

Analyse des différentes méthodes de MPPT directes

Grand Nicolas, Ondet Olivier, Yicong Li, Cenhao Liu

17 juin 2024

Résumé

Les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont conçues pour optimiser la puissance de sortie des panneaux photovoltaïques en trouvant et en adaptant en temps réel les valeurs de tension et d'intensité à fournir au panneau afin que celui-ci soit le constamment le plus proche du point pour lesquels les paramètres lui permettent de produire la puissance la plus élevée. Cet article abordera en détail les méthodes MPPT directes ainsi que les divers algorithmes associés. Nous présenterons également différents exemples de MPPT direct, précisément deux méthodes à pas fixe et deux méthodes à pas variable, à travers des simulations réalisées avec le logiciel MATLAB-SIMULINK pour illustrer leur fonctionnement et leur efficacité. L'objectif est de démontrer comment ces technologies peuvent contribuer à une production énergétique plus durable et efficace, en exploitant au mieux le potentiel des sources d'énergie renouvelable.

1 Introduction

Au cours des dernières années, la demande énergétique mondiale a considérablement augmenté et continue de croître. Cependant, en répondant à cette demande, il est crucial de ne pas ignorer la problématique des émissions de gaz à effet de serre et du réchauffement climatique. Pour faire face à ces défis, il est essentiel de réduire l'exploitation des ressources fossiles et de se concentrer sur l'utilisation des ressources renouvelables, telles que l'énergie solaire avec l'utilisation des panneaux photovoltaïques (PV), qui ont un impact environnemental plus favorable. Mais malgré ses nom-

breux avantages, il présente un inconvénient majeur : l'irrégularité de l'irradiation qui est la source de son énergie, ce qui entraîne une variation de l'efficacité et de la puissance produite. Leur efficacité peut être améliorée par un algorithme appelé Maximum Power Point Tracking (MPPT), qui permet au système de fonctionner à son point de puissance maximale. Cela optimise le rendement du système PV ainsi que sa rentabilité.

2 Le photovoltaïque :

Les panneaux photovoltaïques en silicium cristallin, qui se déclinent en monocristallins et polycristallins, sont les plus couramment utilisés. Les panneaux monocristallins sont fabriqués à partir d'un seul cristal de silicium pur, ce qui leur confère une efficacité plus élevée et une meilleure performance en faible luminosité. Leur coût de production est cependant plus élevé. En revanche, les panneaux polycristallins, constitués de plusieurs cristaux de silicium, sont moins coûteux à produire mais légèrement moins efficaces. Un panneau photovoltaïque est un dispositif conçu pour convertir l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Il est principalement composé de cellules photovoltaïques, fabriquées à partir de semi-conducteurs comme le silicium cristallin ou amorphe. Lorsque la lumière solaire frappe une cellule photovoltaïque, elle transfère son énergie aux électrons du matériau semi-conducteur, ce qui crée une différence de potentiel électrique, à travers la cellule. Cette tension induit un courant électrique dans les fils conducteurs connectés à la cellule. Les électrons libérés par l'absorption de photons sont ainsi

mobilisés par ce champ électrique interne, générant un flux de courant continu. Ce courant est ensuite collecté par des contacts métalliques situés à la surface de la cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont organisées en panneaux solaires, où elles sont connectées en série et en parallèle pour obtenir les tensions et les courants appropriés nécessaires à la production d'électricité. Les panneaux sont souvent protégés par une couche de verre transparente pour maximiser l'absorption de la lumière solaire et assurer la durabilité du système dans diverses conditions climatiques. Pour analyser un panneau photovoltaïque de manière approfondie, il est essentiel de comprendre ses spécifications, représentées dans la figure 15 aux conditions de test standard (STC). Ces conditions comprennent une irradiation de 1000 W/m^2 , une température de cellule de 25°C et une densité spectrale de $1,5 \text{ AM}$ (cette dernière est toujours valable sur terre). Pour modéliser efficacement un panneau photovoltaïque tel que le KC200GT décrit plus tard, il est nécessaire de connaître le courant et la tension traversant le panneau, ainsi que l'irradiation solaire et la température de la cellule. Le KC200GT présente ces caractéristiques sous STC :

I_{mp}	7.61 A
V_{mp}	26.3 V
$P_{max,m}$	200.143 W
I_{sc}	8.21 A
V_{oc}	32.9 V
$I_{0,n}$	$9.825 \cdot 10^{-8} \text{ A}$
I_{pv}	8.214 A
a	1.3
R_p	415.405Ω
R_s	0.221Ω

FIGURE 1 – Caractéristiques du KC200GT sous STC

L'irradiation et la température de la cellule sont des variables mesurables, tandis que la tension et le courant sont interdépendants. Il est donc crucial de déterminer et de modéliser l'équation qui relie ces caractéristiques pour ob-

tenir une représentation précise du comportement électrique du panneau photovoltaïque.

