

## Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque

Hanan Abbes <sup>1\*</sup>, Hafedh Abid <sup>2†</sup>, Kais Loukil <sup>1</sup>, Ahmad Toumi <sup>2</sup> et Mohamed Abid <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratory of Computer and Embedded Systems, Lab-CES

<sup>2</sup> Laboratory of Sciences and Techniques of Automatic, Control & Computer Engineering, Lab-STA  
National School of Engineering of Sfax, University of Sfax  
PO Box, 1173, 3038 Sfax, Tunisia

(reçu le 10 Février 2014 – accepté le 30 Septembre 2014)

**Résumé** - Ce travail est une tentative pour étudier et discuter cinq types de techniques MPPT. La technique du suivi du point de puissance maximale, MPPT est utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour extraire le maximum de puissance. Les techniques MPPT les plus populaires sont revues et étudiées, telles que: Perturber et Observer, Incrément de la conductance, mesure d'une fraction de la tension en circuit ouvert, 'FCO', mesure d'une fraction de courant de court-circuit, 'FCC' et contrôle à base de la logique floue, 'LF'. L'environnement Matlab-Simulink est utilisé pour analyser, puis interpréter les résultats de simulation de ces algorithmes, et par conséquent, montrer les performances et les limites de chaque algorithme.

**Abstract** – This work is an attempt to study and discuss five types of MPPT technics. The technique of tracking the maximum power point is used in PV systems to extract maximum of power. The most popular MPPT technics are studied and reviewed, as: Perturb and observe, Increment of the conductance, Measuring a fraction of the open-circuit voltage, 'FCO', Measuring a fraction of short-circuit current, 'FCC' and Control based on fuzzy logic, 'LF'. The Matlab Simulink environment, is used to analyze and interpret the simulation results of these algorithms, and therefore show the performance and limitations of each algorithm.

**Mots clés:** Panneau photovoltaïque - Commande MPPT – Point de puissance maximale - Perturber et Observer - Incrément de la Conductance – FCO – FCC - Logique floue.

### 1. INTRODUCTION

Dans les dernières années, la croissance du besoin en énergie, ainsi que la pollution provenant de l'utilisation des énergies fossiles poussent le grand public à utiliser les énergies renouvelables. Dans ce contexte, l'énergie solaire photovoltaïque est l'une des plus importantes sources d'énergie renouvelable, qui présente un dénouement à nos problèmes de production d'énergie. De plus, cette énergie semble la plus prometteuse, non polluante et inépuisable. Néanmoins, la production de cette énergie est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque, PV ne coïncide pas toujours avec le point de puissance maximale, (Fig. 1). On utilise alors un mécanisme qui permet la recherche et la poursuite du point de puissance maximale, appelé 'maximal power point tracking', (MPPT afin que la puissance maximale soit générée en permanence [11].

---

\* hanenabbes2009@yahoo.fr

† abidhafedh@gmail.com

Par conséquent, plusieurs travaux ont porté sur les systèmes photovoltaïques. Ils ont essayé de développer des algorithmes permettant d'extraire le maximum d'énergie convertie par le panneau et alors qui permet un fonctionnement optimal du système photovoltaïque [12]. On trouve dans la littérature des algorithmes basés sur les méthodes suivantes, telles que: Hill-Climbing, Perturber & Observer, 'P&O' et Incrément de la conductance, 'INC' [1, 2]. D'autres commandes ont été développées, telles que la mesure d'une fraction de courant court-circuit, 'FCC' ou la mesure d'une fraction de tension de circuit ouvert, 'FCO' [3, 4]. Il existe aussi des commandes dites intelligentes qui sont basées sur la logique floue, 'LF', [5, 6].

