brusque de l'ensoleillement E	- Poursuite du MPP	Elle n'a pas pu suivre exactement la pente de la variation de E
Variation de T	● Faible retard de réponse très élevé ● Correcte poursuite – Variation de T ● Présence des ondulations- Inconvénient pour la traction MPP	● Retard de réponse très élevée ● Poursuite correcte- Variation de T

5. CONCLUSION

Le travail que nous avons présenté a pour objet de mettre au point un banc d'essai-test photovoltaïque. Le but est d'augmenter le rendement de la conversion. Pour effectuer ce travail, nous sommes passés par une étude théorique des composants de la chaîne photovoltaïque.

La seconde étape a pour objectif le test de performance des méthodes de la recherche de point de puissance maximale MPPT proposées. Pour cela, nous avons utilisé Simulink de Matlab®, qui nous a permis de simuler les méthodes 'P & O' et 'Inc-Cond'.

Ces techniques ont été testés à l'état stable et lors des changements des conditions atmosphériques (ensoleillement, température) lents ou brusques. Les résultats sont appréciables.

La maximisation de la production photovoltaïque, compte tenu du caractère fluctuant de la source PV considérée, passe par le développement de commandes de types MPPT performantes, à hauts rendements, en particulier lors des divers transitoires (changements brusques d'ensoleillement).

REFERENCES

[1] H.J. Möller, '*Semiconductors for Solar Cells*', Artech House, Inc, MA, 1993.

[2] H. Knopf, '*Analysis, Simulation and Maximum of Evaluation Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle*', Master of Science in Electrical and Computer Engineering, Portland State University, 1999.

[3] C. Alonso, '*Contribution à l'Optimisation, la Gestion et le Traitement de l'Energie*', Mémoire en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse 3, Décembre 2003

[4] J.L. Santos, F. Antunes, A. Chehab and C. Cruz, '*A Maximum Power Point Tracker for PV Systems Using a High Performance Boost Converter*', Solar Energy, Vol. 80, N°7, pp. 772 – 778, 2006.

[5] C. Cabal, '*Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique Dédié à la Conversion Photovoltaïque*', Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse 3, Décembre 2008.

[6] J. Schmid and H. Schmidt, '*Power Conditioning for Photovoltaic Power Systems*', Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2003.

[7] A. Oi, '*Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System*', Master of Science in Electrical Engineering, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, September 2005.

[8] S. Park and T.M. Jahns, '*A Self-Boost Charge Pump Topology for a Gate Drive High-Side Power Supply*', IEEE transactions on power Electronics, Vol. 20, N°2, pp. 300 – 307, 2005.

[9] J. Fadat, '*Chaîne de Conversion d'Energie Photovoltaïque Commande MPPT*', La Revue 3EI, N°43, Décembre 2005.

[10] K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino and M. Osakada, '*Maximum Photovoltaic Power Tracking, an Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions Generation*', IEE Proceedings, Generation, Transmission and distributions, Vol. 142, N°1, pp. 59 – 64, 1995.