

Comparaison du contrôleur flou Takagi-Sugeno et de la commande "P & O" pour l'extraction de la puissance maximale d'un système photovoltaïque

[Comparison of Takagi-Sugeno fuzzy controller and the command "P & O" for extracting the maximum power from a photovoltaic system]

M. Ajaamoum¹, M. Kourchi¹, B. Bouachrine¹, A. Ihla², and L. Bouhouch¹

¹ERTAIER, ESTA,
Université Ibn Zohr, BP 33/S,
80050 Agadir, Maroc

²Faculté des Sciences,
Université Ibn Zohr, B.P 8106,
80060 Agadir, Maroc

Copyright © 2015 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The maximum power point tracking (MPPT) plays a very important role in obtaining the maximum power of a solar panel because it ensures optimal operation of a photovoltaic system, regardless the conditions of irradiation and temperature. In this paper, we will introduce, a technique for improving and optimising the performances of a control system consisting of a photovoltaic panel, a buck converter and a load. This control is carried out by implementing two techniques of tracking the maximum power point (MPP). The first one, is based on the fuzzy logic control Takagi-Sugeno type ("TS fuzzy"), whereas the second uses the "Perturb and Observe" algorithm (P & O). Simulations of different parts of the system have been developed under Matlab / Simulink, enabling a comparison between the performances of the two controllers studied: "P&O" and "TS fuzzy". Both algorithms of command MPPT associated to these techniques are tested under the weather conditions of Agadir city located in the South of Morocco. So, the results obtained under various operating conditions, show a significant improvement in the performances of MPPT control of a photovoltaic system using the fuzzy logic controller.

KEYWORDS: Photovoltaic; MPPT controller; Buck converter; "Perturb and Observe"; Fuzzy Logic.

RESUME : Le suiveur du point de puissance maximale (MPPT : Maximum Power Point Tracker) joue un rôle très important pour l'obtention de la puissance maximale d'un panneau solaire, car il permet d'assurer un fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, quelles que soient les conditions de variations d'ensoleillement et de température. Dans ce sens, nous présentons dans ce papier, une technique pour l'amélioration et l'optimisation des performances de contrôle d'un système, composé d'un panneau photovoltaïque, d'un hacheur série et d'une charge. Ce contrôle est effectué en mettant en œuvre deux techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPP): l'une à base du contrôle par la logique floue de type Takagi-Sugeno ("Flou TS") et l'autre employant l'algorithme "Perturber et Observer" ("P&O": Perturb and Observ). Des simulations des différentes parties du système sont développées sous Matlab/Simulink, permettant ainsi une comparaison entre les performances des deux contrôleurs étudiés; "P&O" et "Flou TS". Les deux algorithmes de commande MPPT associées à ces techniques sont testés, sous les conditions météorologiques de la ville d'Agadir située au sud du Maroc. Les résultats ainsi obtenus, sous différentes conditions de fonctionnement, montrent une nette amélioration des performances de contrôle MPPT d'un système photovoltaïque en utilisant le contrôleur à base de la logique floue.

MOTS CLEFS : Photovoltaïque ; Contrôleur MPPT ; Hacheur Buck ; "Perturber et Observer" ; Logique Floue.

1 INTRODUCTION

L'énergie solaire photovoltaïque provenant de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique, souffre entre autre, du problème de maximisation du transfert de puissance du générateur photovoltaïque (GPV) vers la charge. Cela est dû au caractère non-linéaire des caractéristiques électriques $I-V$ (Courant-Tension) des cellules photovoltaïques [1], [2], [3]. Ces caractéristiques dépendent du niveau d'éclairement, de la température de la cellule et de la charge. Afin d'augmenter la puissance de sortie d'un système d'énergie photovoltaïque, il est indispensable de forcer le panneau photovoltaïque à travailler au point de puissance maximale (MPP). Pour extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, la technique utilisée classiquement est d'insérer un étage d'adaptation entre le GPV et la charge. Cet étage d'adaptation est constitué d'un convertisseur statique à commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) [4], [5].

La plupart des articles traitant les algorithmes de contrôle du MPPT sont basés sur la méthode d'incrémentement de la conductance (IncCon) ou sur la commande dite "Perturb and Observe (P&O)" [6], [7], [8]. Les contrôleurs de logique floue de Type Mamdani ont également été étudiés [9], [10]. Ces dernières années, l'analyse et la synthèse de lois de commande des systèmes non-linéaires, décrits par des modèles flous de type Takagi-Sugeno (TS), ont été largement étudiées dans la littérature [11], [12].

Dans ce travail, nous présentons une technique robuste permettant la poursuite du PPM du système à panneau PV, grâce au contrôleur à base de logique floue (CLF) de type Takagi-Sugeno ("Flou TS"). Cette technique de contrôle réduit le temps de calcul, tout en conservant une bonne précision. En plus elle peut être mise en œuvre dans un microcontrôleur à faible coût [6], [13]. Ce contrôleur "Flou TS" ainsi développé, appartenant aux techniques de l'intelligence artificielle, sera par la suite confronté à l'utilisation de l'algorithme de poursuite classique "P&O".

Le présent papier est organisé comme suit : Après une brève introduction, nous présentons dans la section 2, l'environnement du travail et les différents moyens et outils utilisés. Dans la section 3, nous exposons la modélisation électrique du système sous test. La section 4 présente la description et les algorithmes développés pour les deux techniques de poursuite du PPM à savoir les contrôleurs "P&O" et "Flou TS". Puis la section 5 est consacrée à la présentation des modèles sous Matlab/Simulink associés aux différentes composantes de la chaîne de conversion PV sous test. Dans la section 6, nous exposons et interprétons les résultats des simulations concernant les comportements du système PV sous l'effet de l'un des deux contrôleurs "P&O" ou "Flou TS" et face aux changements de l'éclairement G et la température T . Après nous présentons dans la section 7 l'évaluation des performances de chacune des commandes MPPT étudiés. Enfin, nous finissons notre contribution par une conclusion sur nos travaux d'investigations tout en proposons quelques perspectives pour faire évoluer ce travail.

2 MOYENS ET OUTILS D'INVESTIGATIONS

Nos travaux d'investigations sont effectués au sein du laboratoire d'ERTAIER, situé à l'ESTA. Ce laboratoire dispose de moyens humains et matériels qui ont été d'une grande aide pour aboutir aux résultats de mesures utilisés ainsi que le développement des divers algorithmes conduisant à l'élaboration de ce papier. Pour mener à bien ce travail, nous avons développé et simulé, sous Matlab/Simulink, les modèles correspondants aux éléments du système sous étudié, à savoir : le modèle associé au panneau PV, celui du convertisseur statique (Hacheur de type Buck: Série ou Dévolteur) et ceux des contrôleurs "P&O" et "Flou TS". Cette section est consacrée à la présentation des différents moyens et outils employés au courant de nos recherches.

2.1 BANC DE MESURES

Les simulations et comparaisons présentées ci-dessous, sont effectuées en utilisant les mesures récoltées dans une base de données météorologique de la ville d'Agadir. Cette base de données est stockée dans la mémoire de la station d'acquisition météorologique -photo de la Figure 1- installée dans le laboratoire d'ERTAIER (*Equipe de Recherche en Technologies Avancées et en Ingénierie des Energies Renouvelables*) au sein de l'ESTA (*Ecole Supérieure de Technologie d'Agadir*).



