

# Maximum Power Point Tracking for a Standalone Photovoltaic System

N. Hamrouni  
 ISSAT-Mateur

Laboratoire Innov-Com-pôle el Gazela-Tunis  
[hamrouni\\_nejib2003@yahoo.fr](mailto:hamrouni_nejib2003@yahoo.fr)

M. Talbi, M. Jraidi, S. Hammouda

Laboratoire Innov-Com- Pole technologique el  
 Gazela, Tunis- Tunisie

**Résumé-** Dans ce travail, nous allons nous intéresser à la modélisation et la commande d'un système PV autonome formé par un générateur PV, d'un hacheur survolteur et d'une charge continue. Autour de convertisseur nous allons développer les principales commandes analogiques et numériques 'MPPT' présentées dans la littérature à savoir; la commande perturbation & observation (P&O), la conductance incrémentale (ConInc), la logique floue (LF) et le réseau de neurones (RN). Ces commandes, appliquées séparément sur le modèle du système PV autonome, seront simulées pour des conditions climatiques stables et perturbées. Les résultats obtenus permettent de conclure sur les performances des commandes calculées du point de vue stabilité, rapidité et rentabilité.

**Mots clés :** modélisation; logique floue; réseau de neurone;

## I. INTRODUCTION

Le générateur photovoltaïque (GPV) est une source d'énergie intermittente qui varie avec les conditions climatiques. L'introduction d'un étage d'adaptation est indispensable pour pomper l'énergie maximale que peut fournir le GPV. Les commandes conventionnelles les plus développées dans la littérature autour de l'étage d'adaptation, sont la commande P&O [1], la commande conductance incrémentale (ConInc) [2] et la commande basée sur la méthode du circuit ouvert. D'autres méthodes, basées sur l'intelligence artificielle, sont en train d'être développées et trouvent leurs places dans les applications industrielles. Elles sont la commande logique floue (LF) et la commande basée sur les réseaux de neurones (RN)[3-5]. Dans ce travail, nous allons se limiter au développement des principales commandes à savoir; P&O, ConInc, LF et RN. Elles seront appliquées séparément sur un système PV autonome pour des conditions climatiques stables et perturbées. L'objectif principal de ce travail, consiste à choisir la commande la plus performante (stabilité, rapidité, rentabilité...) qui s'adapte bien avec les systèmes PV autonome.

## II. MODELISATION

Pour étudier la configuration de la figure 2.1, nous avons élaboré dans une première étape un travail de modélisation élémentaire. Par suite, nous avons intégré ces modèles dans un modèle global qui reflète au mieux le comportement réel du système fonctionnant en mode autonome.

### A Générateur photovoltaïque

Le générateur PV est formé par une association série de cellule PV dont son modèle est obtenu à partir du modèle mono-diode [6]. Il correspond à un générateur de courant, une diode et deux résistances série et shunt associés comme montre la figure 1. Le courant généré par la cellule PV ( $I_{ph}$ ) sera diminuée du courant de la diode  $I_d$  selon sa caractéristique (I-V) et du courant absorbé par la résistance parallèle  $R_p$ . Le courant restant constitue le courant photovoltaïque ( $I_{pv}$ ) traversant la charge. La résistance série  $R_s$  constitue une perte additionnelle de tension.

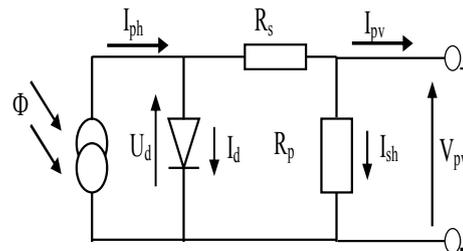


Fig.1. Circuit équivalent d'une cellule PV

La courbe de fonctionnement I-V d'un module de base est une courbe se déduisant de la courbe de fonctionnement d'une cellule PV élémentaire par changement d'échelle sur l'axe des abscisses. Une association série/parallèle de modules PV aura de même une courbe de fonctionnement semblable à la courbe de la cellule de base, obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes du courant et de tension. Pour obtenir des puissances importantes, le générateur photovoltaïque doit être composé par un champ de plusieurs modules.

