



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hama Lakhdar –El-oued

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de :

MASTER ACADEMIQUE

Faculté des sciences et de la technologie

Département Génie électrique

Spécialisation : commande électrique

Le thème

**Améliorations d'une chaîne de
conversion de l'énergie solaire**

Présenté par:

Laib Abdel Hakim
Messioughi Oualid
Ghobch AbdelHak

Encadreur:

Chikha Said

jury de soutenance

Membres de jury	Descriptif	La Fondation d'affiliation
Kechida Ridha	Président	Université de El-oued
Serhoud Hicham	Examineur	Université de El-oued
Chikha Said	Encadreur	Université de El-oued

Année académique: 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Je voudrais exprimer mes sincères remerciements et ma gratitude à notre humble et gentil professeur "Chikha-Said" pour les précieux conseils et commentaires qu'il nous a donnés.

Nous sommes également heureux d'exprimer nos sincères remerciements et notre gratitude aux professeurs de notre collège .

Nous remercions également tout le personnel administratif du collège, et enfin nous remercions tous ceux qui nous ont aidés dans cet humble travail; qu'Allah les récompense tous avec la meilleure récompense

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

A toute ma famille

Et A toutes mes amies

Et surtout Ibrahim , Fouad.

A tous les gens qui me connaissent et que je connais

Et à tous ceux qui aiment le bon travail et ne reculent pas devant les obstacles de la vie.

Abde-Hakim , Abdel-hak , Oualid

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I Overview sur les commandes MPPT classiques	
I.1 Introduction	3
I.2 Historique	3
I.2.1 Histoire de la technique perturb and observe (P&O)	3
I.3 Conversion photovoltaïque	5
I.3.1 Principe de la conversion photovoltaïque	5
I.3.2 Répartition du rayonnement solaire	6
I.4 Générateur photovoltaïque	7
I.4.1 Principe.....	7
I.4.2 Constitution d'un générateur photovoltaïque	7
I.4.3 Protection	8
I.5 Performances du GPV	8
I.5.1 Caractéristiques courant-tension	8
I.5.2 Influence de l'éclairement	9
I.5.3 Influence de la température	10
I.5.4 Association des cellules photovoltaïques en série.....	10
I.5.5 Association des cellules photovoltaïques en parallèle	11
I.6 Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale	11
I.6.1 Principe.....	11
I.7 Les commandes MPPT classiques	12
I.7.1 Commande "perturb and observe (P&O)".....	12
I.7.2 Commande " hill climbing "	14
I.8 Conclusion.....	15
Chapitre II Contrôleur flou pour la recherche du PPM	
II.1 Introduction.....	16
II.2 Généralités sur la logique floue	16
II.3 Principe d'une commande floue.....	17

II.4 Etapes de mise en œuvre d'un contrôleur flou	18
II.4.1 Etape de fuzzification.....	18
II.4.2 Etape d'inférence	19
II.4.2.1 Moteur d'inférence flou.....	20
II.4.2.2 Méthode d'inférence max-min (Mamdani).....	21
II.4.2.3 Choix des éléments du moteur d'inférences floues	23
II.4.2.4 Base de règles floues (un ensemble de règles de type SI-ALORS)	23
II.4.3 Etape de défuzzification	24
II.4.3.1 Méthode du centre de gravité	24
II.5 Domaines d'application de la logique floue	25
II.6 Avantages et Inconvénients du réglage par logique floue	25
II.6.1 Avantages.....	25
II.6.2 Inconvénients	26
II.7 Conclusion	26
Chapitre III : Résultats de simulations et interprétation	
III.1 Introduction	27
III.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïque (GPV)	27
III.3 Modélisation d'un hacheur (boost).....	29
III.4 MPPT par un algorithme basé sur la logique floue	30
III.4.1 Conception du régulateur MPPT flou	30
III.5 Résultats de simulation	33
III.5.1 Résultats de la technique P&O	33
III.5.2 Résultats de la technique floue	36
III.6 Comparaison	39
III.7 Conclusion	39
Conclusion générale.....	40
Bibliographiques.....	41

Listes des figures

Figure I.1 Les défis auxquels sont confrontées les techniques	3
Figure I.2 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil	5
Figure I.3 Spectre du rayonnement solaire reçu hors atmosphère	6
Figure I.4 La carte d'éclairement solaire de l'Algérie	6
Figure I.5 Composants d'un GPV	7
Figure I.6 Diodes de protection des modules	8
Figure I.7 Les caractéristiques I-V et P-V du GPV	9
Figure I.8 Effet de la variation d'éclairement	10
Figure I.9 l'influence de la température sur la caractéristique $I = f(v)$	10
Figure I.10 Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension	11
Figure I.11 Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension	11
Figure I.12 Recherche PPM par méthode (P&O)	12
Figure I.13 Algorithme type de la méthode P&O	13
Figure I.14 Relation entre P_{pv} et le rapport cyclique D du convertisseur statique	14
Figure I.15 Schéma de principe de la commande hill climbing	15
Figure II.1 structure d'une commande floue	17
Figure II.2 Sous ensembles flous classiquement utilisés : (a) Fonction d'appartenance de Fonction de l'erreur e , (b) Fonction d'appartenance de la variation de l'erreur Δe et (c) Fonction d'appartenance de la variable de sortie Δu	19
Figure II.3 Structure du correcteur flou de type PD	20
Figure II.4 Définition d'ALORS dans la méthode d'inférence max-min	21
Figure II.5 Définition de OU dans la méthode d'inférence max-min	22
Figure II. 6 Fonction d'appartenance résultante.....	22
Figure III.1 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire	27
Figure III.2 Schémas équivalents du hacheur (boost)	29
Figure III.3 Schéma électrique d'un hacheur boost fermé	30
Figure III.4 Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert	30
Figure III.5 Structure de base du contrôleur floue	31
Figure III.6 Schéma d'illustration d'un GPV commandé par Logique floue FL	33

Figure III.7 Effet de la variation de l'éclairement.....34

Figure III.8 Effet de la variation de la température.....35

Figure III.9 Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et la sortie.....36

Figure III.10 Effet de la variation de l'ensoleillement.....37

Figure III.11 Effet de la variation de la température.....38

Liste des Tableaux

Tableau II. 1 Matrice d'inférence floue.....	24
Tableau III.1 Caractéristiques électriques standards d'un GPV6-MSX60.....	29
Tableau III.2 Base de règles floues.....	32

LISTE DES ABREVIATIONS

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturb and Observe.

DC : Courant continu (en anglais Direct Current).

AC : Courant alternative (en anglais Alternating Current).

E : Niveau d'Eclairement (ou d'irradiation) [W/m^2].

h : la constante de Planck.

c : la vitesse de la lumière.

λ : La longueur d'onde.

n : Facteur de non-idéalité de la jonction PN.

GPV : générateur photovoltaïque.

PV : photovoltaïque.

(V-I) : La caractéristique tension-courante du GPV.

(V-P) : La caractéristique tension-puissance du GPV.

Voc : Tension de Circuit Ouvert [V].

Isc : Le courant de court-circuit du générateur photovoltaïque [A].

Ppv : Puissance délivrée par le générateur PV [W].

Vpv : La tension de la générateur PV [V].

Ipv : Courant délivré par le générateur PV [A].

D : Diode.

e(t) : L'erreur.

Io : Le courant de saturation inverse.

R_p : Résistance parallèle du générateur PV [Ω].

R_s : Résistance Série du générateur PV [Ω].

Introduction Générale

L'énergie est l'un des facteurs les plus essentiels influençant le progrès et la prospérité des sociétés. Avec l'augmentation de la population mondiale et le développement industriel rapide, la nécessité de sources d'énergie durables et efficaces est devenue cruciale pour maintenir l'équilibre environnemental et réduire les impacts négatifs sur le climat. Dans ce contexte, l'énergie solaire s'est imposée comme l'une des principales sources d'énergie renouvelable, caractérisée par son abondance, sa durabilité et sa propreté. La conversion photovoltaïque est une technologie clé pour transformer l'énergie solaire en énergie électrique utilisable, rendant ainsi impératif l'amélioration de l'efficacité de cette conversion pour maximiser l'exploitation du rayonnement solaire.

Les systèmes de conversion photovoltaïque dépendent fortement de la capacité à suivre le point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking, MPPT) des panneaux solaires, ce point variant continuellement en fonction des conditions environnementales telles que le rayonnement solaire et la température. Ainsi, les techniques de MPPT sont un élément fondamental des systèmes solaires, garantissant leur fonctionnement au point de puissance optimale pour atteindre la plus grande efficacité possible dans la conversion d'énergie. Au fil des ans, de nombreuses techniques de MPPT ont été développées, allant des méthodes traditionnelles telles que "perturb and observe" (P&O) aux méthodes plus avancées basées sur l'intelligence artificielle et la logique floue.

L'amélioration continue des performances des systèmes MPPT est un domaine de recherche actif et important, visant à augmenter l'efficacité des systèmes photovoltaïques et à réduire le coût global de production d'énergie solaire. Les techniques traditionnelles de MPPT reposent sur des algorithmes simples mais peuvent présenter des limitations face aux changements rapides des conditions environnementales, nécessitant l'adoption de méthodes plus intelligentes et adaptatives.

Ce mémoire vise à contribuer à ce domaine de recherche en se concentrant sur l'étude et l'analyse des améliorations possibles de la chaîne de conversion de l'énergie solaire en utilisant des techniques de contrôle flou (fuzzy control) comme alternative innovante aux techniques traditionnelles de MPPT. La logique floue permet de gérer l'imprécision et l'incertitude des

données, la rendant ainsi adaptée aux applications de suivi du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques.

Le premier chapitre de ce mémoire présentera un aperçu complet des techniques traditionnelles de MPPT (P&O) , en mettant en lumière leur historique, leur évolution et leur principe de fonctionnement. Nous aborderons également les détails du processus de conversion photovoltaïque, les composants du système photovoltaïque et les performances de ces systèmes sous l'influence de diverses conditions telles que le rayonnement solaire et la température. Nous expliquerons comment la répartition du rayonnement solaire et les variations environnementales affectent les performances des panneaux solaires, et l'importance de maintenir le système fonctionnant à son point de puissance maximale.

Dans le deuxième chapitre, nous introduirons le concept de la logique floue et comment elle peut être appliquée dans la conception des systèmes MPPT. Nous passerons en revue les étapes de construction et de mise en œuvre d'un contrôleur flou, de la phase de fuzzification à la phase de défuzzification, en mettant l'accent sur la conception de la base de règles et le choix du moteur d'inférence floue approprié. Nous examinerons les avantages et les inconvénients de l'utilisation du contrôle flou dans les systèmes MPPT par rapport aux techniques traditionnelles, et l'importance de cette technologie dans l'amélioration de l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

Le troisième chapitre présentera les résultats des simulations et des modèles pratiques développés pour tester les performances des techniques traditionnelles de MPPT et du contrôleur flou. Nous fournirons une analyse complète des résultats et les comparerons pour déterminer l'efficacité de chaque technique dans l'amélioration des performances du système photovoltaïque. Nous mettrons en évidence les différences essentielles entre les performances des techniques P&O et celles basées sur la logique floue, en offrant une interprétation approfondie des résultats et de leur impact sur l'amélioration de l'efficacité des systèmes solaires.

Chapitre I : OVERVIEW SUR LES COMMANDES MPPT CLASSIQUES

I.1 Introduction

L'optimisation de l'énergie solaire est essentielle pour exploiter cette ressource renouvelable de façon efficace. Le premier chapitre s'immerge dans l'univers des systèmes photovoltaïques, explorant les diverses techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Il met en perspective les fondements historiques et techniques des méthodes classiques comme "perturb and observe" et "hill climbing", et comment elles s'adaptent aux variables critiques telles que l'éclairement et la température. Cette introduction établit le cadre pour comprendre comment les générations passées ont influencé les pratiques actuelles, conduisant à une efficacité accrue dans la conversion photovoltaïque.

