

IV.1 Introduction

Un contrôleur flou peut être vu comme un système expert basé sur la connaissance de l'opérateur. De ce fait, nous allons évaluer le système étudié et d'en tirer les inférences qui nous aiderons à implanter le contrôleur flou visé.

Dans ce chapitre nous allons évaluer les deux méthodes de poursuite MPPT que nous avons introduit ; notre propre méthode de poursuite utilisant un contrôleur flou et la méthode classique P&O. mais avant ceci, nous allons évaluer lequel des deux hacheurs dimensionnés au dernier chapitre sera utilisé. Des simulations et des vérifications seront faite sous différentes conditions météorologiques, est sous différentes charges.

Objectif

Avant d'aller plus loin dans ce chapitre, dans cette section nous allons fixer notre objectif est identifié notre démarche.

- Notre premier objectif, est la conception un dispositif MPPT pour générateur photovoltaïque basé sur un contrôleur flou.
- Le second point, est de choisir quel est le convertisseur de puissance le plus adéquat pour l'implémentation de notre système.
- Le dernier point, est de rechercher la meilleure configuration pour la conception du contrôleur flou.

IV.2 Description du système photovoltaïque global

Le système que nous avons choisi de concevoir doit être est un système de moyenne puissance (100 Watt). Il doit comporter un hacheur avec une charge résistive, et la commande MPPT sera basée sur un contrôleur flou.

Le générateur PV constitue l'élément fondamental de notre système, Les caractéristiques du module photovoltaïque PV-I106/24 sont choisies pour être les paramètres du générateur PV simulé (voir Tableau I.1). Le dispositif MPPT est basé sur l'utilisation d'un hacheur, nous avons choisi un hacheur Buck et hacheur Ćuk que nous allons détailler ci-dessous.

IV.2.1 Description du système photovoltaïque global avec convertisseur Buck

Généralement le système global photovoltaïque sous Matlab/Simulink est composé des éléments que nous avant présenté dans le chapitre III. I est composé de générateur PV et le hacheur Buck qu'on a dimensionnés et le bloc qui contient le contrôleur MPPT et qui permet

de maximiser la puissance générée par le GPV comme montré dans la figure suivante :

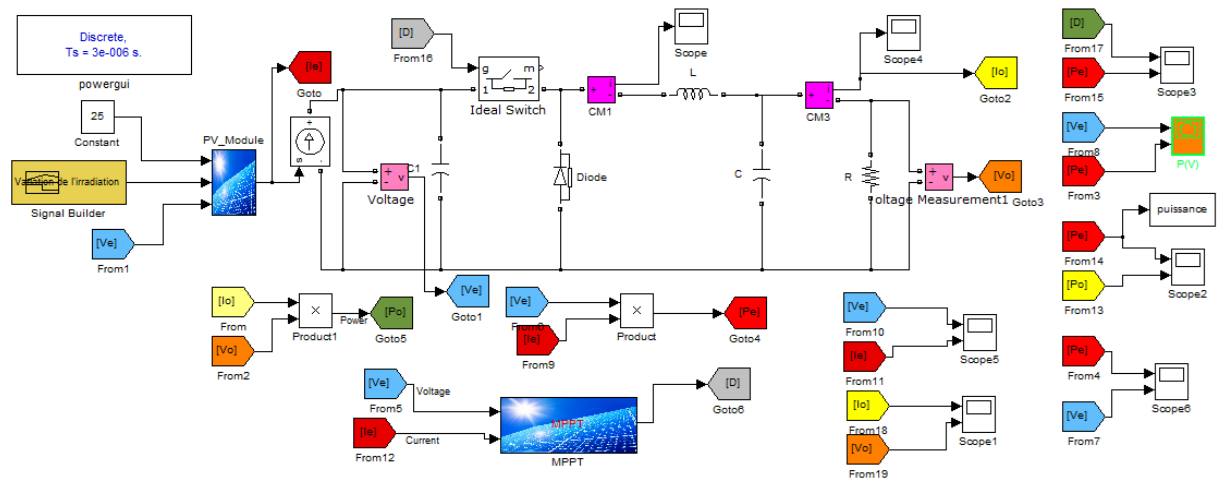


Figure IV.1 : Schéma bloc du système PV avec convertisseur Buck et MPPT.

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.

IV.2.2 Description du système photovoltaïque global avec convertisseur Ćuk

Même composent de système photovoltaïque global avec convertisseur Buck, la déférence sur la convertisseur Plutôt que d'utiliser le Buck on à d'utilisé Ćuk comme montre dans la figure suivante :

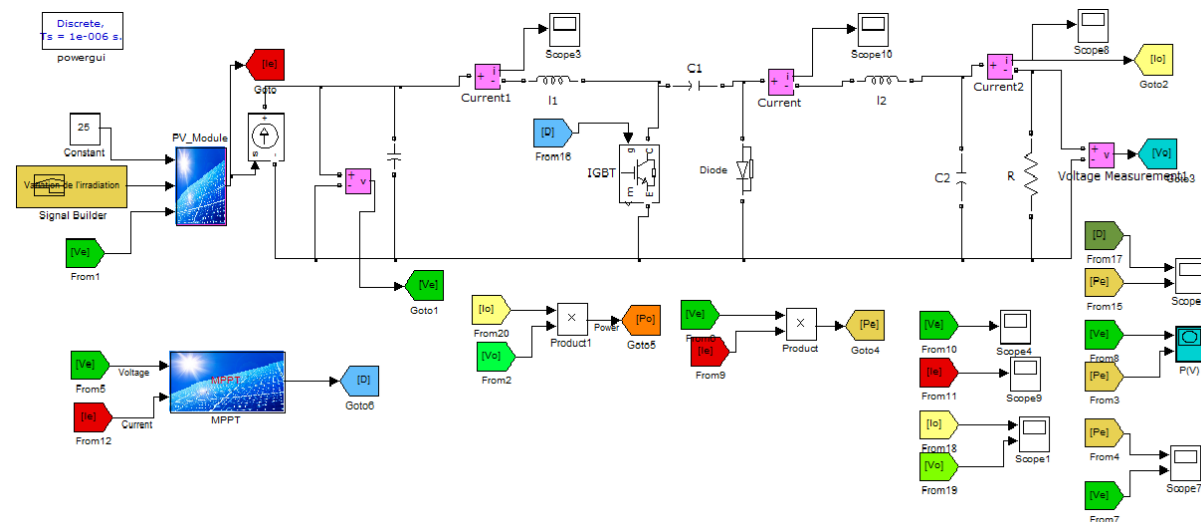


Figure IV.2 : Schéma bloc du système PV avec convertisseur Ćuk et MPPT.

