

# Influence des rayonnements solaires sur le rendement des panneaux photovoltaïques

E. Kechar<sup>#1</sup>, E. Azzag<sup>\*2</sup>, I. Touaïbia<sup>#3</sup>

<sup>#</sup> E. Kechar – Department d'électrotechnique, Annaba, University, B.P 12, 23000 Annaba, Algeria

<sup>#</sup> I. Touaïbia – Department d'électrotechnique, Annaba, University, B.P 12, 23000 Annaba, Algeria

<sup>1</sup>abdoualla\_1980@outlook.fr

<sup>3</sup>elect\_2008@yahoo.com

<sup>\*</sup> E. Azzag

Department d'électrotechnique, Annaba,

University, B.P 12, 23000 Annaba, Algeria

<sup>2</sup>Azzag15@yahoo.fr

**Résumé** — L'exploitation des énergies renouvelables en Algérie est un grand axe de recherche qui connaît de considérables développements cette dernière décennie. Nous nous intéressons dans cette étude à la conversion de l'énergie solaire électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique qui est la conversion photovoltaïque. Nous désirons au moyen d'un module PV obtenir un rendement maximal et ce de le maintenir perpendiculaire aux rayons solaires. Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique I(V) du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale à cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont connues sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) associées à l'hacheur, lequel assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale. Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau PV.

**Mots clés** — Rayonnement; Conversion photovoltaïque; Rendement; Hacheur; Commande MPPT.

## I. INTRODUCTION

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier.

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre

les pays, contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Dans ce travail, on analyse la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique (commande MPPT perturbation et observation) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. L'objectif de ce travail est de contribuer à une meilleure compréhension des performances de convertisseur DC-DC adapté par la commande numérique lors qu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peu utiliser comme un générateur d'électricité.

## II. MODÉLISATION DU SYSTÈME

La figure (1) représente le schéma synoptique d'un système PV alimentant une charge résistive ( $R_S$ ) :

- Le générateur PV est en silicium monocristallin est constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 60 W, un courant de 3,5A sous une tension optimale de 17,1V.

- Le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie de type survolteur pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 17V.

- La commande MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV

qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

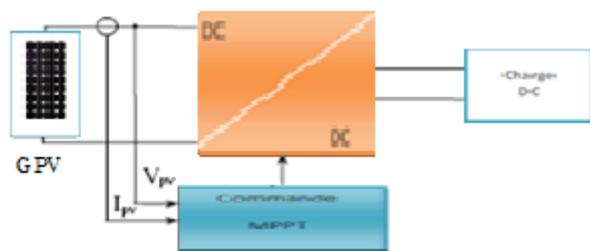


Fig. 1 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge DC

### A. Modèle du module photovoltaïque

La figure (2) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage.

Il correspond à un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule [4]:

- La résistance série ( $R_s$ ) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles;
- La résistance shunt ( $R_p$ ) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

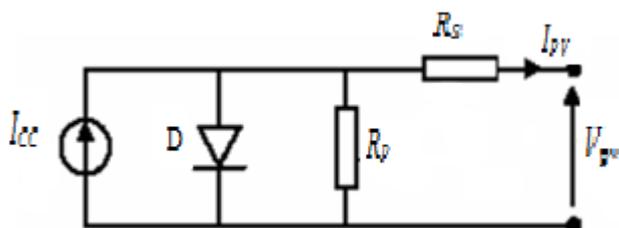


Fig. 2 Schéma équivalent électrique de la cellule PV

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left( \exp \left( \frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{nKT} \right) - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{R_p} \quad (1)$$

Où  $I_{sat}$  est le courant de saturation dans la diode (A),  $K$  est la constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  J/K),  $T$  est la température effective des cellules en Kelvin (K),  $q$  est la charge de

l'électron ( $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  C),  $n$  est le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 3$ ),  $I_{pv}$  est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,  $V_{pv}$  est la tension aux bornes de cette même cellule,  $I_{ph}$  est le photo-courant de la cellule ou bien courant de (court circuit) dépendant de l'éclairage et de la température,  $R_p$  est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,  $R_s$  est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions [1].