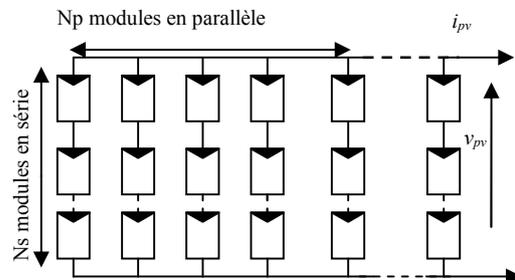


Fig.2. Association de  $N_s$  modules en série et  $N_p$  en parallèle

En supposant que l'ensoleillement, la température et les paramètres des cellules sont

identiques, l'équation du courant d'un générateur photovoltaïque est donnée par :

$$I_{pv} = N_p * I_{ph} - N_p * I_s * \left[ e^{\left( \frac{q}{nkT} \right) \left( \frac{V_{pv}}{N_s} + I_{pv} R_s \right)} - 1 \right] - \frac{N_p}{R_p} * \left( \frac{V_{pv}}{N_s} + I_{pv} R_s \right) \quad (1)$$

Avec :

- $N_p$  est le nombre de cellule monté en parallèle.
- $N_s$  est le nombre de cellule monté en série.

### B Adaptateur de puissance

La puissance PV optimale fluctue instantanément avec les conditions climatiques (ensoleillement, température...). Pour ce faire, le couplage d'une charge à puissance constante, sans l'utilisation d'une batterie de stockage, n'assure pas un fonctionnement optimal. Il est alors indispensable de prévoir un adaptateur de puissance qui permet à la charge d'extraire la puissance PV maximale quelque soient les conditions climatiques.

Pour des raisons liées à la caractéristique physique de la charge et au niveau de la tension désirée du côté charge, le hacheur élévateur constitue un choix convenable pour les systèmes photovoltaïques autonomes. Fig. 3 représente le schéma du hacheur élévateur associé à un filtre LC. Ce dernier assure une tension adéquate aux bornes du GPV et réduit les fluctuations du courant dans l'inductance  $L_{pv}$ . Les variations de la tension aux bornes du générateur PV et du courant circulant dans l'inductance ( $L_{pv}$ ) sont données respectivement par :

$$\frac{dv_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_{pv}} (i_{pv} - i_l) \quad (2)$$

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{1}{L_{pv}} (v_m - v_{pv}) - \frac{R_{pv}}{L_{pv}} i_l \quad (3)$$

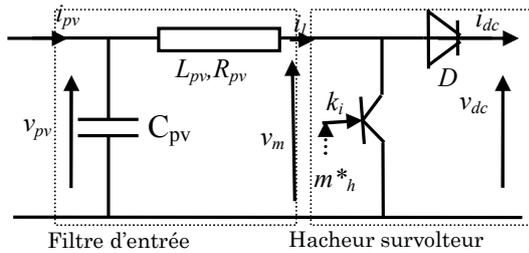


Fig.3. Schéma du hacheur élévateur

La structure interne du hacheur se présente sous la forme d'une fonction matricielle (2x2) [7] traduisant la relation entre les grandeurs électriques d'entrée et de sortie (tension et courant). Elle est de la forme :

$$[f] = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Les paramètres de la matrice [f] représentent les fonctions de connexion. Leur domaine de définition est l'ensemble {0,1}. Les fonctions  $f_{12}$  et  $f_{22}$  sont égales respectivement à 0 et 1. Selon [7], nous avons :

$$[q] \cdot [m_h] = [f] \cdot [r] \quad (5)$$

[q] et [r] sont deux vecteurs colonnes données par :