I.2 Historique

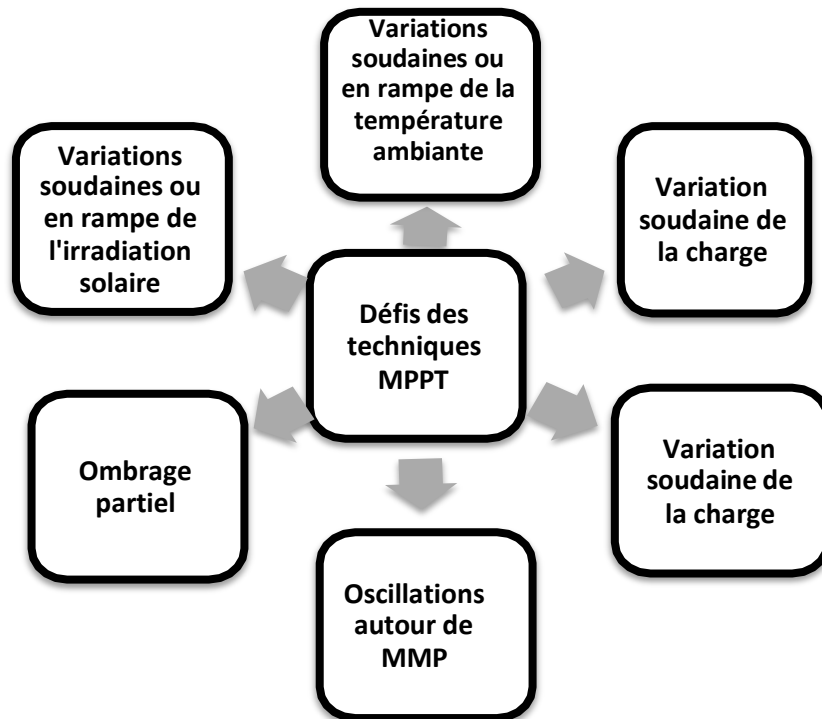


Figure I.1: Les défis auxquels sont confrontées les techniques [1]

I.2.1 Histoire de la technique perturb and observe (P&O)

En 1979, ont été les premiers à souligner le principe de P&O (perturb and observe) en utilisant les fondements de la technique d'optimisation mathématique dite "hill-climbing", qui appartient à la famille de la recherche locale. ont présenté la version finale du diagramme de

flux computationnel de la technique classique de P&O. Depuis lors, les chercheurs ont poursuivi le développement de cette technique classique de P&O en se basant sur les directions suivantes :

- **Utiliser une taille de pas variable pour améliorer les performances**

En 2004, ont développé une technique d'escalade adaptative avec une taille de pas variable, atteignant des efficacités en état stable et dynamique de 97,3 % et 96,3 %, respectivement.[2] en 2015 ont introduit une méthode utilisant une taille de pas adaptative, améliorant l'efficacité dynamique de 2 % par rapport à la technique P&O classique, avec des efficacités en état stable et dynamique de 96 % et 93,9 %. Bennett et al.[3], en 2013, ont modifié la technique P&O pour répondre à ses limites, utilisant un pas de tension plus petit commençant à 0,85 % de Voc, conduisant à des efficacités de 97,1 % (en état stable) et 96,33 % (dynamique).

- **Utilisation du paramètre basé sur le courant du module de seuil pour améliorer son efficacité dynamique**

En 2001, [4]. Ont proposé une technique basée sur une boucle supplémentaire à combiner avec la technique classique pour résoudre le problème de variation soudaine de l'irradiation solaire. Cette boucle inclut un paramètre de courant seuil pour détecter s'il y a une variation du niveau d'irradiation. Les efficacités en régime permanent et dynamique de la technique proposée sont égales à 83,6 %.

- **Utilisation d'une taille de pas de perturbation fixe pour améliorer les performances**

En 1996, [5]. ont abordé le compromis entre vitesse de suivi et amplitude d'oscillation pour la technique P&O classique, en utilisant une taille de pas fixe appropriée. En 2001[6]. ont tenté de résoudre les variations soudaines d'irradiation solaire avec une taille de pas fixe et un capteur d'irradiation, améliorant l'efficacité dynamique mais augmentant le coût et la complexité. En 2003 [7]ont proposé une technique P&O modifiée avec contrôleur PI, améliorant le damping des oscillations. En 2004,[8]. Ont implémenté la technique P&O classique pour un convertisseur boost DC–DC. En 2005, Ont atteint une efficacité de 97% sous variations soudaines d'irradiation. [9]. En 2012 ont simulé une technique MPPT différente dans MATLAB/Simulink. En 2013, ont modifié le suivi de la technique P&O classique pour les systèmes d'éclairage de rue. En 2014, [10]. Ont présenté une implémentation de la technique P&O classique pour améliorer la performance sous variation soudaine d'irradiation.

I.3 Conversion photovoltaïque

Le spectre du rayonnement solaire s'étend de l'ultraviolet au lointain infrarouge, avec un pic dans le visible. Dans l'espace, l'énergie de ce rayonnement est d'environ 1360 W/m^2 , mais elle est réduite à 1000 W/m^2 sur Terre à cause de l'absorption atmosphérique. Les travaux d'Einstein sur l'effet photoélectrique ont montré que la lumière est composée de photons, chacun portant de l'énergie selon la formule $E = hc/\lambda$. Dans la conversion photovoltaïque, les photons absorbés créent des paires électron-trou, conduisant à l'énergie électrique. Ce processus repose sur la séparation de ces paires et leur canalisation à travers un circuit externe, facilitée par les charges opposées des électrons et des trous. Ce principe sous-tend l'efficacité des cellules solaires faites de matériaux comme le silicium dopé de type n et p.

I.3.1 Principe de la conversion photovoltaïque

Le spectre du rayonnement solaire, composé de photons, s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge. Le concept de "Masse d'Air" (AM) est utilisé pour quantifier l'énergie solaire. Hors de l'atmosphère terrestre (AM0), le rayonnement solaire transporte environ 1350 W/m^2 . En traversant l'atmosphère, son intensité et son spectre sont modifiés par l'absorption et la diffusion dans les gaz, réduisant ainsi son intensité à environ 1000 W/m^2 au niveau du sol à une inclinaison de 90° (AM1)[11].

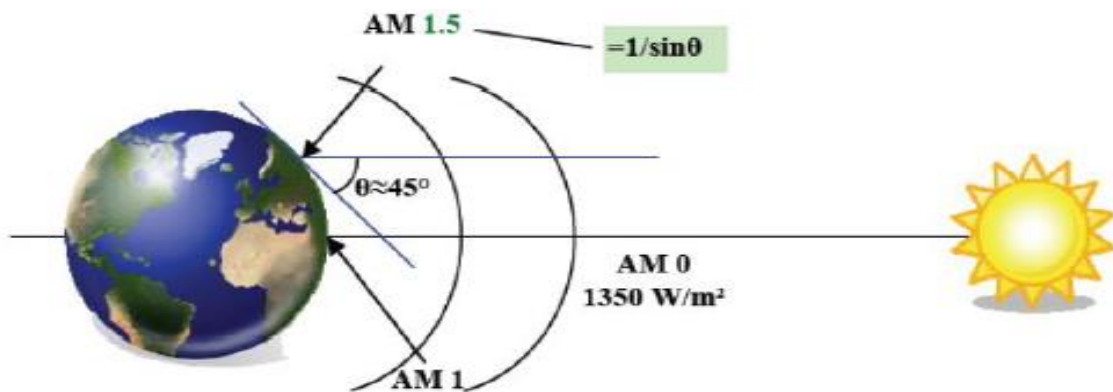


Figure I.2: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM[12].

La valeur du rayonnement global reçu au sol est déterminée en ajoutant le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus est celui dont la trajectoire du soleil au point d'observation n'est pas directe et est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou le sol. Ainsi, nous définissons le spectre global comme étant AM1.5, caractérisé par une puissance de 1000 W/m^2 , ce qui correspond à nos conditions de latitude comme illustré dans la figure I.3

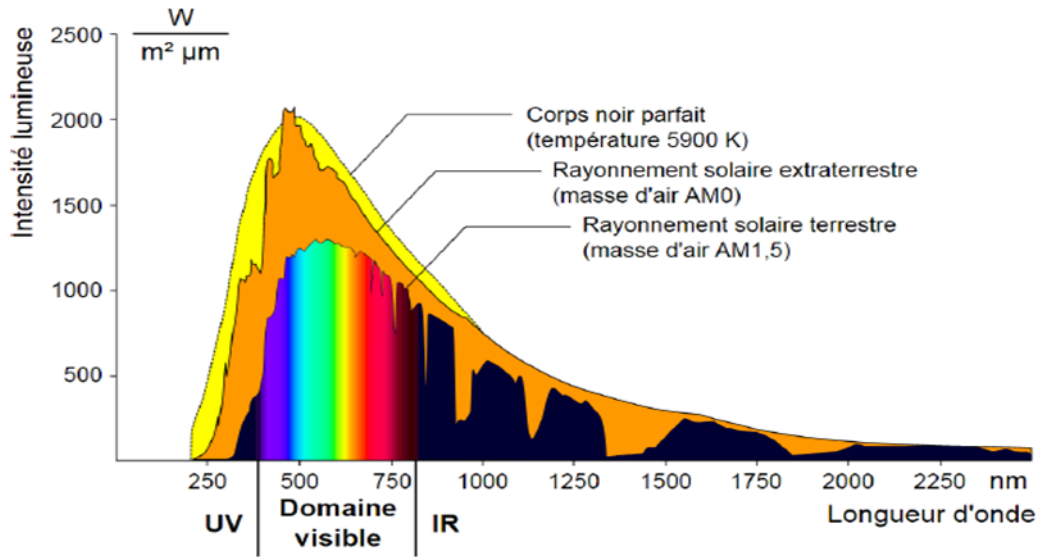


Figure I.3: Spectre du rayonnement solaire reçu hors atmosphère.

I.3.2 Répartition du rayonnement solaire

Bien que la Terre soit située à environ 150 millions de kilomètres du Soleil, elle reçoit une quantité considérable d'énergie, estimée à environ 180 térawatts. Cela fait de l'énergie solaire une alternative viable aux autres sources d'énergie. En particulier, des pays comme l'Algérie, avec une superficie vaste de 2,38 millions de kilomètres carrés et diverses zones climatiques, reçoivent plus de 3000 heures de soleil par an. Cela se traduit par une irradiance solaire moyenne quotidienne de 5 à 7 kWh/m²/jour sous des angles optimaux, soulignant le potentiel solaire significatif du pays. Avec ses huit zones climatiques, chacune recevant une exposition au soleil assez uniforme, l'Algérie démontre une opportunité considérable pour l'exploitation de l'énergie solaire[13].

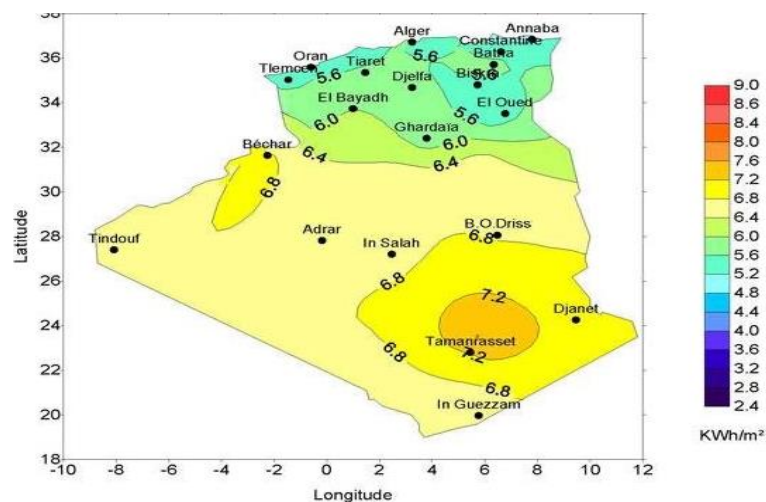


Figure I.4: La carte d'éclairement solaire de l'Algérie[12]

I.4 Générateur photovoltaïque

I.4.1 Principe

Un générateur photovoltaïque (GPV) est un dispositif qui convertit la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Il est composé de cellules photovoltaïques, souvent en silicium, qui génèrent un courant électrique lorsqu'elles sont exposées à la lumière solaire. Ces cellules sont connectées ensemble en panneaux pour augmenter la production d'énergie. L'électricité générée peut être utilisée directement, stockée dans des batteries, ou injectée dans le réseau électrique. Les GPV sont écologiques, ne produisent pas de gaz à effet de serre et fournissent une source d'énergie renouvelable et durable[14].

Le terme "générateur photovoltaïque" (GPV) désigne un module ou un panneau PV, pouvant parfois référer à l'ensemble du système PV. Dans ce contexte, GPV se rapporte à un assemblage de cellules photovoltaïques connectées en série et/ou en parallèle pour obtenir les caractéristiques électriques souhaitées comme la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert. Plusieurs modèles de GPV existent, se différenciant par leurs méthodes de calcul et les paramètres impliqués pour déterminer la tension et le courant du générateur[15].

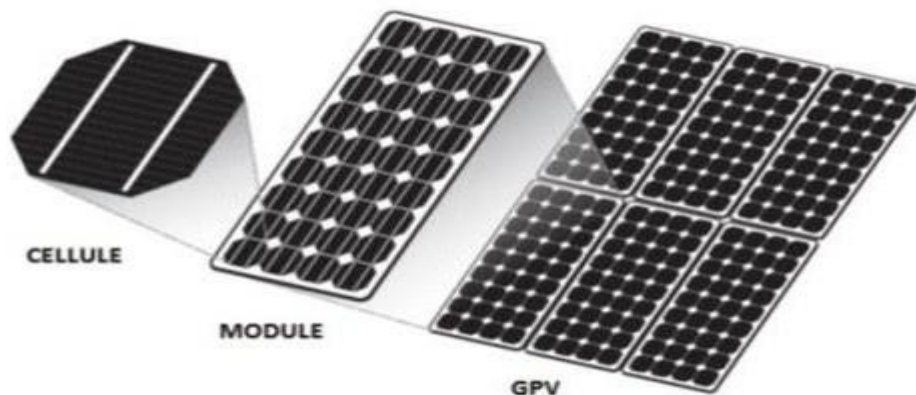


Figure I.5: Composants d'un GPV

I.4.2 Constitution d'un générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire représente une source de puissance très faible par rapport aux besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au Volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de

l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectées en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules connectées en série. Le nombre de cellules de chaque sous-réseau correspond à un compromis économique entre protection et perte d'une partie.