#### 1) Influence du rayonnement sur la courbe $I=f(V)$

La figure (3) montre l'influence de l'éclairage sur la caractéristique  $I=f(V)$ . A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairage alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [2, 1, 7, 5].

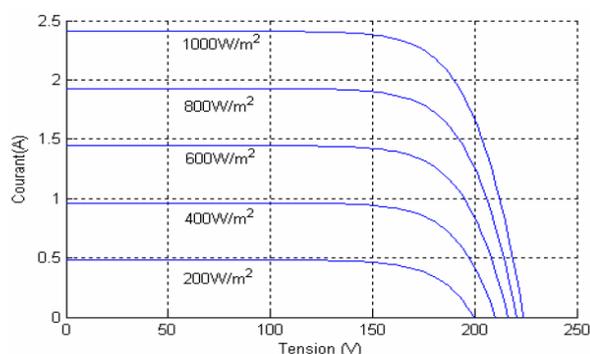


Fig. 3 Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs du rayonnement

#### 2) Influence de la température sur la courbe $I=f(V)$

La figure (4) montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [1].

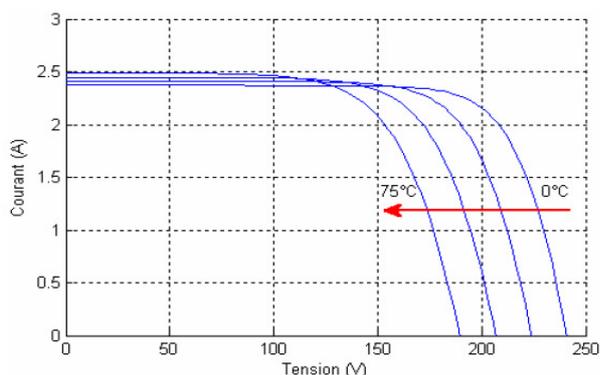


Fig. 4 Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de la température

### III. MODELISATION DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

On présente le schéma du circuit électrique par la figure (5) :

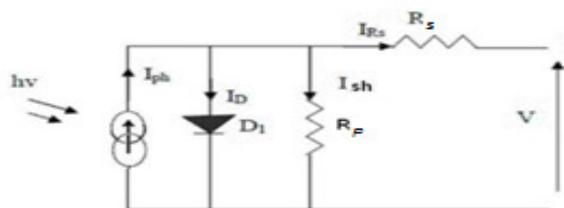


Fig. 5 Circuit électrique équivalent d'une cellule PV

Alors, on peut présenter le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc, Figure (6), comportant quatre paramètres.

Deux variables d'entrées qui sont [6] : l'ensoleillement dans le plan des panneaux  $E_s$  ( $W/m^2$ ), température de jonction des cellules  $T_j$  ( $^{\circ}C$ ) et deux variables de sortie : courant fourni par le GPV  $I_s$  (A), tension aux bornes du GPV  $V_s$  (V).

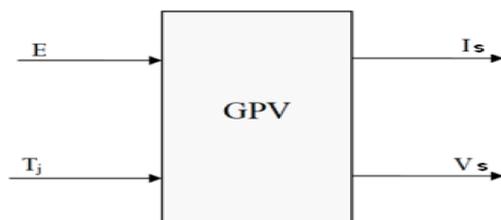


Fig. 6 Schéma bloc du générateur PV.

TABLE I  
 CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE  
 DANS LES CONDITIONS STANDARDS «CST»

Eclairement standard, G	1000W/m <sup>2</sup>
Température standard, T	25°C
Puissance maximale $P_{max}$	60W
Tension à $P_{max}$ ou tension optimale $V_{opt}$	17,1 V
Courant à $P_{max}$ ou courant optimal ( $I_{opt}$ )	3,5 A
Courant de court-circuit $I_{cc}$	3,8A
Tension à circuit ouvert $V_{co}$	21,1 V

Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour simuler le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque. Ces modèles se différencient par la méthode de calcul et le nombre des paramètres intervenants dans la caractéristique courant-tension.

