

IV.1 Introduction

Un contrôleur flou peut être vu comme un système expert basé sur la connaissance de l'opérateur. Des expériences ont montré que, dans de nombreux cas, les résultats obtenus avec un contrôleur flou (technique non conventionnelle) sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle conventionnelle. 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.

Dans ce chapitre nous allons évaluer les deux méthodes de poursuite MPPT que nous avons introduit; notre propre méthode de poursuite utilisant le contrôleur flou et la méthode P&O. Les deux systèmes sont simulés en les combinant avec le convertisseur DC/DC : (hacheurs Boost), et sous les conditions environnementale stable et de nombreux changements des conditions atmosphériques : (changement de l'ensoleillement lent et rapide).

IV.2 Description du système photovoltaïque global

La figure 4.1 montre le schéma bloc sous Simulink du système photovoltaïque général, ce dernier se compose des éléments suivants déjà décrit dans le chapitre précédent, c.-à-d. le générateur PV de 106W que nous avons modélisé, le hacheur Boost qu'on a dimensionnés et le bloc qui contient le contrôleur MPPT et qui permet de maximiser la puissance générée par le GPV.

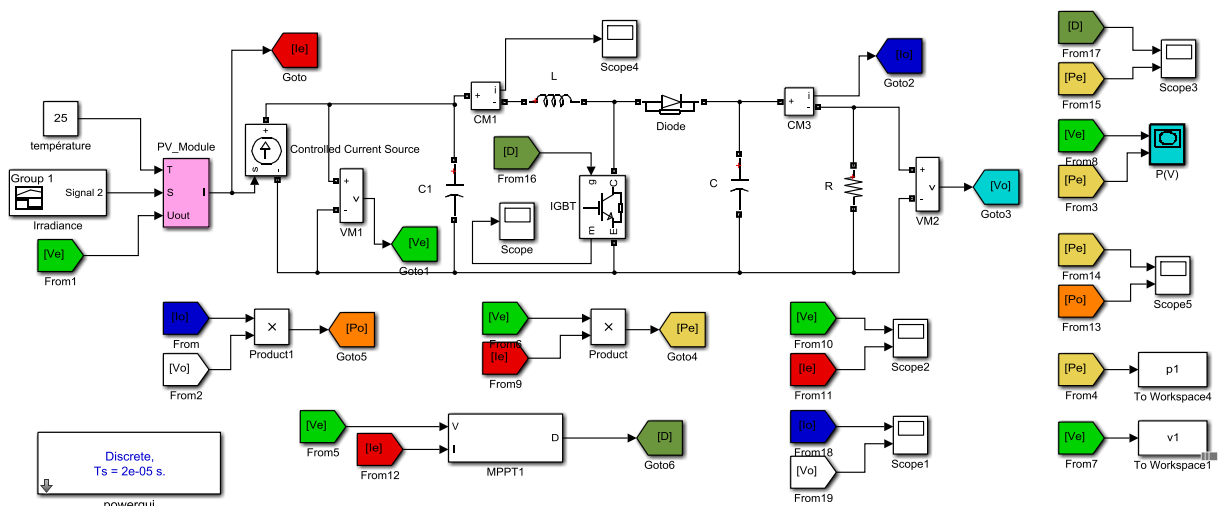


Figure 4.1 : Schéma bloc du système PV avec MPPT

Les éléments de puissance utilisent le toolbox SimPowerSystems, qui est intégré à Simulink, il permet de simuler ces éléments avec les détails nécessaires pour avoir les résultats les plus réalistes possible. Dans toutes les simulations qu'on va voir dans ce chapitre on a fait une comparaison des résultats obtenus avec le MPPT flou avec ceux obtenus avec un MPPT P&O.

IV.3 Contrôleurs MPPT P&O classique

Cette méthode de contrôle, étudiée dans le chapitre I, est une méthode célèbre déjà Traitée par plusieurs chercheurs. Cette méthode peut être modélisée sous Simulink comme illustré sur la figure 4.2 :

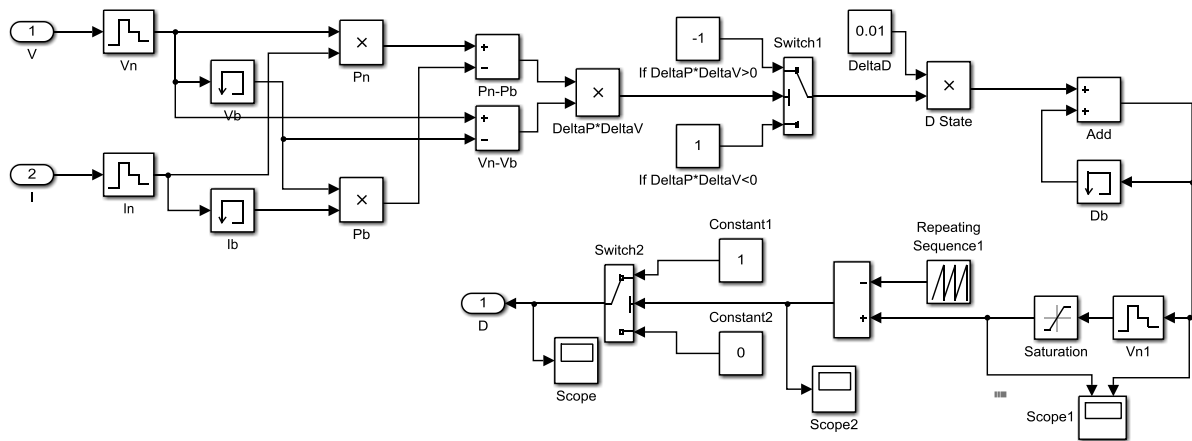


Figure 4.2 : Modèle 'SIMULINK' du contrôleur MPPT P and O avec PWM.

IV.3.1 Résultats de simulation de la méthode P&O

La méthode MPPT P&O, est généralement une technique très utilisée pour contrôler le point de puissance maximale d'un système PV. La Figure 4.3 représente la Simulation de la poursuite du point de puissance maximale.

Pour faire une étude de la robustesse de contrôleur MPPT P&O des différentes conditions environnementales on effectue les tests suivants :

Nous soumettons les systèmes contrôlés à différentes conditions environnementales :

- On maintient une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) et l'éclairement ($G=1000\text{W/m}^2$) c'est-à-dire dans les conditions standard.
- On maintient une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) et on varie l'éclairement solaire par une augmentation et diminution rapide.

- On soumet le contrôleur MPPT P&O à des changements aléatoires de variable de l'ensoleillement.

a) Dans les conditions standards ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

Les figures suivantes montrent les résultats de simulation du dispositif MPPT sous les conditions standard de test avec une charge résistive de 20Ω .

Qu'on a réponse de contrôleur MPPT P&O avec conditions environnementales standards par une petite fluctuation dans le régime permanent.

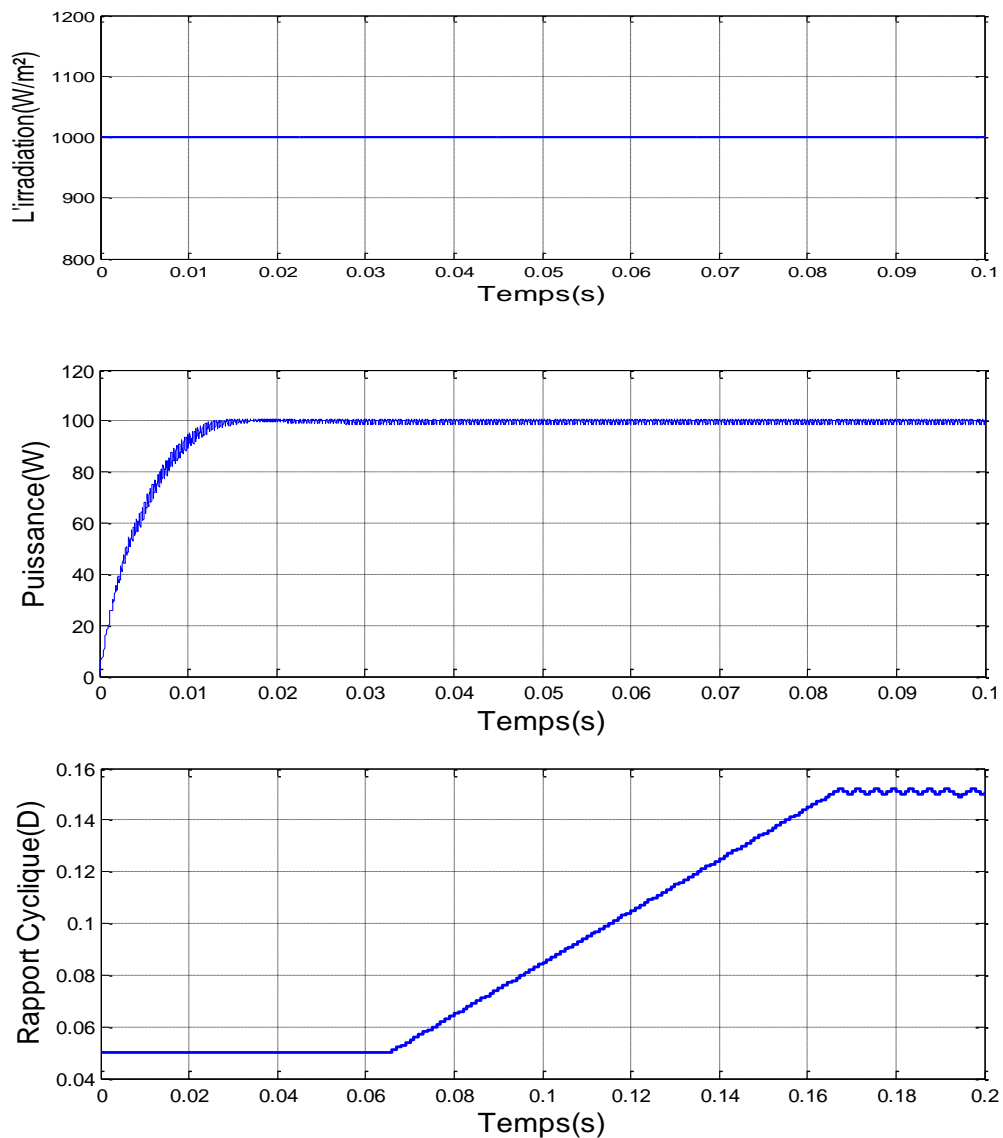


Figure 4.3 : Résultat de simulation sous les conditions STC.