Fig. 1. Photo de la station météorologique

2.2 L'OUTIL MATLAB/SIMULINK

Les simulations numériques des différentes composantes de notre système, à savoir ; le GPV, le hacheur de type Buck, les contrôleurs MPPT, sont effectuées à l'aide de l'environnement Matlab/Simulink. Ce dernier possède une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées, sous forme de boîte à outils (Toolbox). Dans notre cas d'étude, nous avons exploité les blocs Simulink 'Matlab Function' pour développer le modèle PV et les deux types de contrôleurs MPPT choisis.

2.3 CHAÎNE DE CONVERSION PV

Comme l'illustre la chaîne de conversion PV de la Figure 2, l'atteinte du PPM est assurée en contrôlant le convertisseur DC-DC par un système employant un algorithme de commande MPPT. La stratégie de commande MPPT permet ainsi d'optimiser le transfert de puissance du panneau PV vers la charge.

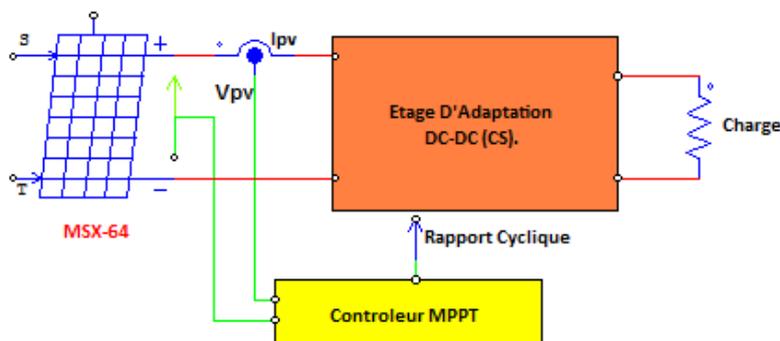


Fig. 2. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

Le panneau PV sous test, figurant dans le schéma de la Figure 2, est de type MSX-64 [14]. Le tableau 1, résume les caractéristiques électriques de ce panneau PV, dans les conditions standards de test (STC : Standard Test Conditions : 1000 W/m², 25 °C et AM 1,5).

Tableau 1. Paramètres du panneau PV de type MSX-64

Paramètres	Valeur
Courant au point de puissance maximale (I_{mp})	3.66 A
Tension au point de puissance maximale (V_{mp})	17.5 V
Puissance maximale (P_{max})	64 W
Nombre de cellule (N_s)	36
Tension nominale en circuit ouvert (V_{ocn})	21.3 V
Courant nominale de court-circuit (I_{scn})	4.0144 A

3 MODÉLISATION ÉLECTRIQUE DU SYSTÈME SOUS TEST

3.1 MODÈLE DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Afin de modéliser notre panneau photovoltaïque, nous commençons par un modèle simple qui est celui d'une cellule PV élémentaire. La configuration que la Figure 3 présente, est le schéma équivalent d'une cellule solaire le plus usuel. Elle comporte une source de courant variable I_{pv} , monté en parallèle avec, d'une part, une diode D , caractérisant la jonction des semi-conducteurs constituant la cellule solaire et d'autre part, une résistance parallèle R_p . A cet assemblage s'ajoute une autre résistance R_s en série avec l'ensemble.

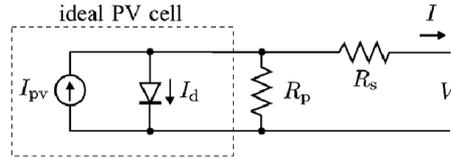


Fig. 3. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

De ce schéma, découle le modèle d'un GPV, régi par les équations données ci-dessous [1] :

$$I = (I_{pv,n} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_n} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{aN_s k T}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (1)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_i \Delta T}{\exp\left(\frac{(V_{oc,n} + K_v \Delta T)}{a V_t}\right) - 1} \quad (2)$$

Avec :

a : Facteur d'idéalité de la cellule solaire, sans unité.

$\Delta T = T - T_n$, avec en degré K, T : Température réelle des cellules et T_n : Température nominale des cellules dans les conditions standards de test (STC) : 1000 W/m², 25 °C et AM 1,5.

G : Eclairement réel (W/m²).

G_n : Eclairement nominal dans les conditions standards de test (W/m²).

I_0 : Courant de saturation inverse de diode (A).

$I_{pv,n}$: Courant généré dans les conditions standards de test (A).

I, V : Courant (A) et tension du GPV (V).

$I_{sc,n}$ et $V_{oc,n}$: Courant de court-circuit (A) et Tension de circuit ouvert (V) dans les conditions standards de test.

$V_t = N_s k T / q$: Tension thermique.

N_s : Nombre de cellule connecté en série (ici 36).

K : Constante de Boltzmann (1.38 10⁻²³ J/K).

K_v : Coefficient de température de tension du circuit ouvert (= 80 ± 10 mV/°C).

K_i : Coefficient de température du courant de court-circuit (= 0.065 ± 0.015) %/°C.

q : Charge de l'électron (1.6 10⁻¹⁹ C).

R_s, R_p : Respectivement résistances série (= 0.2365 Ω) et parallèle (= 415.405 Ω).

3.2 CONVERTISSEUR STATIQUE DE TYPE BUCK

Au courant de nos investigations, le système proposé sur la Figure 2 renferme un convertisseur de puissance DC-DC, de type hacheur série ou dévolteur (Buck), commandé en utilisant le principe de la modulation en largeur d'impulsions (MLI ou PWM : Pulse Width Modulation). Ce hacheur est modélisé par le schéma électrique équivalent de la Figure 4.

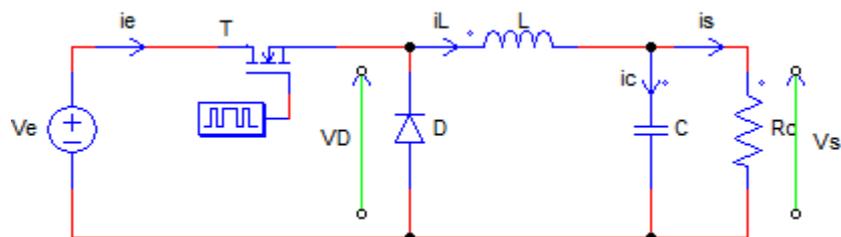


Fig. 4. Circuit électrique équivalent au hacheur dévolteur

Concernant les simulations de ce hacheur étudié, les paramètres que nous avons utilisés sont : La charge est de résistance $R_c = 3 \Omega$, la capacité du condensateur est $C = 4.7 \mu\text{F}$, l'inductance de la bobine est $L = 2 \text{ mH}$, D est la diode de roue libre et T l'interrupteur à amorçage et à blocage commandés de type MOSFET.

Lors du fonctionnement en régime continu de ce hacheur série, les valeurs moyennes des tensions de sortie V_s et d'entrée V_e sont proportionnelles, telle que : $V_s = \alpha V_e$. Le coefficient de proportionnalité α , étant le rapport cyclique de valeurs comprises entre 0 et 1.