$$[q] = [r] = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Cependant la matrice ' $[m_h]$ ' est égale à la fonction de connexion  $f_{11}$ . Pour simplifier l'étude et minimiser les non-linéarités du système global, nous considérons, dans cette approche seulement l'effet moyen du hacheur, en supposant que :

$$m_h = \langle f_{11h} \rangle = 1 - \alpha \quad (7)$$

Les variables modulées par le hacheur, qui sont la tension  $v_m$  et le courant continu  $i_{dc}$ , peuvent être exprimées par :

$$\begin{pmatrix} v_m \\ i_{dc} \end{pmatrix} = m_h \cdot \begin{pmatrix} v_{dc} \\ i_l \end{pmatrix} \quad (8)$$

Avec :

- $v_m$  est la tension d'entrée du hacheur et  $v_{dc}$  est la tension de sortie,
- $i_l$  est le courant d'entrée dans l'inductance et  $i_{dc}$  est le courant fourni par le hacheur.

### C Modélisation de la charge

Comme charge nous avons choisi une résistance de faible impédance. Le modèle de la charge peut être mis sous la forme d'une équation électrique liant la tension  $v_{dc}$  au courant consommé.

$$V_{dc} = R_c i_{dc} \quad (9)$$

## III. CALCUL DES COMMANDES

Nous allons se limiter au développement des principales commandes qui sont la commande P&O, la commande ConInc, la LF et le RN. Ces commandes seront appliquées séparément sur un système PV autonome pour des conditions climatiques stables et perturbées.

### A. Commande logique floue

Dans le cas étudié, nous allons considérer deux variables d'entrées qui sont l'erreur  $E(k)$  et la variation d'erreur  $\Delta E(k)$  à l'instant  $k$ . ces variables sont fonctions de la puissance et de la tension PV. Elles sont données d'après [5] par:

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{v(k) - v(k-1)} \quad (10)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (11)$$

L'intervalle d'intérêt de chaque variable d'entrée et de la variable de sortie est divisé en cinq classes. Elles sont récapitulées dans le tableau 1.

TABLE 1. CLASSES DE VARIABLES D'ENTREE

Négatif Grand	NG
Négatif Petit	NP
Environ Zéro	EZ
Positif Petit	PP
Positif Grand	PG

Les fonctions d'appartenance des fonctions floues ou linguistiques des variables d'entrée et de sortie sont données par la figure 4.

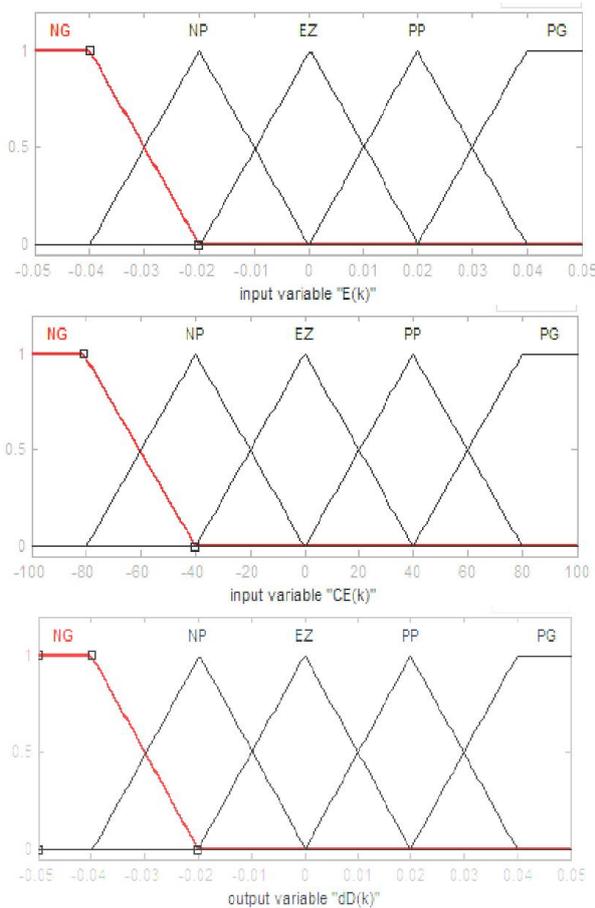


Fig.4. Fonction d'appartenance de chacune des variables linguistiques

Dans la deuxième étape, nous allons définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. De même, nous allons fixer des règles d'appartenance pour la sortie comme il est fait pour les entrées. Grâce à ces règles nous avons dressé le tableau d'inférence suivant.