IV.3 Contrôleurs MPPT P&O classique

Cette méthode de contrôle, étudiée dans le chapitre III, est une méthode célèbre déjà traitée par plusieurs chercheurs. Cette méthode peut être modélisée sous Simulink comme illustré sur la figure IV.3 :

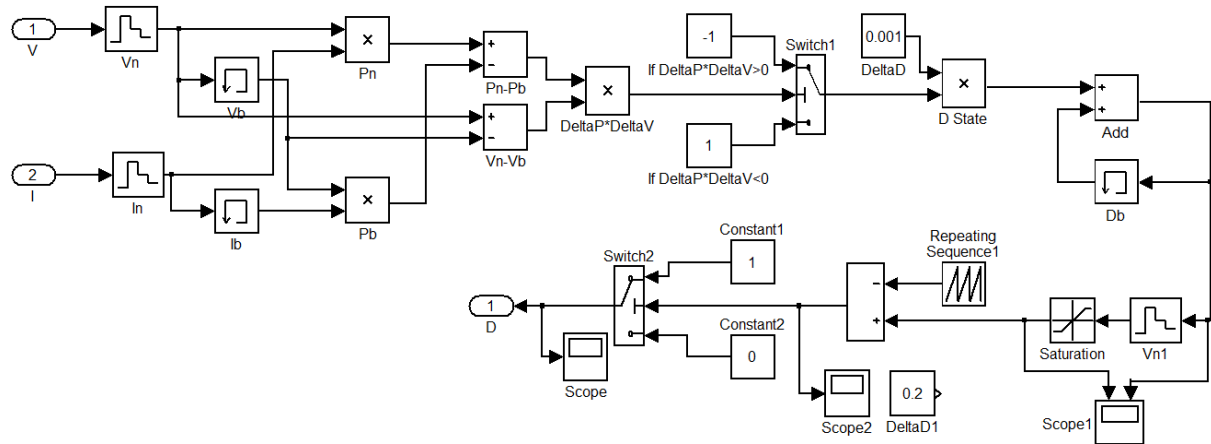


Figure IV.3 : Modèle 'SIMULINK' du contrôleur MPPT P and O avec PWM.

La méthode MPPT P&O, est généralement une technique très utilisée pour contrôler le point de puissance maximale d'un système PV. Dans ce travail nous présentons deux simulations de la poursuite du point de puissance maximale selon le convertisseur de puissance utilisé.

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

Dans ce qui suit nous résumerons plusieurs simulations effectuées sous des différentes conditions environnementales et de charge. Le test le plus important à mettre en avant est le test sous différente valeur de l'irradiation. On soumet le contrôleur MPPT P&O à des changements aléatoires de variable de l'ensoleillement.

La figure IV.4 est un test ou on soumet le système contrôlé sous différentes conditions de l'ensoleillement changements aléatoires. Les valeurs de l'ensoleillement varie est entre 500W/m² à 1000 W/m² à 700 avec une température à 25°C. Les résultats obtenus par cette expérience nous montrent la bonne poursuite de Contrôleur MPPT P&O, mais beaucoup d'ondulation sont présente dans le courant et la tension de sortie du convertisseur de puissance.