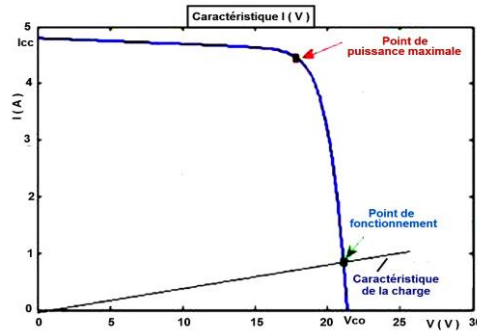


Fig. 1: Caractéristique I – V du panneau photovoltaïque

Ce papier est organisé comme suit: le paragraphe 2 est réservé pour l'étude du système photovoltaïque; le premier sous-paragraphe a été réservé à la présentation du panneau photovoltaïque, alors que le deuxième sous-paragraphe a été réservé pour l'étude du convertisseur statique. Dans le paragraphe 3, on s'intéresse à la commande MPPT. En effet, on étudie les cinq algorithmes les plus populaires: P&O, INC, FCO, FCC et LF. Dans le paragraphe 4, on présente les résultats de simulation puis on fait une discussion pour évaluer les algorithmes présentés. Finalement, on termine par une conclusion.

## 2. SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Un système photovoltaïque est constitué de quatre (04) blocs comme le montre la figure 2. Le premier bloc représente la source d'énergie (panneau photovoltaïque), le second bloc est un convertisseur statique DC-DC, le troisième bloc représente la charge et le quatrième bloc représente le système de commande. Le rôle principal du convertisseur statique est de fonctionner comme une adaptation d'impédance de sorte que le panneau délivre le maximum d'énergie.

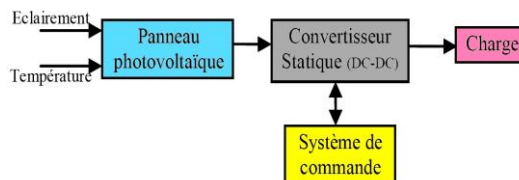


Fig. 2: Schéma synoptique du système photovoltaïque

**2.1 Panneau Photovoltaïque**

La composante élémentaire du panneau photovoltaïque est la cellule photovoltaïque. Cette dernière peut être considérée comme une source idéale de courant fournissant un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui est représenté par la jonction P-N. Par conséquent, la cellule PV peut être modélisée par la figure 3, dont les équations correspondantes sont les suivantes:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_R \tag{1}$$

Le courant  $I_{ph}$  est donné par l'équation suivante:

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_I \times \Delta T) \times E / E_n \tag{2}$$

L'expression du courant au niveau de la jonction est la suivante:

$$I_D = I_S \times \left[ \exp \left( \frac{V_{PV} + R_S \times I_{PV}}{n V_T} \right) - 1 \right] \tag{3}$$

Le courant dans la résistance  $R_p$  est égal à:

$$R_p = \left( \frac{V_{PV} + R_S \times I_{PV}}{R_p} \right) \tag{4}$$

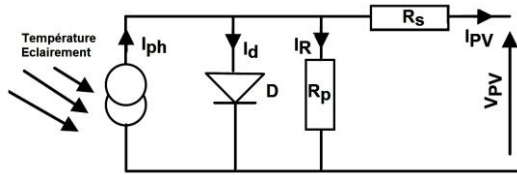


Fig. 3: Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque

**Caractéristique courant – tension**

La caractéristique  $I - V$  est une caractéristique non linéaire possédant un seul point optimal où la puissance est maximale, 'PPM'. La tension et le courant optimaux correspondants sont  $I_{MPP}$  et  $V_{MPP}$  (Fig. 4, Fig. 5).