I.4.3 Protection

Pour transformer un module photovoltaïque en panneau, il est nécessaire d'ajouter des diodes de protection. Ces diodes jouent un rôle clé dans les configurations parallèles et en série des cellules PV. En parallèle, les cellules ont la même tension mais les courants s'accumulent.

Dans des conditions d'éclairement non uniforme, une cellule faible peut subir un courant inverse, menant à des dégâts. Les diodes en série empêchent cela. En série, le courant est constant et les tensions s'additionnent, mais une cellule peut être endommagée sous un éclairement non uniforme. Des diodes en parallèle protègent contre cet effet en limitant la tension inverse[16].

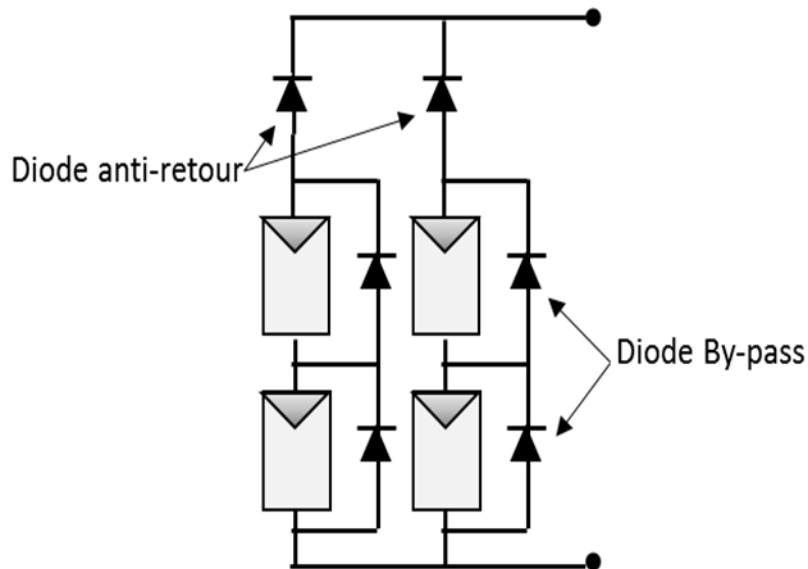


Figure I.6 : Diodes de protection des modules

I.5 Performances du GPV

I.5.1 Caractéristiques courant-tension

La courbe courant-tension d'un dipôle représente la relation entre la tension à ses bornes

et l'intensité du courant qui le parcourt. Cette caractéristique est un outil essentiel pour comprendre le comportement électrique du dipôle sous différentes conditions de fonctionnement.

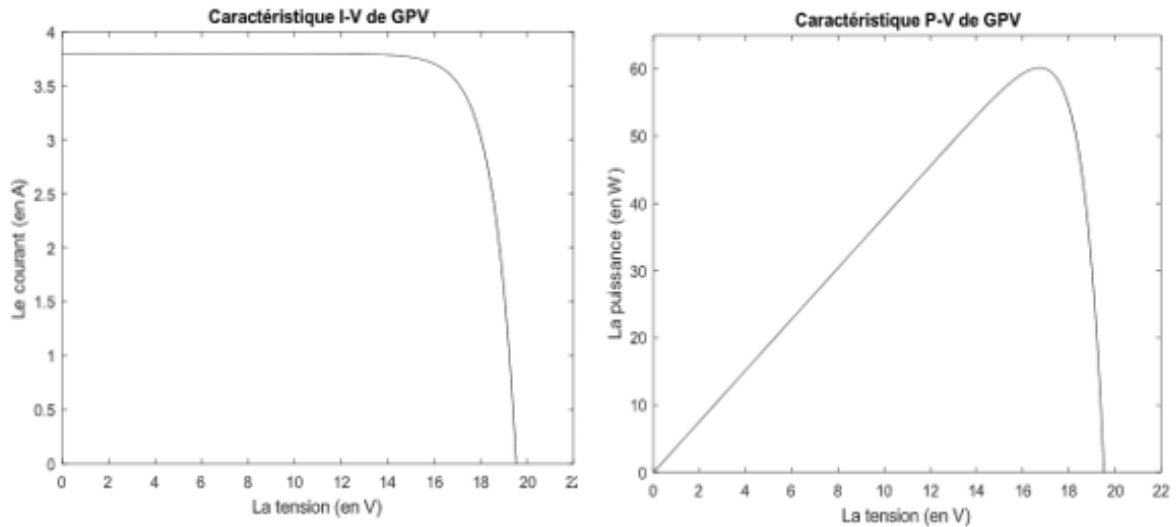


Figure I.7: Les caractéristiques I-V et P-V du GPV

La courbe courant-tension (V-I) et la courbe puissance-tension (V-P) d'un dipôle sont des éléments essentiels pour comprendre le comportement électrique du dipôle dans différentes conditions de fonctionnement. La courbe V-I fournit des informations sur la relation entre la tension aux bornes du dipôle et l'intensité du courant qui le traverse, tandis que la courbe V-P illustre la relation entre la tension et la puissance électrique consommée ou produite dans des conditions, de fonctionnement donné. Ces outils aident à déterminer les points de fonctionnement optimaux du dipôle et à améliorer son efficacité et sa performance dans diverses conditions environnementales et opérationnelles.

I.5.2 Influence de l'éclairement

L'éclairement, ou irradiance, a un impact significatif sur la performance des cellules photovoltaïques. Il correspond à la puissance de lumière solaire qui atteint l'unité de surface et est mesuré en watts par mètre carré (W/m^2). Plus l'éclairement est élevé, plus le courant généré par la cellule photovoltaïque augmente. Cela affecte directement la quantité d'électricité qu'une cellule ou un module PV peut produire. Par conséquent, la maximisation de l'éclairement est cruciale pour améliorer l'efficacité et la production énergétique des systèmes solaires photovoltaïques.

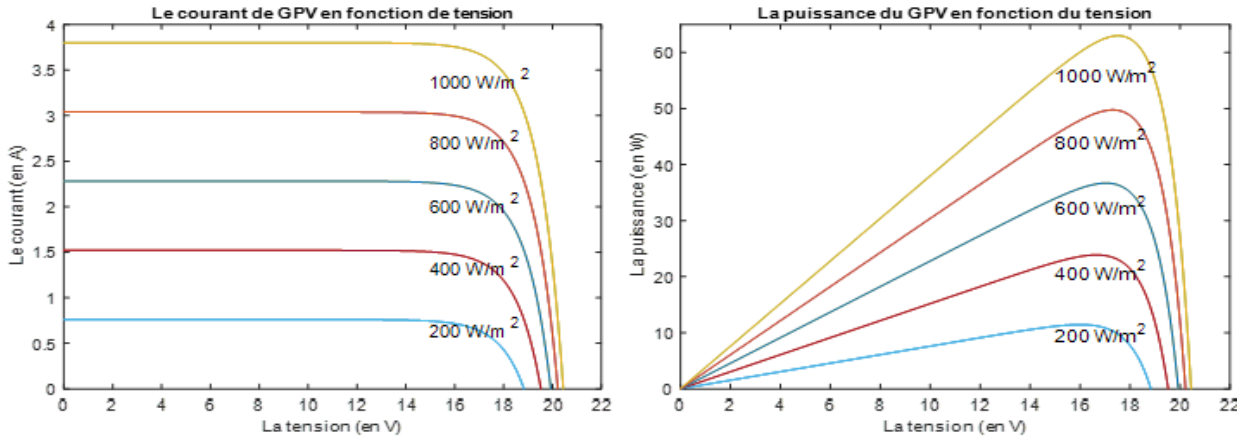


Figure 1.8 : Effet de la variation d'éclairement

I.5.3 Influence de la température

La figure associée démontre comment la température impacte la caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque. L'augmentation de la température entraîne une légère hausse du courant; cependant, elle exerce un effet défavorable sur la tension en circuit ouvert qui tend à diminuer. En conséquence, on observe une réduction de la puissance maximale produite par le générateur.

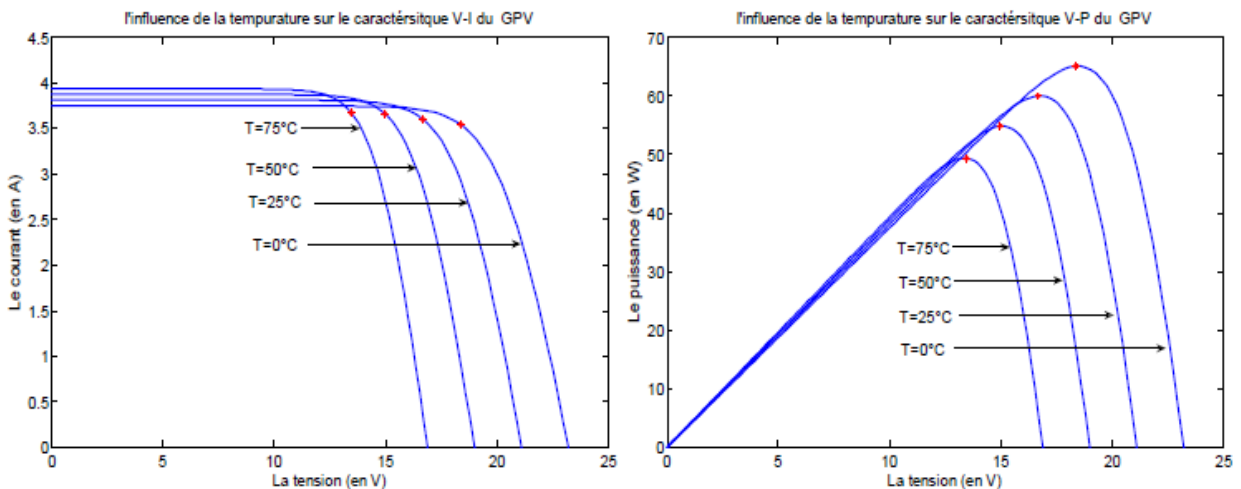


Figure 1.9 : l'influence de la température

I.5.4 Association des cellules photovoltaïques en série

En configuration série, chaque cellule photovoltaïque est traversée par le même courant et l'addition des tensions de chaque cellule forme la caractéristique globale du groupe. Ainsi, la caractéristique I-V de l'ensemble obtenu en série, illustrée par la figure (I.12), résulte de la combinaison en série de N cellules identiques, démontrant les valeurs du courant de court-circuit (I_{sc}) et de la tension en circuit ouvert (V_{oc}).

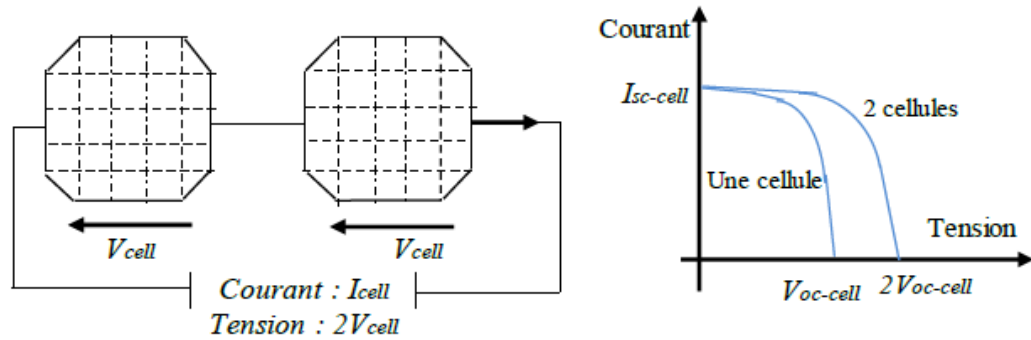


Figure I.10: Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension.

I.5.5 Association des cellules photovoltaïques en parallèle

Les caractéristiques d'un groupement de cellules photovoltaïques en parallèle diffèrent de celles en série. Pour des cellules connectées en parallèle, elles partagent la même tension, et la caractéristique globale est obtenue par la somme des courants individuels. Ainsi, les caractéristiques courant-tension (I_{sc} , V_{oc}) d'un assemblage parallèle sont obtenues en additionnant les courants des cellules identiques en parallèle.

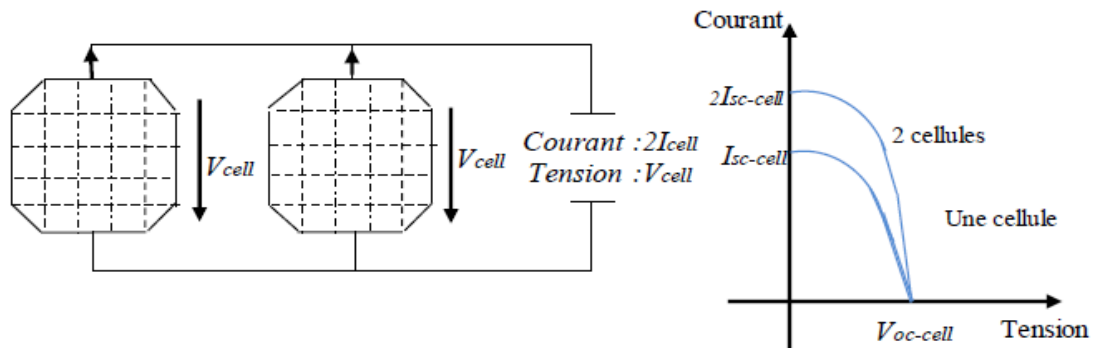


Figure I.11: Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension.