Dans ce cas, on a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, la caractéristique I-V de ce modèle est donnée par l'équation (1) présentée ci-dessus.

Si l'on suppose que la résistance parallèle (shunte) est infinie ( $R_p = \infty$ ), l'équation (1) devienne :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left( \exp \left( \frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{n k T} \right) - 1 \right) \quad (2)$$

Où  $I_{pv}$  est le courant fourni par la cellule PV et  $V_{pv}$  est la tension aux bornes de la cellule PV.

On peut calculer la résistance série dans le point  $V_{co}$ :

$$dI_{pv} = 0 - I_{sat} * q \left( \frac{dV_{pv} + R_s dI_{pv}}{n k T} \right) * \exp \left( q \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{n k T} \right) \right) \quad (3)$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristique (I-V) au voisinage de  $V_{co}$ .

Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$R_s = - \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} - \frac{n k T / q}{I_{sat} * \exp \left( q \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{n k T} \right) \right)} \quad (4)$$

Alors d'après l'équation (4) la valeur de  $R_s$  est estimé en fonction de  $V_{co}=V$  :

$$R_s = - \frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} \Big|_{V_{co}} - \frac{n k T / q}{I_{sat} * \exp \left( \frac{q V_{co}}{n k T} \right)}$$

La méthode de Newton-Raphson est décrite comme suit:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (5)$$

Où  $f'(x_n)$  est la dérivée de la fonction  $f(x_n)$ ,  $x_n$  est la présente itération et  $x_{n+1}$  est l'itération suivante.

Par conséquent, l'équation (2) devient :

$$f(I_{pv}) = I_{cc} - I_{pv} - I_{sat} \left[ \exp \left( q \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{n k T} \right) \right) \right]$$

En remplaçant dans l'équation (5), on calcule le courant  $I$  par les itérations [10] :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{cc} - I_n - I_{sat} \left[ \exp \left( q \left( \frac{V_{pv} + R_s I_n}{n k T} \right) \right) - 1 \right]}{-1 - I_{sat} \left( \frac{q R_s}{n k T} \right) \exp \left( q \left( \frac{V_{pv} + R_s I_n}{n k T} \right) \right)}$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal.

#### IV. SIMULATION DU GENERATEUR PV

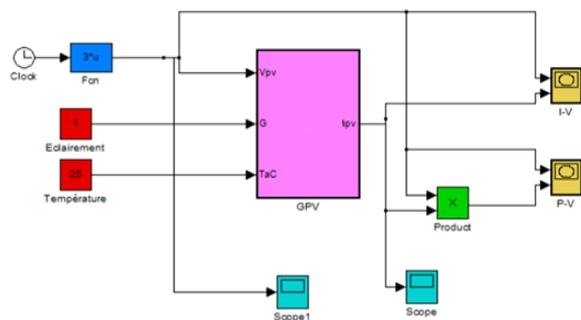


Fig. 7 Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK

Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque sont représentés par les figures (8) et (9). Ces figures représentent la caractéristique Puissance-Tension pour différentes températures et différents éclaircements.

La figure (8) montre clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule. On peut remarquer sur la figure que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

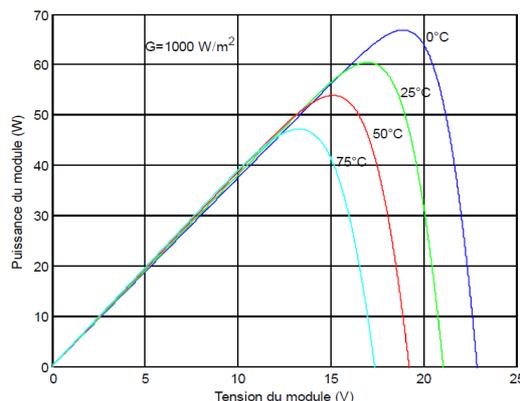


Fig. 8 Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension, pour différentes températures et  $G=1000W/m^2$

