

Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Système Photovoltaïque

N. Ould Cherchali *, A. Morsli **, M. S. Boucherit ** ; L.Barazane *** and A. Tlemçani *

* Laboratoire de Recherche en Electrotechnique et Automatique. Université de Médéa Algérie nocherchali@yahoo.fr

** Laboratoire de commande des processus. Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach, Alger, Algérie

***Faculté d'Electronique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 'USTHB', Alger, Algérie

Résumé -- Ce travail présente une approche intelligente pour l'amélioration et l'optimisation des performances de contrôle d'un système photovoltaïque, par la méthode de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

Les résultats de simulation obtenus sont développés sous logiciel MATLAB/Simulink. Les deux méthodes sont utilisées avec un convertisseur DC/DC élévateur "Boost" et une batterie - comme une charge -. Ces résultats nous montrent que le contrôleur à base de la logique floue est meilleur et plus rapide que celle du contrôleur classique perturbation et observation.

Mots clés — MPPT ,PV, contrôleur flou, contrôleur PandO, Hacheur Boost.

I. INTRODUCTION

Dans le but d'améliorer le rendement du générateur photovoltaïque (PV) autrement dit maximiser la puissance délivrée à la charge reliée aux bornes du générateur, plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité du système photovoltaïque étaient appliqués [1-2], et des techniques étaient suivies pour avoir une bonne adaptation et un rendement élevé. Parmi ces techniques on trouve la technique de Poursuite du Point de Puissance Maximale ou "Maximum Power Point Tracker, MPPT" [3-4], technique de recherche des points de puissance optimale avec la méthode classique Perturbation et Observation (P&O) et la nouvelle technique par logique Floue. La comparaison entre ces techniques est fixée comme objectif en première étapes, ensuite une contribution d'amélioration est proposée.

Le système photovoltaïque est constitué par un panneau photovoltaïque une interface de puissance et une charge. Un simple circuit convertisseur DC/DC (Boost) est utilisé comme interface entre le panneau PV et la charge (ici une batterie).

II. SYSTÈME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

A. Modèle d'une cellule photovoltaïque avec deux diodes

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Ainsi, (Figure 1) illustre le schéma électrique équivalent d'une cellule PV réelle.

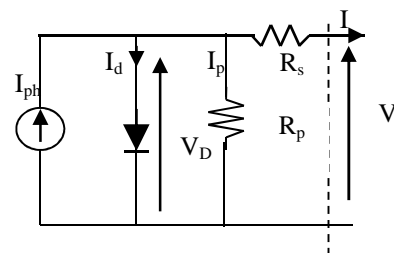


Fig. 1. Schéma équivalent de cellule PV.

Dans ce schéma, on prend en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique. En statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1)$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule.

I_{ph} : Photocourant (A).

$I_{sc} = I_{scr} \left(\frac{G}{1000} \right)$: Le courant de court-circuit de référence.

$I_p = \frac{V+I.R_s}{R_p}$: Le courant dérivé par la résistance parallèle.

$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V+I.R_s}{nV_T} \right) - 1 \right]$: Le courant traversant la diode.

I_0 : Le courant de saturation inverse d'une diode.

$V_T = \frac{KT}{e}$: La tension thermique.

Où

e : charge d'électron ($1.602 \times 10^{-19} C$)

K : constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} J/K$)

n : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

T : La température effective de la cellule en kelvin.

En utilisant les équations ci-dessus, on peut en déduire l'expression du courant délivré par la cellule photovoltaïque :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (2)$$

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 notre cas, nous avons choisi un modèle simple nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, la caractéristique I-V de ce modèle est illustrée ci-dessous:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+I.Z.R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V+I.Z.R_s}{R_p} \quad (3)$$

Avec Z : nombres de cellules

B. L'influence de l'éclairement et de l'ensoleillement solaire sur le fonctionnement du panneau PV

Un réseau de caractéristiques $I=f(U)$ suivant avec un éclairement variable (pour une température de jonction de 25°C et une répartition spectrale du rayonnement dit AM 1,5). On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement.