Dans le cas présent, nous utilisons le modèle dit moyen du hacheur Buck, c'est-à-dire : $V_D \approx \alpha V_e$. Par conséquent ce hacheur sera décrit par les équations suivantes [15] :

$$C \frac{dV_s}{dt} = i_L - \frac{V_s}{R_s} \qquad L \frac{di_L}{dt} = \alpha V_e - V_s \qquad (3, 4)$$

Pour limiter les ondulations du courant et de la tension au niveau de la charge, la cellule LC associée au circuit équivalent de la Figure 4, constitue un filtre de type passe-bas. Pour dimensionner ce filtre, nous déterminons les valeurs minimales de l'inductance L et de la capacité C en utilisant les contraintes ci-dessous, étudiées par certains auteurs [16] :

- Le courant à travers l'inductance, doit être dans un intervalle raisonnable, pour toutes les conditions de charge, car le convertisseur fonctionne en mode continu.
- L'ondulation maximale de la tension de sortie, ne doit pas dépasser un faible pourcentage, généralement 5 % de la tension de sortie V_s .

Tenant compte de ces contraintes, le filtre passe-bas LC doit obéir aux conditions des relations ci-dessous, où f_c correspond à la fréquence de commutation MLI :

$$L \geq \frac{V_e}{\Delta I_s f_c} \alpha (1 - \alpha) \qquad C \geq \frac{(1 - \alpha)}{8 L f_c^2} \left(\frac{V_s}{\Delta V_s} \right) \qquad (5, 6)$$

Le filtre LC doit laisser passer la composante continue ainsi que certaines harmoniques de faibles fréquences. Dans notre cas d'étude, nous avons fixé les valeurs consignées dans le tableau 3 :

Tableau 4. Paramètres relatifs à la conception du filtre passe-bas LC

Paramètre	Valeur
V_e : Tension d'entrée	24 V
V_{smax} : Tension maximale de sortie	23.4 V
I_{smax} : Courant maximum de sortie	5 A
f_c : Fréquence de commutation MLI	15 kHz
ΔV_s et ΔI_s : Ondulation maximale respectivement de la tension et du courant de sortie	5% de V_s et de I_s
α : Rapport cyclique assurant l'ondulation maximale de $V_s(t)$	0.5

Selon les valeurs de ce tableau et d'après les conditions (5) et (6), nous aboutissons aux valeurs optimales, telles que pour l'inductance ($L \geq 1.6 \text{ mH}$) et pour la capacité ($C \geq 2.7 \mu\text{F}$).

4 TECHNIQUES DE POURSUITE MPPT

La chaîne de puissance assurant l'alimentation d'une charge DC par le GPV, à travers un convertisseur statique (CS) piloté par une commande de type MPPT représentée par la Figure 5 et basée sur l'un des algorithmes "Flou TS" ou "P&O". La commande MPPT ajuste le rapport cyclique du CS de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit maximale à ses bornes.

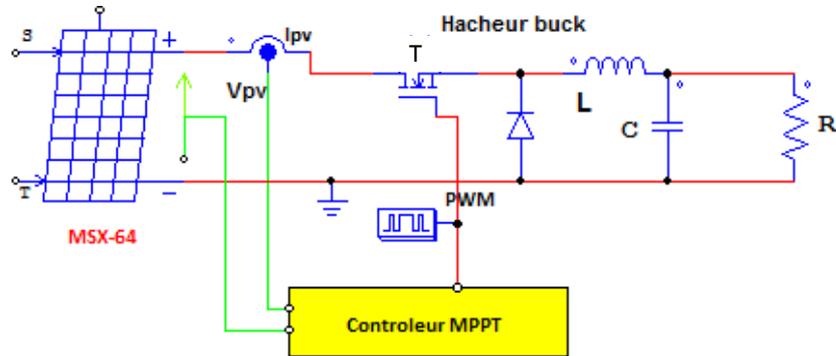


Fig. 5. Chaîne de conversion PV avec le détail du hacheur série contrôlé par une commande MPPT

4.1 COMMANDE P&O "PERTURBER ET OBSERVER"

L'algorithme appelé "P&O" est une commande MPPT dont le fonctionnement est basé sur la perturbation de la tension V_{pv} , en l'augmentant ou en la diminuant d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale. Cette perturbation a pour effet d'agir directement sur le rapport cyclique du signal contrôlant le convertisseur DC-DC. La perturbation est suivie par l'observation de son impact sur la puissance de sortie du panneau PV, en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique. La Figure 6 présente l'organigramme décrivant l'algorithme assurant cette commande appelée "P&O".

Toutefois, cette technique présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi, car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de la perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande assez difficile à optimiser.

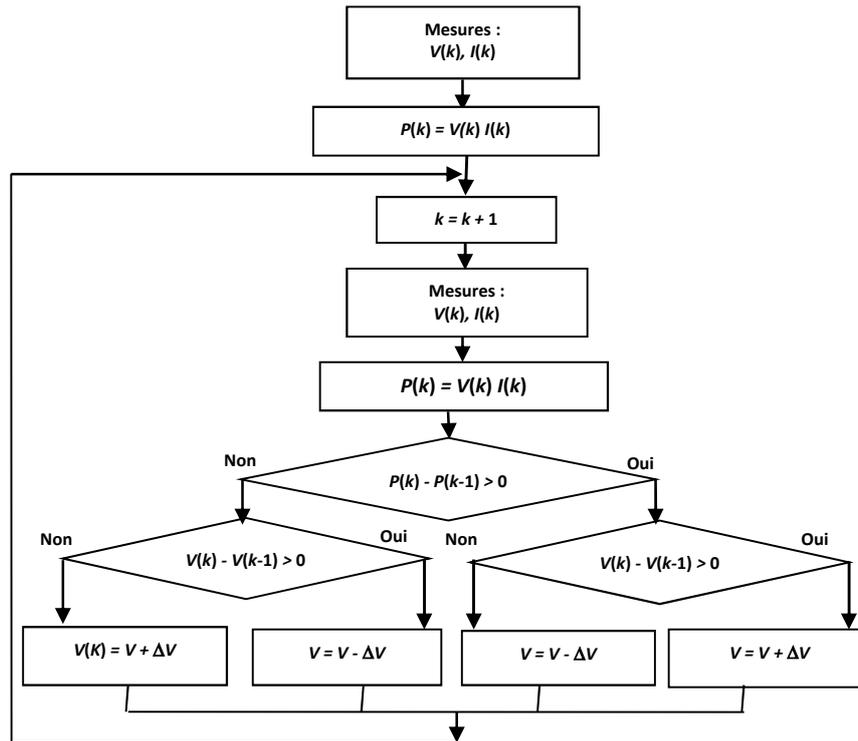


Fig. 6. Organigramme de l'algorithme de commande "P&O"

4.2 COMMANDE FLOUE DE TYPE TAKAGI-SUGENO

Les modèles flous de Takagi-Sugeno [17] sont réputés être une technique efficace, pour représenter un système non-linéaire par des ensembles flous et raisonnement flou. Ce type de modèle est, comme celui de Mamdani, construit à partir d'une base de règles de type "Si ... Alors ...", dans laquelle si la prémisse est toujours exprimée linguistiquement, le conséquent utilise des variables numériques plutôt que des variables linguistiques. Le conséquent peut s'exprimer par exemple, sous la forme d'une constante, d'un polynôme ou de manière plus générale sous forme d'une fonction ou d'une équation différentielle dépendant des variables associées à l'antécédent. Généralement le modèle de type Takagi-Sugeno est basé sur une collection des règles R_i du type :

$$R_i : \underline{\text{Si}} (E \text{ est } A_i) \underline{\text{Et}} (\Delta E \text{ est } B_i) \underline{\text{Alors}} y_i = f_i(E, \Delta E) \quad \text{Pour } i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Où R_i dénote la $i^{\text{ème}}$ règle du modèle et n le nombre de règles flous que contient la base de règles. E et ΔE sont les variables d'entrée x , appelées antécédents (ou prémisses) et y est la variable de sortie, nommée conséquent (ou conclusion). A_i et B_i sont les sous-ensembles flous (ou univers de discours) de l'antécédent de la $i^{\text{ème}}$ règle. Ces ensembles flous sont définis par des fonctions d'appartenance $\mu_{A_i}(E)$ ou $\mu_{B_i}(\Delta E)$ appartenant l'intervalle $[0, 1]$. $\mu_{A_i}(E)$ ou $\mu_{B_i}(\Delta E)$ symbolisent respectivement la valeur de la fonction d'appartenance de l'entrée E ou l'entrée ΔE à l'ensemble flou A_i ou B_i . Dans le cas où les conséquents $y_i = f_i(E, \Delta E)$ prennent la forme d'une constante, ce qui correspond à notre cas d'étude ($y_i = \Delta\alpha$), le modèle est appelé singleton ou d'ordre zéro.