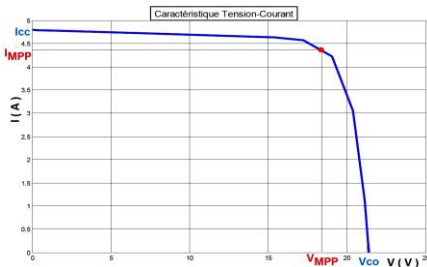


Fig. 4: Caractéristique courant–tension

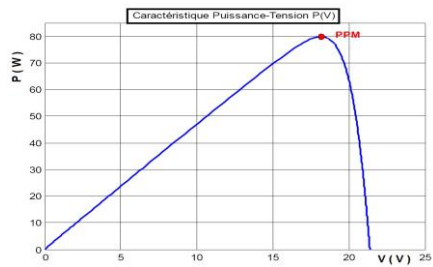


Fig. 5: Caractéristique puissance–tension

**2.2 Convertisseur statique (hacheur boost)**

Le convertisseur DC-DC est une interface qui permet l'adaptation entre le panneau PV et la charge afin d'extraire la puissance maximale du panneau.

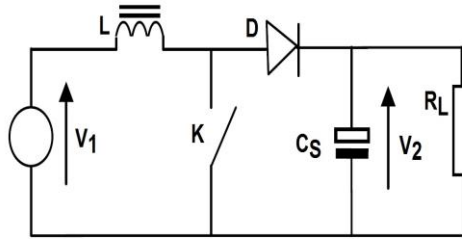


Fig. 6: Schéma électrique du convertisseur Boost

Pour  $t \in [0, \alpha T]$ , le transistor est passant. Par la suite, le convertisseur peut être modélisé par les équations suivantes:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_1}{L} \quad (5)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{V_2}{R_L \times C_S} \quad (6)$$

Pour  $t \in [\alpha T, T]$ , le transistor est bloqué. Par la suite, le convertisseur peut être modélisé par les équations suivantes:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_1 - V_2}{L} \quad (7)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{i_L}{C_S} - \frac{V_2}{R_L \times C_S} \quad (8)$$

Où  $T$  est la période du convertisseur statique et  $\alpha$ , le rapport cyclique.

### 3. COMMANDE MPPT

La commande MPPT, 'Maximum Power Point Tracking', est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires.

#### 3.1 Algorithme Perturber et observer, 'P&O'

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$ . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant  $k$ , puis on la compare à la précédente de l'instant  $(k - 1)$ .

Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale, 'PMP' et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens.

Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale, 'PMP'. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [7].

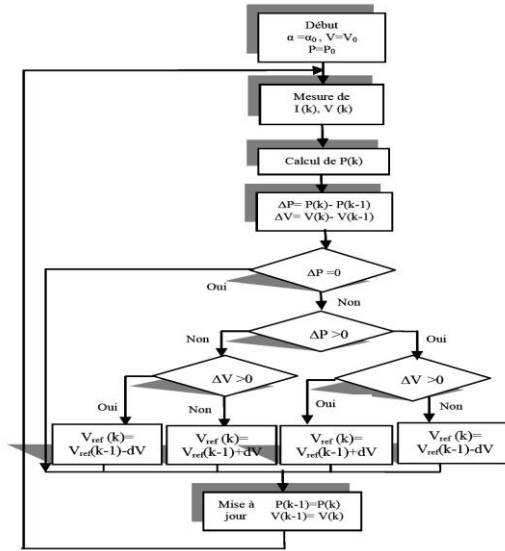


Fig. 7: Organigramme de l’algorithme ‘P&O’

### 3.2 Algorithme Incrément de la conductance, ‘INC’

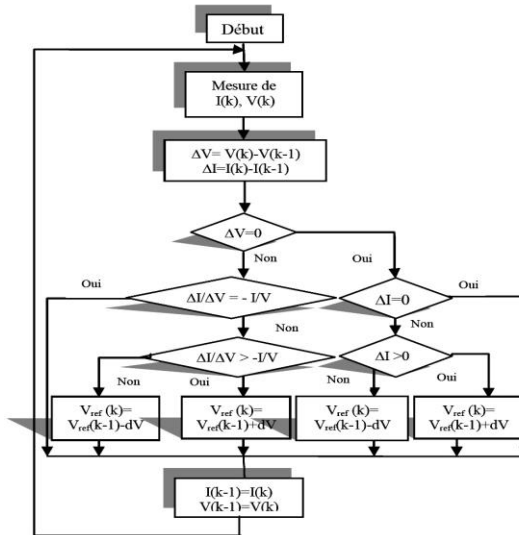


Fig. 8: Organigramme de l’algorithme ‘INC’