3 Le MPPT

Le Maximum Power Point Tracking (MPPT) fonctionne en ajustant continuellement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour maximiser la puissance de sortie. Pour comprendre cela, il est essentiel de connaître la courbe caractéristique courant-tension (I-V) du panneau solaire. Sur cette courbe, la puissance produite par le panneau ($P = V \cdot I$) varie en fonction des conditions d'irradiation et de température. Le point de puissance maximale (MPP) se trouve à une position spécifique sur la courbe I-V où le produit de la tension (V) et du courant (I) est maximal.

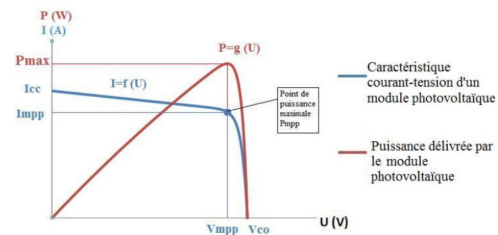


FIGURE 2 – courbe donnant le point MPPT

- Si l'augmentation de la tension augmente la puissance, l'algorithme continue à augmenter la tension dans cette direction.
- Si l'augmentation de la tension diminue la puissance, l'algorithme inverse la direction de l'ajustement.

Les méthodes directes de MPPT ajustent directement la tension et observent les variations de puissance pour localiser le point de puissance maximale. En revanche, les méthodes indirectes utilisent des modèles prédictifs et des mesures électriques pour guider l'ajustement des paramètres, calculant précisément où se situe ce point optimal. Divers algorithmes peuvent être

utilisés pour modéliser ces approches, chacun offrant des avantages spécifiques en termes de rapidité et de précision. En outre, les algorithmes MPPT peuvent fonctionner avec des pas fixes, offrant une simplicité de mise en œuvre, ou des pas variables, permettant une adaptation dynamique aux conditions changeantes pour une performance optimisée. Nous

allons dans notre étude se focaliser sur le MPPT directe.

4 Le MPPT direct

Dans cette étude, nous allons explorer quatre algorithmes de MPPT direct, en mettant l'accent sur deux approches à pas fixe et deux à pas variable. Tout d'abord, le classique Perturb and Observe (PO) à pas fixe fonctionne en ajustant périodiquement le point de fonctionnement du système et en observant l'effet sur la puissance produite. Lorsqu'une augmentation de puissance est détectée, la perturbation continue dans la même direction ; sinon, elle change de direction pour trouver le point de puissance maximale. Le deuxième algorithme à pas fixe est la méthode de la Conductance Incrémentale. Cette approche mesure les variations de conductance du système et ajuste le point de fonctionnement pour maximiser la puissance produite, offrant une solution robuste avec une réaction rapide aux changements environnementaux. Passant aux algorithmes à pas variable, nous étudions d'abord l'approche du Perturb and Observe Amélioré (PO-A). Cette méthode améliore le PO classique en introduisant des ajustements adaptatifs du pas, réduisant ainsi les oscillations autour du point de puissance maximale et améliorant la convergence du système. Enfin, nous abordons l'algorithme de logique floue (Fuzzy Logic). Ce système utilise des règles floues pour ajuster dynamiquement le pas en fonction des conditions environnementales variables, assurant une optimisation continue de la puissance du système photovoltaïque tout en minimisant les fluctuations. Ces quatre algorithmes seront implémentés et évalués à l'aide de simulations

dans MATLAB-SIMULINK, permettant une analyse comparative approfondie de leur performance et de leur adaptabilité aux conditions réelles. Pour notre étude nous avons travaillé sur un modèle de panneau photovoltaïque : le KC200GT dont la caractéristique courant-tension (I-V) du panneau peut être décrite par l'équation suivante :

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t a} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p}$$