I.6 Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale

I.6.1 Principe

Le fonctionnement optimal d'un générateur PV à sa puissance maximale, connu sous l'acronyme MPP (Maximum Power Point), survient lorsque le produit du courant (I) et de la tension (V) est au plus élevé. Les systèmes PV modernes utilisent souvent des trackers MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui ajustent en continu le fonctionnement électrique du générateur pour capter le maximum d'énergie solaire possible en fonction des conditions d'éclairement et de température. Ce point varie avec les conditions environnementales et est crucial pour l'efficacité énergétique des systèmes solaires.

I.7 Les commandes MPPT classique

I.7.1 Commande "perturb and observe (P&O)"

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$) [17]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [18]

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{PV} , ce qui engendre une variation de la puissance [19]. Figure I.12 montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié

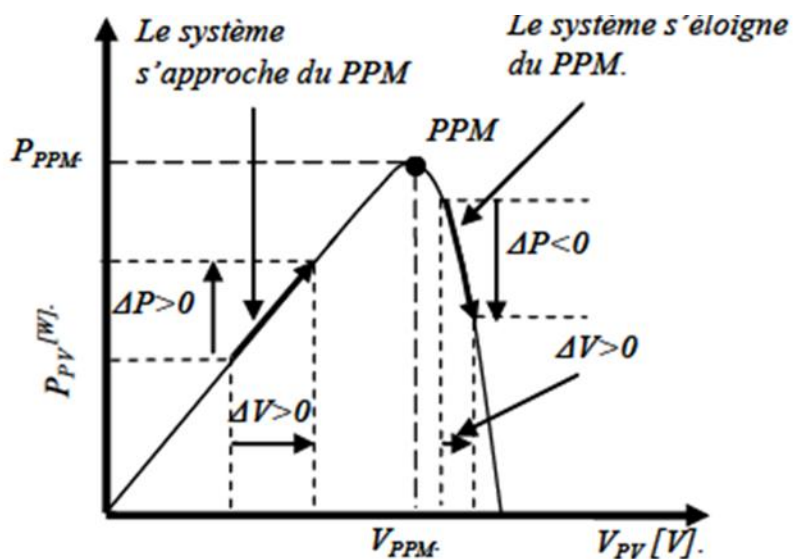


Figure I.12: Recherche PPM par méthode (P&O)

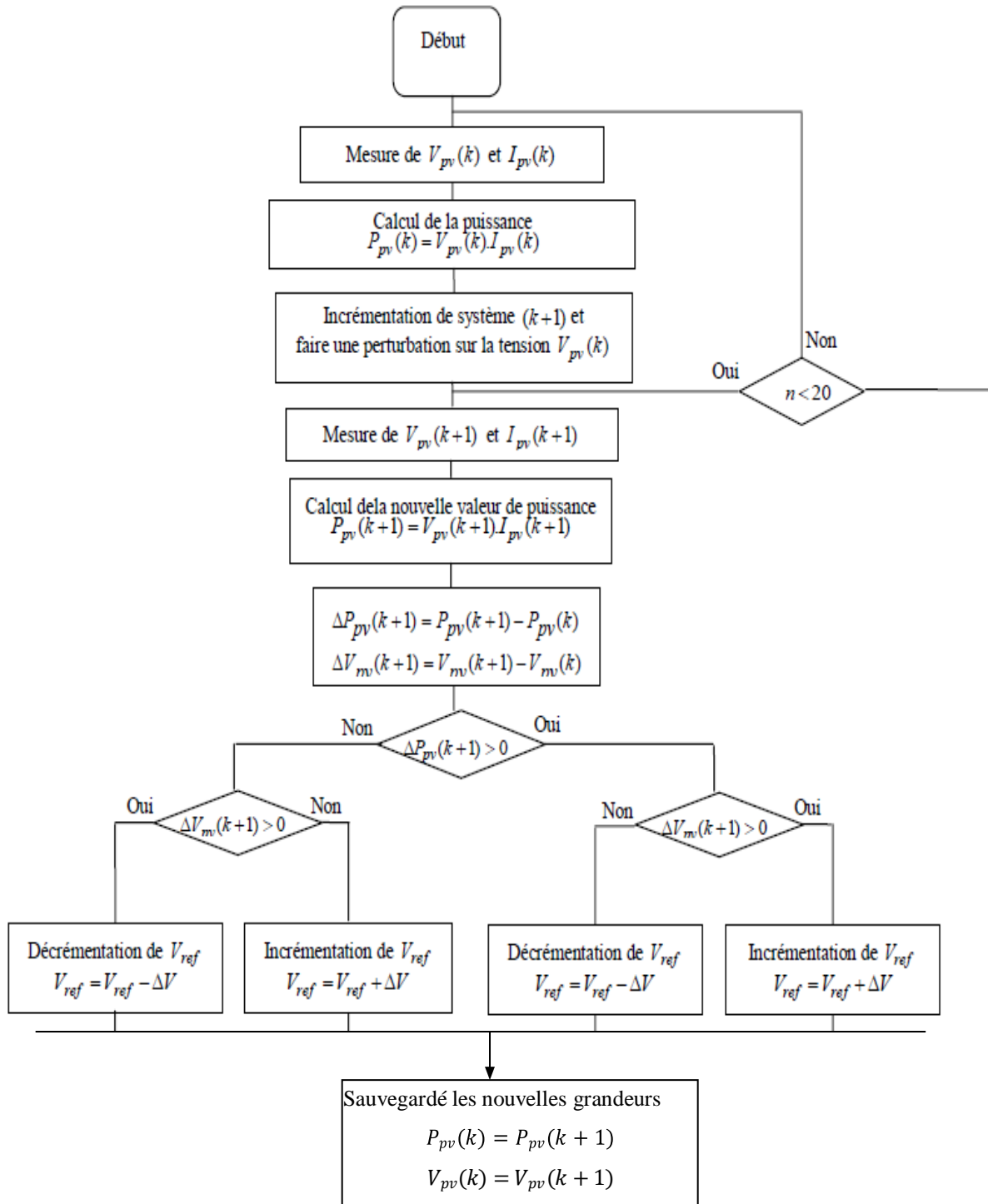


Figure I.13 : Algorithme type de la méthode P&O.

Tout d'abord, la tension V_{pv} et le courant I_{pv} sont mesurés pour calculer la puissance $P_{pv}(k)$. Ensuite, cette valeur $P_{pv}(k)$ est comparée avec la valeur de puissance obtenue lors de la dernière mesure, $P_{pv}(k-1)$. Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrémation de la tension V_{ref} continuera dans la même direction que lors

du dernier cycle. Ceci est réalisé en testant la variation de tension ΔV_{pv} .

Si $\Delta V_{pv} > 0$ pour , cela signifie que la tension V_{pv} a été augmentée lors du dernier cycle, ce qui peut être exprimé comme $V_{ref}(k + 1) = V_{ref}(k) + \Delta V$.

Si $\Delta V_{pv} < 0$, cela signifie que nous avons diminué V_{pv} au cours du dernier cycle, ce qui signifie que nous allons mettre à jour V de telle sorte que $V_{ref}(k + 1) = V_{ref}(k) - \Delta V$. Ainsi, nous continuons dans la voie où la valeur de P continue à augmenter.

Si la puissance fournie par le panneau solaire a diminué depuis la dernière mesure, alors l'incrémentation ou la décrémentation de la tension de référence, V_{ref} , se fera dans le sens opposé par rapport au dernier cycle, ce qui sera déterminé également par le test sur ΔV .

I.7.1 Commande " hill climbing "

La méthode Hill Climbing consiste à ajuster progressivement le fonctionnement du générateur photovoltaïque afin de gravir la courbe de puissance jusqu'à atteindre le sommet, où le générateur opère à sa puissance maximale. On explore les changements de puissance selon deux directions possibles et on considère que le point de puissance maximale (PPM) est trouvé quand le changement de puissance par rapport au rapport cyclique est nul, comme la figure I.14.

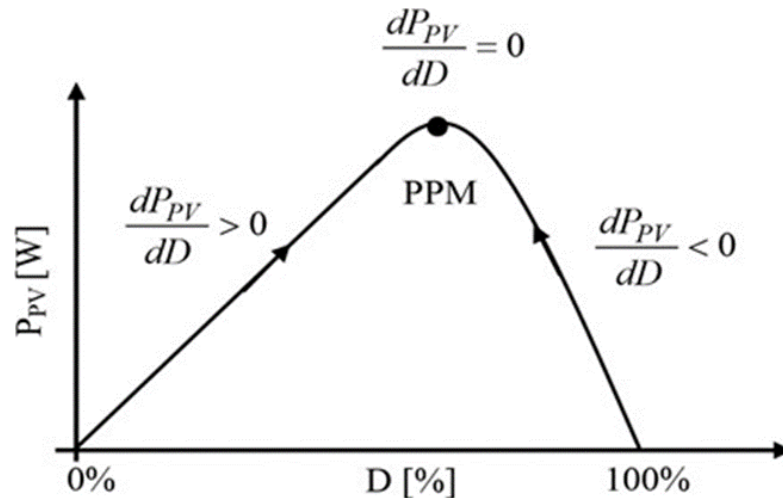


Figure I.14: Relation entre P_{pv} et le rapport cyclique D du convertisseur statique

Cette courbe illustre la méthode de suivi du point de puissance maximale (PPM) d'un générateur photovoltaïque. Sur l'axe horizontal, D représente le rapport cyclique, tandis que l'axe vertical montre la puissance PV. À gauche du PPM, l'augmentation de D accroît la puissance ; à droite, elle la réduit. Le PPM est le sommet où la dérivée de la puissance par rapport à D est zéro.

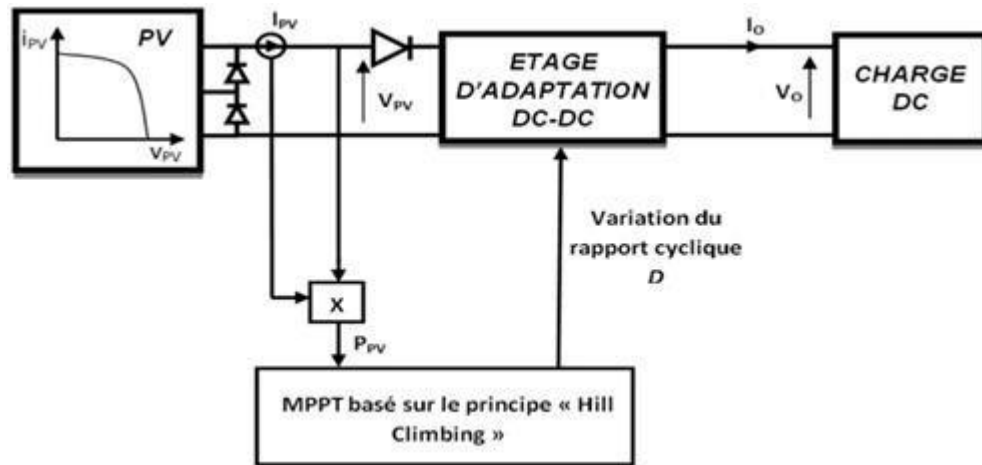


Figure I.15: Schéma de principe de la commande hill climbing

Ce schéma illustre le système MPPT (Maximum Power Point Tracking) basé sur la technique du Hill Climbing pour un panneau photovoltaïque (PV). Il montre comment le panneau PV est connecté à un étage d'adaptation DC-DC, qui optimise la tension et le courant pour la charge DC en fonction des variations du rapport cyclique D . Le MPPT ajuste ce rapport pour maximiser la puissance P_v produite par le panneau, assurant que la charge reçoit constamment le maximum d'énergie disponible.

I.8 Conclusion

Le premier chapitre offre une exploration approfondie des stratégies MPPT classiques, essentielles pour optimiser la production d'énergie des systèmes photovoltaïques. En retraçant l'histoire et l'évolution de techniques telles que P&O, le chapitre éclaire leur pertinence actuelle. Il souligne aussi le rôle crucial de l'éclairement et de la température dans la performance des générateurs PV, démontrant l'importance de l'adaptation aux conditions environnementales pour maximiser l'efficacité énergétique.

En plus des méthodes classiques mentionnées, des techniques avancées de contrôle du point de puissance maximale ont été développées ces dernières années. Ces techniques modernes incluent l'utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones artificiels et des algorithmes génétiques. Ces approches novatrices visent à améliorer les performances et l'efficacité des systèmes MPPT, en particulier dans des conditions variables d'ensoleillement et de températures. Les avantages et les applications de ces techniques modernes seront abordés plus en détail dans le chapitre suivant.

Chapitre II : CONTROLEUR FLOU POUR LA RECHERCHE DU PPM

II.1 Introduction :

Ce chapitre propose une autre approche de la commande MPPT, utilisant une technique issue de l'intelligence artificielle, à savoir la logique floue. Le contrôleur proposé, le MPPT Flou, repose sur l'expertise de l'opérateur. Les commandes basées sur la logique floue (Fuzzy Logic Control) gagnent en popularité, notamment grâce aux avancées dans les microcontrôleurs. Ces techniques présentent l'avantage de pouvoir opérer avec des valeurs d'entrée peu précises, sans nécessiter un modèle mathématique. De plus, elles sont capables de gérer les non-linéarités.