TABLE.2. TABLE D'INFERENCE

E/ ΔE	NG	NP	EZ	PP	PG
NG	EZ	EZ	NG	NG	NG
NP	EZ	EZ	NP	NP	NP
EZ	NP	EZ	EZ	EZ	PP
PP	PP	PP	PP	EZ	EZ
PG	PG	PG	PG	EZ	EZ

Enfin, nous avons réalisé l'opération inverse de la fuzzification. Pour ce faire, nous avons calculé une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue. La figure 5 présente le modèle d'un contrôleur flou dont le schéma de principe est implanté dans l'environnement Matlab-Simulink.

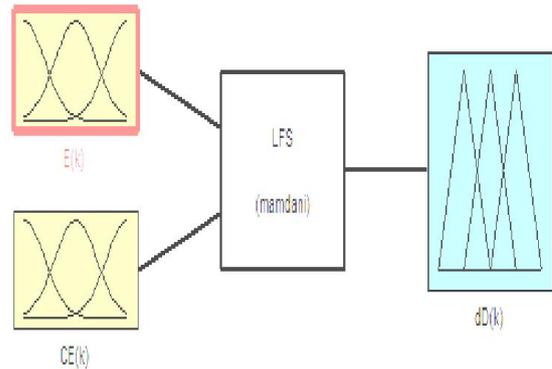


Fig.5. Schéma du contrôleur flou(FLC) sous Matlab

**B. Réseau de neurones**

Le réseau de neurones est constitué de trois couches comme représenté sur la figure 6. La couche d'entrée qui est formée de deux neurones reçoit la tension et le courant PV variant en fonction des conditions climatiques. La couche caché est formée de cinq nœuds par contre la couche de sortie est formée par un seul nœud permettant de fournir la variation du rapport cyclique.

Les neurones de la couche cachée reçoivent des données à partir de la couche d'entrée pour calculer une sortie en utilisant la fonction d'activation sigmoïde (tansig). Par suite ils transmettent ces données à la couche de sortie moyennant la fonction linéaire (purelin) pour calculer un rapport cyclique permettant la commande du hacheur survolteur.

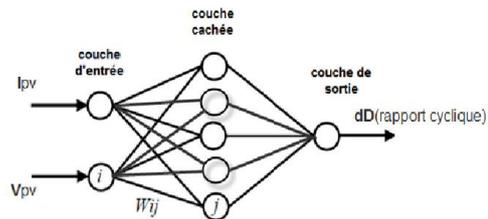


Fig.6. Architecture de réseau de neurone

Pour ce cas de commande, nous avons rassemblé un nombre de données suffisant pour construire une base représentative qui servira à l'apprentissage et au test du réseau de neurones. Pour chaque couple I-V, nous avons calculé le rapport cyclique qui permet d'avoir la puissance maximale.

**C. Méthode de Perturbation et Observation P&O**

Cette méthode demande la mesure de la tension  $v_{pv}$  et du courant  $i_{pv}$ . Le fonctionnement de cette méthode est basé sur la perturbation de la tension photovoltaïque ( $v_{pv}$ ) et l'observation simultanée de la puissance fournie par le GPV. Pour chaque cycle la méthode P&O calcule la puissance photovoltaïque  $P_{pv}(n)$  et la compare avec  $P_{pv}(n-1)$  calculée dans le cycle précédent. Si  $P_{pv}(n) > P_{pv}(n-1)$ ,  $v_{pv}$  évolue dans le même sens. Inversement, si  $P_{pv}(n) < P_{pv}(n-1)$ ,  $v_{pv}$  évolue en sens inverse. La tension  $v_{pv}$  est perturbée dans chaque cycle du MPPT. Une fois le mode MPPT est atteinte  $v_{pv}$  commence à osciller autour

de la tension PV maximale. La figure 7 illustre le synoptique de la commande P&O.