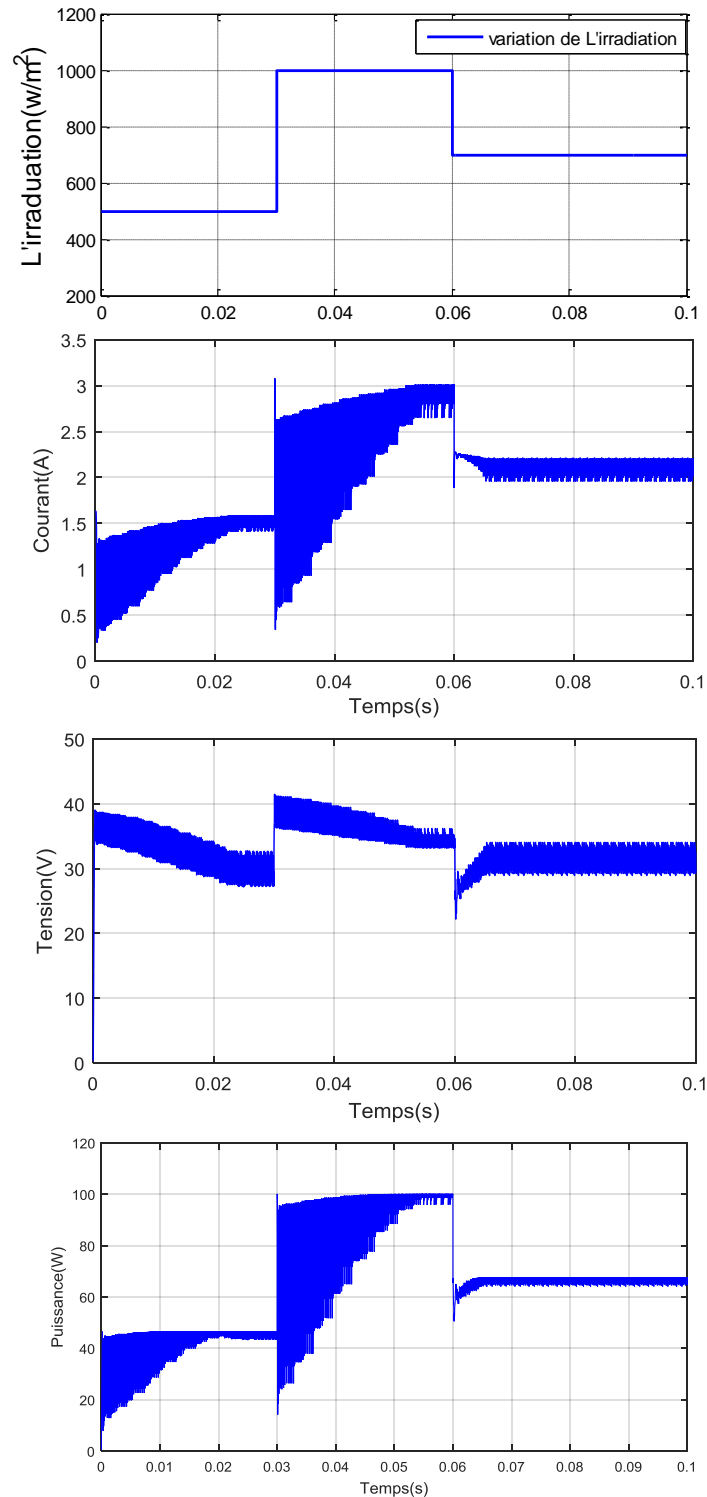


Figure IV.4 : Variation de la tension, courant et la puissance avec convertisseur Buck.

IV.3.2 Résultats de simulation de la méthode P&O avec Ćuk

On fait la même étude de la robustesse de contrôleur MPPT P&O sous les mêmes conditions qu'avec le Buck. Dans la figure suivante nous résumons les simulations et tests effectués.

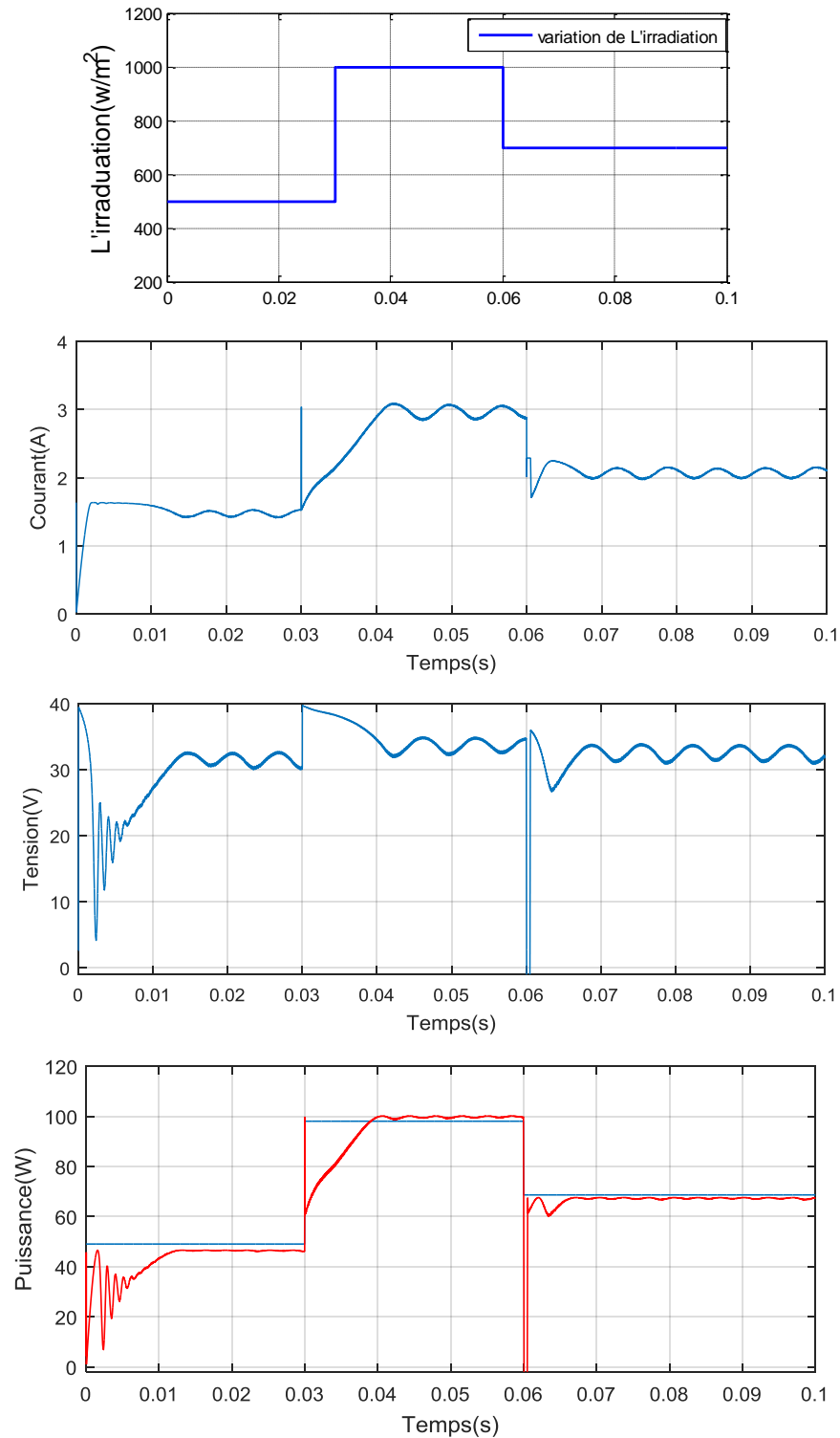


Figure IV.5 : Variation de la tension, courant et la puissance avec convertisseur Ćuk.

Les résultats obtenus lors de ce test montrent que le contrôleur MPPT P&O suit la consigne (variation de l'ensoleillement) avec une température fixe et une changement rapide de l'ensoleillement sur une période de 0.1 seconde.