Le fonctionnement d'une commande floue repose sur deux variables d'entrée, à savoir l'erreur (e) et la variation de l'erreur (Δe), ainsi qu'une variable de sortie, Δd (variation du rapport cyclique), qui gouverne le convertisseur statique pour atteindre le PPM. La valeur de cette variable de sortie est déterminée en se basant sur une table de vérité et l'évolution des paramètres d'entrée. Des variables linguistiques sont sélectionnées pour évaluer la proximité du point de fonctionnement par rapport au PPM, dans le but d'atteindre rapidement ce point. Dans cette optique, la méthode Mamdani est adoptée comme méthode d'inférence floue, en utilisant les opérateurs MAX et MIN.

Généralement, le processus de commande par logique floue est constitué de trois étapes souvent désignées dans la littérature :

- La fuzzification.
- La consultation de la table de vérité.
- La défuzzification.

II.2 Généralité sur la logique floue

Les fondements théoriques de la logique floue, également connue sous le terme anglais de "fuzzy logic", furent établis en 1965 par *Lotfi Zadeh* [20] [21]. le Professeur de l'Université de Berkeley en Californie. La caractéristique prédominante de la logique floue réside dans sa capacité à représenter des données de manière linguistique. Elle permet la description d'un système à travers une base de règles qui reflète le processus de raisonnement humain. En outre, elle offre des outils mathématiques pour traiter les problèmes d'incertitude et d'imprécision. Cette approche de raisonnement linguistique s'avère particulièrement efficace pour réduire, dans de nombreuses situations, les temps de calcul et améliorer la capacité de description des processus pour lesquels le modèle mathématique est inconnu, complexe ou lorsque l'expérience humaine joue un rôle significatif.

De nos jours, les applications de la logique floue se sont répandues dans divers

domaines. Parmi celles-ci, on peut citer les contrôleurs flous, les systèmes experts flous, ainsi que les systèmes de diagnostic, de classification et de reconnaissance des formes flous, entre autres. Le contrôle flou, considéré comme l'un des domaines d'application les plus importants de la logique floue, a été développé à partir de 1975 par E. Mamdani[22]. Depuis lors, il a suscité un vif intérêt parmi les chercheurs du monde entier.

Peu de temps après, en 1977, le Danois Ostergaard a appliqué la logique floue à la commande de tubes broyeurs utilisés dans la fabrication de ciment[23]. À cette époque, la majorité des études portant sur les systèmes de régulation exploitant la logique floue ont été menées en Europe[24] [25] [26]. À partir d'environ 1985, les Japonais ont largement adopté la logique floue dans des produits industriels et de consommation pour résoudre des problèmes de réglage et de commande. Parmi les exemples figurent le contrôle de programmes de certaines machines à laver, les équipements électroniques et vidéo, ainsi que le traitement des eaux usées, entre autres[27] [28] [29]. Les nombreux succès rencontrés au Japon ont captivé l'Europe, qui redécouvre ainsi une approche qu'elle connaissait déjà.

II.3 Principe d'une commande floue:

La structure d'une commande floue peut être décomposée en trois grands modules [30][31].

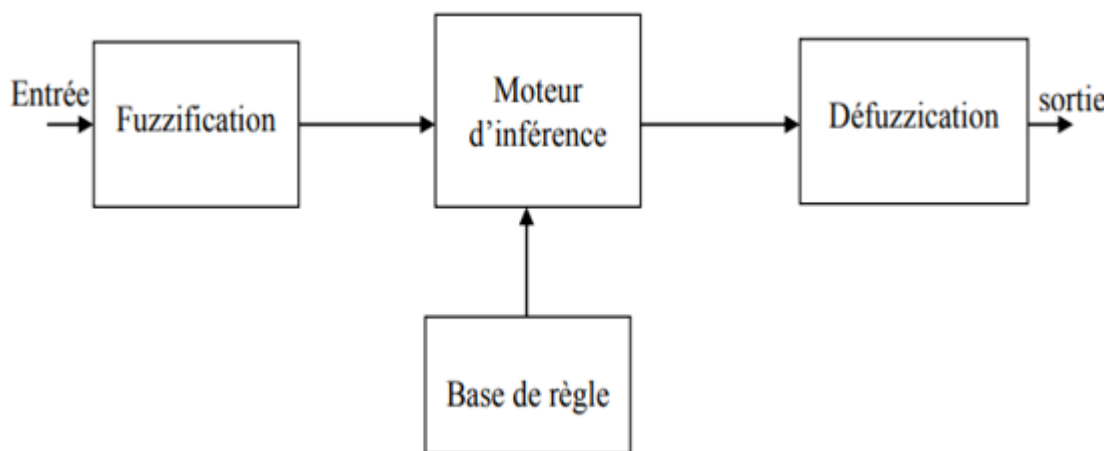


Figure II.1 : structure d'une commande floue

Le premier module de cette structure se concentre sur le traitement des entrées du système, dénommé fuzzification. Il vise à associer à chaque valeur d'entrée réelle, par le biais de fonctions d'appartenance, un degré d'appartenance à chacun des sous-ensembles flous définis sur l'ensemble du domaine.

Le deuxième module est constitué du moteur d'inférences et de la base de règles. Cette dernière est constituée de règles du type "Si..., Alors....", permettant de passer des degrés d'appartenance des variables d'entrée aux degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous de la variable de commande. Le moteur d'inférence, quant à lui, génère des conclusions à partir

des entrées et des règles actives, calculant les degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous correspondant à la commande du système.

Le dernier module, l'interface de défuzzification, opère la conversion des degrés d'appartenance des sous-ensembles flous de commande en grandeurs numériques. Il s'agit de l'opération inverse de celle réalisée par le module de fuzzification.

À partir de cette structure, différents types de correcteurs flous peuvent être définis. La section suivante expose les structures des correcteurs flous [30].

II.4. Etapes de mise en œuvre d'un contrôleur flou.

II.4.1. Etape de fuzzification

La fuzzification est une étape fondamentale dans la modélisation des systèmes flous. Elle implique la définition des fonctions d'appartenance pour chaque variable d'entrée, permettant ainsi de convertir les grandeurs physiques en variables linguistiques. Ces variables linguistiques sont ensuite manipulées par des inférences pour effectuer des décisions et des actions. Dans le contexte du réglage des systèmes flous, afin de faciliter leur implémentation en temps réel, il est courant d'utiliser des formes trapézoïdales et triangulaires pour les fonctions d'appartenance. Typiquement, plusieurs ensembles, généralement trois, cinq ou sept, sont définis pour chaque variable d'entrée. Le choix du nombre d'ensembles à utiliser est déterminé par la précision et la dynamique requises pour le réglage, tout en tenant compte de l'impact sur le temps de calcul nécessaire pour les opérations d'inférence.

Une augmentation de la granularité de la subdivision ne conduit généralement pas à une amélioration significative des performances dynamiques du système de contrôle basé sur la logique floue. En considérant deux états flous, "Positif" et "Négatif", pour chaque entrée, trois actions distinctes peuvent être envisagées pour moduler la sortie du système de commande floue, définies par les sous-ensembles flous "Positif" (P), "Nul" (Z) et "Négatif" (N) [24,25].

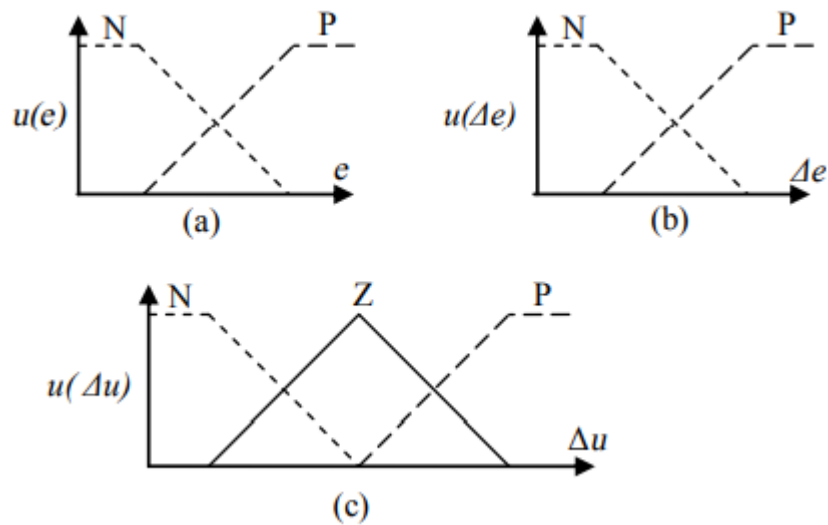


Figure II. 2 Sous ensembles flous classiquement utilisés : (a) Fonction d'appartenance de Fonction de l'erreur e , (b) Fonction d'appartenance de la variation de l'erreur Δe et (c) Fonction d'appartenance de la variable de sortie Δu

II.4.2. Etape d'inférence

Cette phase implique l'établissement des règles qui gouvernent la génération de la commande en fonction des valeurs de l'erreur et de sa dérivée temporelle. Habituellement, la commande dépend à la fois de l'erreur et de sa variation temporelle. Les règles floues établissent des corrélations entre la sortie souhaitée et les entrées, permettant ainsi de formuler des inférences floues.

Une règle floue se compose d'une prémisse du type "Si l'erreur est négative ET que sa variation est négative", avec une conclusion floue du type "Alors la variation de la commande est grande et positive". Lorsque chaque variable d'entrée est définie par trois ensembles flous, cela engendre neuf règles floues distinctes.

Après la spécification des règles, la prochaine étape consiste à calculer les degrés d'appartenance de la variable de sortie à tous les ensembles flous qui lui sont associés. Chaque règle est construite à partir de prémisses reliées par les opérateurs logiques ET et OU, et aboutit à une implication grâce à l'opérateur logique ALORS. La méthode de Mamdani propose d'utiliser l'opérateur minimum pour le ET et l'opérateur maximum pour le OU. Il est possible que plusieurs règles soient activées simultanément, tant que chacune de leurs prémisses possède un degré d'appartenance non nul. Cela dépend du choix des fonctions d'appartenance utilisées ; en particulier, toutes les règles peuvent être plus ou moins activées à chaque instant d'échantillonnage si des fonctions d'appartenance de forme gaussienne sont sélectionnées. L'agrégation de ces règles, processus visant à obtenir une valeur unique pour la variable de sortie, est réalisée en utilisant l'opérateur maximum, simulant ainsi une connexion logique de type OU entre les règles [32,33].

II.4.2.1. Moteur d'inférence flou

Cette section vise à fournir une analyse détaillée de la structure adoptée pour les régulateurs flous de type PI et PID. Ces deux régulateurs partagent le même moteur flou, dont la configuration de type PD est illustrée dans la figure II.3.

Deux entrées sont prises en compte : l'erreur e et sa dérivée, pour une commande unique SPD . Ces entrées sont normalisées à l'aide de gains de normalisation, gem pour l'erreur et $gdem$ pour sa dérivée. Un gain de dénormalisation, gm , est appliqué à la sortie. Ainsi, l'univers du discours pour le moteur flou est ramené à l'intervalle $[-1,+1][[-1,+1]$. Ces facteurs de normalisation définissent le domaine de variation normalisé des entrées, tandis que le gain de dénormalisation détermine la sortie du régulateur flou de type PD. Ces éléments agissent globalement sur la surface de commande en modifiant l'étendue de l'univers du discours des grandeurs de commande.[34]

Concernant le module de fuzzification, divers types de fonctions d'appartenance sont disponibles, tels que les fonctions triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes, pour n'en citer que quelques-unes. Ces fonctions sont définies sur l'univers du discours normalisé afin d'attribuer des degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous en entrée. Les positions des fonctions d'appartenance influencent également de manière globale la surface de commande.

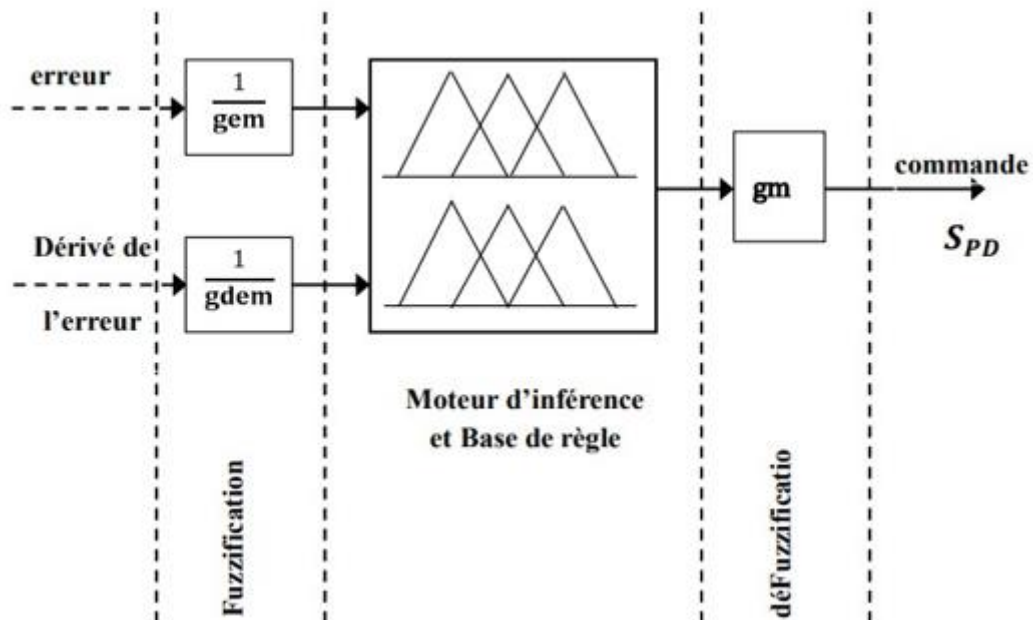


Figure II. 3 Structure du correcteur flou de type PD

Dans le domaine de la commande, il est fréquent que les fonctions d'appartenance soient stratégiquement placées pour susciter une réponse réactive lorsque la valeur de la variable contrôlée s'écarte de la référence, tout en maintenant un gain moindre autour de cette référence.