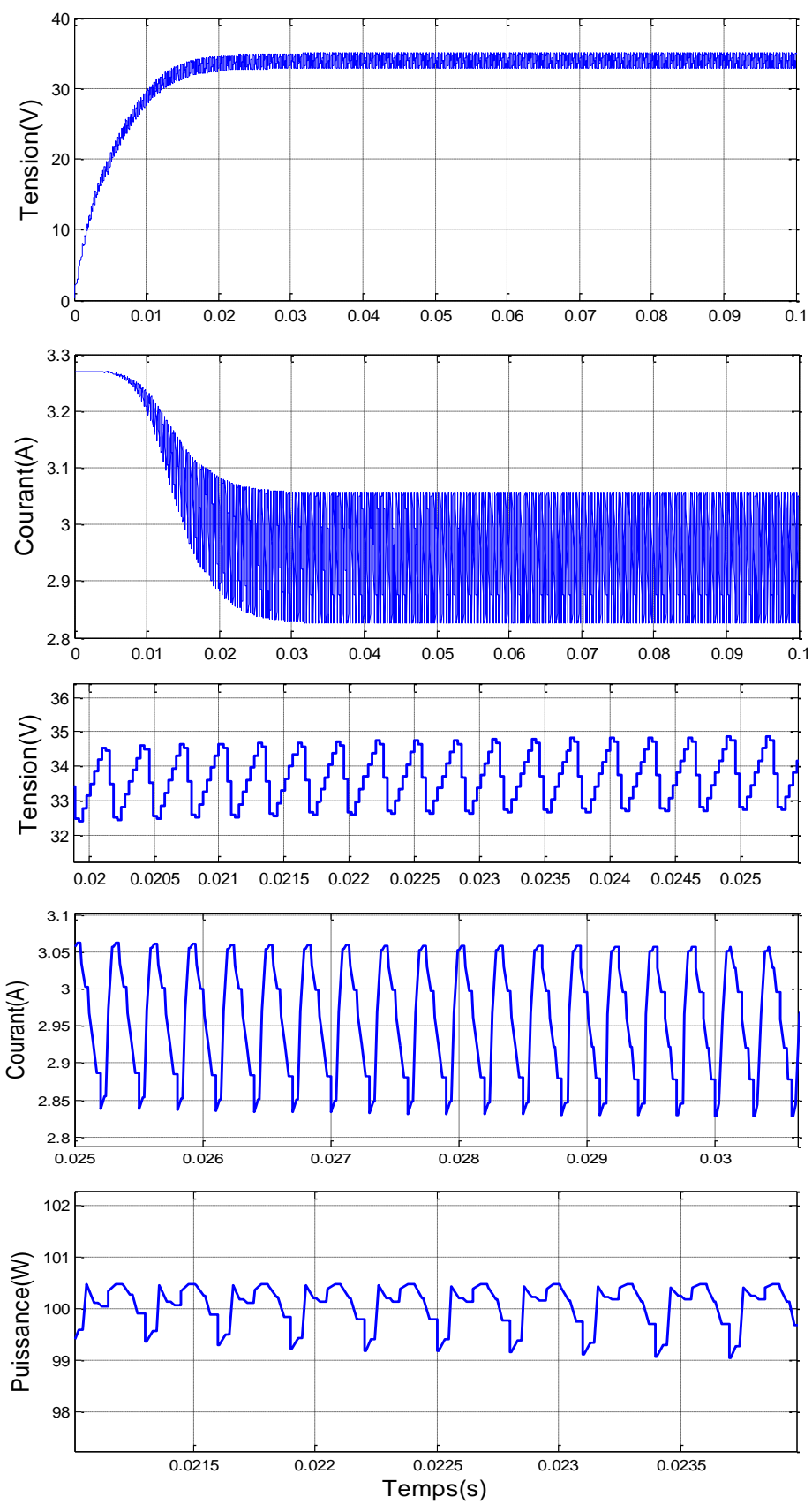


Figure 4.4 : Tension et courant du GPV et ondulations du courant, tension et puissance

b) Diminution rapide de l'ensoleillement (1000 à 400W/m^2)

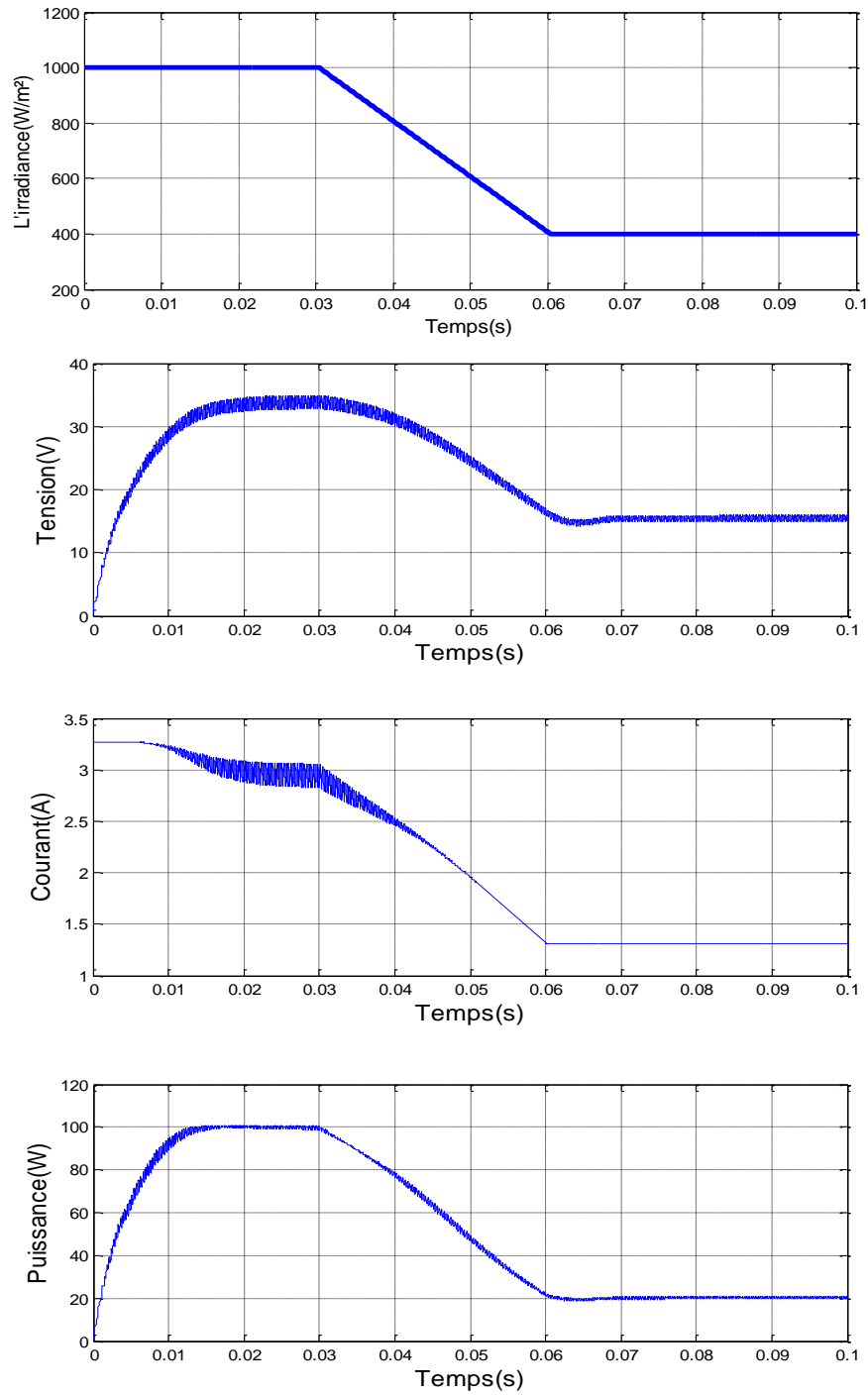


Figure 4.5: Variation de la tension, courant et la puissance pour une diminution rapide de l'ensoleillement de 1000W/m^2 à 400W/m^2 avec $T=25^\circ\text{C}$

Les résultats obtenus lors de ce test montrent que le contrôleur MPPT P&O suit la consigne (variation de l'ensoleillement) avec de faibles fluctuations. Pour une température fixe et une diminution rapide linéaire de l'ensoleillement de 1000 à 400W/m^2 sur une période de 0.1 seconde. La diminution de l'ensoleillement implique une diminution de la puissance.