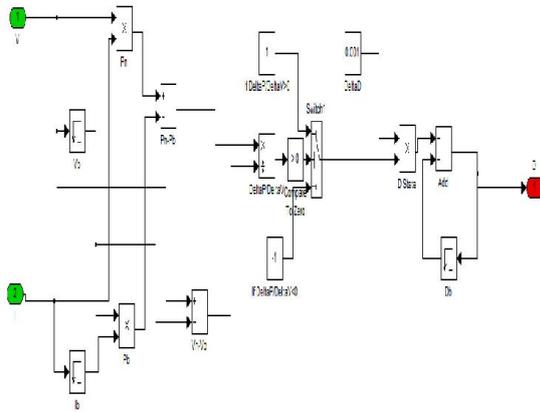


Fig.7. Méthode perturbation et observation

D. Méthode de conductance Incrémentale

Cette méthode, donnée par Fig.8, est proposée pour résoudre les inconvénients de la méthode P&O. La tension du GPV peut être ajustée à la tension PV maximale par la mesure incrémentale et instantanée de la conductance du GPV (I/V et dI/dV). Cette conductance peut être exprimée comme suit :

$$\text{Au PPM : } \frac{di_{pv}}{dv_{pv}} = - \frac{i_{pv}}{v_{pv}} \quad (12)$$

$$\text{A gauche du PPM : } \frac{di_{pv}}{dv_{pv}} > - \frac{i_{pv}}{v_{pv}} \quad (13)$$

$$\text{A droite du PPM : } \frac{di_{pv}}{dv_{pv}} < - \frac{i_{pv}}{v_{pv}} \quad (14)$$

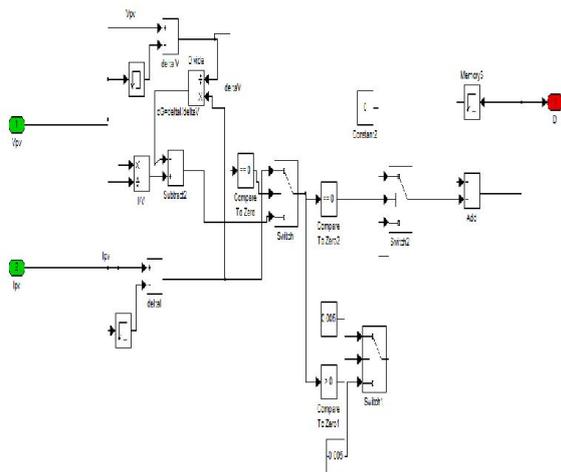


Fig.8. Modèle Simulink de l'algorithme ConInc

IV. SIMULATION ET INTERPRITATION

Pour la simulation du modèle du système PV autonome commandé en mode MPPT, nous avons

choisi un module photovoltaïque monocristallin en silicium ‘SP75’. Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau 3.

TABLE 3. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU MODULE ‘SP75’

Paramètres	valeur
Eclairage standard, G	1000 W/m <sup>2</sup>
Température Standard, T	25°C
Puissance maximale	75 Wc
Tension optimale (V <sub>opt</sub> )	17 V
Courant optimale (I <sub>opt</sub> )	4.41 A
Courant de court-circuit I <sub>sc</sub>	4.8 A
Tension de circuit ouvert Voc	21.7V
Nombre des cellules en séries	36
Nombre des cellules en parallèles	1
Courant de saturation I <sub>sat</sub>	20nA
Résistance parallèle R <sub>p</sub>	10.35Ω
Résistance parallèle R <sub>s</sub>	0.011 Ω