Pour le deuxième module, la base de règles floues établit les correspondances entre les différentes combinaisons de classes d'événements en entrée et les commandes correspondantes. Chaque ensemble flou d'entrée activé est associé à un ensemble flou de sortie par la base de règles, ce qui confère à celle-ci une influence locale sur la surface de commande. Ajuster une règle permet d'adapter précisément la commande en réponse à une condition particulière.

Enfin, plusieurs méthodes sont disponibles pour la défuzzification. La méthode du centre de gravité, parmi les plus simples et les plus couramment utilisées, consiste à déterminer le centre de gravité d'un système de sous-ensembles flous pondérés par leurs degrés d'appartenance. Cette méthode permet de définir une valeur de commande réelle en fonction des sous-ensembles flous de commande activés.

Il convient de noter qu'il existe une dualité entre l'action sur les fonctions d'appartenance et les gains de normalisation et de dénormalisation, chacun de ces éléments influençant globalement la surface de commande. En effet, en ajustant les coefficients de normalisation, une même position de fonction d'appartenance peut activer un même sous-ensemble flou pour des états différents du système. Cette propriété est largement exploitée dans la définition de réglages de correcteurs flous "simples", notamment dans les réglages prédéfinis présentés dans [34], où les positions des fonctions d'appartenance demeurent constantes et les gains de normalisation sont calculés en fonction du système contrôlé.

II.4.2.2. Méthode d'inférence max-min (Mamdani).

En utilisant la méthode d'inférence max-min, l'opération "ALORS" est interprétée par la prise du minimum entre la valeur de la règle et la fonction d'appartenance considérée pour la sortie. Par conséquent, la règle : "Si l'erreur est P et la variation de l'erreur est Z ALORS la commande est P" est exprimée par la surface hachurée dans la figure (II.4), qui représente la fonction d'appartenance partielle.

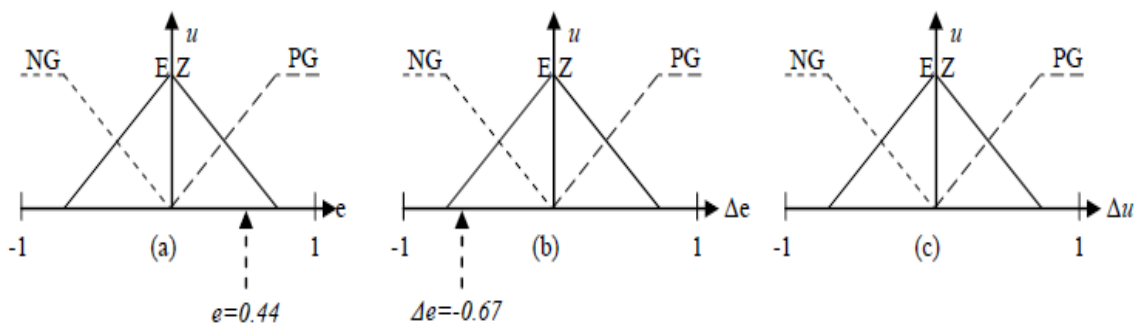


Figure II. 4 Définition d'ALORS dans la méthode d'inférence max-min.

Par ailleurs l'interaction entre les règles sera nommée OU ainsi, on considère que les deux règles suivantes :

- Si e est EZ et Δe est NG ALORS u est NG
- Si e est PG et Δe est EZ ALORS u est PG
- Se lisent :
- Si e est EZ et Δe est NG ALORS u est NG
- Si e est PG et Δe est EZ ALORS u est PG

Et ce OU se traduit par l'opération max. Nous obtenons ainsi la fonction d'appartenance résultante

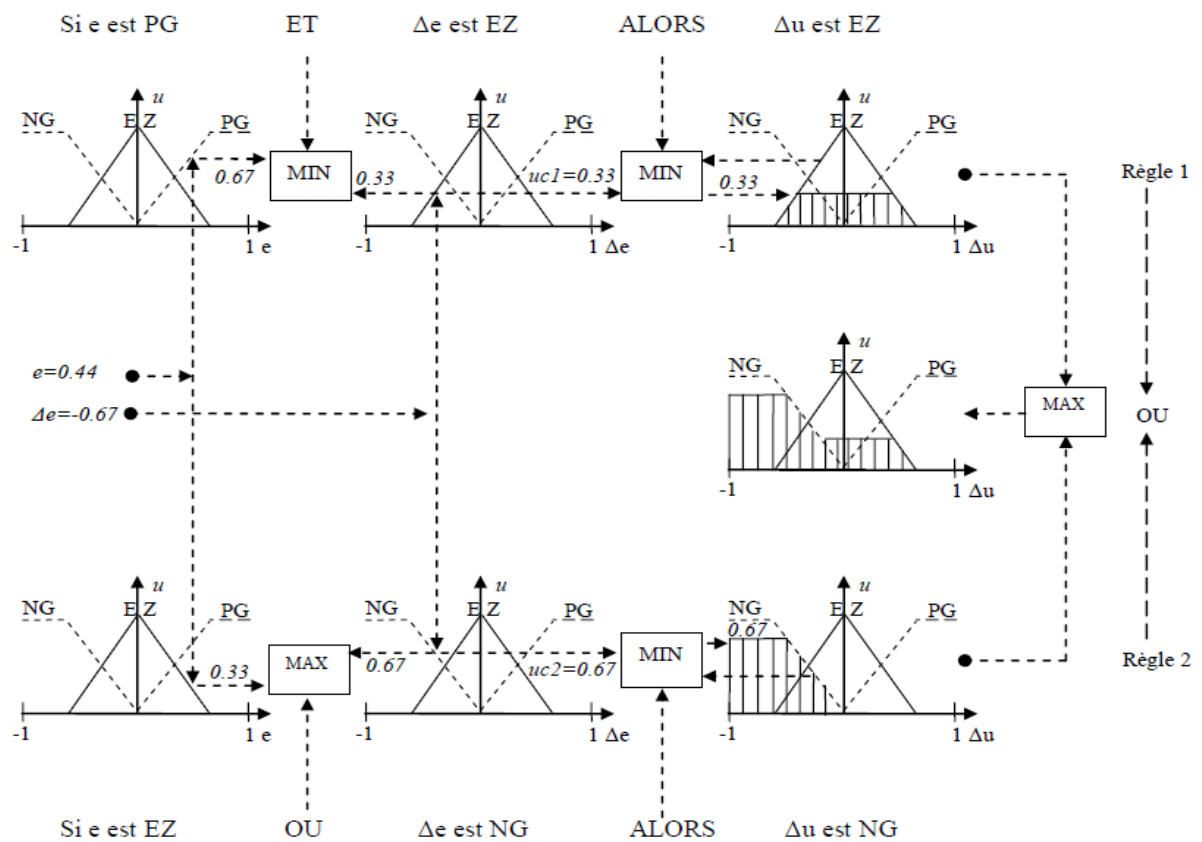


Figure II. 5 Définition de OU dans la méthode d'inférence max-min.

L'application de l'ensemble des règles donne la fonction d'appartenance partielle représentée sur la figure (II.5)

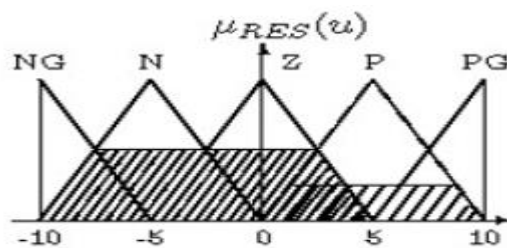


Figure II. 6 Fonction d'appartenance résultante

II.4.2.3. Choix des éléments du moteur d'inférences floues

La nécessité de simplifier les ajustements des commandes floues conduit à faire des choix structuraux spécifiques pour le contrôleur. Cette section vise à présenter ces choix.

Le premier aspect concerne la nature des fonctions d'appartenance en entrée. Afin de faciliter les réglages du contrôleur flou, des formes triangulaires sont adoptées, permettant une manipulation aisée des fonctions linéaires par morceaux en entrée. Les fonctions d'appartenance sont disposées de manière à ce qu'à tout moment, seulement deux d'entre elles soient activées pour chaque entrée. Ce choix présente plusieurs avantages. Tout d'abord, en limitant les interactions entre les paramètres, la commande est considérablement simplifiée. De plus, il permet une action très ciblée sur la surface de commande. Enfin, en limitant le nombre de fonctions actives simultanément, le temps de calcul nécessaire au traitement flou sur le calculateur est également réduit, rendant possible une implantation sur microcontrôleur.

Après avoir déterminé le type de fonction d'appartenance en entrée, il est nécessaire de fixer leur nombre, c'est-à-dire la couverture de l'univers du discours. Un nombre élevé de fonctions augmente le nombre de sous-ensembles flous et la sensibilité de la commande floue. Cependant, cette augmentation implique également un nombre croissant de paramètres à ajuster, ce qui peut poser des problèmes en termes de temps et de difficulté de réglage. Pour trouver un compromis satisfaisant entre la sensibilité de la commande et la facilité de réglage, nous fixons le nombre de fonctions d'appartenance à sept [35].

II.4.2.4. Base de règles floues (un ensemble de règles de type SI-ALORS)

Ce bloc de connaissances représente l'expertise ou le savoir-faire de l'opérateur concernant le comportement du système. Il englobe toutes les informations et connaissances pertinentes dans le domaine d'application, ainsi que le résultat de commande anticipé. Il est utilisé pour déterminer le signal de sortie du contrôleur flou et exprimer la relation entre les variables d'entrée, transformées en variables linguistiques, et les variables de sortie, également converties en variables linguistiques [20]. Par conséquent, il est constitué d'un ensemble de règles formulées sous la forme "Si... Alors...". En général, la i -ème règle floue peut être représentée par la relation suivante :

➤ Modèle de Mamdani :

$$R^i: \text{Si } x_1 \text{ est } F_1^i \text{ et } x_2 \text{ est } F_2^i \text{ et } \dots x_n \text{ est } F_n^i \text{ Alors } y_i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots a_n^i x_n \quad (\text{II. 1})$$

Où : $i = 1, \dots, m$.

➤ m est le nombre total des règles.

- F_1, F_2, \dots, F_n sont les ensembles flous (valeurs linguistique) des entrées (x_1, x_2, \dots, x_n)
- G_j est l'ensemble flou correspondant à la sortie y_j .
- Les $a_0^i, a_1^i, \dots, a_n^i$ sont paramètres ajustables des conséquences de la règle R_i .

On peut écrire les règles d'inférence sous forme d'une matrice appelée Matrice d'inférence, qui est généralement antisymétrique. A titre d'exemple, si on considère un contrôleur flou à deux entrées caractérisées par trois ensembles flous et une sortie, alors la matrice d'inférence peut prendre la forme suivante :

Tableau II. 1 Matrice d'inférence floue

$x_2 \backslash x_1$	F_1^1	F_1^2	F_1^3
F_1^1	G_1	G_4	G_7
F_1^2	G_2	G_5	G_8
F_1^3	G_3	G_6	G_9

II.4.1. Etape de défuzzification.

La dernière étape pour avoir un système flou opérationnel s'appelle la défuzzification. Lors de la seconde étape, on a généré un tas de commandes sous la forme de variables linguistiques (une commande par règle). Le but de la défuzzification est de fusionner ces commandes et de transformer les paramètres résultants en donnée numérique.[36]

II.4.1.1. Méthode du centre de gravité.

La seconde méthode est la méthode du centre de gravité. Elle consiste à prendre l'abscisse correspondant au centre de gravité de la fonction d'appartenance. Formellement, on l'exprime comme :

$$\mathbf{Valeur} = \frac{\int s \mu(x).xd(x)}{\int s \mu(x).xd(x)} \tag{II. 2}$$

Avec S, le domaine de la fonction d'appartenance La défuzzification est une partie délicate à implémenter dans un système flou. En effet, elle consomme généralement pas mal de ressources informatiques pour pouvoir transformer les variables linguistiques en données numériques, car dans cette partie, on manipule des fonctions. Ceci peut être un point critique dans un système embarqué et le choix de la méthode de défuzzification y est donc crucial.[36]

II.5. Domaines d'applications de la logique floue

Parmi les multiples applications de la logique floue, la commande floue se distingue comme le domaine d'application le plus dynamique à l'échelle mondiale. Les champs d'application de la logique floue sont vastes et variés. Ils incluent [37][38] :

- En ingénierie automatique, pour la commande et la régulation floues, entre autres.
- En traitement du signal, pour la fusion de données, la classification, la reconnaissance de formes, ou la recherche d'informations, par exemple.
- En robotique, pour la planification de trajectoires, entre autres applications.
- En traitement d'images, pour la réduction du bruit, l'interpolation, et autres procédés.