Le régulateur "Floue TS" proposé pour l'optimisation du système, est représenté par la Figure 7. Il reçoit comme entrées l'erreur et la variation de l'erreur du système ($E(k)$, $\Delta E(k)$). A la sortie, il y'a génération de la variation du rapport cyclique $\Delta\alpha$ commandant le hacheur DC-DC. Ce contrôleur "Floue TS" peut être décomposé en trois principaux modules :

- celui d'entrée : Fuzzification. Il associe à chacune des entrées réelles un degré d'appartenance compris entre 0 et 1,
- le moteur d'inférence : il est associé à la base de règles de type : "Si ... Alors ...",
- celui d'entrée : Défuzzification. Il permet de transformer les degrés d'appartenance des sous-ensembles flous de commande en grandeur numérique.

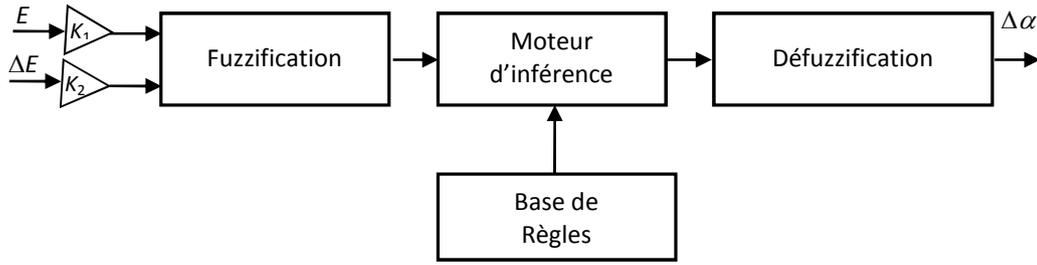


Fig. 7. Figure Structure de base du contrôleur flou

Dans le cas de notre contrôleur flou présenté sur la Figure 7, il est caractérisé par :

- Deux entrées ; l'erreur E et sa variation ΔE ainsi qu'une seule sortie $\Delta\alpha$.
- Des facteurs d'échelle K_1 et K_2 (de -1 à 1), pour la normalisation des entrées, associés à l'erreur et à sa variation.
- L'univers de discours découpé en cinq classes, décrites plus en bas, pour les variables d'entrées et de sortie.
- Les fonctions d'appartenances de types triangulaires et trapézoïdales.
- L'implication de Takagi-Sugeno pour l'inférence.
- La méthode moyenne pondérée pour le calcul de la sortie.

Les deux variables d'entrées E et ΔE sont définies par les deux expressions suivantes :

$$E = \frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} = \frac{P_{pv}(t) - P_{pv}(t-1)}{V_{pv}(t) - V_{pv}(t-1)} \quad \Delta E = E(t) - E(t-1) \quad (8, 9)$$

Avec :

$P_{pv}(t)$: La puissance instantanée délivrée par le GPV (en W).

$V_{pv}(t)$: La tension instantanée aux bornes du GPV (en V).

La sortie du contrôleur $\Delta\alpha$ est défini par la loi de commande qui dépend de l'erreur E et de sa variation ΔE , telle que $\Delta\alpha = f(E, \Delta E)$. Enfin le rapport cyclique α , commandant le hacheur DC-DC, est exprimé par l'équation suivante :

$$\alpha(t) = \alpha(t-1) + \Delta\alpha \quad (10)$$

Le grand avantage de la technique de Takagi-Sugeno, c'est qu'elle permet de simplifier le calcul de l'agrégation, afin d'obtenir plus rapidement une solution nette et d'alléger, de façon importante, le mécanisme du calcul global. Dans la modélisation Takagi-Sugeno, la sortie finale selon [19], est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle. Cette moyenne est donnée par l'expression (11) :

$$CG_{Sugeno} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (11)$$

Où z_i est le niveau de sortie de chaque règle R_i et w_i les degrés d'appartenance calculés par l'équation :

$$w_i = \mu_{A_i}(E) \cdot \mu_{B_i}(\Delta E) \quad (12)$$

La base des règles est résumée dans le tableau 4. Dans le cas concernant notre système, l'univers de discours est découpé en cinq classes NB , NS , ZE , PS et PB , pour les variables d'entrées et de sortie. Tels que NB pour négatif grand, NS pour négatif petit, ZO pour environ zéro, PS pour positif petit, et PB pour positif grand.

Tableau 5. Base des règles floues

ΔE \ E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PB	PB	PS	ZE
NS	PB	PB	PS	ZE	NS
ZE	PB	PS	ZE	NS	NB
PS	PS	ZE	NS	NB	NB
PB	ZE	NS	NB	NB	NB

Les fonctions d'appartenance utilisées dans le cas de notre contrôleur flou, sont de types triangulaire et trapézoïdale pour les entrées, alors qu'elles sont de type singleton pour la sortie. Ces fonctions sont représentées sur la Figure 8 :

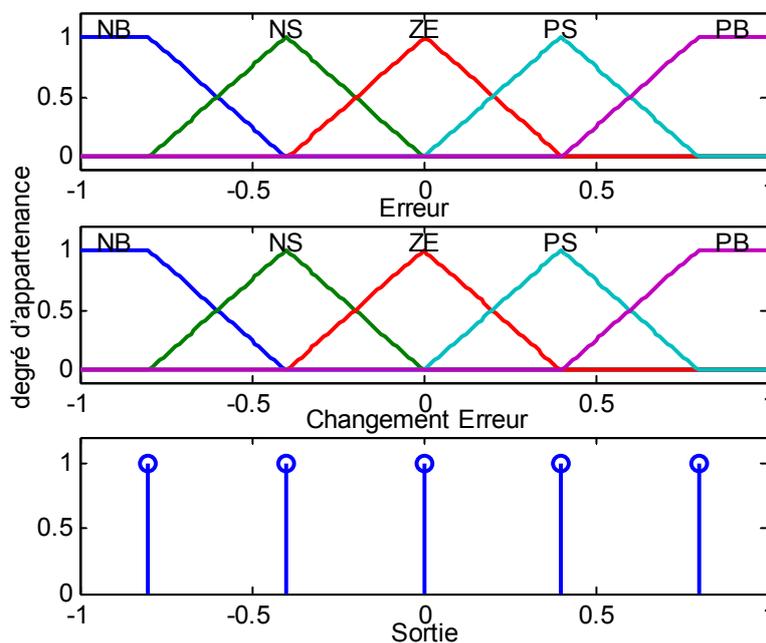


Fig. 8. Fonctions d'appartenance correspondantes aux variables d'entrées et de sortie

5 MODÉLISATION DE LA CHAÎNE DE CONVERSION SOUS MATLAB/SIMULINK

Dans cette partie, nous présentons les modèles utilisés pour simuler les différentes composantes de la chaîne de conversion PV, en travaillant sous l'environnement Matlab/Simulink.