IV.3.3 Comparaison P&O entre deux convertisseurs Buck et Ćuk

Les figures IV.4 et IV.5 montrent clairement la grande différence entre les résultats de simulation des deux topologies des convertisseurs de puissance DC/DC.

Pour les mêmes contraintes de dimensionnement, et les mêmes configurations du simulateur ainsi que le même algorithme MPPT, nous remarquons la stabilité et la rapidité de la réponse du convertisseur Ćuk, contrairement à celle du convertisseur Buck. Une autre différence est que le convertisseur Ćuk donne des résultats avec moins d'ondulation contrairement au Buck qui est très sensible et difficilement réglable.

Pour ces différentes raisons qu'on a choisi de travailler avec le convertisseur Ćuk.

IV.4 Analyse et choix de la commande MPPT flou

L'un des objectifs de ce travail étant de concevoir un contrôleur flou, qui remplacera l'algorithme MPPT classique, nous allons dans ce qui suit, présenter les différents éléments de ce contrôleur qui permettront de réaliser la poursuite du point maximum de puissance qui est basé sur l'algorithme MPPT P&O.

La mise en œuvre d'un contrôleur flou passe par la mise en œuvre de ces trois composantes qui sont la fuzzification qui permet de passer de variables réelles à des variables floues, le cœur du régulateur représenté par les règles reliant les entrées aux sorties, et enfin l'inférence et la défuzzification qui permettent à partir des ensembles flous d'entrée de déterminer la valeur réelle de sortie. La figure suivante représente le schéma synoptique de base d'un contrôleur flou :

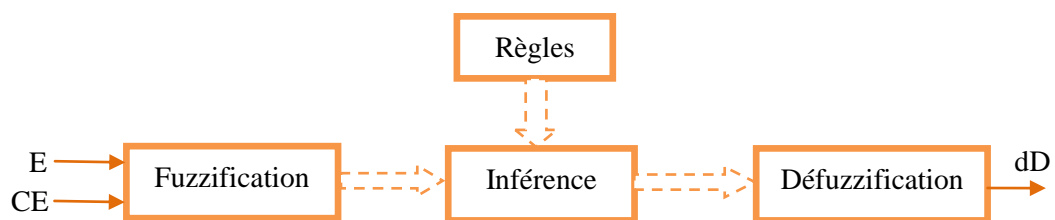


Figure IV.6 : Structure de base du contrôleur flou

dD : La variation du rapport cyclique D ,

E : L'erreur,

CE : La variation de l'erreur.

IV.4.1 Fuzzification

On se basant sur le concept de l'algorithme MPPT P&O, nous allons essayer d'extraire la définition de chaque élément pour reproduire le fonctionnement de la MPPT, mais avec de performances qui seront meilleurs. La tension et le courant actuels du générateur photovoltaïque sont mesurés instantanément, et la puissance peut être ainsi calculée :

$$P(k) = i(k).v(k) \quad (IV.1)$$

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 :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (IV.2)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (IV.3)$$

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 qui sont l'erreur (E) et le changement d'erreur (CE) et de sortie qui le variation du rapport cyclique (dD) d'après la méthode P&O étudiée précédemment.

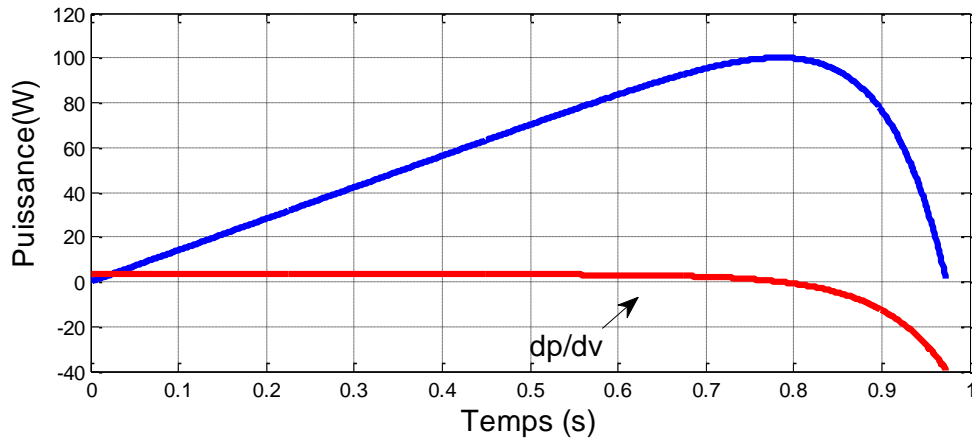


Figure IV.7 : variation de la puissance par rapport à la variation de la tension

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

$$E = \Delta P / \Delta V \in [-45 \ 4.5]$$

$$CE = E(k) - E(k-1) \in [-45 \ 4.5]$$

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

$$dD \in [-0.1 \ 0.1]$$

La valeur de l'entrée $E(k)$ nous indique de quel côté 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 [15].

IV.4.2 Méthodes d'inférence (les règles floues)

La figure IV.8 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.

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.

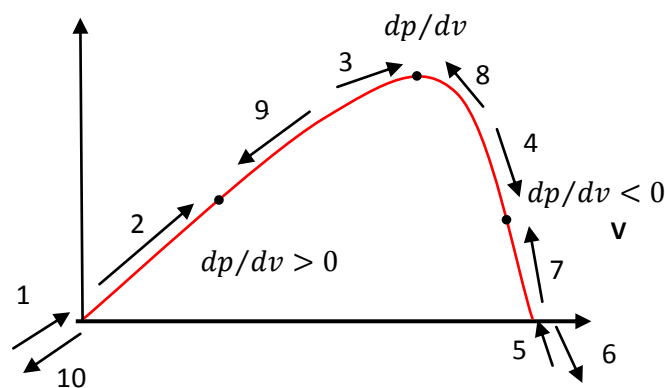


Figure IV.8 : La variation du point de puissance maximal

Tableau IV.1 : Table des inférences

	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 IV.1 montre les règles du contrôleur flou, où toutes les entrées de la matrice sont les fonctions d'appartenance flous 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.