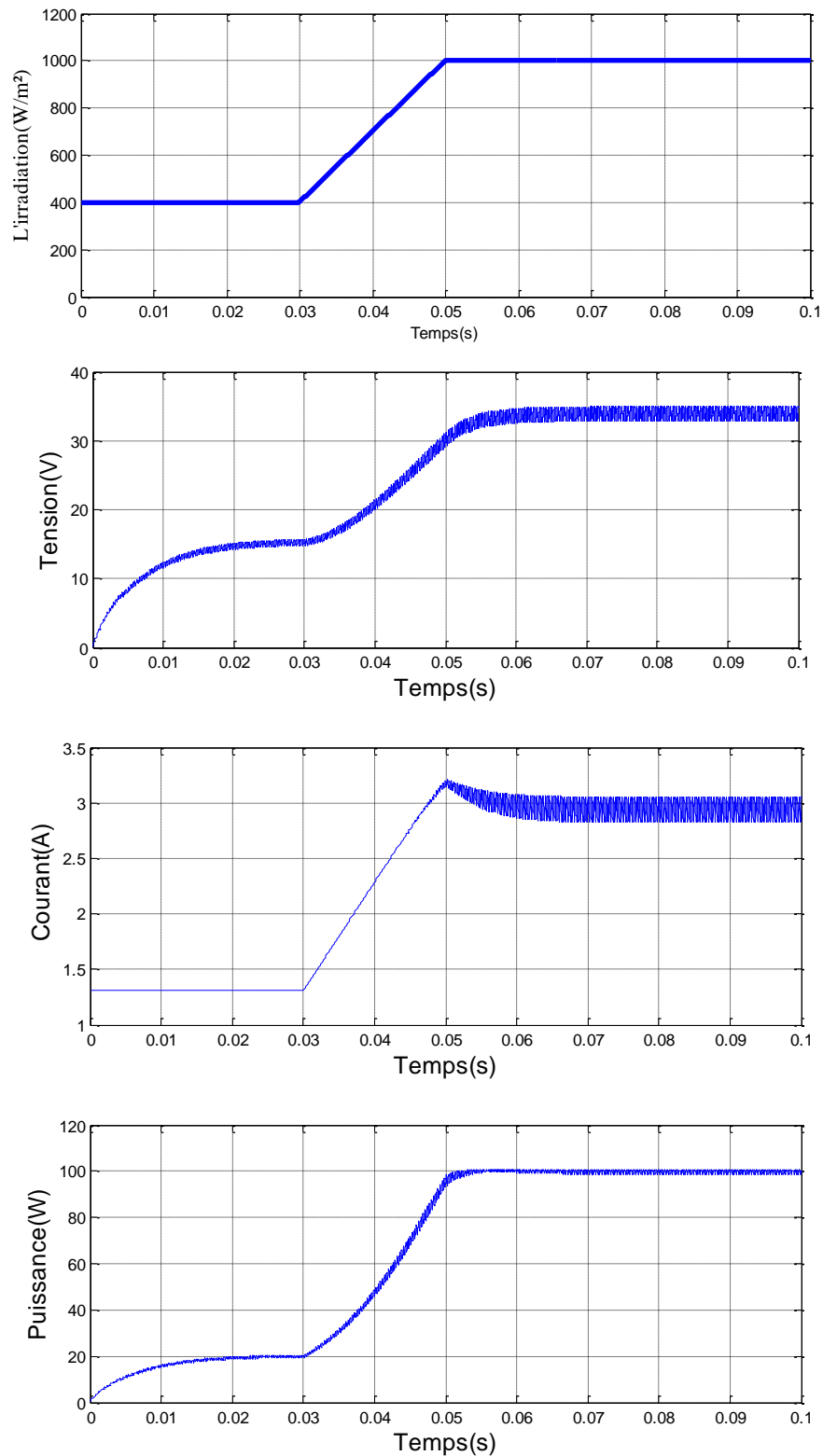
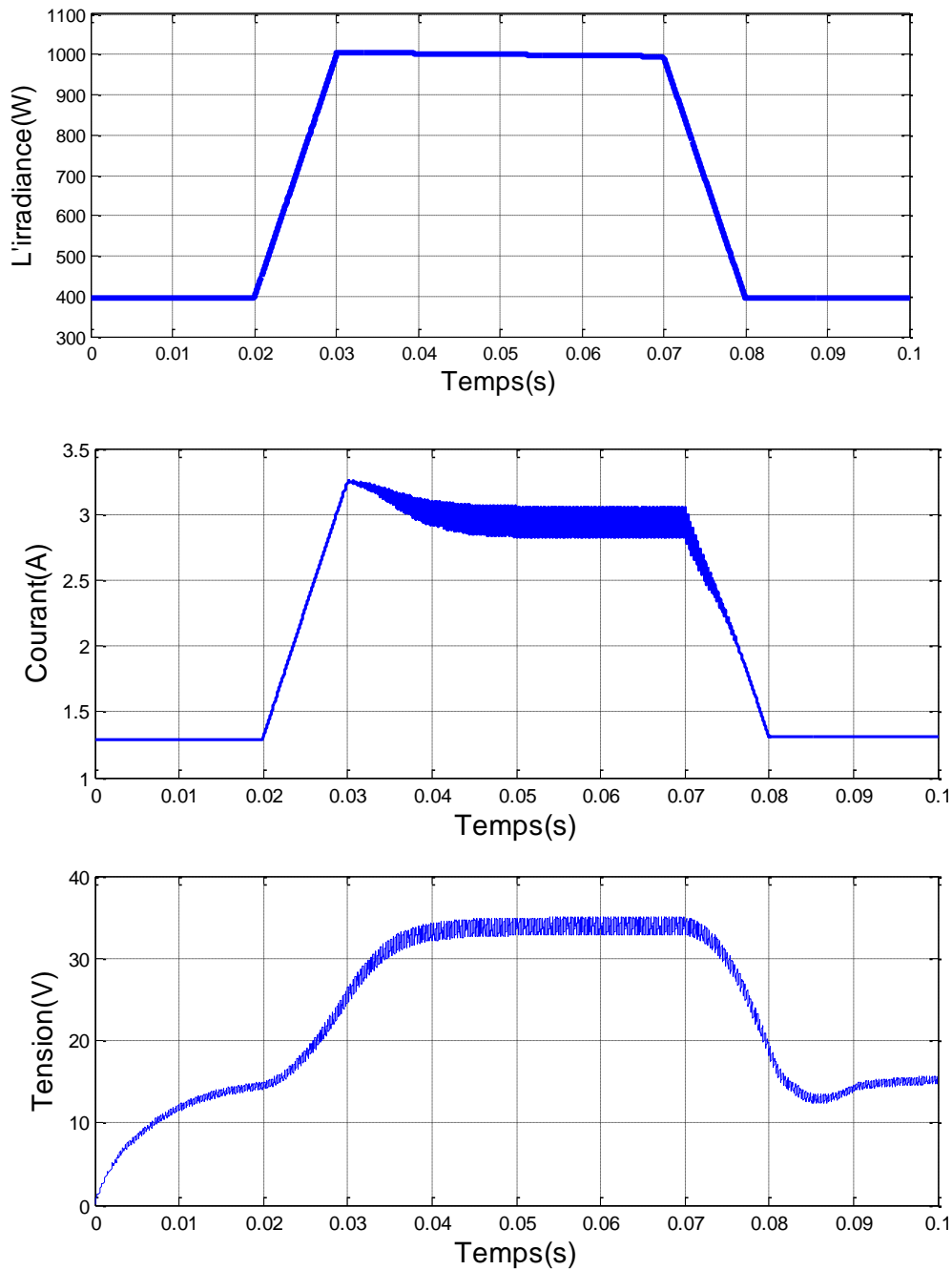
c) Augmentation rapide de l'ensoleillement (400 à 1000W/m²)

Figure 4.6 : variation de la tension, courant et la puissance pour une augmentation rapide de l'ensoleillement de 400W/m² à 1000W/m² avec T=25°C.

Les résultats obtenus lors de ce test montrent que le contrôleur MPPT P&O suit la consigne (variation de l'ensoleillement) avec de faibles fluctuations. Pour une température fixe et une augmentation rapide linéaire de l'ensoleillement de 400 à 1000W/m² sur une période de 0.1 seconde. L'augmentation de l'ensoleillement implique une L'augmentation de la puissance.

c) Changements aléatoires de l'ensoleillement.



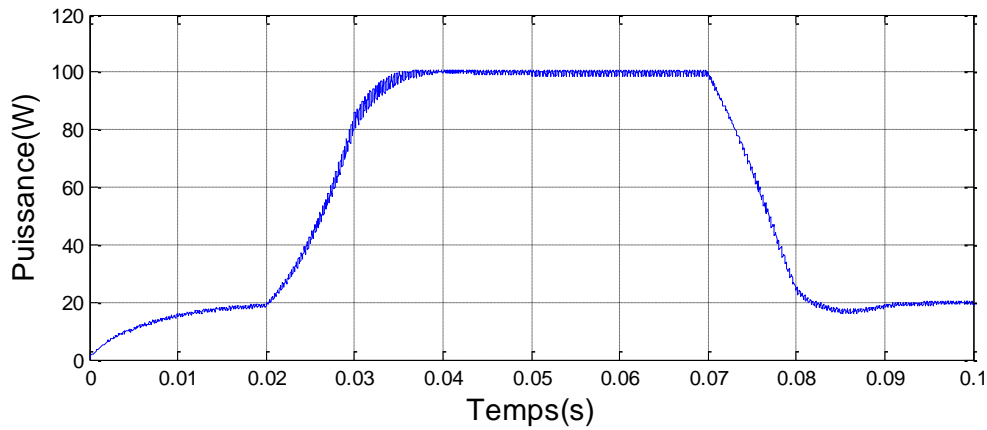


Figure 4.7 : Variation de la tension, courant et la puissance pour un changement aléatoire de l'ensoleillement avec $T=25^{\circ}\text{C}$.

La figure 4.7 est un test où on soumet le système contrôlé sous différentes conditions de l'ensoleillement changements aléatoires. La marge ou l'ensoleillement varie entre 200W/m^2 à 1000W/m^2 . Le résultat obtenu par cette expérience nous montre la bonne poursuite de Contrôleur MPPT P&O.

IV.4 La commande MPPT flou

Dans un but de poursuivre le point maximum de puissance, comme pour toutes les méthodes de poursuite *MPPT*, le Contrôleur *MPPT* à base de logique floue fonctionne aussi suivant le même principe. Un convertisseur *DC/DC* (continu-continu) est généralement utilisé entre le générateur photovoltaïque et la charge (Figure 4.8) [23].

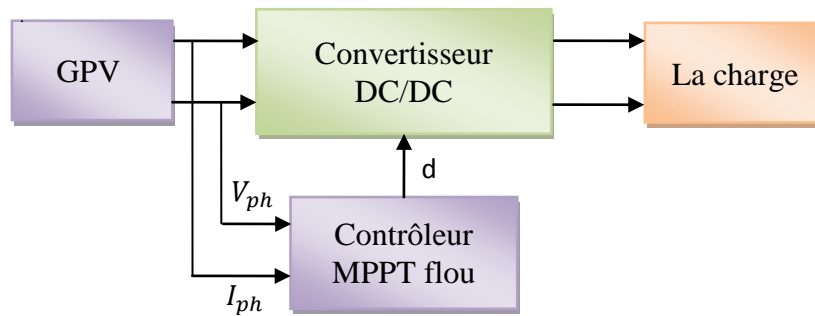


Figure 4.8 : Schéma synoptique d'un système PV avec une commande MPPT flou.