5.1 PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Le modèle du panneau photovoltaïque à base d'équations (1) et (2) est résolu par la méthode de Newton-Raphson. L'organigramme assurant cette résolution est donné par la Figure 9.a. Le programme associé est implémentée dans le schéma bloc Simulink présenté dur la Figure 9.b. Ce programme est traduit à l'aide d'une *S-function* de Matlab.

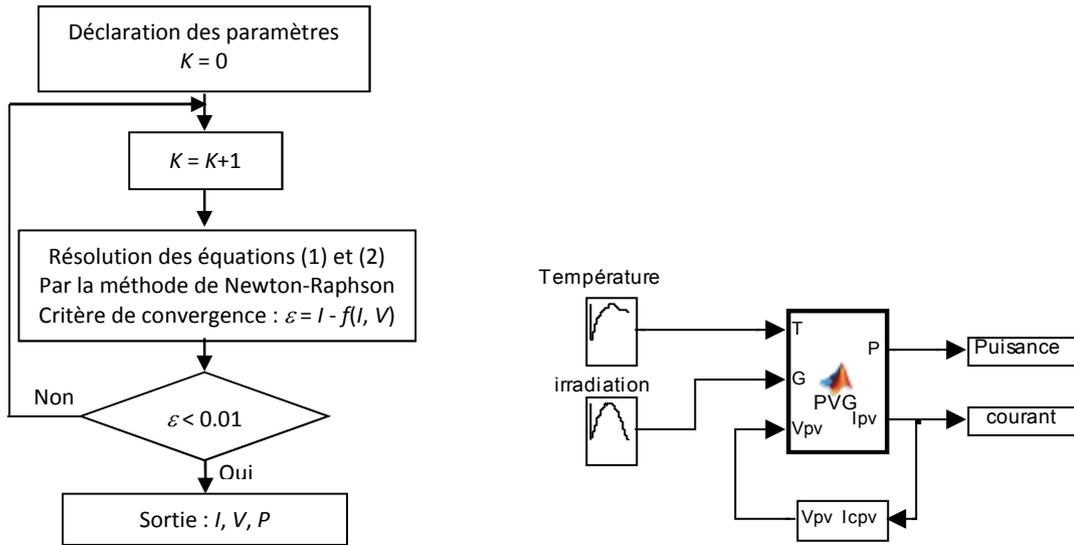


Fig. 9. a. Organigramme de Newton-Raphson

b. Schéma bloc du module PV

5.2 HACHEUR BUCK

Le schéma bloc réalisé sous Simulink, est présenté sur la Figure 11. Il correspond au modèle dit moyen, du convertisseur Buck intégré à la chaîne de conversion PV.

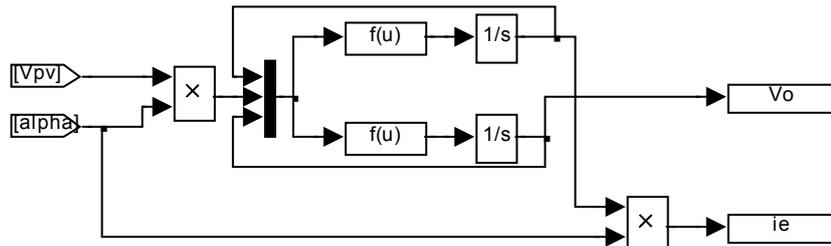


Fig. 10. Schéma bloc du hacheur Buck DC-DC

5.3 CONTRÔLEUR MPPT TYPE "P&O"

Dans une première phase nous implémentons sous Simulink, le schéma complet du système PV avec le modèle de la commande "P&O", comme l'illustre la Figure 11.

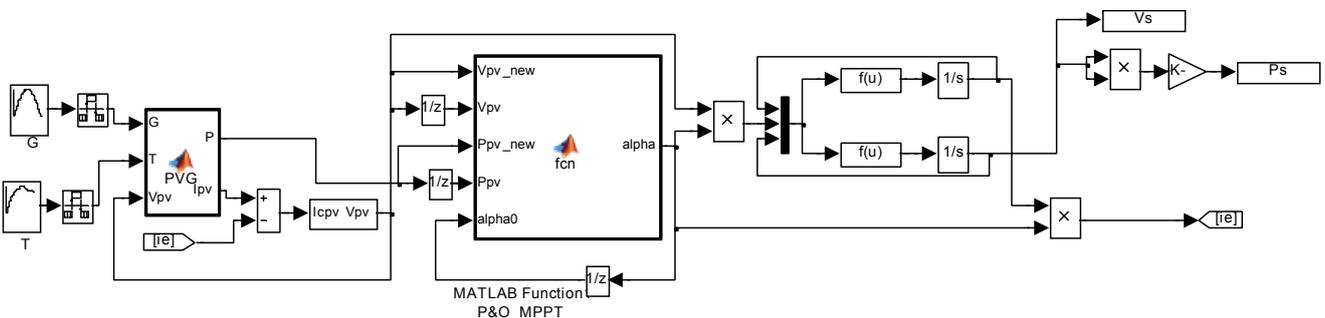


Fig. 11. Schéma complet du système PV avec le modèle de la commande de type "P&O"

5.4 CONTRÔLEUR MPPT TYPE FLOU TAKAGI-SUGENO

Dans la seconde phase, le contrôleur "Flou TS" est aussi implémenté sous Simulink, grâce aux S-function de Matlab, comme le montre la Figure 12.

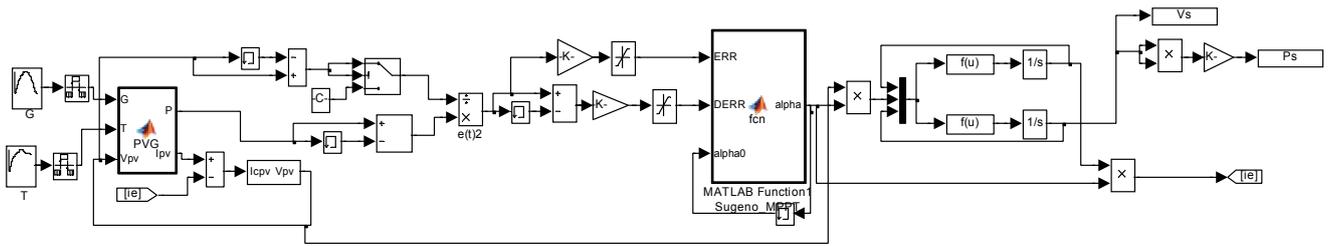


Fig. 12. Schéma complet du système PV avec le modèle de la commande de type "Flou TS"

6 RESULTATS ET COMMENTAIRES

6.1 COMPORTEMENT FACE AUX VARIATIONS DE G ET T DU SYSTÈME SOUS LES CONTRÔLEURS "P&O" ET "FLOU TS"

Dans un premier scénario nous comparons par simulations, la convergence vers le PPM concernant la puissance de sortie du système PV sous test, en utilisant l'un des deux contrôleurs P&O et "Flou TS". D'abord, pour une température T fixée à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, alors que l'éclairement G est rapidement variable sous forme d'escalier avec des fronts montants de durées assez courte. Ensuite, une irradiation G fixée à 1000 W/m^2 tout en faisant varier rapidement la température T sous forme d'escalier avec des fronts descendants de durées assez courte. Respectivement, les Figures 13.a et b montrent les résultats des simulations ainsi obtenues pour ce premier scénario.