FIGURE 3 – Equation caractéristique d'un panneau PV

où les termes I_0 et I_{pv} sont exprimé comme ceci :

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \Delta_T) \frac{G}{G_n}$$

FIGURE 4 – I_{pv}

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta_T}{\exp((V_{oc,n} + K_V \Delta_T)/aV_t) - 1}$$

FIGURE 5 – I_0

Le pas fixe dans les algorithmes de MPPT, tel que Perturb and Observe (PO), implique des ajustements périodiques et constants de la tension du panneau photovoltaïque pour maximiser la puissance de sortie. L'algorithme suit un cycle d'observation et de perturbation : il commence par mesurer la tension et la puissance actuelles du panneau. Ensuite, il modifie légèrement la tension (perturbation) et mesure la nouvelle puissance. Si la puissance augmente,

l'algorithme continue de perturber la tension dans la même direction ; sinon, il inverse la direction de la perturbation. L'organigramme de l'algorithme PO illustre ce processus en boucle. Il montre les étapes de mesure de la puissance, de perturbation de la tension, et de décision basée sur l'augmentation ou la diminution de la puissance. Ce cycle se répète continuellement, permettant à l'algorithme de suivre les variations d'irradiance et de température, en maintenant le système proche du point de puissance maximale. Bien que simple et efficace, cette méthode peut entraîner des oscillations autour du point optimal, car le pas fixe ne s'ajuste pas en fonction des conditions dynamiques :

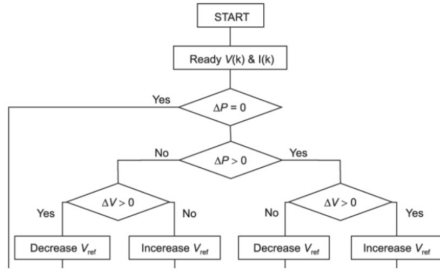


FIGURE 6 – organigramme de la méthode PO

La température de cellule Pour estimer la température de la cellule photovoltaïque à partir du flux solaire global incident (G), de la température ambiante, et des propriétés physiques du matériau du panneau, nous utilisons une approche basée sur l'équation de transfert thermique. Cette équation prend en compte plusieurs facteurs : la conductivité thermique du matériau, qui détermine la capacité de ce dernier à conduire la chaleur ; le coefficient d'échange thermique h, qui représente les pertes de chaleur par convection et par rayonnement avec l'environnement ambiant ; ainsi que la capacité thermique du matériau, qui mesure sa capacité à stocker la chaleur. L'équation de transfert thermique équilibre le flux solaire absorbé par la cellule avec les pertes de chaleur vers l'extérieur. Elle intègre également des variables telles que la surface effective d'échange thermique et les conditions de ventilation autour du panneau. Cette approche per-

met de modéliser et de prédire efficacement la température de la cellule photovoltaïque dans différentes conditions environnementales :

$$T_c = T_a + \frac{G \cdot (1 - \eta)}{A \left(\frac{k}{d} + h \right)}$$

FIGURE 7 – équation de la température de cellule en fonction des paramètres environnementaux et des caractéristiques du panneau

Ensuite on a pu calculer l'énergie fournie sur un an par notre PV et on a essayé de voir l'impact du gain en sortie de la fonction MPPT sur notre simulink sur cette énergie récupérée :

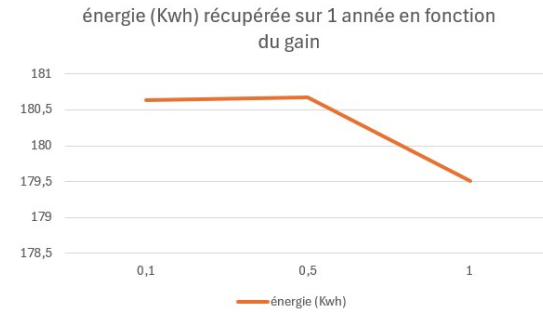


FIGURE 8 – Graphique montrant l'évolution de l'énergie récupérée sur 1 an en fonction du gain en sortie