A. En régime stable

Les simulations, données par Fig.9, représentent les caractéristiques électriques du système PV autonome commandé séparément par la LF, la méthode P&O, la ConInc et le RN. Ils sont obtenus pour des conditions climatiques standard (1000W/m<sup>2</sup> et 25°C). Les puissances obtenues par les quatre commandes se stabilisent en régime permanent autour des valeurs optimales délivrées par un module ‘SP75’ (P<sub>pvopt</sub>=75W, V<sub>pvopt</sub>=17V et I<sub>pvopt</sub>=4.4A).

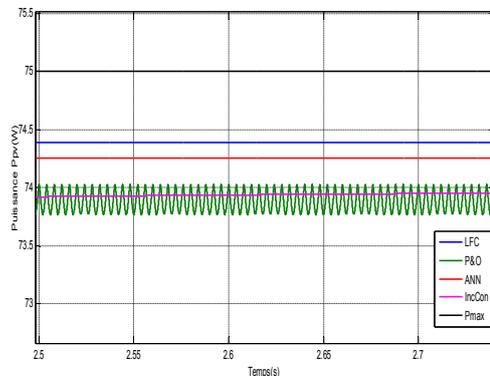
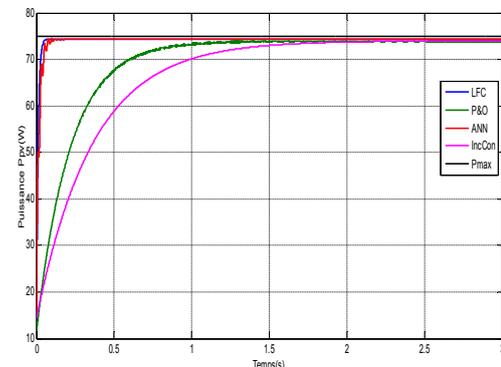


Fig.9 Puissance PV maximale

La commande par LF permet d’atteindre le point de puissance maximale (PPM) dans 0.06s, par contre avec la commande RN le PPM est atteint dans

0.13s. Les commandes P&O et ConInc sont plus lentes. Elles permettent au système d’atteindre le PPM respectivement en 1.6s et 1.91s.

En outre, Fig.9 montre qu’en régime permanent, la puissance maximale fournie par le système PV commandé par la LF et le RN est plus stable et plus proche du PPM comparant aux autres types de commandes MPPT. La commande P&O oscille autour du point de puissance maximale engendrant par conséquences des pertes de puissance.

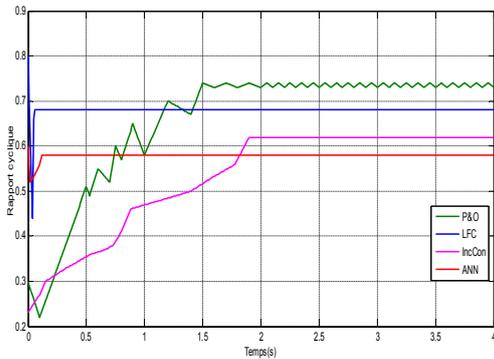


Fig.10. Rappports cycliques pour les commandes MPPT

Le rapport cyclique de la commande logique floue est plus stable. Il se stabilise autour du PPM dans 0.06s par contre les autres commandes nécessitent plus de temps pour atteindre leurs valeurs permanents.