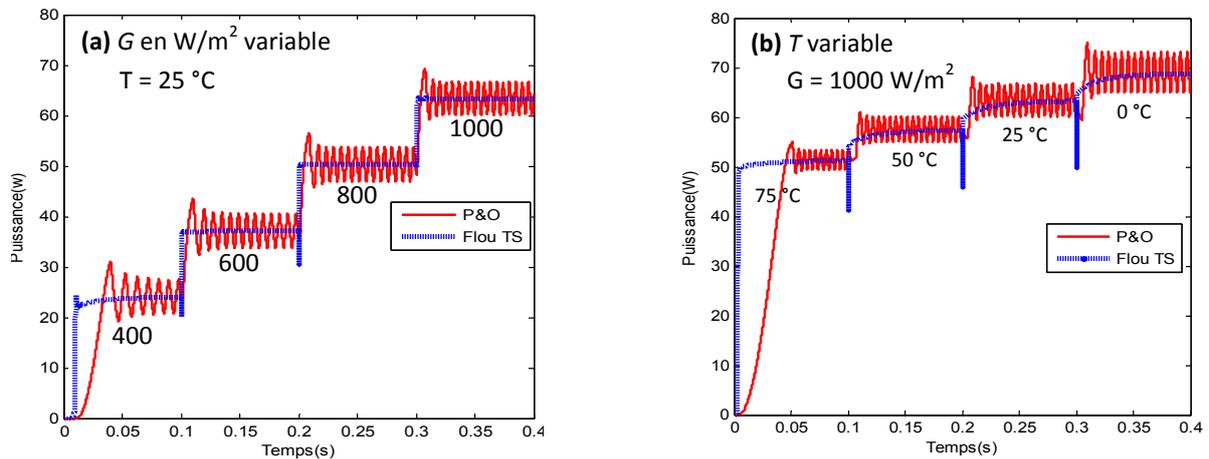


Fig. 13. Comparaison de la convergence vers le PPM de la puissance de sortie en utilisant l'un des contrôleurs "P&O" et "Flou TS" sous différentes conditions : (a) T fixe et G variable (b) G fixe et T variable

Pour ce premier scénario, face aux variations précitées et suite aux résultats de la Figure 13, nous déduisons les remarques et interprétations ci-dessous, concernant le comportement du système PV vis-à-vis des deux contrôleurs MPPT types "P&O" et "Flou TS" :

- Pour ces deux contrôleurs, nous remarquons l'effet de l'augmentation de la puissance produite par le système PV, causée par une augmentation de l'éclairement G si la température est fixe, ou encore causé par une diminution de la température T si est l'éclairement est fixe.
- Dans les deux cas, le temps de convergence ou temps de réponse du contrôleur "Flou TS" est plus rapide que celui du contrôleur "P&O".
- Le contrôleur "P&O" présente des oscillations autour du PPM, tandis que le contrôleur "Flou TS" reste assez stable.

6.2 COMPORTEMENT AU VOISINAGE DU PPM DU SYSTÈME SOUS LES CONTRÔLEURS "P&O" ET "FLOU TS"

Pour le deuxième scénario, nous évaluons l'efficacité des deux commandes "P&O" et "Flou TS" en comparant leur vitesse de convergence et leur stabilité apportée vis-à-vis du PPM au niveau des caractéristiques P - V fournies par le constructeur du panneau PV de type MSX-64.

Toujours, selon la même démarche que précédemment, pour l'évaluation des deux techniques de contrôle "P&O" et "Flou TS", les Figures 14.(a, b) et 15.(a, b), résumant les résultats des simulations effectuées concernant les caractéristiques PV. Ces dernières sont obtenues dans les conditions respectives, telles que la température T est fixée à 25 °C et l'éclairement G est variable, ensuite un éclairement G fixé à 1000 W/m² et une température T est variable.

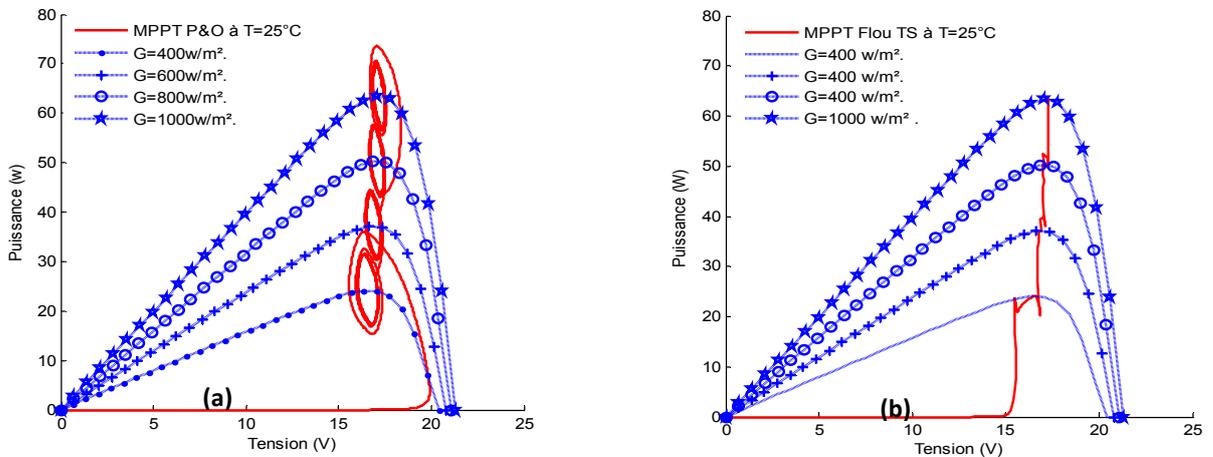


Fig. 14. Comparaison de la convergence vers le PPM des caractéristiques P-V du constructeur [14] pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et G variable en employant un MPPT à base du contrôleur "P&O" (a) ou "Flou TS" (b)

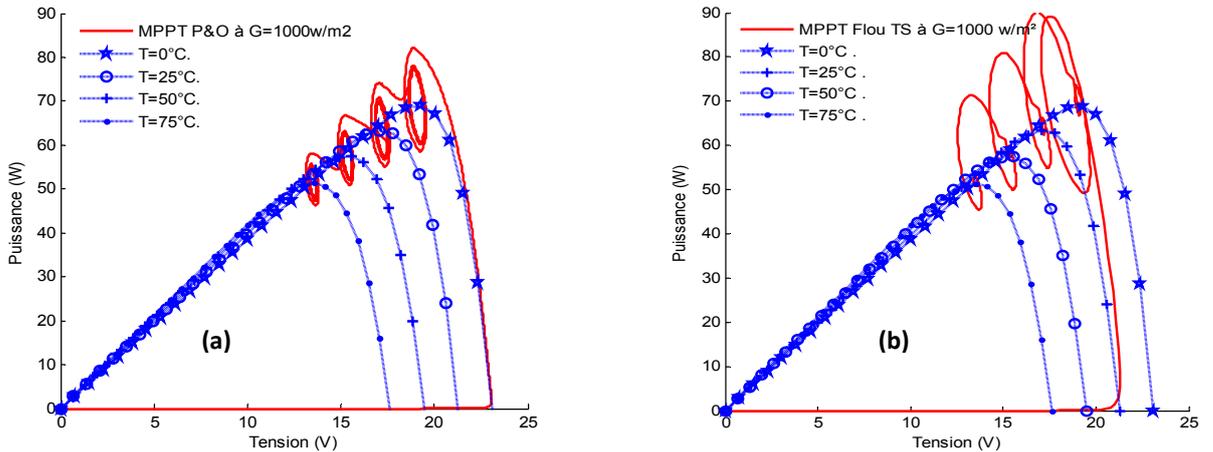


Fig. 15. Comparaison de la convergence vers le PPM des caractéristiques P-V du constructeur [14] pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et T variable en employant un MPPT à base du contrôleur "P&O" (a) ou "Flou TS" (b)