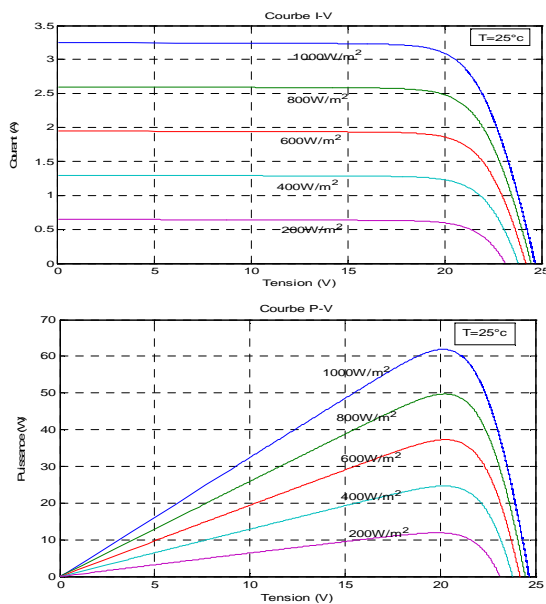


Fig. 2. Caractéristiques d'un module photovoltaïque (I-V) et (P-V); $T_j=25^\circ\text{C}$.

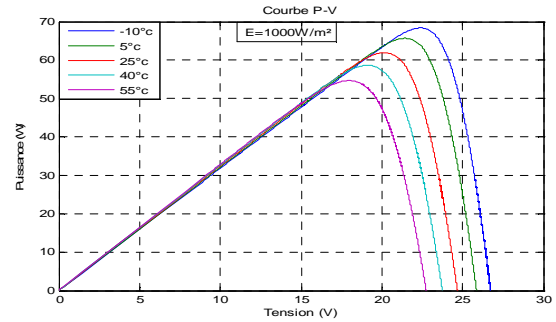
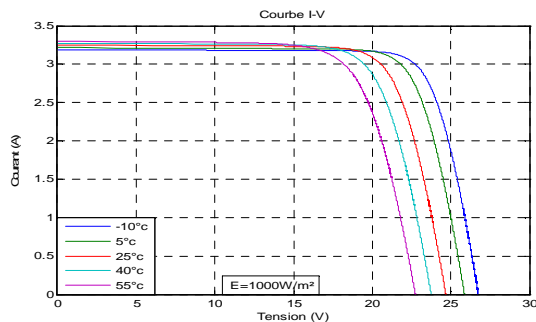


Fig. 3. Caractéristiques d'un module photovoltaïque (I-V) (P-V); $S=1000\text{W/m}^2$.

III. POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT)

Il existe environ une vingtaine de méthodes de recherche du point de puissance maximale (MPPT) d'un champ de modules photovoltaïque, dont l'efficacité et la rapidité varient. Parmi ces méthodes on cite :

La méthode dite de la tension de circuit ouvert fractionnaire (Fractional Open-Circuit Voltage) ;

- La méthode dite du courant de court-circuit fractionnaire (Fractional Short-Circuit Current) ;
 - Le contrôle du MPP à base de réseaux neuronaux (Neural Network) ;
 - La méthode de retour de l'information de tension (voltage-feedback) ;
 - Méthodes à contre réaction de puissance : La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs $P=V.I$. Les méthodes à contre réaction de puissance se basent sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système [7].
 - La méthode IncCond (Incremental Conductance);
 - La méthode de perturbation et d'observation (P&O) ;
 - Le contrôle du MPPT à base de logique floue (Fuzzy Logic Control) ;
- Dans cette catégorie, l'une des méthodes les plus efficaces et utilisés est de la logique floue, qui est présenté dans la section suivante.

A. Mise en œuvre d'un régulateur flou

Cette approche est basée sur deux concepts essentiels : celui de la décomposition d'une plage de variation d'une variable sous forme de nuances linguistiques : "faible", "moyen", "élevé" ... et des règles provenant de l'expertise de l'opérateur humain, qui expriment, sous forme linguistique, comment doivent évoluer les commandes du système en fonction des variables observées : "Si l'erreur est positivement grande et la variation de l'erreur est positivement grande alors la variation de la sortie est très négative".