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance  $G = I / V$  et sur l’incrément de la conductance ( $dG$ ) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, ‘PMP’. Si l’incrément de conductance ( $dG$ ) est supérieur à l’opposé de la conductance ( $-G$ ), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l’incrément de conductance est inférieur à l’opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu’à atteindre le point de puissance maximale, ‘PMP’ [8].

**3.3 Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension,  $V_{oc}$**

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante:

$$V_{mp} = k \times V_{oc} \tag{9}$$

Où  $k$  est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8.

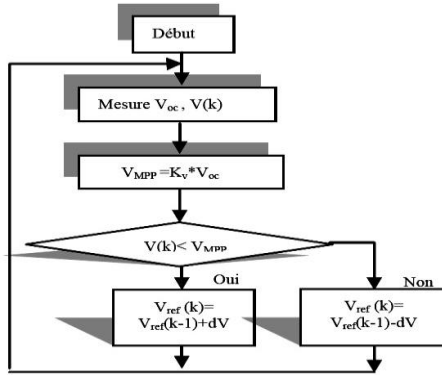


Fig. 9: Organigramme de l'algorithme FCO

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$ . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance optimale en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale [9].

**3.4 Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant  $I_{cc}$**

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante:

$$I_{mp} = k \times I_{cc} \tag{10}$$

Où  $k$  est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92.

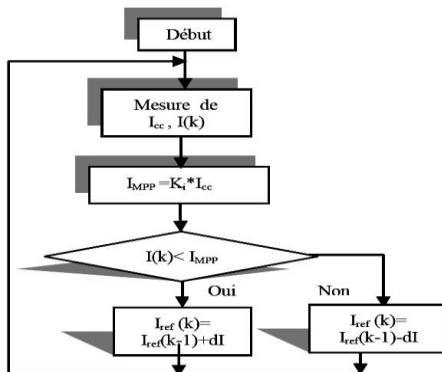


Fig. 10: Organigramme de l'algorithme FCC

En effet, le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal. Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale [10].

### 3.5 Algorithme à base de la logique floue

Récemment, la commande à base de la logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale. Cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système.

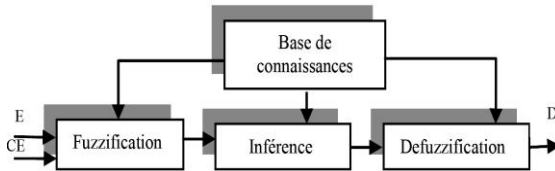


Fig.11: Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue

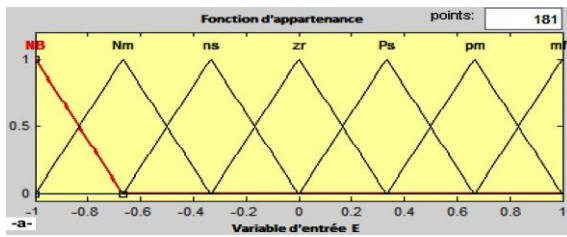
En particulier, cette commande est mieux adaptée aux systèmes non linéaires. Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois blocs: la fuzzification, l'inférence et la défuzzification (Fig. 11).