Dans notre travail, nous allons comparer plusieurs versions du contrôleur flou, qui sont basées sur le même principe, mais qui présenteront différents nombres de règles et de fonctions d'appartenance.

IV.4.3 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 meilleure performance.

$$dD = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) \cdot D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \quad (IV.4)$$

IV.4.4 Conception du contrôleur flou.

Nous allons utiliser le même modèle Simulink du convertisseur de puissance que celui utilisé avec la MPPT P&O, nous avons réalisé quelques modifications pour le calcul de E et CE, ainsi que l'adaptation de la sortie du contrôleur qui est la variation du rapport cyclique comme montré sur les figures suivantes :

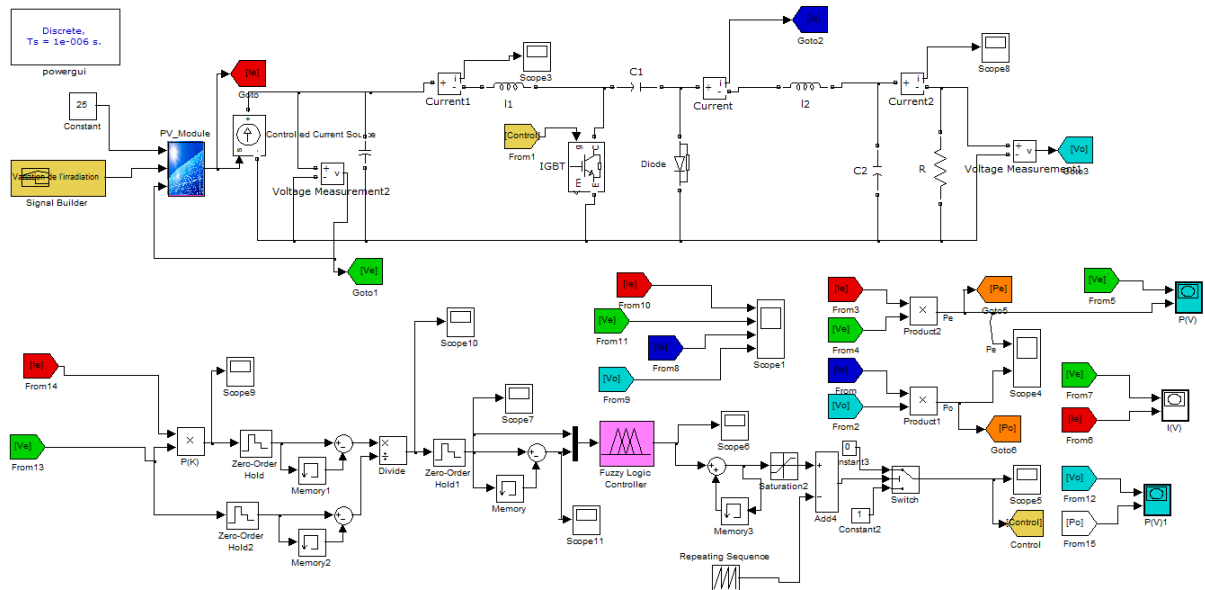


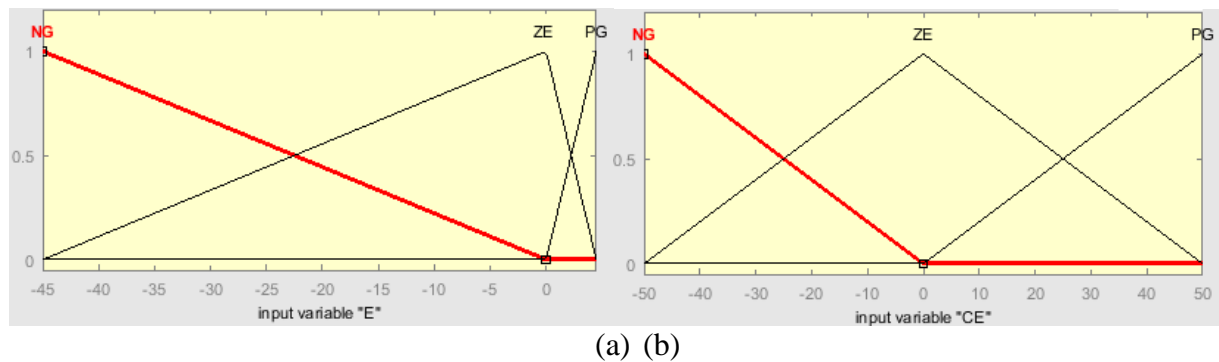
Figure IV.9: Modèle Simulink global de système avec contrôleur MPPT flou et convertisseur Cuk.

Nous avons choisi de concevoir trois versions du contrôleur et ensuite de les comparées pour en tirer la meilleure, en termes de performance et rapidité.

IV.4.3.1 Le 1^{er} cas avec 3 sous-ensembles flous

En utilisant trois bases des sous-ensembles flous, on peut exprimer les variables d'entrées et de sorties en termes des variables linguistiques suivantes : PB (Positif Petit), ZE (Environ Zéro), et NB (Négatif Grand).

La Figure IV.10 montre les fonctions d'appartenance des sous-ensemble flou de base pour les variables d'entrée et de sortie.



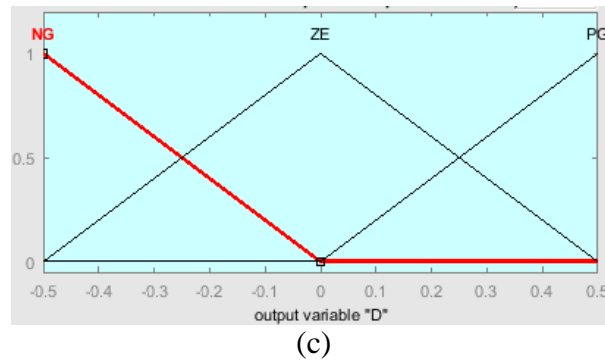


Figure IV.10 : Fonctions d'appartenances de l'erreur $E(a)$, du changement d'erreur $DE(b)$ et du changement du rapport cyclique $dD(c)$.