Ces concepts sont basés sur une partie de la théorie des sous-ensembles flous introduite par Zadeh. Un régulateur flou peut être présenté de différentes façons, mais en général la présentation adoptée se scinde en

trois parties [8] : la **fuzzification** qui permet de passer de variables réelles à des variables floues, le coeur du régulateur représenté par les **règles** reliant les entrées et sorties, et enfin l'**inférence** et la **déffuzzification** qui permettent à partir des ensembles flous d'entrée de déterminer la valeur réelle de sortie, figure 4.

La figure 4, montre la configuration du contrôleur flou qui se compose des: Entrées - Sortie d'échelle, fuzzification, décision floue, et la déffuzzification. Les facteurs d'échelle : SE, SCE et SdD font changer les valeurs des entrées et de sorties du contrôleur proportionnellement. La sortie dD est déduite par les deux variables E et CE, ou cette dernière est dérivée du signal actuel par la division avec le facteur d'échelle correspondant [9].

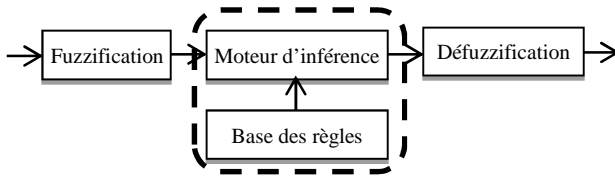


Fig. 4. Schéma de principe de la régulation floue. (SE, SCE : Gains d'entrees, SdD : Gain de sortie).

1) Fuzzification

La tension et le courant actuels du générateur photovoltaïque sont mesurés instantanément par un convertisseur A/N, et la puissance peut être ainsi calculée :

$$P(k) = i(k).v(k) \quad (4)$$

On suppose que le contrôle se fait par la satisfaction de deux critères relative à deux variables d'entrées du contrôleur flou proposé, qui sont:

L'erreur (E) et le changement de l'erreur (CE) à des instants échantillonnés (k).

Les variables E et CE sont exprimées comme suit:

$$E(k) = \frac{P_{ph}(k) - P_{ph}(k-1)}{V_{ph}(k) - V_{ph}(k-1)} \quad (5)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (6)$$

Où $P_{ph}(k)$ et $V_{ph}(k)$ sont respectivement : la puissance et la tension du générateur photovoltaïque [10].

La figure 8 montre les fonctions d'appartenance des cinq sous ensembles flous des variables d'entrées ainsi que la variable de sortie.

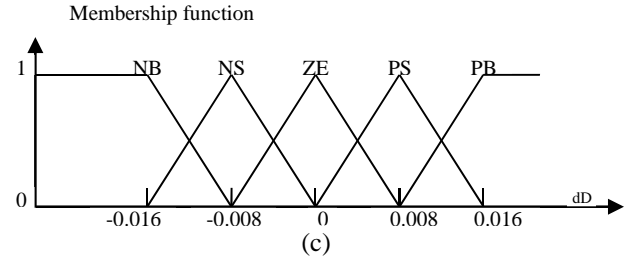
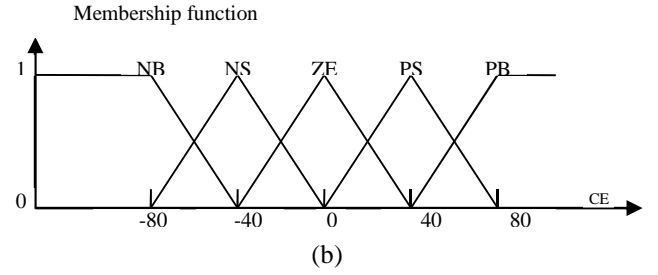
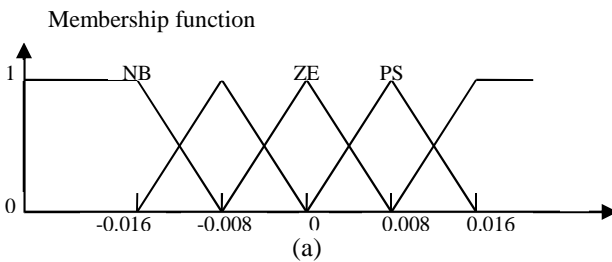


Fig. 5. Fonctions d'appartenance de : (a) L'entrée E ; (b) L'entrée CE et (c) La sortie dD.