Comme tous contrôleurs flous, le contrôleur MPPT flou comporte les trois blocs suivants : **Fuzzification** des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions triangulaire, ensuite **l'inférence** où ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée. Et enfin la **défuzzification** pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs en utilisant la défuzzification par le centre de gravité. La structure de base de notre contrôleur flou est donnée par la figure suivante [24]:

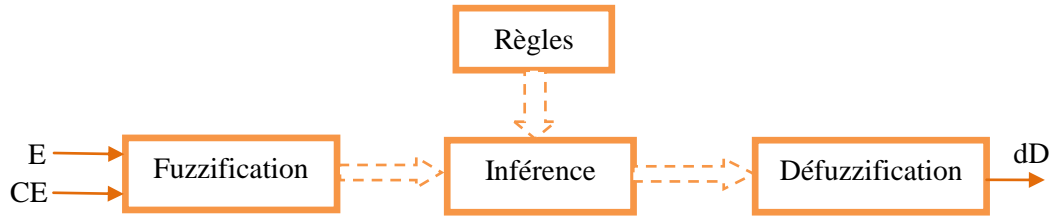


Figure 4.9 : Structure de base du contrôleur flou

dD : La variation du rapport cyclique D ,

E : L'erreur,

CE : La variation de l'erreur.

IV.4.1 Fuzzification

La tension et le courant actuels du générateur photovoltaïque sont mesurés instantanément, et la puissance peut être ainsi calculée :

$$P(k) = i(k).v(k) \quad (4.1)$$

La commande est déterminée sur la *base* de la satisfaction de deux critères concernant deux variables d'entrées de contrôleur proposé, à savoir l'erreur E et le changement d'erreur CE , à un instant d'échantillonnage k . Les variables E et CE sont exprimées comme suit :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (4.2)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (4.3)$$

Où $P(k)$ et $V(k)$ sont la *puissance* et la tension de module *PV*, respectivement.

Dans le cas de notre travail on va choisir l'univers de discours des variables d'entrée (erreur (E) et le changement d'erreur (CE)) et de sortie (dD) d'après la méthode P&O qui a été étudiée précédemment.

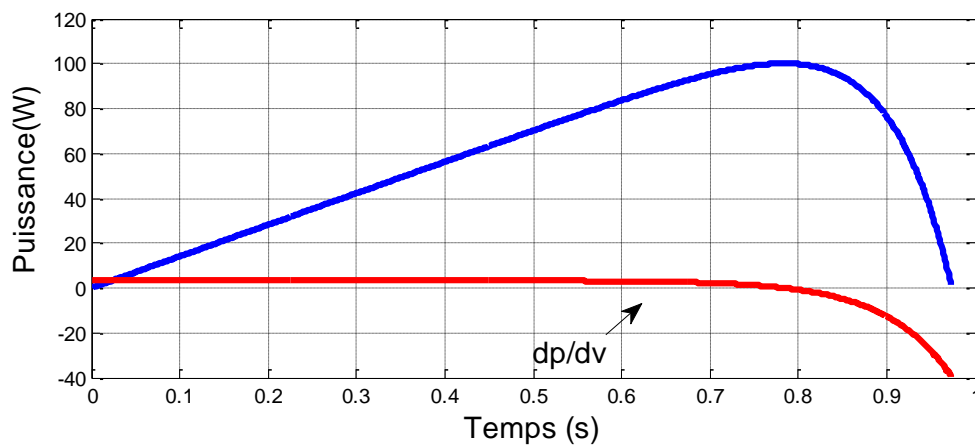


Figure 4.10 : variation de la puissance par rapport à la variation de la tension.

D'après la figure précédente on peut déduire l'univers du discours de chaque variable d'entrée/sortie comme suit :

$$E = \Delta P / \Delta V \in [-40 \ 4]$$

$$CE = E(k) - E(k - 1) \in [-40 \ 4]$$

Ainsi, nous pouvons définir l'intervalle de variation du rapport cycle D comme suit :

$$dD \in [-1 \ 1]$$

La valeur de l'entrée $E(k)$ nous indique de quel coté est situé le point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale MPP. Si cette valeur est positive, cela veut dire que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point MPP, si par contre elle est négative alors le point de fonctionnement est à droite du point MPP.

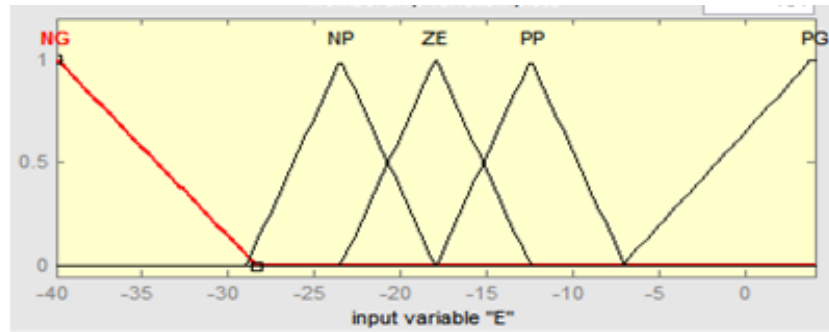
L'entrée $CE(k)$ nous permet d'estimer le degré d'éloignement entre le point de fonctionnement et le point MPP. Si sa valeur est petite, cela veut dire que le point de fonctionnement est encore loin du point MPP, si par contre cette valeur est élevée cela indique que le point de fonctionnement est très proche du point MPP.

Ces deux entrées nous permettent de prendre la décision appropriée sur la valeur de la sortie dD du pas du rapport cyclique. Augmenter le rapport cyclique du convertisseur DC-DC permet d'augmenter la tension du point de fonctionnement et inversement [18].

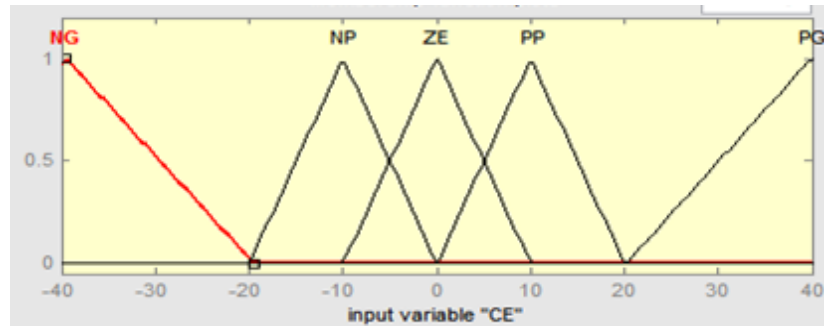
IV.4.2 Les variables linguistiques

En utilisant les bases des sous ensembles flous, on peut exprimer les variables d'entrées et de sorties en terme des variables linguistiques suivantes : PG: (positif grand), PP: (positif petit), ZE: (environ Zéro), NP: (négatif petit) et NG: (négatif grand).

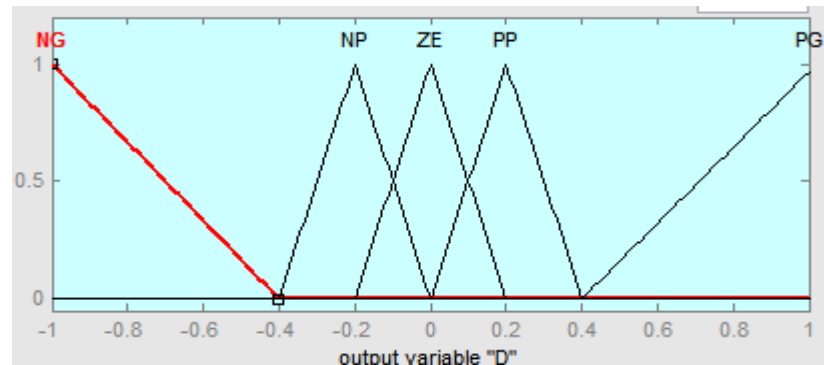
La Figure 3.4 montre les fonctions d'appartenance du cinq sous-ensemble floue de base pour les variables d'entrée et de sortie.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.11 : Fonctions d'appartenances de :

(a) L'entrée erreur E , (b) l'entrée changement d'erreur CE et (c) la sortie dD .

IV.4.3 Méthodes d'inférence (les règles floues)

La figure 4.12 montre l'évolution de la variation de la puissance par rapport à la variation de la tension dp/dv les points de 1 à 10 montre le sens de variation et l'éloignement de la valeur courant par rapport au point maximum de puissance.

Le tableau 4.1 représentent la méthode que nous avons suivie pour extraire les règles floues à partir de la compréhension du système en fonctionnement avec la méthode P&O.

Ceci implique que : "si le point de fonctionnement est éloigné du point de puissance maximale *MPP* au côté gauche et le changement de la pente dans la courbe *P-I* est environ zéro, alors lever le rapport cyclique.

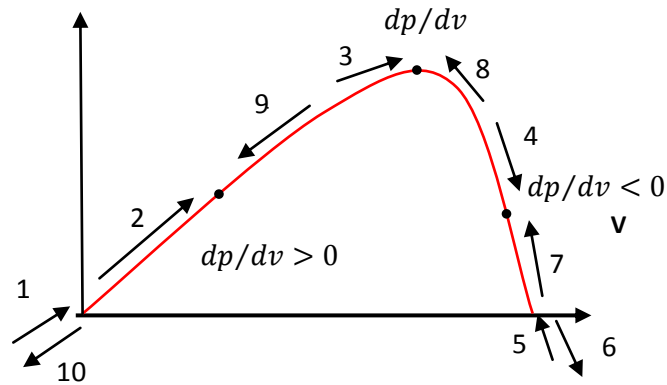


Figure 4.12 : La variation du point de puissance maximal

Tableau 4.1 : Table des signaux pour déterminer la position de PPM

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔP	+	+	0	-	-	+	+	0	-	-
ΔV	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
$E = \Delta P / \Delta V$	+	+	0	-	-	-	-	0	+	+
ΔE	+	+	0	-	-	-	-	0	+	+
D	PG	PP	ZE	NP	NG	PG	PP	ZE	NP	NG

Le tableau 4.2 montre les règles du contrôleur flou, où toutes les entrées de la matrice sont les fonctions d'appartenance floues de l'erreur *E* et celle du changement de l'erreur *CE* et la variation du rapport cyclique *D*. Dans le cas de la commande flou, la règle de commande doit être conçue pour que la variable d'entrée *E* doive toujours être zéro.

Tableau 4.2 : Table des règles floues

CE E	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	NG	NG	NP	NP	ZE
NP	NP	NG	NP	NP	NG
ZE	NP	NP	ZE	PP	PP
PP	PP	PP	ZE	ZE	PG
PG	PG	PP	PP	PG	PG

Le Tableau 4.2 inclut 25 règles floues de commande. Ces règles sont employées pour la commande de convertisseur *Boost* tels que la puissance maximum du panneau solaire est vérifiée. Par exemple la case (5, 3) du *Tableau 4.1* représente la règle de commande :

Si E est PG et CE est ZE alors dD est PP.