La logique floue trouve donc naturellement sa place dans de nombreux secteurs d'activité, tels que :

- La médecine (diagnostic assisté, guidage de systèmes chirurgicaux, comme la chirurgie au laser pour les yeux, etc.).
- Le contrôle aérien.
- La gestion des feux de circulation.
- Les secteurs des assurances et des finances (gestion des risques, aide à la décision).
- L'environnement (prévisions météorologiques, etc.).
- La robotique (systèmes de freinage ABS, machines à laver, etc.).
- Et bien d'autres encore.

II.6. Avantages et Inconvénients du réglage par logique floue

II.6.1. Avantages :

- Pas de modèle mathématique requis pour le procédé à réguler.
- La théorie est simple et peut s'appliquer à des systèmes complexes.
- La commande floue est en général robuste.
- La commande peut facilement être auto-adaptative.
- La commande floue permet la capitalisation du savoir-faire.
- La commande floue conduit à un code informatique clair et lisible,

II.6.2. Inconvénients

- La technique de réglage est totalement empirique.
- Les performances dépendent directement de l'expertise.
- Il y a aucune démonstration possible, par exemple il est impossible de prouver la stabilité de la boucle.
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause du fonctionnement non linéaire
- La cohérence des inférences non garantie à priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

II.7 Conclusion

Ce chapitre a abordé la commande du Point de Puissance Maximale (MPPT) en utilisant la logique floue, ainsi que son application spécifique à un générateur photovoltaïque. La logique floue a été introduite et le moteur d'inférences flou utilisé dans la plupart des architectures de commande basées sur cette logique a été examiné en détail. Étant donné la complexité associée à la manipulation d'un grand nombre de paramètres dans ce type de commande, des stratégies de simplification ont été discutées, mettant en lumière les inconvénients liés à leur ajustement. Ces simplifications reposent notamment sur l'identification de symétries afin de réduire la complexité du système.

Chapitre III: Résultats de Simulations et Interprétation

III.1 Introduction :

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelable et respectueuse de l'environnement les plus prometteuses à l'ère moderne. Cependant, pour exploiter pleinement cette source d'énergie, il est essentiel de concevoir un système efficace pour suivre le point de puissance maximale (MPPT) des panneaux photovoltaïques. Ce chapitre vise à présenter un modèle mathématique précis des cellules photovoltaïques et du convertisseur électrique associé, ainsi qu'à développer un nouvel algorithme de suivi du point de puissance maximale basé sur la logique floue.

Dans un premier temps, les modèles mathématiques des cellules photovoltaïques et du convertisseur électrique seront présentés, suivis d'une explication détaillée de l'algorithme MPPT proposé utilisant la logique floue. Ensuite, les résultats numériques de la simulation seront exposés et les performances de l'algorithme proposé seront évaluées par rapport à la technique de suivi conventionnelle connue sous le nom de méthode de perturbation et d'observation. Enfin, les conclusions finales de cette étude seront tirées.

III.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïque (GPV) :

repose sur un schéma équivalent qui décrit le comportement électrique d'une cellule solaire. Une configuration couramment utilisée consiste en une source de courant variable en parallèle avec une diode D représentant la jonction et une résistance R_p en parallèle, qui simule l'arrière de l'élément. Cette configuration est également en série avec une autre résistance R_s , qui symbolise les pertes dues aux effets joule.

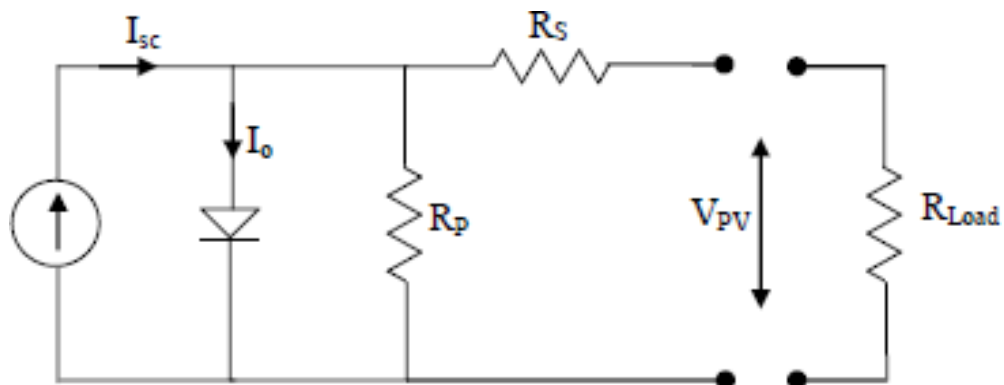


Figure III.1 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

L'équation non linéaire suivante peut décrire le comportement d'une cellule photovoltaïque [39].

$$I_{pv} = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{(V_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_s)}{R_p} \quad (III.1)$$

Avec:

I_{pv}, V_{pv} : Le courant et la tension du GPV.

I_{sc} : Le courant de court-circuit du GPV.

I_0 : Le courant de saturation inverse.

R_s, R_p : résistance série et parallèle.

V_{th} : La tension thermique.

Lorsque la résistance série (R_s) tend vers zéro et que la résistance parallèle (R_p) devient extrêmement élevée, théoriquement infinie, le modèle GPV se métamorphose en un modèle idéal, caractérisé par l'équation suivante :

$$I_{pv=} = I_{sc} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{V_{th}} \right) - 1 \right) \quad (III.2)$$

$$I_{pv=} = (I_{sc} - I_0) \left(\exp \left(- \frac{V_{op} + R_s \cdot I_{pv}}{V_{th}} \right) \right) \quad (III.3)$$

$$V_{th} = \frac{(V_{op} + R_s \cdot I_{op} - V_{oc})}{L_n \left(1 - \frac{I_{op}}{V_{op}} \right)} \quad (III.4)$$

Les paramètres électriques du GPV sont exprimés selon le format suivant :

$$I_{sc} = N_p \cdot I_{scm}$$

$$I_{op} = N_p \cdot I_{opm}$$

$$I_{oc} = N_p \cdot I_{ocm}$$

$$V_{op} = N_p \cdot V_{opm}$$

$$R_s = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{sm}$$

N_s représente le nombre de cellules en série, tandis que N_p désigne le nombre de cellules en parallèle.

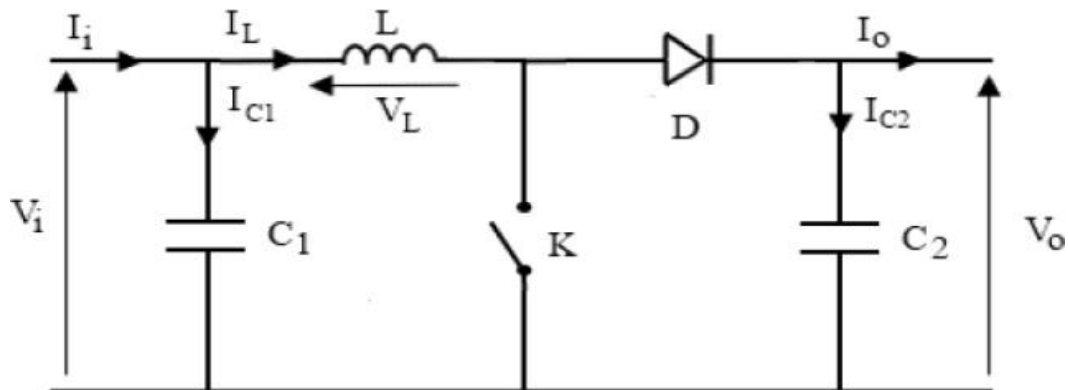
L'indice "m" est un marqueur de l'association de cette grandeur avec le modèle. Dans notre recherche, nous avons opté pour le modèle MSX60, pour lequel les paramètres électriques de fabrication sont répertoriés dans le tableau suivant [40]:

Tableau III.1: Caractéristiques électriques standards d'un GPV6-MSX60.

Paramètre	Valeur (STC)
Puissance maximale (P_{max})	60 W
Tension optimal (V_{opm})	17.1 V
Courant optimal (I_{opm})	3.5 A
puissance minimal garantie	58 W
Courant de court-circuit (I_{ccm})	3.8 A
Tension de circuit ouvert (V_{com})	21.1V
Coefficient de température de (V_{com})	$(80 \pm 10) \text{ mV}/^\circ\text{C}$ –
Coefficient de température d' (I_{ccm})	$(0.065 \pm 0.015)\% / ^\circ\text{C}$
Coefficient de température pour la puissance	$(0.5 \pm 0.005)\% / ^\circ\text{C}$ –

III.3 Modélisation d'un hacheur (boost) :

Pour assurer une conversion efficace de la puissance, il est primordial de maintenir un rendement élevé afin d'éviter toute perte de puissance et de limiter les élévations de température dans les composants électroniques. C'est pourquoi il est nécessaire de concentrer toute conversion d'énergie autour des composants de stockage d'énergie tels que les inductances et les condensateurs, ainsi que les commutateurs. Le choix des commutateurs de puissance à utiliser dépend du niveau de puissance à convertir ou à contrôler [41]. Le schéma (III.2) illustre le principe de fonctionnement d'un convertisseur élévateur Boost.

**Figure III.2 Schémas équivalents du hacheur (boost).**

Afin de pouvoir appliquer la loi de Kirchhoff de manière précise, il est impératif de présenter les schémas équivalents du circuit pour chaque configuration de l'interrupteur K.

Pour la première période (D, T_s) :

La figure (III.3) représente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé

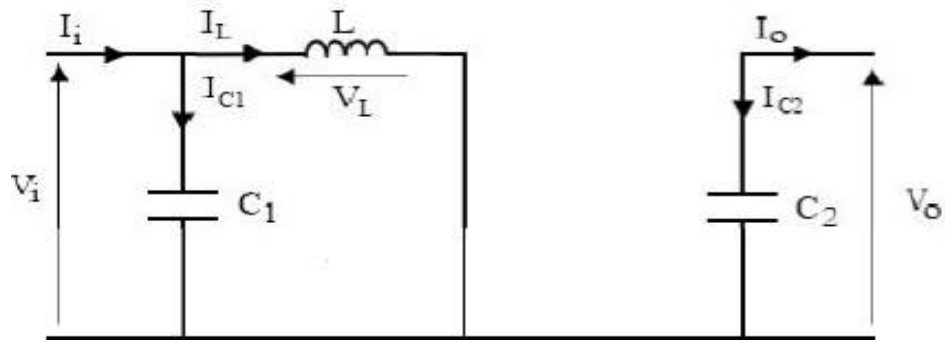


Figure III.3: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Pour la deuxième période ((1-d)Ts):

La figure (III.4) présente le circuit équivalent du boost lorsque l'interrupteur K est ouvert.

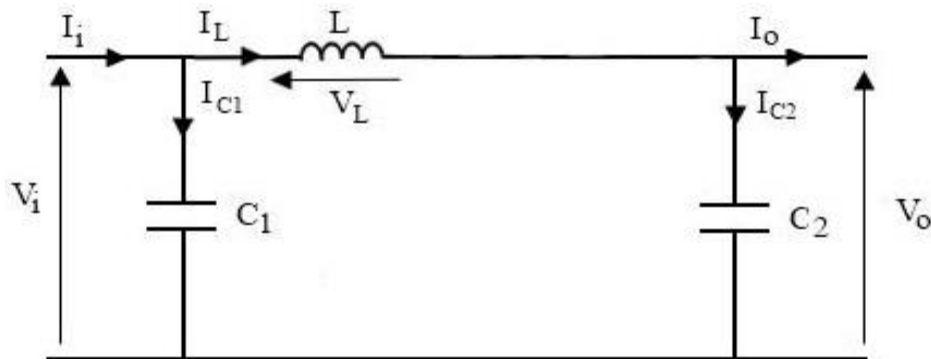


Figure III.4 : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \\ I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_o(t) \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

III.4 MPPT par un algorithme basé sur la logique floue.

III.4.1. Conception du régulateur MPPT flou

Récemment, les contrôleurs flous ont été employés dans la quête du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques et éoliens. Leur avantage réside dans leur robustesse et leur relative simplicité de conception, car ils ne requièrent pas une connaissance précise du modèle exact [42,43].

Cependant, leur utilisation implique une connaissance exhaustive et précise du système PV par l'opérateur pour l'établissement des règles d'inférences.

Le contrôleur flou se compose de trois blocs principaux : la fuzzification des variables d'entrée par l'utilisation de fonctions trapézoïdales et triangulaires ; puis l'inférence, où ces variables fuzzifiées sont comparées à des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée ; enfin, la défuzzification pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs numériques en utilisant la méthode de défuzzification par le centroïde. La structure fondamentale de notre contrôleur flou est illustrée dans la figure (III.5).