2) Méthode d'inférence

La table 1, montre la table de règles du contrôleur flou où toutes les entrées de la matrice sont :

TABLE I.
TABLE DE RÈGLES FLOUES

	CE	NB	NS	ZE	PS	PB
E						
NB		ZE	ZE	PB	PB	PB
NS		ZE	ZE	PS	PS	PS
ZE		PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS		NS	NS	NS	ZE	ZE
PB		NB	NB	NB	ZE	ZE

On prend comme exemple de règles de contrôle de la table 1 :

"Si E est PG et CE est ZE Alors dD est NG".

Ce qui veut dire que :

"Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale (PPM) vers le coté gauche, et le changement de la pente de la courbe ($P_{ph} = f(V_{ph})$) est environ Zéro; Alors diminuer le rapport cyclique (dD) largement".

3) Déffuzzification

Pour une représentation de données échantillonnées, le centre de gravité est calculé par :

$$dD_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) \cdot D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \quad (7)$$

Les valeurs de sorties sont déffuzzifiées et multipliées par le facteur d'échelle pour construire le signal de contrôle, actuel (figure. 4). Son rôle est de régler le contrôleur flou pour obtenir la poursuite du PPM.

B. La méthode Perturbation et Observation (P&O)

La méthode Perturbation et Observation (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées [11–12]. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le MPP : on mesure les caractéristiques du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte.

La figure 6, montre l'organigramme de l'algorithme de P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

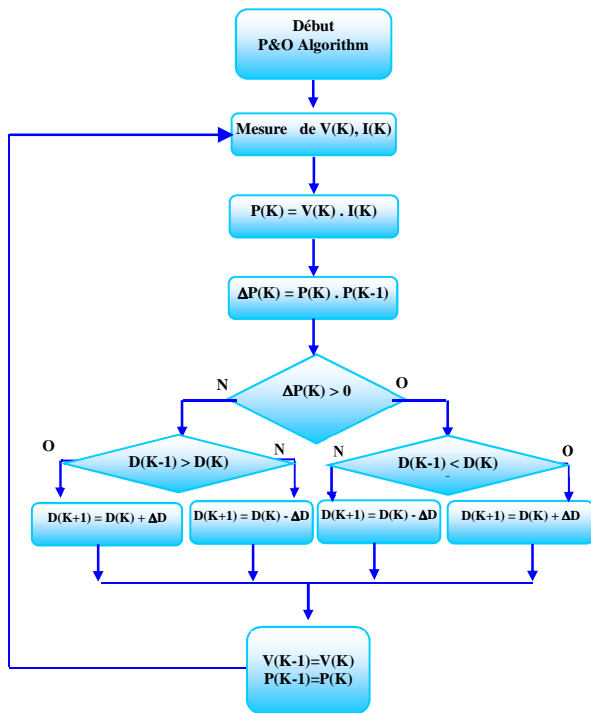


Fig. 6. Algorithme de la méthode de Perturbation et d'Observation (P & O) du MPPT.

Le principe de fonctionnement de cette méthode est comme suit :

Si $dV > 0$ cela veut dire qu'on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire $D(k+1) = D(k) + \Delta D$;

Si $dV < 0$ cela veut dire qu'on a décrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre $D(k+1) = D(k) - \Delta D$, donc on termine dans le chemin où P continue à augmenter.

Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrémentation ou la des incréments du rapport cyclique D sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur dV .

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée avec chaque cycle [13].

La figure 7 représente la variation de la puissance en fonction de la tension d'un panneau photovoltaïque. On voit que, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP.