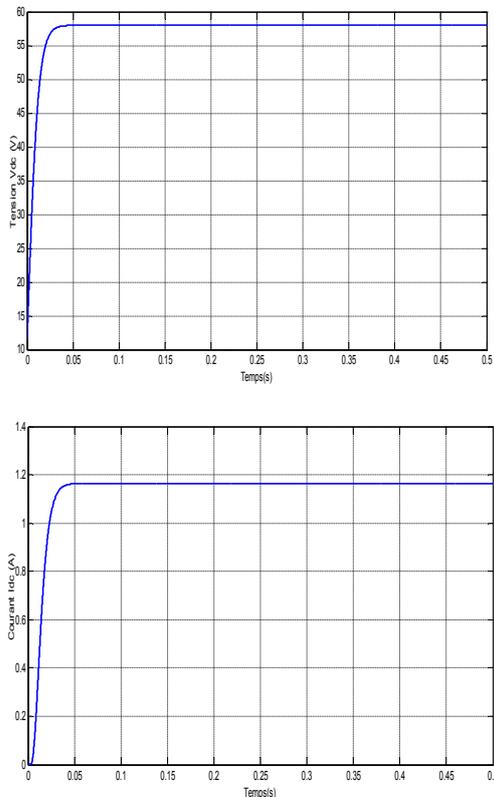


Fig.11. caractéristique aux bornes de la charge : tension et courant

D’après Fig. 11, nous constatons que les valeurs de la tension et du courant au niveau de la charge se stabilisent respectivement autour de 58 V et 1.18 A.

A la sortie du GPV, la tension et le courant PV se stabilisent respectivement autour de 17 V et 4.4 A. Ces résultats montrent que les commandes MPPT permettent l’adaptation de générateur PV et la charge au PPM avec transfère optimale de la puissance PV.

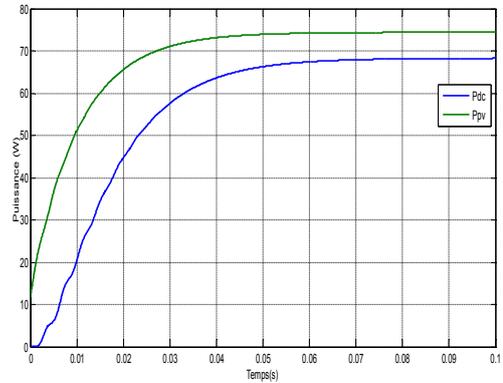


Fig. 12. Puissance maximale fournie par le GPV et puissance consommée par la charge

D’après Fig.12, nous constatons que la différence entre la puissance  $P_{pv}$  à la sortie de générateur PV et celle fournie à la charge reste dans la limite de 6W. Ces pertes sont attribuées aux pertes par commutation et par conduction dans le transistor et dans les résistances shunt et série du module PV.

**B. Régime perturbé**

*1) Variation d’enseillement*

Nous allons tester les performances des commandes MPPT précédemment développées en effectuant séparément des variations sur la température et l’enseillement. Dans une première étape, nous apportons des variations sur l’irradiation solaire et nous supposons que la température est constante égale à 25°C. L’enseillement passe brusquement de 1000 à 600W/m<sup>2</sup> et de 600 à 800 W/m<sup>2</sup> pendant 4s.

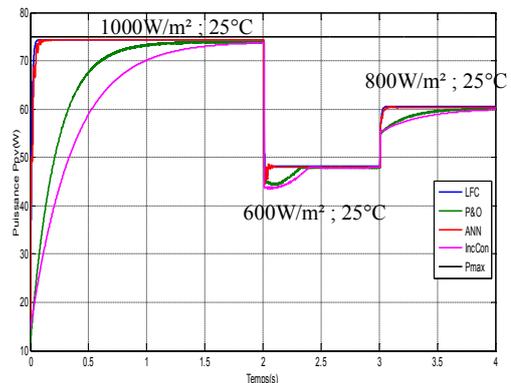


Fig. 13. Courbes de puissances maximales fournies par le GPV pour ensoleillement variable

Fig. 13 présente la variation des puissances maximales fournies par le GPV quand le système est soumis séparément aux commandes MPPT. Nous remarquons que la puissance maximale

fournie par la GPV varie proportionnellement avec l'irradiation. Quand l'ensoleillement passe de 1000 à 600W/m<sup>2</sup>, la puissance maximale fournie par le GPV se stabilise autour de 48W, alors quand elle s'élève à 800w/m<sup>2</sup>, la P<sub>pvm</sub> devient égale à 60W. En outre, le résultat de simulation présenté par la Fig. 13, montre que la commande par LF et RN représentent des meilleures performances puisqu'elles convergent rapidement vers le nouveau PPM. Les commandes P&O et ConInc, qui sont moins rapides, n'arrivent au PPM qu'après un retard. Cet inconvénient constitue l'handicape des deux commandes pendant les variations rapides des conditions climatiques.