Suite à l'analyse des courbes des Figures 14 et 15, nous pouvons confirmer, encore une fois de plus, la supériorité du contrôleur "Flou TS" en terme de stabilité et aussi en terme de convergence assez rapide vers le PPM des caractéristiques PV fournies par le constructeur du module de type MSX-64. En effet, le contrôleur "P&O" remonte vers le point de fonctionnement et ne se stabilise autour du MPP qu'après d'importantes oscillations.

6.3 CONFRONTATION DES ALGORITHMES "P&O" ET "FLOU TS" DANS DES CONDITIONS RÉELLES

Enfin, pour le troisième scénario, les deux algorithmes de commande "P&O" et "Flou TS" sont simulés et testés dans l'environnement Matlab/Simulink, sous un éclairement et une température modulés selon la journée choisie. Les simulations et comparaisons sont effectuées en utilisant les mesures recueillies dans une base de données météorologique de la ville d'Agadir illustré par la photo de la Figure 2. Sur les Figure 16-a et b, nous présentons l'évolution des données relevées toutes les 15 mn de 8h00 à 18h00 de la journée du 25-Mars-2014, concernant la température et l'éclairement.

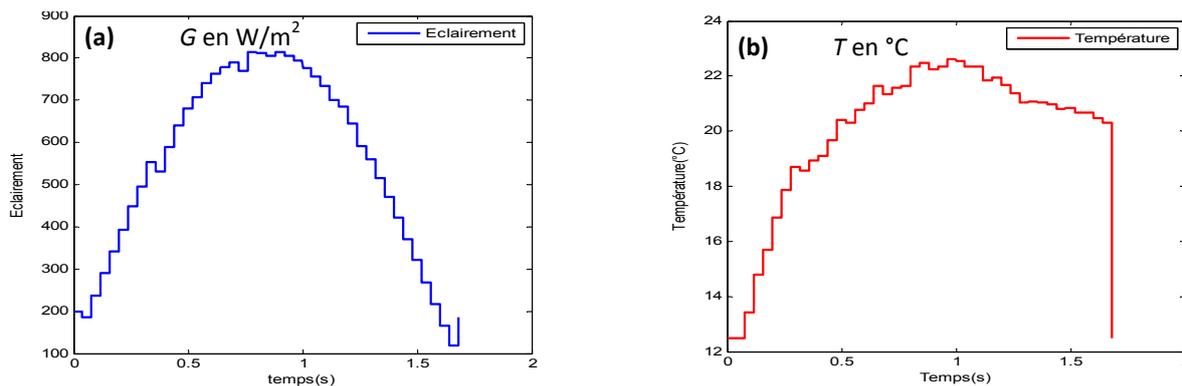


Fig. 16. Variations de l'éclairement G (a) et de la température T (b) au courant de la journée du 25-Mars-2014, selon les données relevées par la station météorologique précitée plus haut

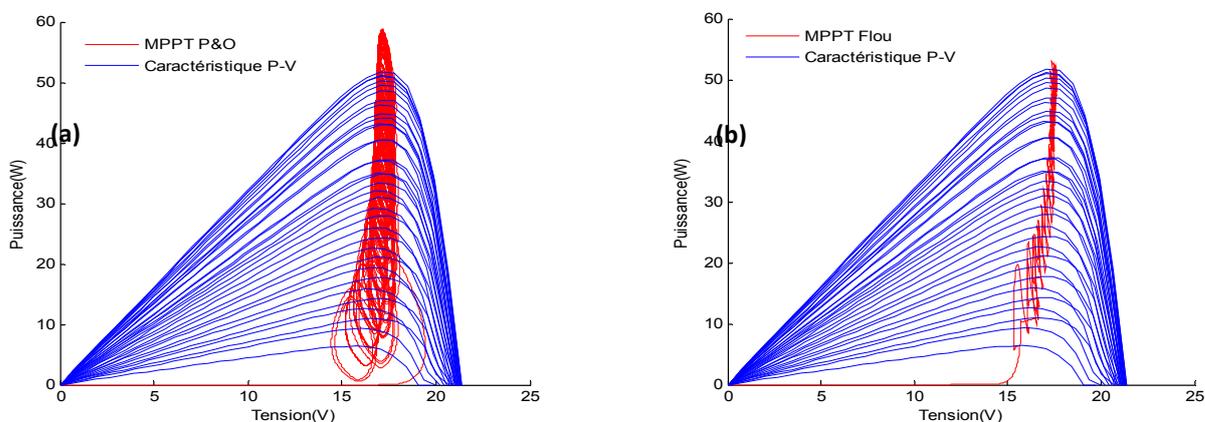


Fig. 17. Caractéristiques P-V, sous les conditions réelles de température et d'éclairement de la ville d'Agadir avec le suivi du MPP grâce au contrôleur "P&O" (a) et "Flou TS" (b)

Dans cette section, nous examinons les effets du contrôle assuré par les deux algorithmes de commande MPPT : "P&O" et "Flou TS", face aux variations de la température et de l'éclairement, mesurés au niveau de la ville d'Agadir. Ces effets sont illustrés par les figures 17-a et b qui mettent en évidence la grande efficacité, en termes de stabilité et du temps de réponse, du contrôleur "Flou TS" par rapport à la commande basée sur l'algorithme "P&O", ce qui valide ainsi les interprétations des paragraphes 6.1 et 6.2.

7 CRITÈRES DE PERFORMANCE DES CONTRÔLEURS MPPT

Afin d'évaluer théoriquement et expérimentalement les performances des deux types des contrôleurs étudiés, nous nous intéressons dans ce paragraphe, à comparer deux critères de performance de ces contrôleurs MPPT, à savoir :

- Le critère du rendement η_{MPPT} d'un contrôleur MPPT défini par [4] :

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^t P_m(t) dt}{\int_0^t P_{max}(t) dt} \quad (13)$$

Avec :

P_m : Puissance mesurée que le panneau PV produit sous le contrôle MPPT.

P_{max} : Puissance maximale qu'ils pouvaient produire sous la même température et le même ensoleillement sans MPPT.