Pour la commande par logique floue. On utilise en générale une des méthodes suivantes.

- Méthode d'inférence MAX-MIN.
- Méthode d'inférence MAX-PROD.
- Méthode d'inférence SOMME-PROD.

Comme la méthode d'inférence floue de Mamdani est employée avec la loi de combinaison d'opération floue MAX -MIN. Dans notre cas, les opérateurs logiques sont interprétés comme suit :

Tableau 4.3 : Interprétation des opérations logiques

Opération	Interprétation
ET	Minimum
OU	Maximum

IV.4.4 Défuzzification

Les sorties floues des règles floues précédentes sont combinées en utilisant la fonction MAX pour former un seul ensemble flou, cet ensemble est défuzzifié pour générer une seule valeur de commande, il existe plusieurs méthodes de défuzzification, nous avons choisi celle du centre de gravité qui donne de meilleur performance.

$$dD = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) \cdot D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \quad (4.4)$$

IV.4.5 Résultats de simulation de la méthode MPPT flou

Nous allons utiliser le même modèle Simulink que celui utilisé avec la MPPT P&O, nous avons réalisé quelque modification pour le calcul de E et CE , ainsi que l'adaptation de la sortie du contrôleur qui est la variation du rapport cyclique.

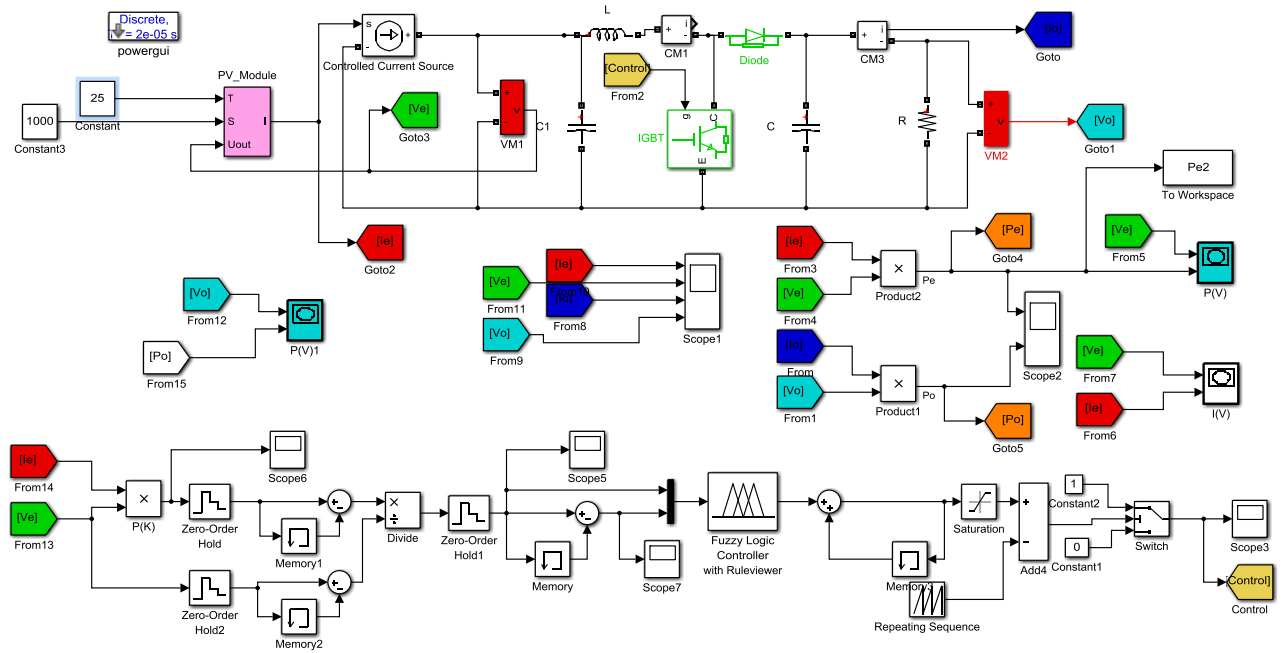


Figure 4.13 : Modèle Simulink global de système avec contrôleur MPPT flou.

Après avoir dimensionné tous les éléments du contrôleur flou nous allons l'intégrer dans notre système grâce à la toolbox Fuzzy de Simulink (figure 4.14).

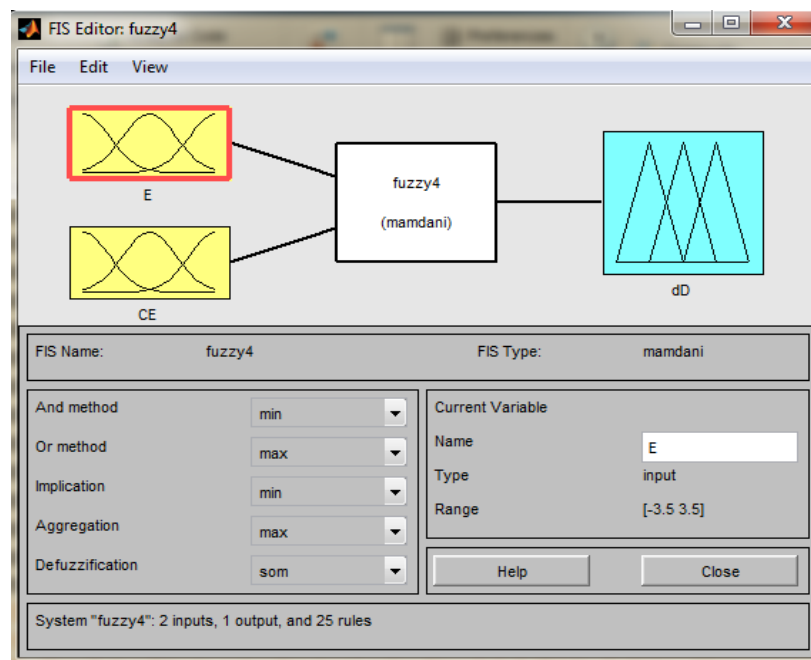


Figure 4.14 Schéma générale du contrôleur MPPT flou.

IV.4.5.1 Résultats de simulation du contrôleur MPPT flou

La méthode MPPT flou, est une technique intelligente très utilisée pour contrôler le point de puissance maximale d'un système PV. La figure 4.15 représente la Simulation de Poursuite du point de puissance maximale.

Pour faire une étude de la robustesse de contrôleur MPPT flou des différents changements de l'éclairement on effectue les mêmes tests utilisés dans la méthode P&O.

a) Dans les conditions standards ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

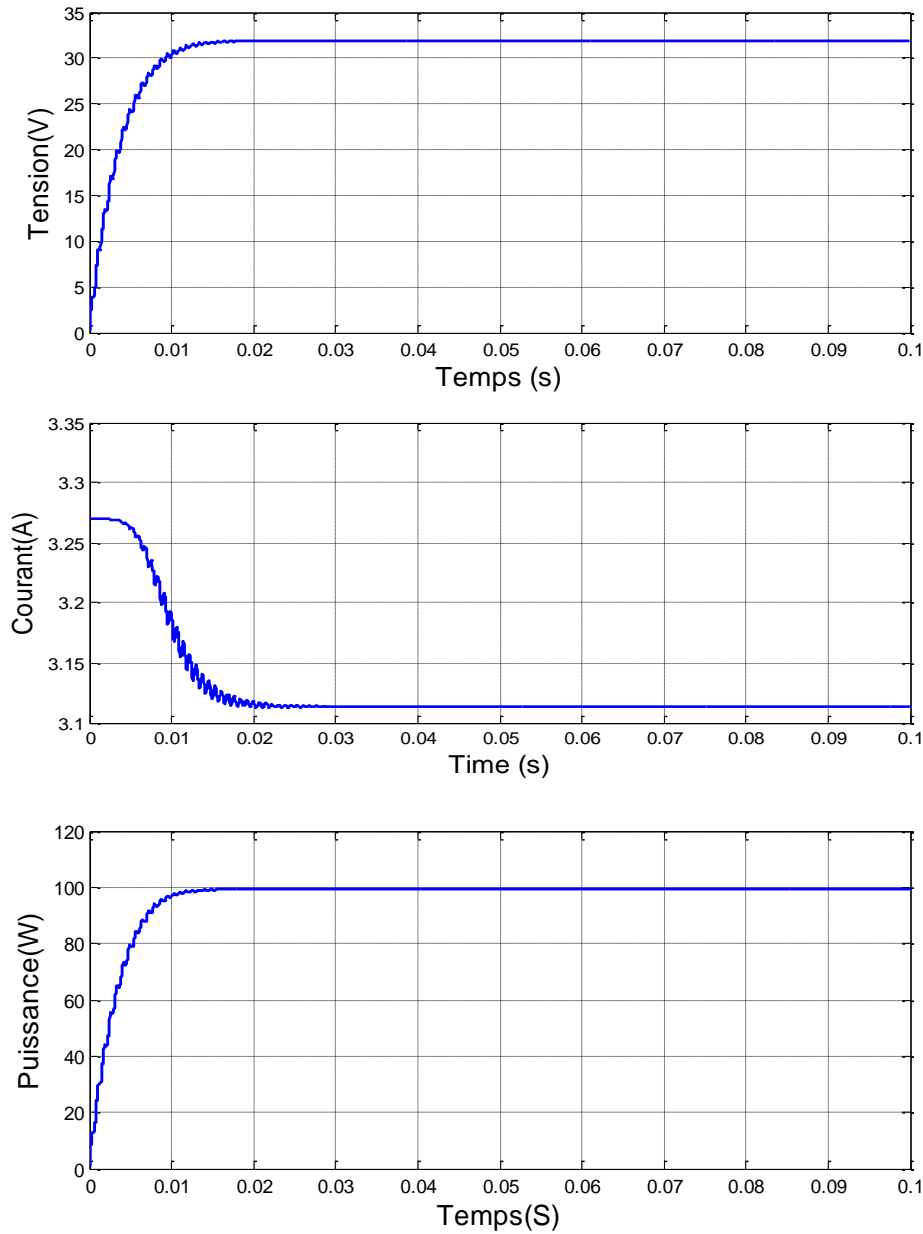


Figure 4.15 : Forme des signaux de tension, du courant et de la puissance du module PV, réalisé par le contrôleur MPPT flou à $T = 25^\circ\text{C}$ et $G = 1000\text{W/m}^2$.