La fuzzification permet la conversion des variables physiques d'entrée en ensembles flous. Dans notre cas, on a deux entrées, l'erreur E et la variation de l'erreur CE définies comme suit:

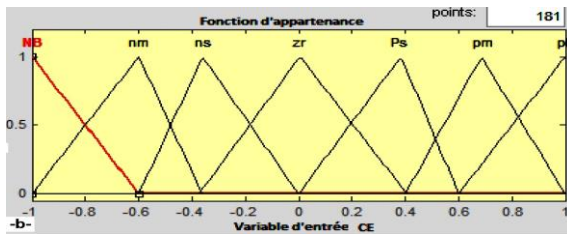
$$E = \frac{P(k) - P(k - 1)}{I(k) - I(k - 1)}$$

$$CE = E(k) - E(k - 1)$$

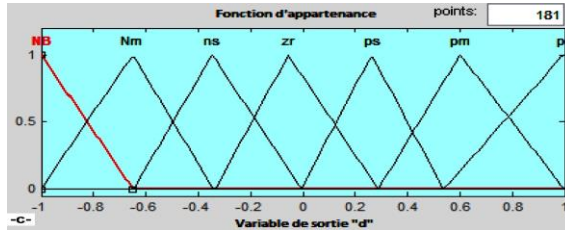
On attribue à ces grandeurs des variables linguistiques: NG (Negative Grand), NM (Negative Moyen), NP (Negative Petit), Z (Zéro), PPPP (Positive Petit), PM (Positive Moyen) et PG (Positive Grand):



-a-



-b-



-C-

Fig. 12: Les sous-ensembles pour les entrées (a) E , (b) CE et la sortie (c) C

Dans l'étape d'inférence, on prend des décisions. En effet, on établit des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance. Par la suite, on dresse le tableau de règles d'inférence (**Tableau 1**).

Finalement, en défuzzification, on convertit les sous ensembles flous de sortie en une valeur numérique.

**Tableau 1:** Règles d'inférence

CE	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
E							
<b>NG</b>	NG	NG	NG	NM	NM	NP	Z
<b>NM</b>	NG	NG	NM	NM	NP	Z	PP
<b>NP</b>	NG	NM	NM	NP	Z	PP	PM
<b>Z</b>	NM	NM	NP	Z	PP	PM	PM
<b>PP</b>	NM	NP	Z	PP	PM	PM	PG
<b>PM</b>	NP	Z	PP	PM	PM	PG	PG
<b>PG</b>	Z	PP	PM	PM	PG	PG	PG

### 4. RESULTATS ET DISCUSSION

#### 4.1 Résultats de simulation

Les résultats de simulation, des algorithmes précédemment étudiés, sont données par les figures 13 et 14. Ces figures montrent les valeurs de sortie de la puissance et de la tension pour une paire de la température et de l'éclairement égale à (25°C, 1000 W/m<sup>2</sup>).

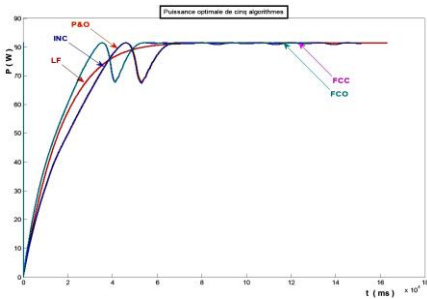


Fig. 13: Puissance optimale du système PV

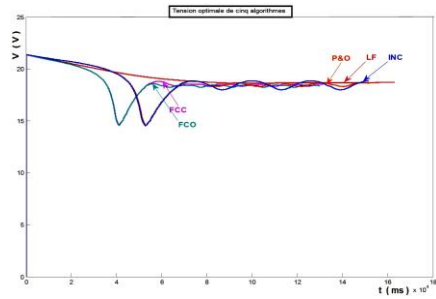


Fig. 14: Tension optimale du système PV

Les figures de simulation précédentes montrent que le système photovoltaïque converge vers les valeurs optimales.



On considère les variations de la température et de l'éclairement données par les figures 15 et 16. Les figures 17 et 18 illustrent l'évolution de la puissance et de la tension aux bornes du panneau PV, suite à l'évolution de la température et de l'éclairement.