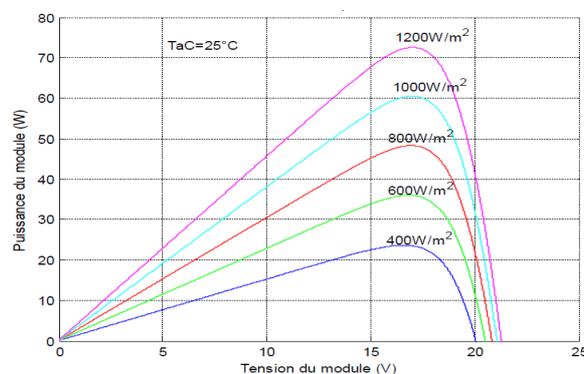


Fig.9 Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension pour différents éclaircements et une température  $T=25°C$ .

Après simulation de notre modèle dans l'environnement Matlab-Simulink, on a déduit les différentes grandeurs électriques du générateur PV : tension optimale  $V_{opt}$ , courant optimal  $I_{opt}$ , puissance maximale  $P_{max}$  et résistance optimale  $R_{opt}$  en fonction de la température et de l'éclaircissement. Les résultats de simulation obtenus sont représentés sur les figures (10) à (13).

On remarque que le courant optimal est très sensible à l'éclaircissement. Par contre la tension optimal varie très peu avec l'éclaircissement et diminue légèrement avec la température.

Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.

A partir la figure (12), on peut remarquer que la puissance maximale est très sensible à l'éclaircissement.

Par contre, cette puissance maximale diminue légèrement avec la température en particulier pour les forts éclaircissements.

La résistance optimale, figure (13), est très sensible à l'éclaircissement en particulier pour les faibles éclaircissements.

En examinant les caractéristiques obtenues, nous pouvons conclure que des fortes variations du niveau de l'éclaircissement

provoquent des variations relativement importantes du courant optimal. Alors que, les variations relatives de la tension optimale restent faibles.

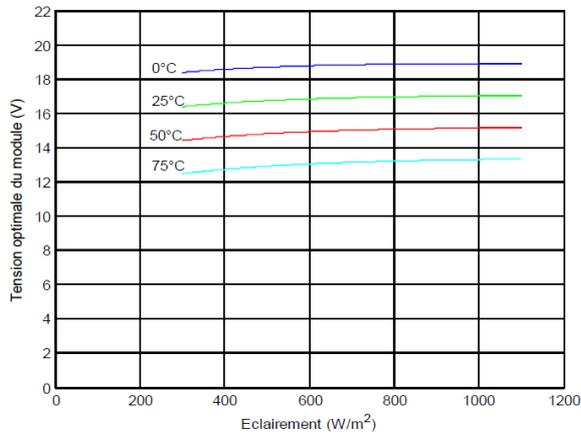


Fig. 10 Résultats de simulation des caractéristiques Tension optimale- Eclairement pour différentes températures

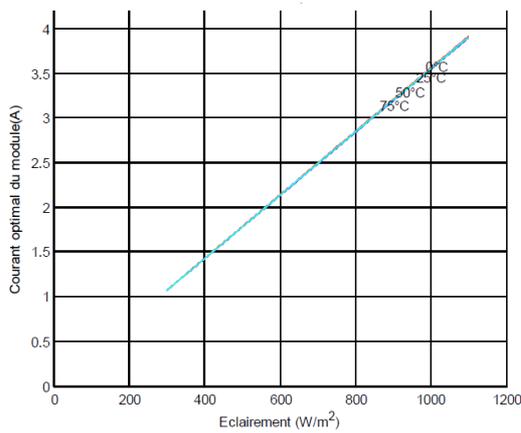


Fig. 11 Résultats de simulation des caractéristiques courant optimal- Eclairement pour différentes températures