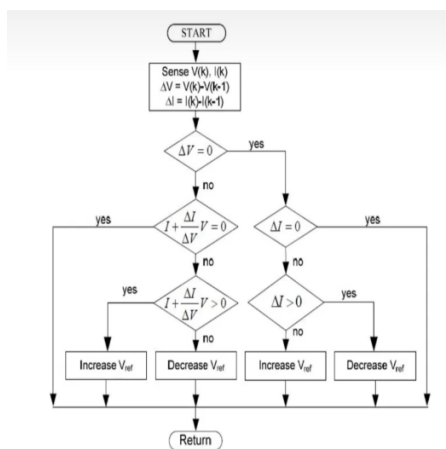
On voit alors que les valeurs sont très similaires pour 0.1 et 0.5 mais commencent à baisser significativement pour G=1. Les calculs étant très lourds nous n'avons pu faire que 3 simulations mais on peut supposer qu'en augmentant le gain les oscillations créées sont plus fortes et cela se traduit par une perte d'énergie sur l'année qui n'est pas compensée par la vitesse de réponse du MPPT (accrue pour un gain supérieur) On choisira plutôt un gain proche de 0.5.

5 INC(Incremental conductance)

La méthode **INC** (Incremental Conductance) utilise instantanément la dérivée de la conductance $\frac{dI}{dV}$ du PPV (Point de Puissance Maximum). En effet,

$$\frac{dP}{dV} = V \times \frac{dI}{dV} + I \Rightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

Cette dérivée permet de connaître la position du point de fonctionnement par rapport au MPP. Son schéma de fonctionnement est visible à la figure 9. Si le coefficient directeur de la tangente de la caractéristique est positif, alors la tension du point de fonctionnement est inférieure à la tension du MPP (le point se trouve à gauche du MPP). Si cette tangente a un coefficient directeur négatif, alors la tension du point de fonctionnement est supérieure à la tension du MPP (le point se trouve à droite du MPP). Enfin, s'il est égal à zéro, le point se trouve au MPP (maximum de la caractéristique $\frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} = 0$).



Flowchart for the Incremental Conductance method

FIGURE 9 – Schéma de fonctionnement de l'algorithme INC

Le sens de déplacement du point de fonctionnement peut alors être déduit. La modulation de la tension V_{PPV} permet le déplacement du point dans le but d'atteindre le MPP.

Si

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$$

alors la tension est diminuée ; si

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$$

alors la tension est augmentée . D'après, la méthode INC permettrait une meilleure poursuite du MPP que P&O.

Lorsque $\Delta V = 0$, il est nécessaire de vérifier la variation du courant ΔI . Si $\Delta I > 0$, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP, et il faut donc diminuer la tension pour se rapprocher du MPP. Si $\Delta I < 0$, cela indique que le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP, et il est alors nécessaire d'augmenter la tension pour atteindre le MPP.

Cette méthode permet de déterminer précisément si le point de fonctionnement est à gauche ou à droite du MPP en se basant sur les variations instantanées de la tension et du courant. Cela assure une meilleure précision et une convergence plus rapide vers le MPP par rapport à d'autres méthodes comme P&O. Ainsi, l'algorithme INC améliore l'efficacité de la recherche du point de puissance maximum en exploitant les dérivées de la conductance.

En résumé, la règle à suivre est :

$$\text{Si } \Delta V = 0 : \begin{cases} \Delta I > 0 \rightarrow \text{Diminuer } V \\ \Delta I < 0 \rightarrow \text{Augmenter } V \\ \Delta I = 0 \rightarrow \text{Maintenir } V \end{cases}$$

Cette approche garantit que le système suit correctement les variations de la courbe de puissance et ajuste la tension en conséquence pour maintenir le fonctionnement optimal.

6 Perturb and Observe Amélioré (P&OA)

Bien que discutée précédemment, la méthode classique P&O avec un pas fixe présente des inconvénients en termes d'efficacité et de précision. Pour améliorer ces aspects, des algorithmes à pas variable, comme P&OA, ont

été développés. Dans ces méthodes adaptatives, le pas de perturbation est automatiquement ajusté en fonction du point de fonctionnement réel.

6.1 Principe de Fonctionnement du P&OA

La différence entre la tension de sortie réelle V et la tension optimale V^* est utilisée pour ajuster le pas de perturbation variable comme suit :

$$d(k+1) = d(k) + \alpha(V - V^*)$$

où $d(k)$ représente le cycle de service du convertisseur, et α est un coefficient déterminé en fonction de la courbe de puissance optimale.