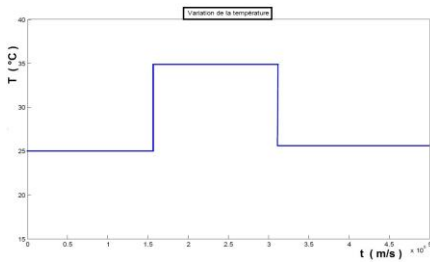


Fig. 15: Evolution de la température

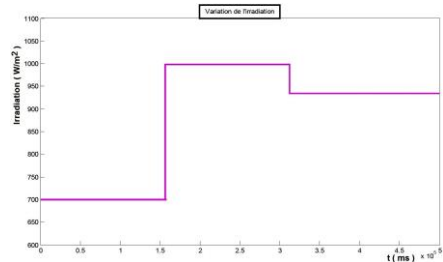


Fig. 16: Evolution de l'éclairement

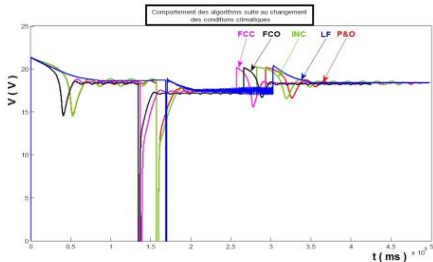


Fig. 17: Puissance optimale du système PV pour des conditions variables de la température et de l'éclairement

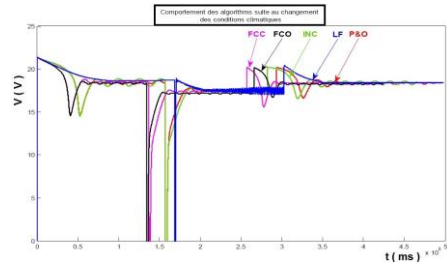


Fig. 18: Tension optimale du système PV pour des conditions variables de la température et de l'éclairement

## 4.2 Discussion

L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En général, cet algorithme dépend fortement des conditions initiales et il présente des oscillations autour de la valeur optimale. L'inconvénient majeur de cet algorithme est son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement (nuages).

L'algorithme INC semble une amélioration de l'algorithme P&O. En effet, il se comporte mieux lors d'un changement rapide des conditions météorologiques. Cependant, c'est un algorithme un plus complexe que le précédent.

Les algorithmes basés sur la mesure d'une fraction de tension du circuit ouvert ou d'une fraction de courant de court-circuit sont très simples et faciles à implémenter. L'inconvénient majeur est les pertes d'énergie et l'arrêt de transfert de puissance lorsqu'on mesure les grandeurs  $V_{oc}$  et  $I_{cc}$ . Pour surmonter ce problème, on utilise une cellule pilote de même nature que les cellules du panneau. De plus, la détermination de la valeur optimale du paramètre  $k$  est très difficile. C'est pourquoi, ces méthodes semblent juste une approximation et elles ne présentent pas assez de précision et par la suite le système ne fonctionne pas toujours au point optimal.

L'algorithme basé sur la logique floue est un algorithme robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations. En outre, il est caractérisé par un bon comportement en état transitoire. Cependant, l'implémentation de ce type

d'algorithme est plus complexe que les algorithmes classiques. De plus, l'efficacité de cet algorithme dépend énormément du tableau d'inférence.

Le tableau suivant résume les principales spécifications des différents algorithmes MPPT précédemment étudiés. Nous avons évalué et comparé ces algorithmes en termes de connaissance technique des paramètres du panneau PV, complexité, rapidité et précision.