La figure (4.15) montre la réponse de contrôleur MPPT flou avec conditions environnementales standards. Cette figure nous montre la rapidité de contrôleur MPPT flou qui donné de très bonne améliorations en ce qui concerne les ondulations en régime permanent, elles ont presque été éliminées.

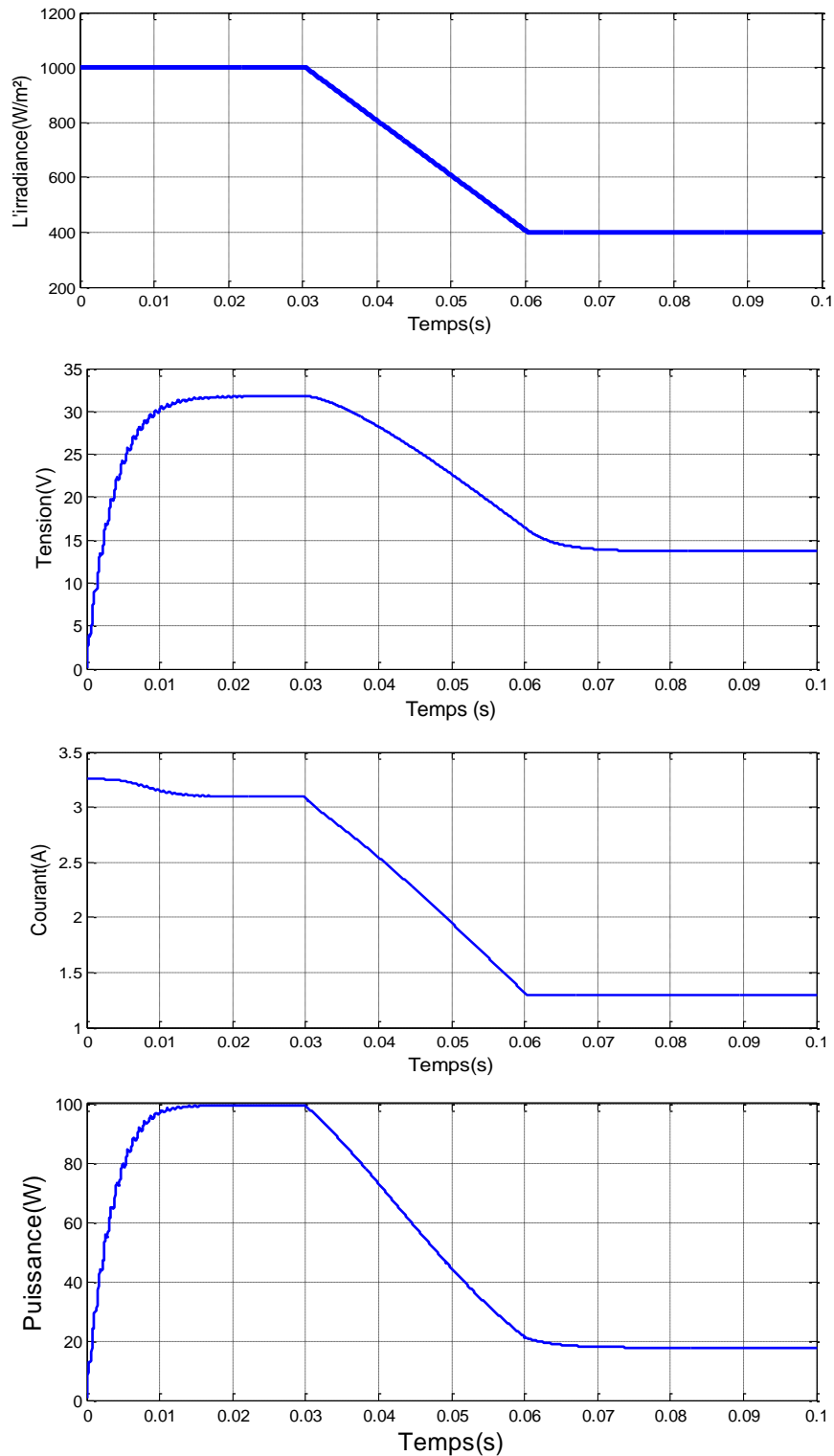
b) Diminution rapide de l'ensoleillement

Figure 4.16 : Variation de la tension, courant et la puissance pour une diminution rapide de l'ensoleillement de 1000W/m² à 400W/m² avec T=25°C

Les résultats obtenus lors de ce test montrent que le contrôleur MPPT floue suit la consigne (variation de l'ensoleillement) sans fluctuations. Pour une température fixe et une

diminution rapide linéaire de l'ensoleillement de 1000 à 400W/m^2 sur une période de 0.1 seconde. La diminution de l'ensoleillement implique une diminution de la puissance.

c) Augmentation rapide de l'ensoleillement

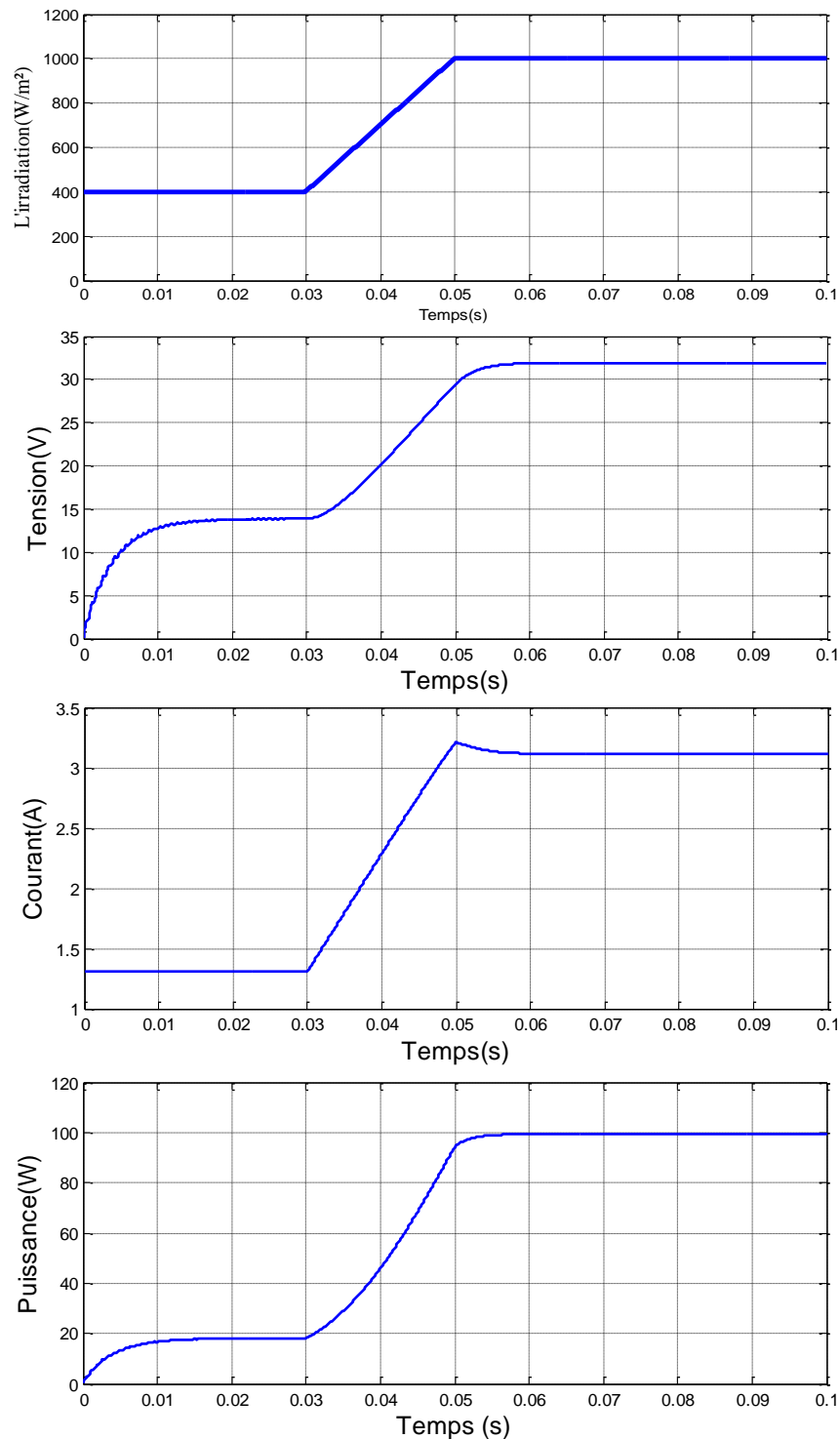


Figure 4.17 : Variation de la tension, courant et la puissance pour une augmentation rapide de l'ensoleillement de 400W/m^2 à 1000W/m^2 avec $T=25^\circ\text{C}$.

Les résultats obtenus lors de ce test montrent que le contrôleur MPPT P&O suit la consigne (variation de l'ensoleillement) sans fluctuations. Pour une température fixe et une augmentation rapide linéaire de l'ensoleillement de 400 à 1000W/m² sur une période de 0.1 seconde. L'augmentation de l'ensoleillement implique une L'augmentation de la puissance.

d) Changements aléatoires de l'ensoleillement.