Alternativement, le pas peut être choisi en fonction de la mesure mise à l'échelle de la pente de la sortie de puissance :

$$Cycle\ Duty(k+1) = Cycle\ Duty(k) + \alpha \frac{\Delta puissance(k)}{\Delta Cycle\ Duty(k)}$$

où α doit être déterminé par les concepteurs.

6.2 Comparaison entre P&O et P&OA

Après la simulation, nous obtenons le résultat de la puissance sur une année pour P&O et P&OA. La Figure 10 montre la puissance sur une année pour les deux méthodes.

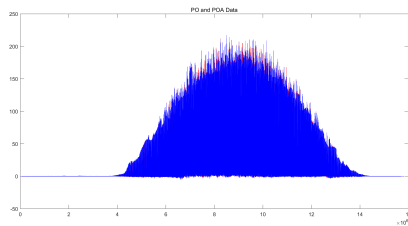


FIGURE 10 – Puissance sur une année avec P&O (rouge) et P&OA (bleu)

6.3 Comparaison des Énergies Produites

Après le traitement des données, nous calculons l'énergie produite par le PV avec P&O et P&OA. En résumé sur une année, le PV avec P&O produit 180,28 kWh, tandis que le PV avec P&OA produit 179,36 kWh. La Figure 11 montre l'énergie produite par jour pour les deux méthodes.

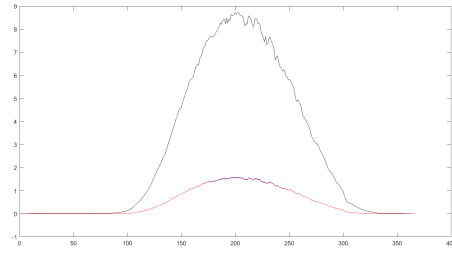


FIGURE 11 – Comparaison de l'énergie produite par jour pour les algorithmes MPPT Direct P&O et P&OA.

7 Méthodes de MPPT par Logique Floue

7.1 Principe de la Logique Floue

La logique floue est une technique de contrôle inspirée par les principes du raisonnement humain, qui gère les incertitudes et les imprécisions. Contrairement à la logique binaire traditionnelle, la logique floue utilise des degrés de vérité, ce qui la rend particulièrement adaptée aux systèmes complexes comme les panneaux PV où les conditions environnementales peuvent varier considérablement.

7.2 Système de Mamdani

Le système de logique floue utilisé dans cette étude est basé sur le modèle de Mamdani, qui est l'une des approches les plus couramment utilisées pour la prise de décision en logique floue. Ce système comprend les étapes suivantes :

1. **Fuzzification** : Transformation des entrées précises en ensembles flous.
2. **Base de Règles** : Ensemble de règles floues définissant le comportement du système.
3. **Inférence** : Application des règles pour générer une sortie floue.
4. **Défuzzification** : Conversion des sorties floues en une valeur précise.

7.3 Fuzzification

Dans l'étape de fuzzification, les variables d'entrée numériques sont converties ou mappées en variables linguistiques basées sur les fonctions d'appartenance. Pour transformer les valeurs de l'erreur et de la variation de l'erreur en variables d'entrée floues "erreur" (E) et "variation de l'erreur" (DE), nous utilisons cinq variables floues : PB (Très Grand), PS (Petit Positif), Z (Zéro), NS (Petit Négatif), NB (Très Petit).

L'erreur et la variation de l'erreur sont les variables d'entrée du système, tandis que la sortie du contrôleur de logique floue est la variation du rapport cyclique. Chaque variation de l'erreur et variation de l'erreur est définie par des fonctions d'appartenance et leur changement relatif est montré comme dans la figure suivante. Les fonctions d'appartenance des entrées et des sorties sont déterminées par des expériences du système et la variation des paramètres.

La table suivante montre les règles implémentées dans le contrôleur de logique floue :

Table :Règles implémentées dans le contrôleur de logique floue

E\DE	NB	NS	Z	PS	PB
NB	ZE	ZE	ZE	PS	PB
NS	ZE	ZE	PS	PS	PB
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NB	NS	NS	ZE	ZE
PB	NB	NB	NS	ZE	ZE

FIGURE 12 – Règles implémentées dans le contrôleur de logique floue

7.4 Équations Importantes

Les étapes clés de la logique floue impliquent des transformations mathématiques

Fuzzification La fuzzification transforme une valeur d'entrée précise x en une valeur floue $\mu(x)$:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-c}{a}\right)^2} \quad (1)$$

où c est le centre de l'ensemble flou et a est la largeur de l'ensemble.