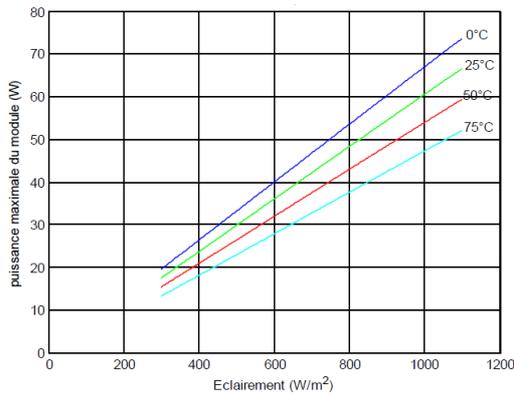


Fig. 12 Résultats de simulation des caractéristiques Puissance maximale- Eclairement pour différentes températures

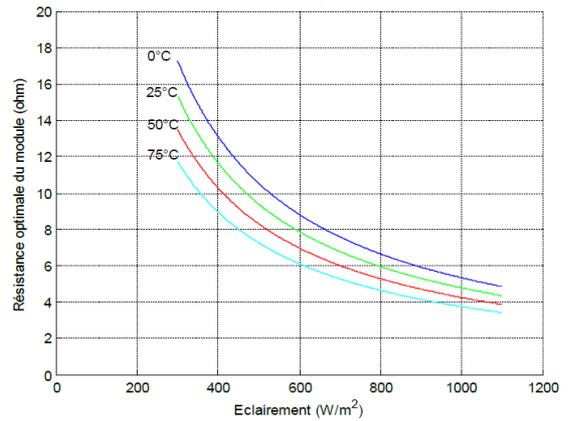


Fig. 13 Résultats de simulation des caractéristiques Résistance optimale- Eclairement pour différentes températures

### V. MODELISATION DE HACHEUR SURVOLTEUR

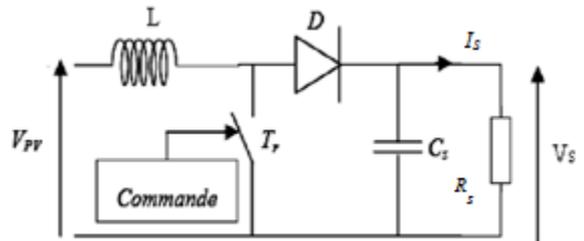


Fig. 14 Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost)

Les grandeurs électriques de sorties ( $V_s$  et  $I_s$ ) dans le convertisseur survolteur sont liées à celles d'entrées ( $V_{pv}$  et  $I_{pv}$ ) en fonction du rapport cyclique  $\alpha$  du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur (Figure(14)) par le système d'équations:

$$\begin{cases} V_s = -\frac{V_e}{\alpha-1} = \frac{V_{pv}}{\alpha-1} \\ I_s = (1-\alpha) I_e = (1-\alpha) I_{pv} \end{cases} \quad (6)$$

A partir du système d'équations (6), on peut déduire la résistance à la sortie du panneau PV ( $R_{pv}$ ) en fonction de  $\alpha$  et  $R_s$ :

$$R_{pv} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = \frac{(1-\alpha)V_s}{I_s(\alpha-1)} = R_s (1-\alpha)(1-\alpha) \quad (7)$$

Alors, le rapport cyclique  $\alpha$  s'écrit en fonction des résistances  $R_{pv}$  et  $R_s$ :

$$\frac{R_{pv}}{R_s} = (1 - \alpha)(1 - \alpha) \quad (8)$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_s}} \quad (9)$$

Puisque le rapport  $\alpha$  vérifie l'inégalité  $0 < \alpha < 1$ , le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge  $R_s$  remplit la condition suivante :

$$R_s > R_{pv}$$

L'adaptation optimale est alors réalisée lorsque  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  valent respectivement  $I_{opt}$  et  $V_{opt}$  ceci correspond alors à une résistance optimale  $R_{opt}$  du générateur répondant à l'équation suivante :

$$R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} = \frac{V_s}{I_s} (1 - \alpha)^2 \quad (10)$$

$$R_{opt} = R_s (1 - \alpha)^2 \quad (11)$$

#### VI. STRUCTURE DE LA COMMANDE « PERTURBATION ET OBSERVATION »

Pour avoir la meilleure connexion entre le « GPV » une source non linéaire et une charge pour 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. Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique (I-V) avec celle de la charge.