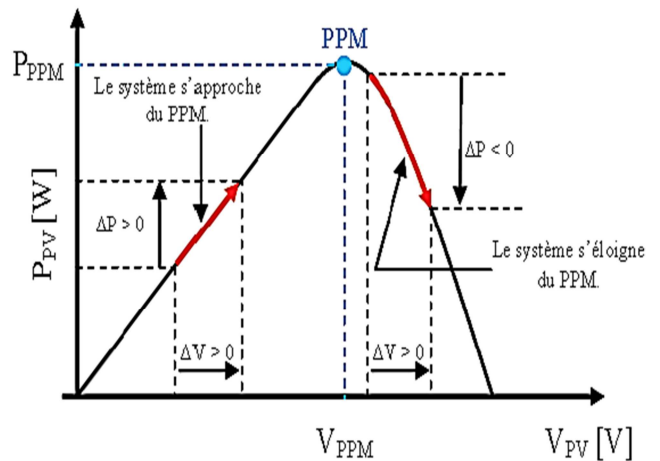


Fig. 7. Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau photovoltaïque [14]

IV. RESULTATS DE SIMULATION

Dans ce test, la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : la température égale 25°C et l'ensoleillement égale 1000W/m^2 . Le but de ces simulations est de visualiser les différentes allures de puissances P , des rapports cycliques D et des tensions délivrant du panneau photovoltaïque et atteignant l'élément de stockage (la batterie) via un hacheur boost avec les deux méthodes de poursuivre la puissance maximale (MPP), contrôleur Flou et P and O

A. MPPT à base de la Logique floue

La figure 8, montre le schéma fonctionnel sous Simulink du système photovoltaïque général, ce dernier se compose des éléments suivants : Le panneau solaire, le hacheur boost, la batterie, et le contrôleur MPPT.

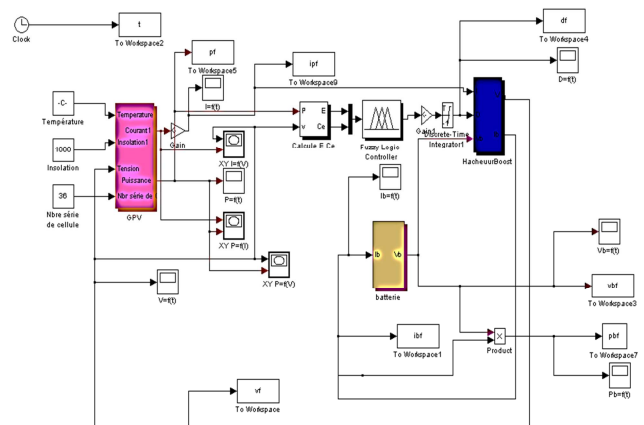


Fig. 8. Modèle Simulink du contrôleur MPPT flou avec hacheur Boost par MATLAB/Simulink.

Pour une fréquence d'échantillonnage égale à 100Hz la figure 9 montre la variation des puissances du panneau PV et de la batterie ainsi que la commande D en fonction du temps.

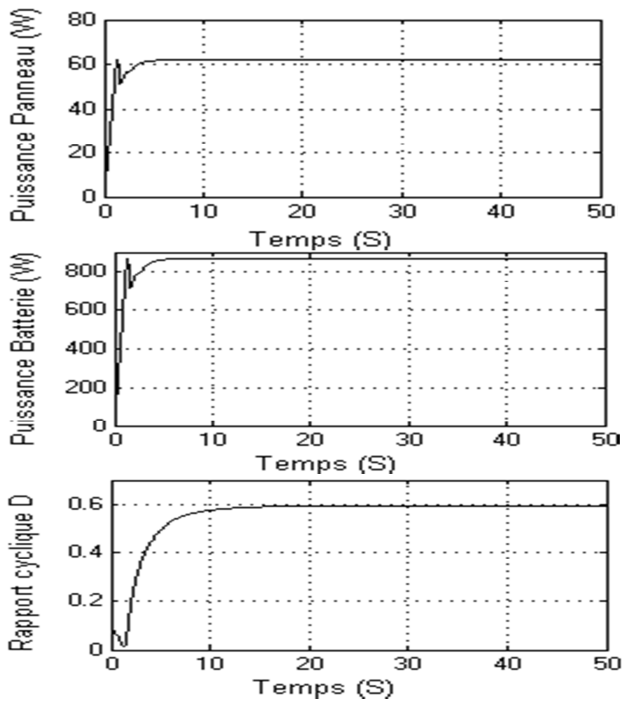


Fig. 9. Variation de la puissance du panneau, la puissance de la batterie et le rapport cyclique D, avec le contrôleur Flou.