Inférence L'application des règles floues utilise les opérateurs logiques flous, tels que l'opérateur Min pour l'intersection :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2)$$

Défuzzification La défuzzification peut être réalisée par le centre de gravité :

$$z = \frac{\sum \mu(z_i) \cdot z_i}{\sum \mu(z_i)} \quad (3)$$

7.5 Implementation avec Matlab et Simulink

Pour implémenter le MPPT par logique floue, Matlab et Simulink sont utilisés pour modéliser et simuler le système. Les étapes incluent :

- **Modélisation du Panneau PV** : Création d'un modèle de panneau PV basé sur ses caractéristiques I-V et P-V.
- **Conception du Contrôleur Flou** : Définition des ensembles flous et des règles de décision dans Matlab (Convertisseur DC-DC SEPIC).
- **Simulation et Analyse** : Utilisation de Simulink pour simuler le comportement du système sous différentes conditions d'irradiance et de température.

7.6 Convertisseur SEPIC Conventionnel

Le convertisseur SEPIC (Single-Ended Primary-Inductor Converter) est un type de

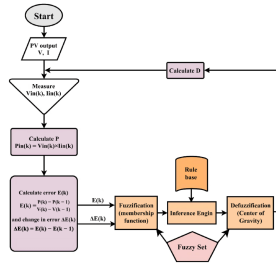


FIGURE 13 – Grafset Fuzzy Logic

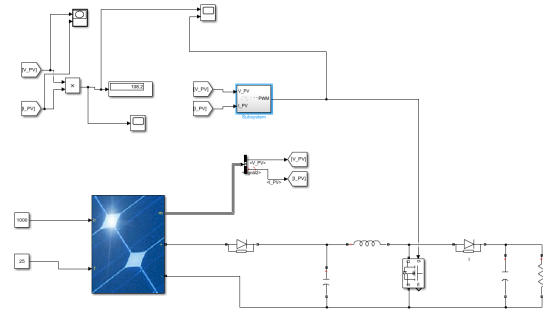


FIGURE 14 – Bloc Fuzzy Logic

convertisseur DC-DC qui permet de réguler la tension de sortie indépendamment de la tension d'entrée, la rendant soit supérieure soit inférieure. Ce type de convertisseur est particulièrement utile dans les systèmes PV car il peut gérer les fluctuations de la tension d'entrée due aux variations d'irradiance solaire.

7.7 Conception et Fonctionnement

Le convertisseur SEPIC est constitué de deux inductances, deux condensateurs et un interrupteur (typiquement un MOSFET). Son fonctionnement se divise en deux phases :

- **Phase de Conduction** : Lorsque le MOSFET est activé, les inductances se chargent.
- **Phase de Blocage** : Lorsque le MOSFET est désactivé, l'énergie stockée dans les inductances est transférée à la charge via les condensateurs.

Les principales caractéristiques d'un convertisseur SEPIC incluent :

- **Sortie Non-Inversée** : La tension de sortie a la même polarité que la tension d'entrée.
- **Régulation Efficace** : Capacité à réguler la tension de sortie à une valeur désirée, peu importe les variations de la tension d'entrée.

8 Conclusion Logique Floue

L'utilisation de la logique floue pour le MPPT, combinée avec un convertisseur SEPIC, offre une solution efficace pour maximiser la

puissance extraite des panneaux PV. Les outils Matlab et Simulink permettent de modéliser et de simuler ces systèmes complexes, offrant une compréhension approfondie de leur performance et de leur efficacité.

9 Références

- Liu, Hongliang. "Contribution for integrating urban wind turbine into electrical microgrid : modeling and control." (2017).
- Parimita, Bhuvaneswari "MATLAB based modeling to study the performance of different MPPT techniques used for solar PV system under various operating conditions" (2014)
- Ahmed, Hassanien "Improved PO MPPT algorithm with efficient open-circuit voltage estimation for two-stage grid-integrated PV system under realistic solar radiation " (2021)
- Sheik, Devaraj, Sri Revathi "Development and analysis of a Two stage Hybrid MPPT algorithm for solar PV systems"
- Toumi "Comparaison de PO et du contrôleur de logique floue dans MPPT pour Applications photovoltaïques (PV)" (2020)