## 2) Variation de température

Pour une valeur d'ensoleillement constante égale à 1000W/m<sup>2</sup>, nous effectuons une variation brusque de la température de 25°C à 75°C et de 75 à 25°. Ces simulations nous permettent de tester les performances des commandes pour différents niveaux de température.

D'après Fig.14, nous constatons que les performances à savoir la stabilité et la rapidité obtenues avec LF et RN sont plus meilleures que les commandes P&O et ConInc. Ils permettent au système de fonctionner instantanément au PPM malgré le changement rapide de la température.

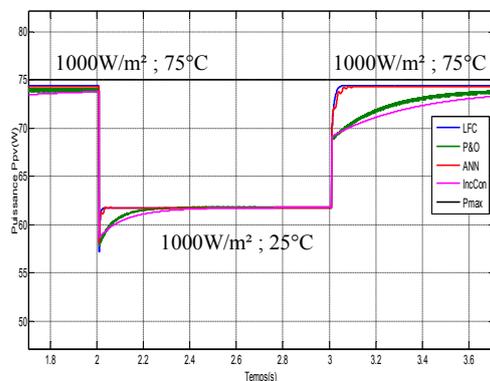


Fig.14. Courbes de puissances maximales fournies par le GPV pour température variable

## V. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons élaboré un modèle d'un système PV autonome composé d'un générateur PV, d'un hacheur élévateur et d'une charge continue. Autour du convertisseur continu-continu, nous avons développé séparément les principales commandes MPPT les plus utilisées. Nous avons fait des simulations du système PV pour des conditions climatiques constantes et variables dans le but de faire une comparaison entre les quatre commandes et de déterminer la meilleure commande de point de vue précision, stabilité, transfert énergétique et robustesse.

Les résultats obtenus montrent que les commandes logique floue et réseau de neurones présentent de meilleures performances. Elle permet au système PV d'atteindre le PPM plus rapidement inversement aux commandes classiques (P&O, ConInc...). De plus ces deux commandes sont plus stables pendant les variations des conditions climatiques.

## REFERENCES

- [1] T. Esham, P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques". IEEE transactions on energy conversion, vol.22, 2007.
- [2] S. Alsadi, B. Alsayid, "Maximum Power Point Tracking Simulation for Photovoltaic Systems Using Perturb and Observe Algorithm", International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume 2, December 2012.
- [3] A. Rezaei, A. Gholamian, "Optimization of New Fuzzy Logic Controller by Genetic Algorithm for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic System", ISESCO Journal Of Science And Technology, Vol. 9, No.15, May 2013.
- [4] D. Nikhitha, J.N.C. Sekhar, "Modeling and Simulation of IM Drive Performance Using PI, ANN and FLC", International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS), 2013.
- [5] B.S. Chokri, O. Mohamed, "Comparison of Fuzzy Logic And Neural Network In Maximum Power Point Tracker For PV Systems", Electric Power Systems Re-search, vol.81, pp. 43–50, 2011.
- [6] N. Hamrouni, M. Jraidi, A. Chérif, "Theoretical and Experimental Analysis of a Photovoltaic Pumping System", Solar Energy, Volume 83, Issue 8, pp. 1335-1344, August 2009.
- [7] B. François, "Conception des dispositifs de commandes des convertisseurs de puissance par modulation directe des conversions. Perspectives pour l'insertion de production d'énergie dispersée dans les réseaux électriques," Habilitation à diriger des recherches, Lille 2003