Dans ce premier cas nous avons rapidement choisi les règles qu'on de verai utilisé on ce réfèrent à l'analyse déjà présenté et au fonctionnement de la MPPT de type P&O

Tableau IV.2 : Table des règles floues pour 3 SE flou

$\text{CE} \backslash E$	NB	ZE	PB
NB	ZE	PB	ZE
ZE	PB	PB	ZE
PB	PB	NB	PB

Le Tableau IV.2 inclut 9 règles floues de commande. Ces règles sont employées pour la commande de convertisseur Ćuk.

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 IV.3 : Interprétation des opérations logiques

Opération	Interprétation
ET	Minimum
OU	Maximum

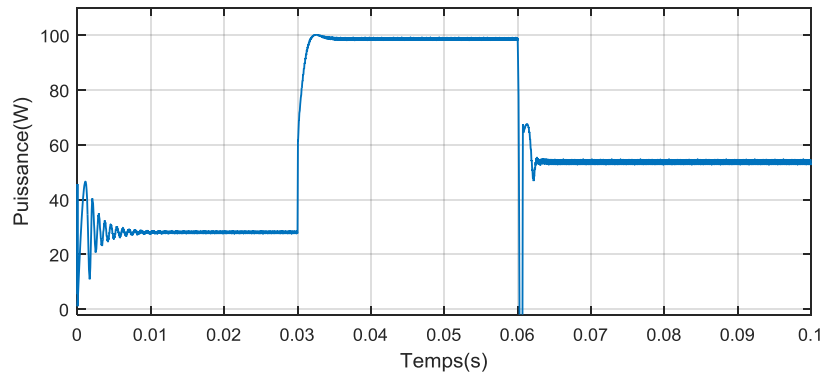
Résultat de simulation

Figure IV.11 : Variation de la puissance avec un convertisseur Ćuk pour le 1^{er} cas.

IV.4.3.2 Le 2^{ème} cas avec 5 sous-ensembles flous

En utilisant le même raisonnement flou et les mêmes sous-ensembles flous, mais en changeant le nombre de fonctions d'appartenance et de règles, on considère les figures suivantes qui présentent le partitionnement de l'univers du discours de chaque variable.

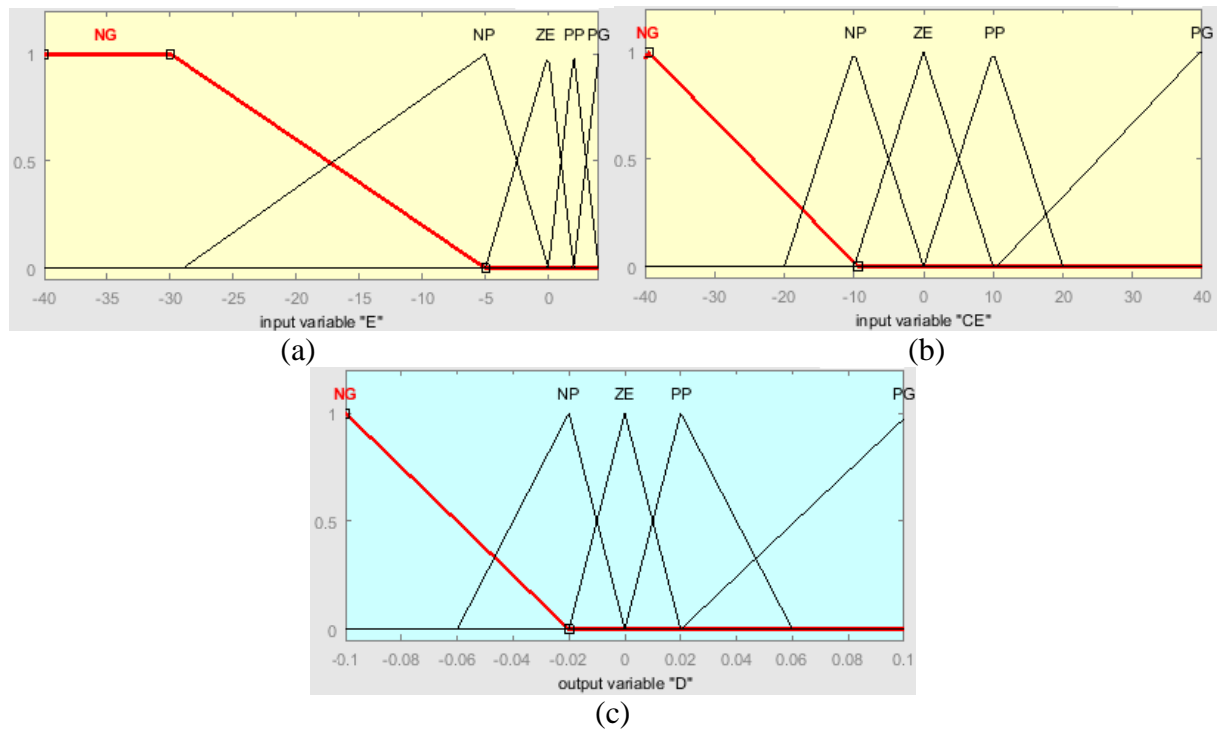


Figure IV.12 : Fonctions d'appartenances de l'erreur E (a), du changement d'erreur DE (b) et du changement du rapport cyclique dD (c).

Le tableau ci-dessous montre les règles choisies, pour la mise en œuvre de notre système de poursuite du point maximal de puissance d'un générateur PV, ces règles sont fixées après plusieurs essais plus ou moins réussis.