**Tableau 2:** Comparaison des techniques MPPT

Algorithmes MPPT	P&O	INC	FCO	FCC	LF
Type de Capteurs utilisés	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant	1 Tension	1 Courant	1 Courant
Identification des paramètres du panneau PV	Non nécessaire	Non nécessaire	Oui nécessaire	Oui nécessaire	Oui nécessaire
Complexité	Basse	Moyenne	Très Basse	Très Basse	Haute
Nb itérations	45	48	35	41	27
Vit. Convergence	Moyenne	Moyenne	Rapide	Rapide	Très rapide
Précision	95 %	98 %	94 %	94 %	99 %

### 4.3 Caractéristiques du panneau PV

Les caractéristiques nominales du panneau photovoltaïque sont:

$N_p$	$N_s$	$V_{oc}$	$I_{cc}$	$P_{max}$	$V_{max}$	$K_I$	$R_s$	$R_p$	$R_L$
1	36	21.38V	4.8 A	81.5 W	18.4 V	0.00171A/°C	0.09Ω	100Ω	30Ω

## 4. CONCLUSION

Dans cette communication, nous avons décrit les principaux éléments du système PV. Ensuite, nous avons rappelé le principe de cinq (05) algorithmes MPPT les plus populaires. Enfin, nous avons terminé par une simulation des différents algorithmes.

Les résultats des simulations montrent que l'algorithme 'INC' donne des résultats meilleurs que le 'P&O'. D'autre part, la méthode du courant de court circuit 'FCO' a de meilleures performances que la méthode de tension de circuit ouvert, 'FCC'

Parmi tous ces algorithmes, le 'P&O' et 'INC' sont largement utilisés, mais la commande basée sur la logique floue montre un bon comportement et des meilleures performances par rapport aux autres méthodes.

## REFERENCES

- [1] Liu Xuejun, 'An Improved Perturbation and Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Panels', Thesis for the Degree of Master of Applied Science, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2004.
- [2] A.P.K. Yadav, S. Thirumaliah and G. Haritha, 'Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based PV Systems', International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 1, N°1, 2012.

- [3] S. Balakrishna, Thansoe, A. Nabil, G. Rajamohan, A.S. Kenneth and C.J. Ling, '*The Study and Evaluation of Maximum Power Point Tracking Systems*', International Conference on Energy and Environment, 2006 (ICEE 2006).
- [4] J. Surya Kumari and Ch. Sai Babu, '*Comparison of Maximum Power Point Tracking Algorithms for photovoltaic System*', International Journal of Advances Engineering and Technology, Vol. 1, N°1, pp. 133 – 148, 2011.
- [5] T. Balamurugan, Dr.S. Manoharan, P. Sheeba and M. Savithri, '*Design a Photovoltaic Array with Boost Converter Using Fuzzy Logic Controller*', Vol. 3, N°2, pp. 444 – 456, 2012.
- [6] M.S. 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, pp. 387 – 395, 2007.
- [7] A. Chermitti, O. Boukli-Hacene and S. Mouhadjer, '*Design of a Library of Components for Autonomous Photovoltaic System under Matlab/Simulink*', International Journal of Computer Applications, Vol. 53, N°14, 2012.
- [8] M.R. Sourov, U.T. Ahmed and M.G. Rabbani, '*A High Performance Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power System Using DC-DC Boost Converter*', IOSR Journal of Engineering, Vol. 2, N°12, pp. 12 – 20, 2012.
- [9] C. Cabal, '*Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique dédié à la Conversion Photovoltaïque*', Thèse de Doctorat, LAAS, Université de Toulouse, 2008.
- [10] B. Ankaiah and J. Nageswararao, '*Enhancement of Solar Photovoltaic Cell by Using Short-Circuit Current MPPT Method*', International Journal of Engineering Sciences Invention, Vol. 2, N°2, pp. 45 - 50, 2013.
- [11] M. Azab, '*A New Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems*', International Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 3, N°11, 2009.
- [12] H.N. Zainudin and S. Mekhilef, '*Comparison Study of Maximum Power Point Tracker Techniques for PV Systems*', Proceedings of the 14<sup>th</sup> Middle East Power Systems Conference, Mepcon'10, Cairo University, Egypt, December 2010.