La méthode de perturbation et d'observation « P&O » est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement.

Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température.

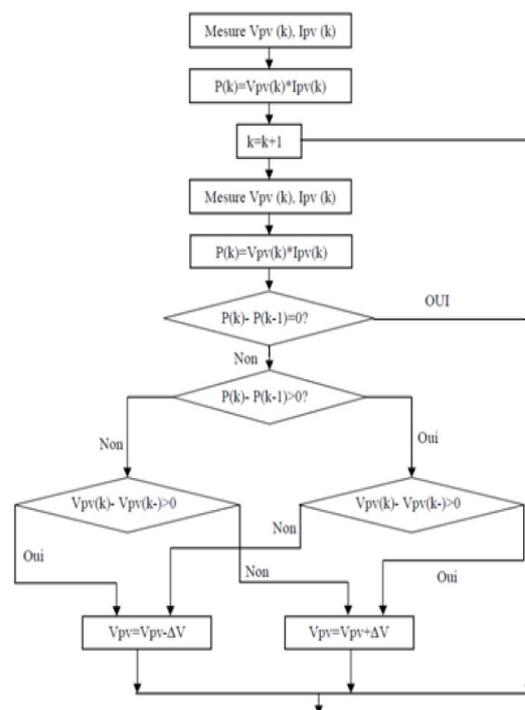


Fig. 15 Diagramme fonctionnel algorithme « perturbation-observation » (p&o)

#### VII. SYNTHÈSE DU SYSTÈME GLOBAL

Le système est composé de trois éléments distincts, le panneau PV, le convertisseur de type hacheur survolteur (partie de puissance) avec sa commande (partie de commande) qui représentent les deux le régulateur MPPT et la charge. Pour chacune des parties, un modèle simple a été choisi en vue de la simulation. Ceci nous a permis de mieux comprendre l'influence des paramètres du Système et d'en dégager les conclusions intéressantes.

#### VIII. CONCLUSION

L'énergie photovoltaïque devient progressivement une source d'énergie à part entière ; de plus en plus sollicitée pour produire de l'énergie électrique allant du domestique à de grandes centrales connectées au réseau. Cependant, il reste encore pas mal de freins à son développement en termes de manques de production, de taux de pannes ou bien même de coûts prohibitifs rendant cette source d'énergie chère et peu fiable.

La modélisation et la conception d'un module ou générateur PV est une manière d'étude très importante pour analyser le fonctionnement du système PV et voir l'influence de différents facteurs sur le module surtout la variation de l'éclairement et de la température.

Nous avons montré tout d'abord l'importance d'installer un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge, ce type de connexion est indispensable pour augmenter le rendement et minimiser les pertes de transfère d'énergie.

Nous avons montré aussi que dans un système PV, la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que grâce à des lois de commande spéciale qui réagie directement sur le rapport cyclique.

Finalement, on propose le régulateur MPPT comme solution pour optimiser le système photovoltaïque quelques soit le taux de variation de l'éclairement et de la température.

#### REFERENCES

- [1] M. Adouane, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [2] S. Issaadi, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [3] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [4] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [5] M. Makhoulf, «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage», mémoire de magister, université Mentouri Constantine, Algérie, 2006.
- [6] A. Meflah, « Modélisation et commande d'une chine de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [7] S. Bellakehal, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [8] M. Djarallah, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique », Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, 2008.
- [9] B. Gori, « modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT analogique », Mémoire d'Ingéniorat, université Ouargla, 2011.
- [10] L. Abbassen, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque», Mémoire de Magistère, Université de Tizi Ouzou, Algérie, 2011.