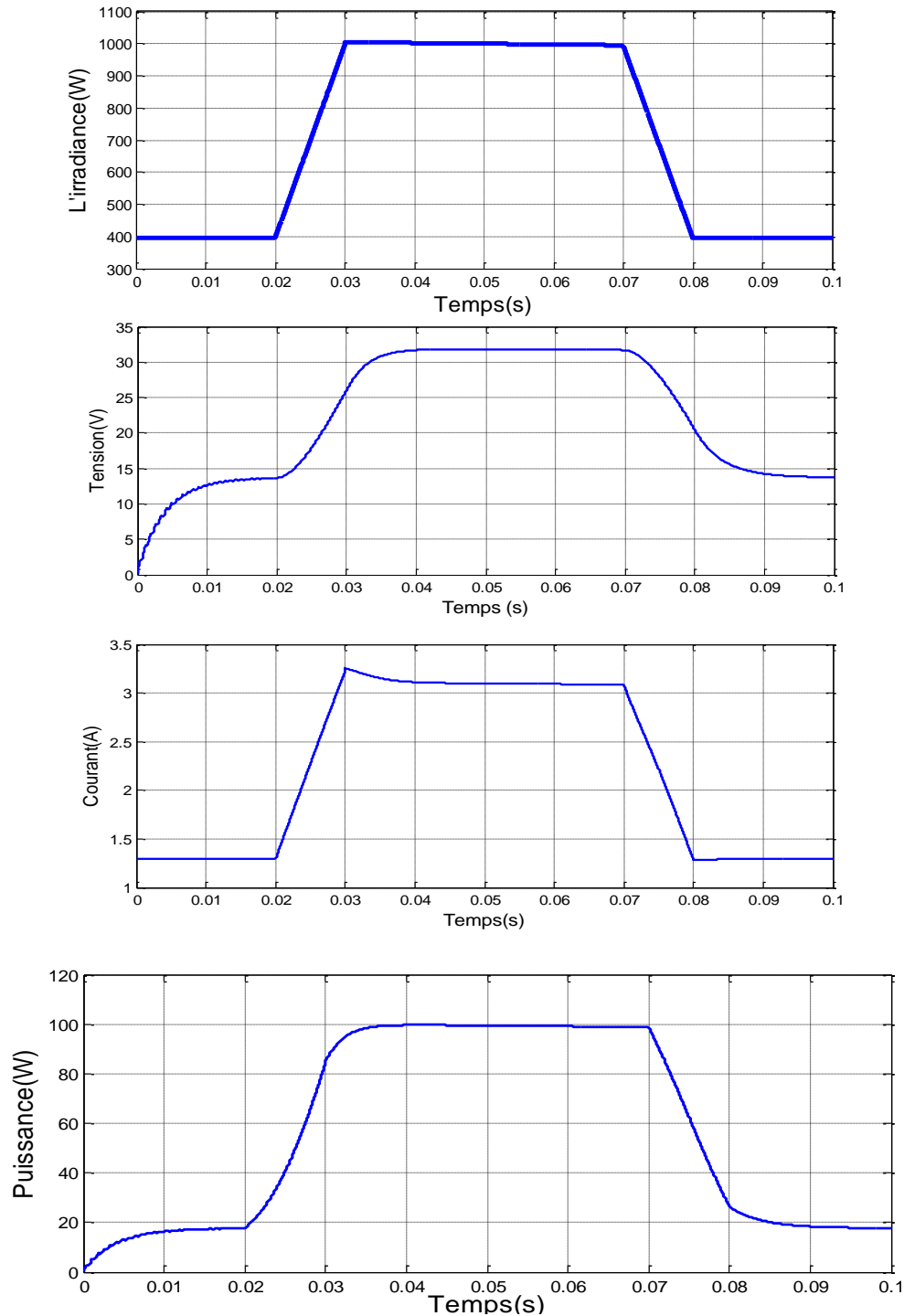


Figure 4.18 : Variation de la tension, courant et la puissance pour un changement aléatoire de l'ensoleillement avec T=25°C.

La figure 4.18 est un test ou on soumet le système contrôlé sous différentes conditions de l'ensoleillement changements aléatoires .La marge ou l'ensoleillement varie est entre 200W/m^2 à 1000 W/m^2 La résultat obtenus par cette expérience nous montre la bonne poursuite de Contrôleur MPPT flou.

IV.4.6 Règles et surface de contrôle

Lors des simulations effectuées, nous pourrions visualiser au cours des simulations les règles actives à chaque instant, et nous pouvons aussi voir la surface de contrôle qui permet d'avoir une idée sur toutes les sorties possible en fonction de toute les entrées possible.

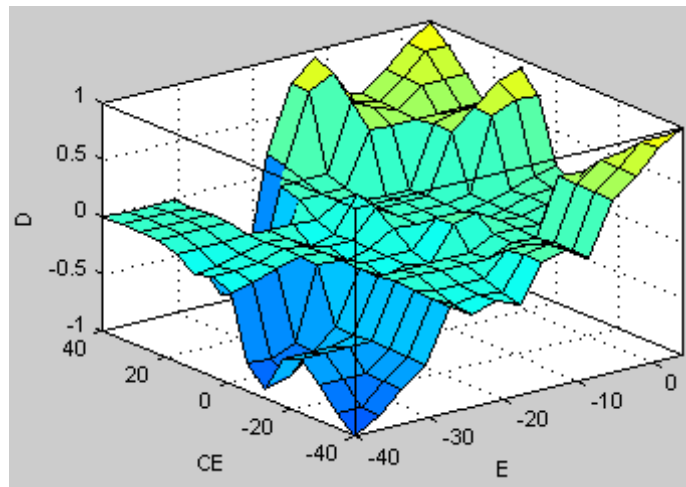


Figure 4.19 : Surface de control

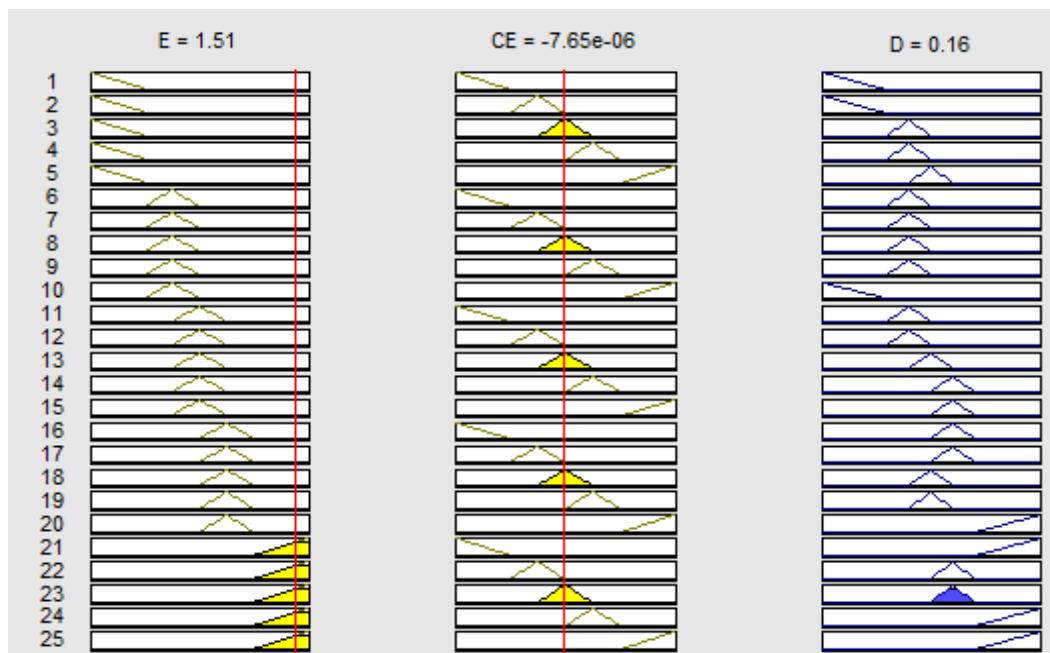


Figure 4.20 : Les règles actives à chaque pas de simulation

IV.4 Etude comparative entre MPPT P&O et MPPT flou

IV.4.1 Test de performances

a) Dans les conditions standards ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

Pour faire une étude des performances des deux systèmes contrôlés MPPT P&O et MPPT Flou, et voir la différence entre eux on a effectué un test où les deux systèmes subissent les mêmes conditions environnementales standards, c'est-à-dire un éclairement solaire constant qui est égal à 1000 W/m^2 et une température égale à 25°C .

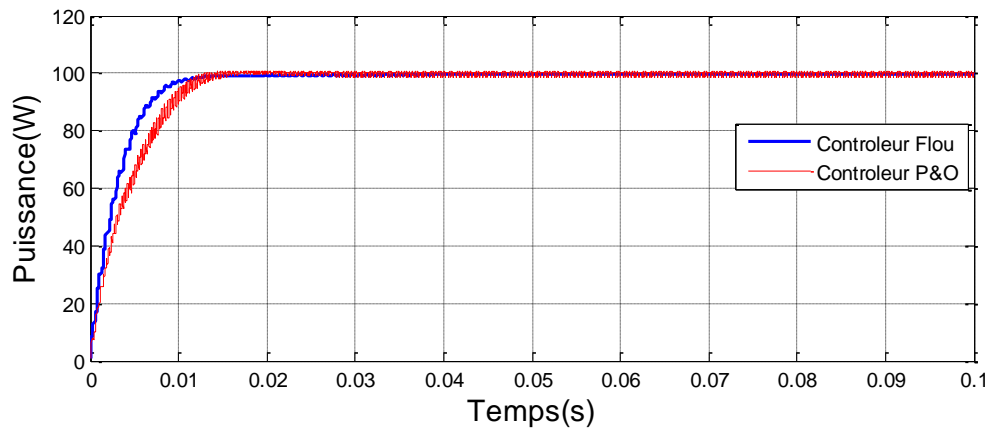


Figure 4.21 : Courbe de variation de tension de panneau avec les contrôleurs Flou et P and O ($T=25^\circ\text{C}$, $G=1000\text{w/m}^2$)

Nous remarquons que pour le contrôleur P&O l'état transitoire dure plus longtemps que l'état transitoire du contrôleur flou ; c'est à dire un temps de réponse de contrôleur flou est rapide par rapport le contrôleur P and O. Ce qui montre que le contrôleur flou est plus rapide que l'algorithme P&O.

Au régime permanent, la puissance avec contrôleur flou se stabilise à environ 100W, cette valeur représente le MPP du module PV de 72 cellules montées en série pour les conditions normales d'insolation et de température, cela veut dire que le mécanisme a vraiment suivi le point de puissance maximale. Tandis que la puissance du contrôleur P and O, présente des oscillations au-dessous de ce point ce qui implique que la puissance maximale n'est jamais atteinte. Cela est dû à l'approximation de la dérivée continue par une différence discrète, ce qui conduit à l'impossibilité d'annuler la dérivée.

b) Diminution rapide de l'ensoleillement

Une diminution rapide de 1000W/m^2 à 400W/m^2 de l'ensoleillement avec une température constante de 25°C . Cette diminution d'ensoleillement cause bien sûre une diminution de la puissance pour les deux systèmes.