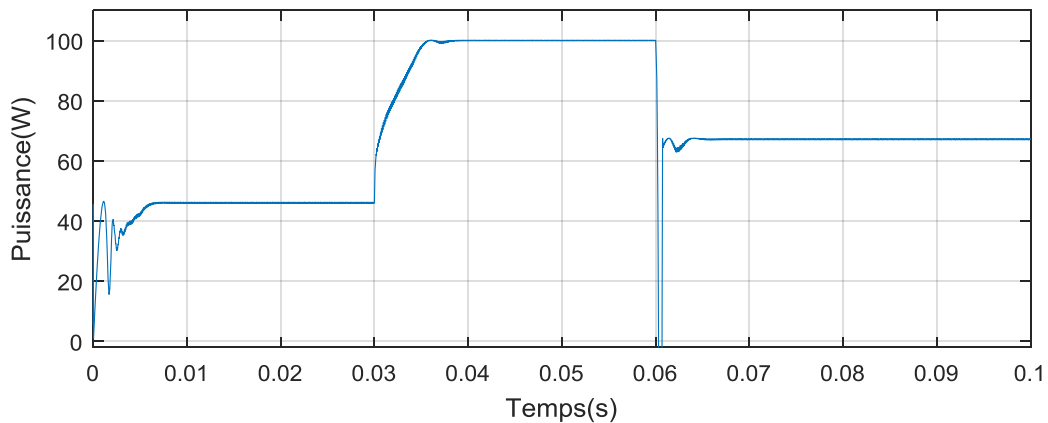
Tableau IV.4 : Table des règles floues pour 5 SE flous

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

Le Tableau IV.4 inclut 25 règles floues de commande. Ces règles sont employées pour la commande de convertisseur *Ćuk*.

Résultat de simulation

Le résultat de simulation est donné par la forme d'onde de la puissance sur la figure suivante :

**Figure IV.13 : Variation de la puissance avec un convertisseur *Ćuk* pour le 2^{ème} cas.**

En visualisant cette figure on peut remarquer que la forme est plus lisse que celle du 1^{er} cas. La figure ci-dessous montre les principales différences entre le 1^{er} cas et le second. Pour les valeurs de l'irradiation faible (500 et 700 W/m²), les pertes de puissance sont considérables pour le cas des 3 fonctions d'appartenance par contre pour l'irradiation maximal de notre simulation qui est 1000W/m², nous remarquons une légère chute de la puissance du GPV mais une réponse rapide du contrôleur flou.

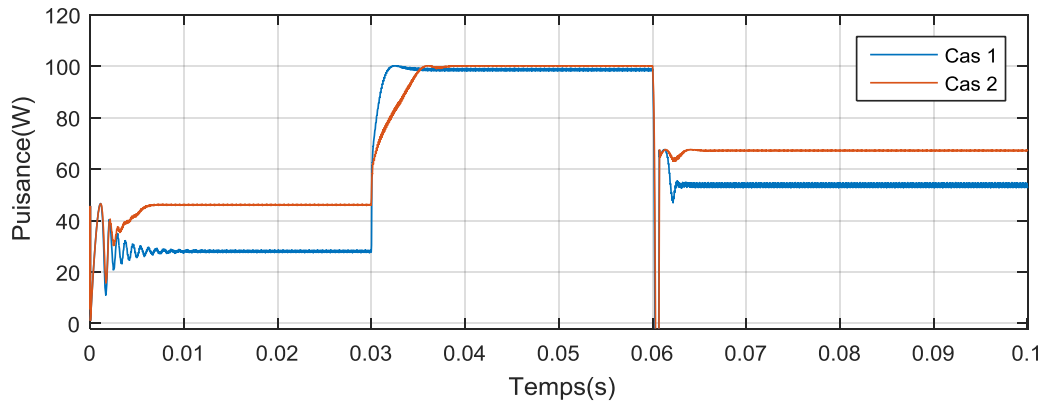


Figure IV.14 : Comparaison entre le 1^{er} cas et 2^{ème} cas.

IV.4.3.2 Le 3^{ème} cas avec 7 sous-ensembles flous

Pour ce cas de figure nous allons diviser l'univers du discours des entrées et sortie du contrôleur flou en 7 sous-ensembles, qui nécessite 49 règles flou, nous allons étendre les 25 règles utilisées pour le 2^{ème} cas pour recouvrir toutes les possibilités.

La Figure IV.15 montre les fonctions d'appartenance des sept sous-ensemble floue de base pour les variables d'entrée et de sortie.