- Le critère de l'intégrale du carré de l'erreur (ISE : *Integral of the Squared Error*) [18] :

En générale, l'objectif d'un système de commande est de minimiser l'écart entre la sortie d'un système et une valeur de consigne désirée. Cet écart peut être dû, soit à un changement de consigne, soit à des perturbations agissant sur le système. A partir de ces constatations on définit le critère de l'intégrale du carré de l'erreur par :

$$ISE = \int_0^t [e(t)]^2 dt \quad (14)$$

Où $e(t) = \frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}}$ est la variation de la puissance par rapport aux variations de la tension de sortie du panneau PV. $e(t)$ représente l'erreur sur la première entrée E du contrôleur flou. La valeur de $e(t)$ montre si le point de fonctionnement pour la charge utilisée à l'instant t , se situe du côté gauche ou du côté droit du point de puissance maximale au niveau de la caractéristique P - V . Le critère ISE est évalué dans l'intervalle d'étude $[0, t]$.

D'après les définitions ci-dessus, concernant les deux critères η_{MPPT} et ISE , nous constatons que plus η_{MPPT} est grande et plus ISE est faible, plus la commande MPPT sera efficace et rapide.

Dans le cas de nos investigations, pour les deux contrôleurs MPPT traités dans cet article, le tableau ci-dessous résume les résultats de calcul concernant le rendement η_{MPPT} et le critère ISE .

Tableau 6. Critères de performance des contrôleurs MPPT

Paramètres	"Floue TS"	"P&O"
μ_{MPPT}	99.04 %	97.03 %
$ISE.10^6$	0.204	7.261

La comparaison entre ces résultats nous permet de constater que la commande "Flou TS" a un rendement meilleur que celui de la commande "P&O". Ainsi le critère de l'intégrale du carré de l'erreur ISE correspondant au contrôleur "Flou TS" est largement inférieur -environ 50 fois- à la commande "P&O". Cela prouve la rapidité du contrôleur "Flou TS".

8 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons étudié et analysé, en modélisant et en simulant sous Matlab/Simulink, le fonctionnement d'un système photovoltaïque, dont la charge est adaptée par l'intermédiaire d'un hacheur de type Buck. La régulation est assurée par deux types de commande MPPT : La commande classique "Perturb and Observ" et une commande découlant de l'intelligence artificielle floue de type Takagi-Sugeno. Les résultats auxquels nous avons aboutis, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer de manière considérable et efficace le rendement des installations photovoltaïques. Les comparaisons effectuées entre les deux types de commandes confirment que l'utilisation du contrôleur "Flou TS" permet d'un côté, de minimiser le critère de l'intégrale du carré de l'erreur ISE ce qui réduit le temps de réponse du système de commande. D'un autre côté, il permet d'améliorer le rendement η_{MPPT} du contrôleur MPPT ce qui a pour objectif de diminuer les fluctuations du régime transitoire. Cela augmente l'efficacité du contrôleur MPPT de type "Flou TS" et assure une nette amélioration de la stabilité autour du PPM.

En perspective à ce travail, nous proposons de le parfaire par :

- L'implémentation d'une commande "Floue TS" sur un microcontrôleur pilotant une application sur un site réel. Cela est possible, car la méthode de Takagi-Sugeno est basée sur une démarche simplifiant le calcul de l'agrégation, tout en aboutissant plus rapidement à une solution nette. En effet, cette méthode est bien adaptée aux applications temps réel, pour lesquelles le temps de calcul a une importance capitale.
- La conception d'une commande floue optimisée en employant des algorithmes génétiques assurant l'optimisation des différents gains et paramètres des systèmes flous.

REFERENCES

- [1] M.G. Villalva, J.R. Gazoli, E.R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 24, Issue 5, 2009, pp. 1198-1208.
- [2] Djamila Rekioua, Ernet Matagne, "Optimisation of photovoltaic power systems, Modelization, Simulation and Control", ISBN 978-1-4471-2348-4, Springer, London Dordrecht Heidelberg New York, 2012.
- [3] E. Jensi Miriam, S. Ambalavanan, "Online Tracking of Maximum Panel Power Output in Photovoltaic Stand Alone System with Different Insolation", *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 3, Issue 3, July 2013, pp. 685-692.

- [4] J.M. Enrique , E. Durán, M. Sidrach-de-Cardona, J.M. Andújar , "Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies", *Solar Energy*, Vol. 81, Issue 1, 2007, pp. 31-38.
- [5] Ainah Priye Kenneth, "Design of Dc-Dc Converter with Maximum Power Point Tracker Using Pulse Generating (555 Timer) Circuit for Photovoltaic Module", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, <http://www.ijser.org/>, Vol. 3, Issue 6, June 2012, pp. 869-878.
- [6] Ahmed M. Fares, Belal A. Abo Zalam, Salwa G. El Nashar, Haitham Aka, "Comparison Between Different Algorithms for Maximum PPT in Photovoltaic Systems and its Implementation on Microcontroller", *Journal of Energy Technologies and Policy*, www.iiste.org, Vol. 3, No 5, 2013, pp. 62-72.
- [7] J. Surya Kumari, Dr. Ch. Sai Babu, A. Kamalakar Babu, "Design and Analysis of P&O and IP&O MPPT Techniques for Photovoltaic System", *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)* <http://www.ijmer.com/pages/vol2-issue4.html>, Vol. 2, Issue 4, July-Aug 2012, pp. 2174-2180.
- [8] Anto Joseph and Godwin Jam, "An Efficient Analog Maximum Power Point Tracking (MPPT) Regulator for the Parallel Hybrid Photo Voltaic – Diesel and Wind Energy Systems", *International Journal of Innovation and Applied Studies*, <http://www.issr-journals.org/ijias/>, Vol. 4, Issue 2, October 2013, pp. 456-464.
- [9] Maysa Farhat, Lassâad Sbita, "Advanced Fuzzy MPPT Control Algorithm for Photovoltaic Systems". *Science Academy Transactions on Renewable Energy Systems Engineering and Technology*, Vol. 1, Issue 1, March 2011, pp. 29-36.
- [10] M. Ajaamoum, M. Kourchi, R. Alaoui, L. Bouhouch, "Fuzzy Controller to Extract the Maximum Power of a Photovoltaic System", *IEEE, International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Ouarzazate 7-9 March 2013, pp. 141-146.
- [11] Victor-Hugo Grisales Palacio, "*Modélisation et commande floue de type Takagi-Sugeno Appliquées à un bioprocédé de traitement des eaux usées*", Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier - Toulouse III, France, en cotutelle avec l'Université de los Andes, Colombie, 2007.
- [12] Hafedh Abid, Fernando Tadeo, Mansour Souissi, "Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Panel based on T-S Fuzzy Systems", *International Journal of Computer Applications*, Vol. 44, No 22, April 2012, pp. 50-58.
- [13] A. Louchene, A. Benmakhlouf, A. Chaghi, "Solar tracking system with fuzzy reasoning applied to crisp sets", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 10, N° 2, 2007, pp. 231-240.
- [14] MSX-64 PDF Spec sheet, MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules, <http://www.solarelectricsupply.com/solarex-msx-64-w-junction-box-548>.
- [15] K.W. Seo, Han Ho Choi, "Simple Fuzzy PID Controllers for DC-DC Converters", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol. 7, Issue 5, 2012, pp. 724-729.
- [16] Hayrettin CAN, "Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, <http://mistug.tubitak.gov.tr/bdyim/toc.php?dergi=elk&yilsayi=2013/2>, Vol. 21, Issue 2, 2013, pp. 301-308.
- [17] T. Takagi, M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-15, No 1, January/February 1985, pp. 116-132.
- [18] Ouahib Guenounou, "*Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique- application à un bioprocédé*", Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, France, 2009.