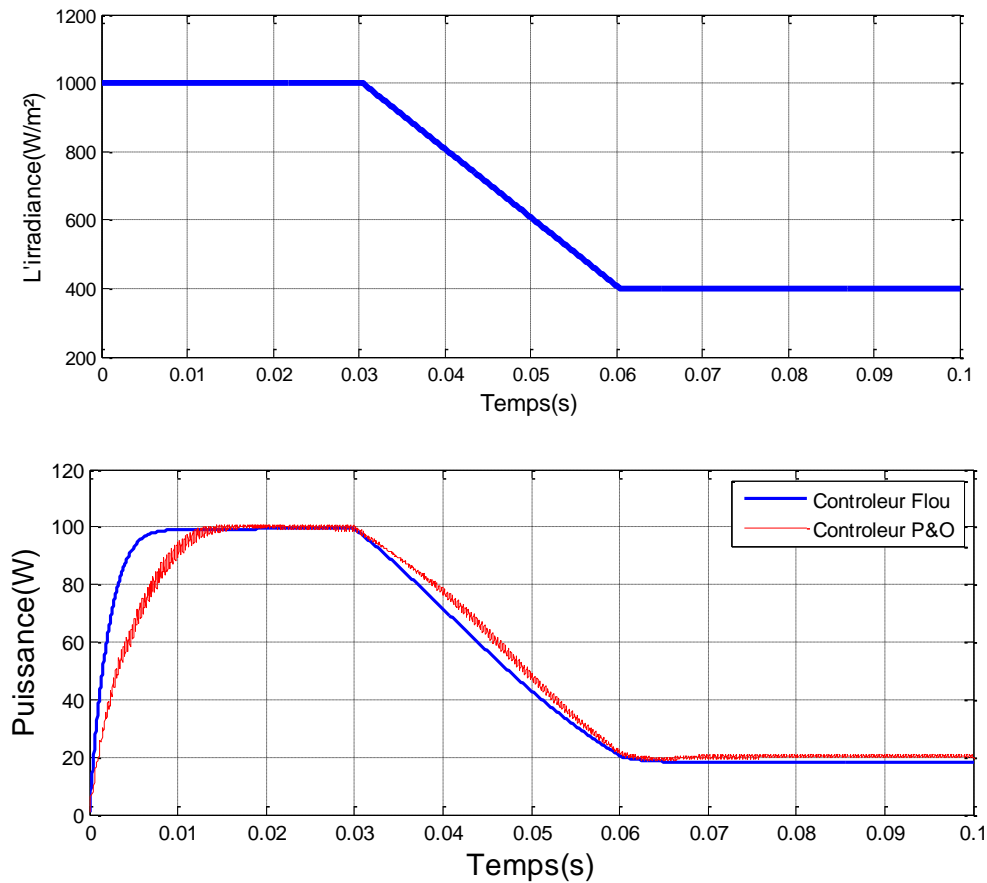


Figure 4.22 : Réponse des deux contrôleurs MPPT Flou et P and O pour une diminution rapide de l'ensoleillement de 1000W/m² à 400W/m² (T=25°C).

C'est le résultat des règles floues lorsqu'une grande pente est détectée, mais cela conduit à l'augmentation de la vitesse de réponse du système.

c) Augmentation rapide de l'ensoleillement

Pour le premier test on augmente l'ensoleillement de 400 à 1000 W/m² dans un temps très court. La température est maintenue constante à 25°C. Dans ces conditions, pour le contrôleur MPPT P and O on remarque l'effet de l'augmentation rapide de la puissance causée par une augmentation de l'ensoleillement. Dans ce cas cette technique continue à perturber le système dans la même direction alors qu'il est dans le mauvais sens, ce qui engendre une déviation du point de fonctionnement du vrai MPP. Cette déviation une fois l'ensoleillement stabilisé prend quelque temps pour être récupéré, et cause un retard de quelque sec, ce qui implique une chute d'efficacité du système.

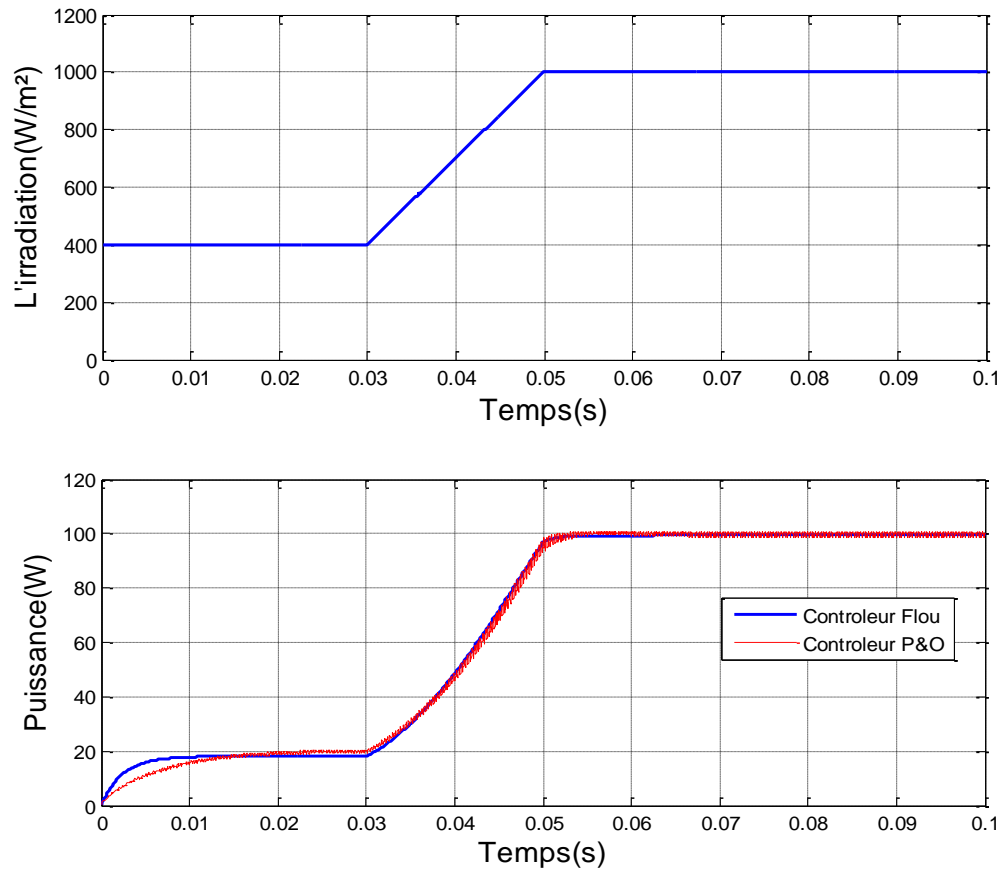


Figure 4.23 : Réponse des deux contrôleurs MPPT Flou et P and O pour une augmentation rapide d'ensoleillement de 400W/m² à 1000 W/m² température constante de 25°C.

C'est le résultat des règles floues lorsqu'une grande pente est détectée, mais cela conduit à l'augmentation de la vitesse de réponse du système.

d) Changements aléatoires de l'ensoleillement.

Dans la simulation suivante les deux techniques de poursuite du PPM sont soumises à de condition d'ensoleillement bien réelles. Dans un tel environnement, des variations rapides et indépendantes d'ensoleillement est rarement produites.

Le but de cette simulation est de faire un test global des deux contrôleurs MPPT sur une période de test relativement longue qui vise à résumer toutes les simulations précédentes.

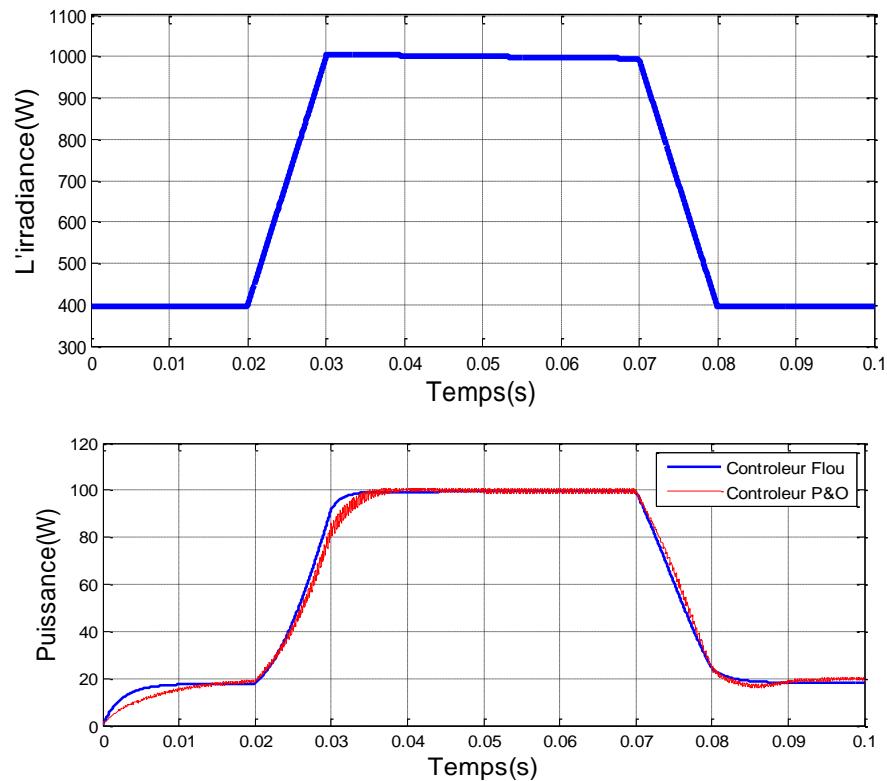


Figure 4.24 : Réponse des deux contrôleurs MPPT Flou et P and O pour un changement aléatoire de l'ensoleillement.

La figure (4.24) facilite la comparaison entre différents signaux de puissance de chaque méthode. Ces signaux révèlent bien l'avantage de la méthode « floue » par rapport à la méthode P&O vis-à-vis d'une augmentation rapide d'ensoleillement.

Autre remarque, pour la méthode P and O, on observe une chute de la puissance par rapport à l'autre méthode floue pour des ensoleillements importants.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les deux Commande pour suivi le point de puissance maximal on parle sur la méthode classique P&O et la méthode intelligent le contrôleur MPPT flou ont été implémentés en forme de blocs dans Simulink ensuite simulés.

Différents résultats de sortie du générateur photovoltaïque, pour différentes valeurs d'éclairement, ont été obtenus en simulant le système PV avec les contrôleurs MPPT flou et avec l'algorithme MPPT P&O.

Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur P&O mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances avec un temps de réponse rapide et une erreur en état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.