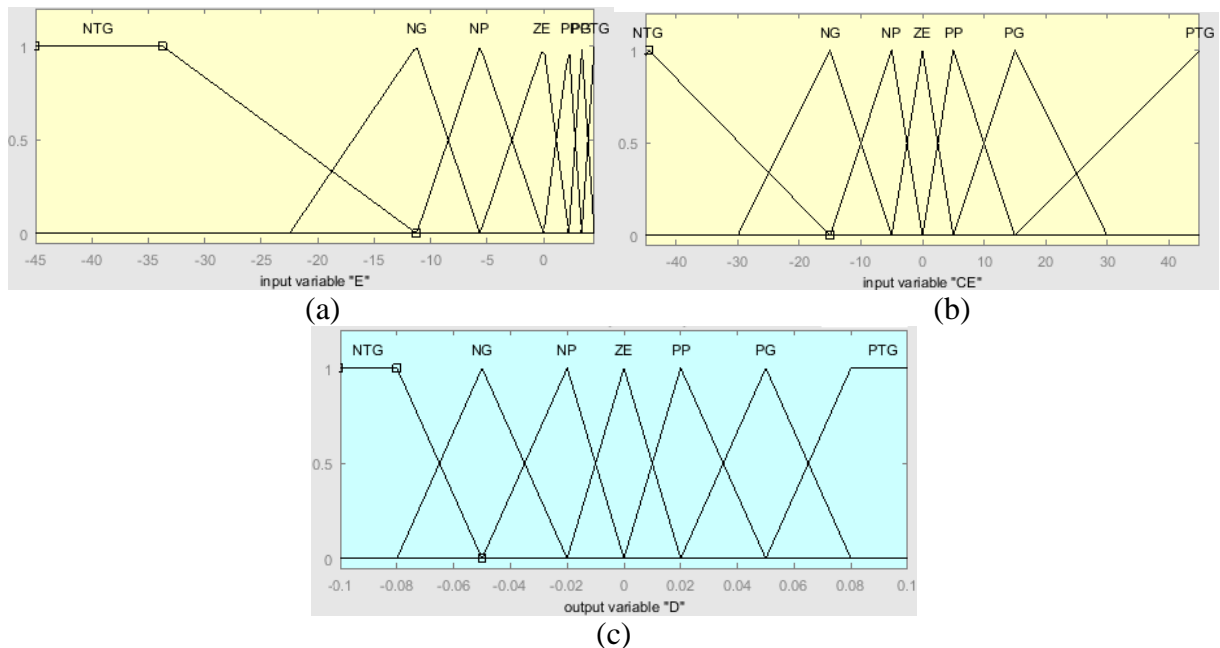


Figure IV.15 : Fonctions d'appartenances de l'erreur E (a), du changement d'erreur DE (b) et du changement du rapport cyclique dD (c).

Tableau IV.5 : table des règles floues

CE/E	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	NS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Le Tableau IV.5 inclut 49 règles floues de commande. Ces règles sont employées pour la commande de convertisseur $\dot{C}uk$ tels que la puissance maximum du panneau solaire est vérifiée.

Résultat de simulation

En ce qui concerne la simulation du système avec un contrôleur à 49 règles, il est très difficile de trouver le bon compromis pour toutes les contraintes liées à son fonctionnement, pour cela nous avons fini de choisir la table des règles précédentes. Le résultat de simulation est donné sur la figure suivante :

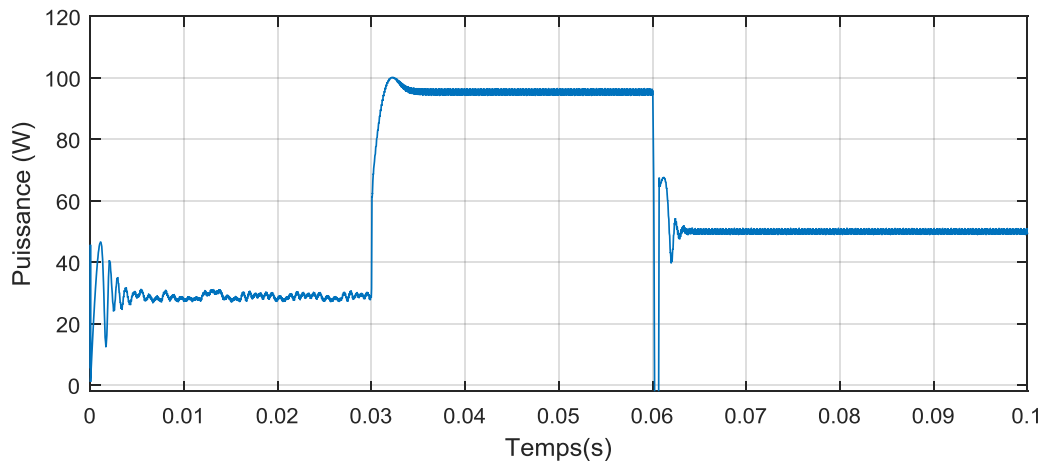


Figure IV.16 : Variation de la puissance avec un convertisseur $\dot{C}uk$ pour le 3^{ème} cas.

Nous voyons que ce troisième cas n'apporte aucune amélioration à la réponse du système, au contraire, l'erreur est de plus en plus grande. Concrètement le développement des règles qui régissent la MPPT est très difficile à fixer, et le temps de simulation est très important.

IV.7 Comparaisons

Dans la simulation suivante les deux techniques de poursuite du point maximum de puissance 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 long qui vise à résumer tous les cas de figure étudiés.

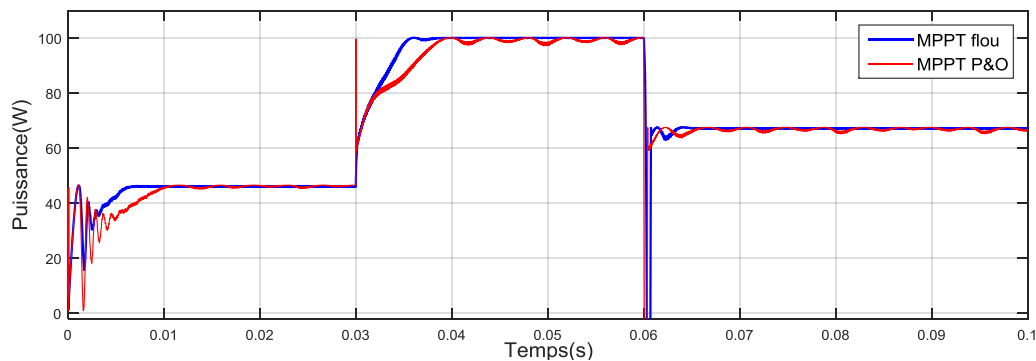


Figure IV.17: Réponse des deux contrôleurs MPPT Flou et P and O pour un changement aléatoire de l'ensoleillement.

La figure IV.17 facilite la comparaison entre la forme de puissance du système avec MPPT P&O classique et celle avec le contrôleur flou, nous utilisant pour cette comparaison le cas d'étude numéros deux qui comporte cinq fonctions d'appartenance et 25 règles, c'est ce dernier qui a montrer le plus de justesse et de fiabilité, en c

On remarque, que le contrôleur flou est plus précis que la contrôleur classique P & O et plus rapide que le contrôleur MPPT classique.

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les deux Commande pour suivi du point de puissance maximal on parle de la méthode classique P&O et de la méthode intelligent de contrôle MPPT flou, ces deux méthodes on était implémentés sous forme de blocs dans Simulink ensuite simulés et validé.

Différents résultats en étaient exposés pour différentes situation et plusieurs choix de l'implémentation du contrôleur flou. Ces résultats ont montré les avantages du contrôleur flou ainsi que convertisseur Cuk pour la mise en œuvre des dispositifs MPPT.