Les tensions du panneau photovoltaïque ainsi de la batterie sont représentées sur la figure 10. Le convertisseur DC/DC boost utilisé élève la tension du panneau (20 V) à la valeur désirable vue à la sortie de la batterie (50 V).

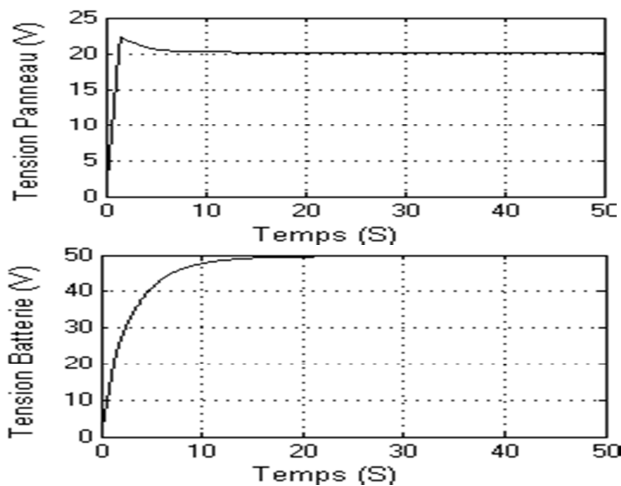


Fig. 10. Courbe de variation des tensions du panneau PV et de la batterie avec le contrôleur Flou.

B. MPPT avec contrôleur P and O

La figure 11, illustre le contrôleur à base de la méthode P&O remplaçant le contrôleur flou, dans le but de réaliser des comparaisons entre les deux méthodes de contrôle.

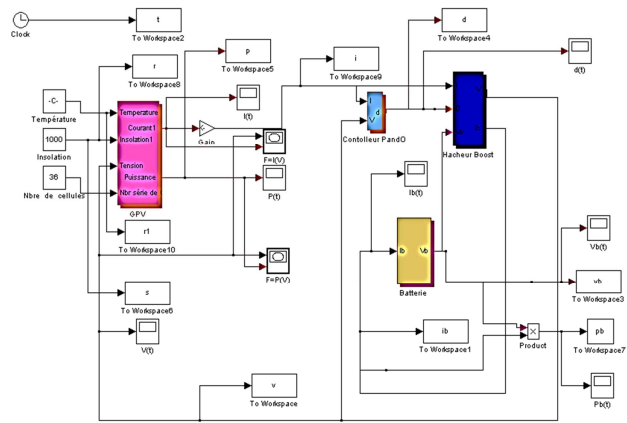


Fig. 11. Modèle Simulink du contrôleur MPPT PandO avec hacheur Boost par MATLAB/Simulink.

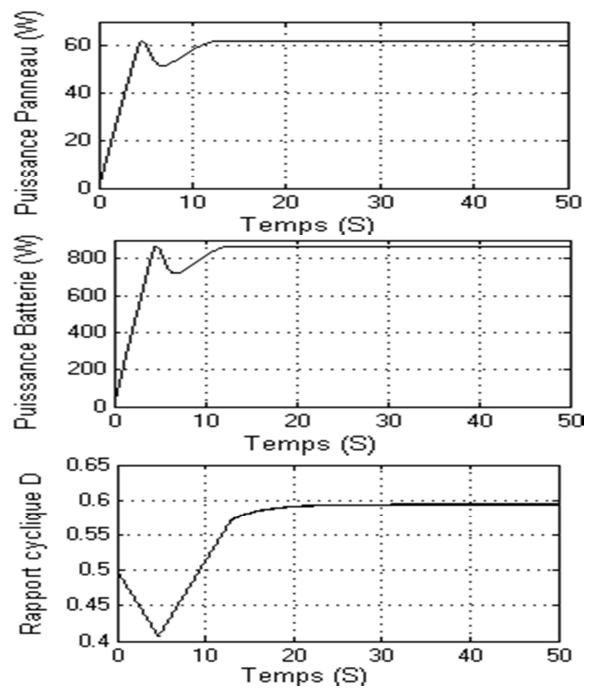
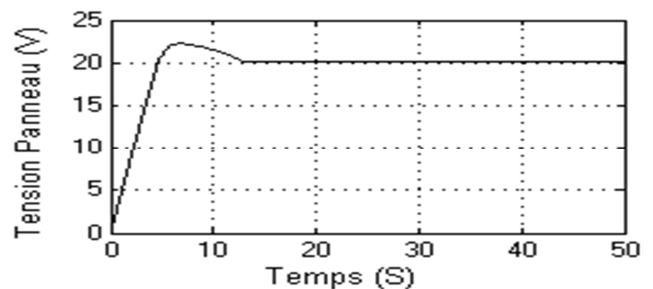


Fig. 22. Variation de la puissance du panneau, la puissance de la batterie et le rapport cyclique D, avec le contrôleur P and O.

La figure 12 montre la variation des puissances du panneau PV et de la batterie ainsi que la commande D. Les tensions du panneau photovoltaïque ainsi de la batterie sont représentées sur les figure 13 .



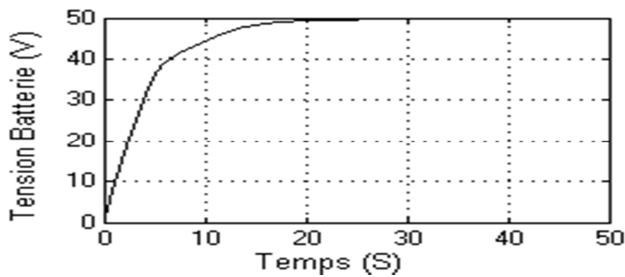


Fig. 33. Courbe de variation des tensions du panneau PV et de la batterie avec le contrôleur PandO.

V. CONCLUSION

Les résultats obtenues avec un Contrôleur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle perturbation et observation. Ainsi le contrôle par logique flou peut être vu comme un pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. Aussi, ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P and O) mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

REFERENCES

- [1] Ilan Glasner "Advantage Of Boost Vs.Buck Topology For Maximum Power Point Tracker In Photovoltaic Systems". TelAviv University, Faculty of Engi, Dept.of Electrical Eng. Israel, *IEEE*.1996, pp:355-358.
- [2] E. Mujadi. "ANN Based Peak Power Tracking for PV Supplied DC Motors". *Solar Energy*, Vol. 69, N°4, 2000, pp:343-354.
- [3] E. Mujadi. " PV Water Pumping With A Peak-Power Tracker Using A Simple Six Step Square-Wave Inverter". *IEEE trans.* on I. A. Vol.33, N°3,may /june 1997, pp:714-721.
- [4] B.k. Bose "Microcomputer Control Of A Residential Photovoltaic Power Conditioning System". *IEEE Trans.* I.A., Vol. IA-21, N°5, Sept./Oct. , 1985, pp:1182-1191.
- [5] L. Protin et S. Astier, « Convertisseurs Photovoltaïques, *Techniques de l'Ingénieur* » - *Energie*, D3360.
- [6] Rémi Saisset, "Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire". -*Thèse Doctorat en génie électrique*, 2004- L'institut National Polytechnique De Toulouse.
- [7] TCHOKETCH KEBIR Gul Filiz « Commande des hacheurs MPPT par la logique floue . *Mémoire de Magister en électronique. Option : Electricité Solaire. Ecole Nationale Polytechnique.* Février 2006.
- [8] H. Buhler, "Réglage Par Logique Floue", *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes* CH-1015 Lausanne. 1994.
- [9] L.A. Zadeh, "Information and Control, Fuzzy Sets", *vol 8, pp 338-353*, 1965.
- [10] Aït Cheikh, C. Larbes, G.F. Tchoketch Kebir and A. Zerguerras. , "Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme". *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°3 (2007).
- [11] Ch. Hua, J. Lin, Ch. Shen, "Implementation of a DSP-controlled PV system with peak power tracking", *IEEE Trans. Ind. Electron.* 45 (1) (1998), pp. 99-107.
- [12] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, F. Bllaadjeorg "Improved MPPT Algorithms for rapidly Changing Environmental Conditions", *Power Electronics and Motion Control*.
- [13] M.Hatti, "Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d' un Système Photovoltaïque". *JCGE'08 LYON*, 16 et 17 décembre 2008.