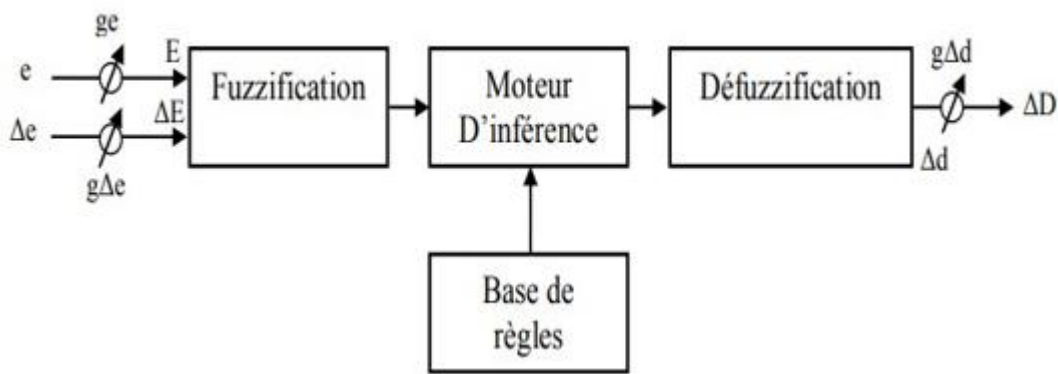


Figure III.5 Structure de base du contrôleur flou.

La figure (III.5) présente la configuration détaillée du contrôleur flou, qui comprend les éléments suivants : les entrées, la sortie échelonnée, la fuzzification, la décision floue et la défuzzification.

Deux variables d'entrée sont prises en compte, à savoir l'erreur e et la dérivée de l'erreur Δe , pour une unique commande SPD. Ces deux entrées sont normalisées à l'aide de gains de normalisation, g_e pour l'erreur et $g_{\Delta e}$ pour la dérivée de l'erreur. Un gain de dénormalisation, $g_{\Delta d}$, est appliqué à la sortie. Les deux variables d'entrée du contrôleur flou, l'erreur e et la variation de l'erreur Δe échantillonnées à chaque pas de temps t sont définies par les expressions suivantes :

$$e = \frac{\partial P_{pv}}{\partial P_{pv}} = \frac{P_{pv}(t) - P_{pv}(t-1)}{V_{pv}(t) - V_{pv}(t-1)} \quad (\text{III.7})$$

$$\Delta e = e(t) - e(t-1) \quad (\text{III.8})$$

Définissons $P_{pv}(t)$ comme la puissance instantanée du générateur photovoltaïque PV et $V_{pv}(t)$ comme la tension instantanée du même générateur.

La variable $e(t)$ indique si le point de fonctionnement de la charge à l'instant t se trouve à

gauche ou à droite du point de puissance maximale sur la courbe caractéristique P-V. La variable $\Delta e(t)$ quantifie la direction de déplacement de ce point. Conformément à la méthodologie exposée dans la partie théorique de la logique floue, notre approche d'inférence, dans cette étude, est basée sur la méthode de Mamdani. En ce qui concerne la défuzzification, nous avons opté pour la méthode du centre de gravité afin de calculer la sortie Δd [44].

La représentation de la matrice des règles que nous employons est donnée par le tableau (III.2).

Tableau III.2 Base de règles floues.

Δe e	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>EZ</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>EZ</i>
<i>NS</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>EZ</i>	<i>NS</i>
<i>ZE</i>	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>EZ</i>	<i>NS</i>	<i>NB</i>
<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>EZ</i>	<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>
<i>PB</i>	<i>EZ</i>	<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>

La variable linguistique assignée $ad\Delta$, dépend des différentes combinaisons entre e et Δe . Par exemple, si les variables d'entrée (e et $e\Delta$), ont comme valeurs *PB* et *ZE* correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie $d\Delta$ est *NB*, ce qui implique une forte variation négative du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à $d\Delta$ s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

La figure (III.6) illustre le schéma fonctionnel d'un contrôleur MPPT flou régissant un générateur photovoltaïque (GPV) via un convertisseur statique DC-DC (hacheur Boost) en ajustant le rapport cyclique, conformément à la relation suivante :

$$d(t) = d(t-1) + \text{gain}\Delta d(t) \quad (\text{III.9})$$

Tel qu'illustré par l'équation du rapport cyclique, celui-ci est déterminé par la sommation du rapport cyclique à l'instant $(t-1)$ et la sortie du régulateur flou, qui représente la variation du rapport cyclique à l'instant (t) , le tout multiplié par un gain [44].

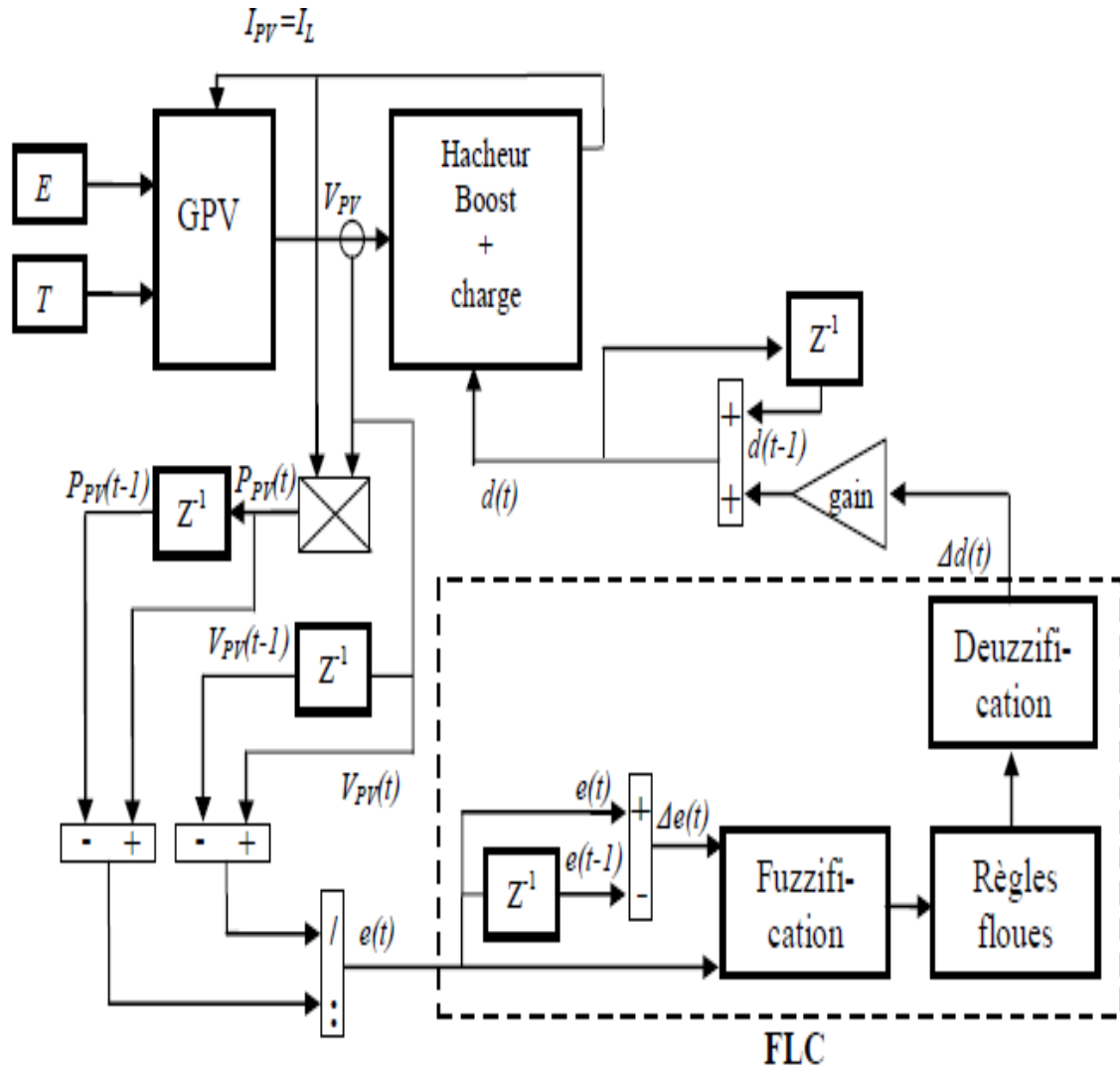


Figure III.6 Schéma d'illustration d'un GPV commandé par Logique floue FL.

III.5 Résultats de simulation :

III.5.1. Résultats de la technique P&O :

La figure III.7 représente les résultats de la simulation de l'algorithme "Perturb and Observe" sous différentes irradiances lumineuses (500, 750, 1000 W/m²) montrent que la tension (V_{pv}) reste presque constante tandis que le courant (I_{pv}) et la puissance (P_{pv}) augmentent avec l'irradiation. Ces résultats reflètent la performance attendue des panneaux solaires, où la puissance générée augmente avec l'irradiation, confirmant ainsi l'efficacité de l'algorithme pour suivre le point de puissance maximale (MPP).

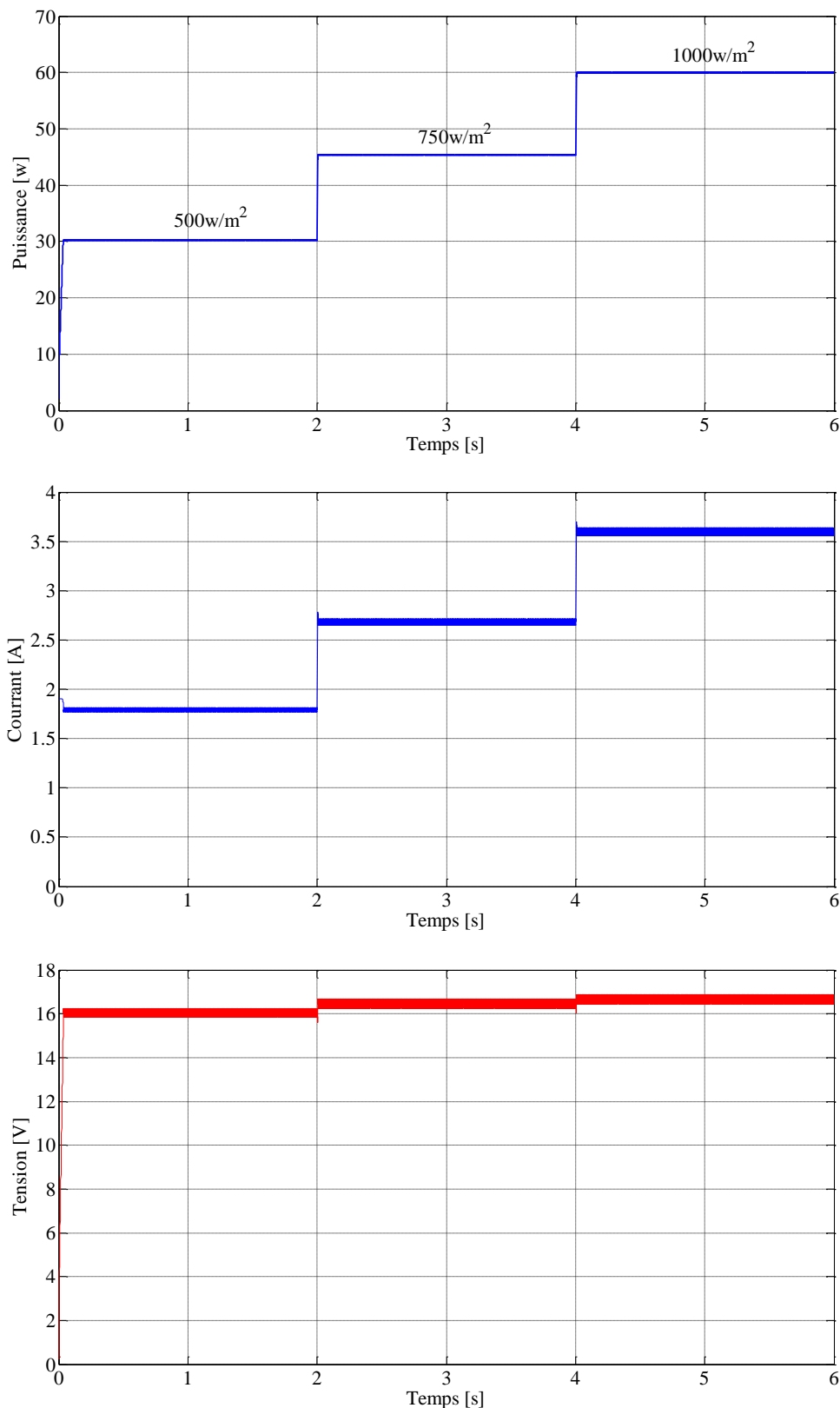


Figure III.7 Effet de la variation de l'éclairement

La figure III.8 représente les résultats de la simulation de l'algorithme "Perturb and Observe" à différentes températures (25°C, 35°C, 45°C) montrent que la tension (Vpv) et la puissance (Ppv) diminuent légèrement avec l'augmentation de la température, tandis que le courant

(I_{pv}) reste constant. Ces résultats reflètent l'effet connu de l'augmentation de la température sur la performance des panneaux solaires, entraînant une légère diminution de la tension et de la puissance générée.

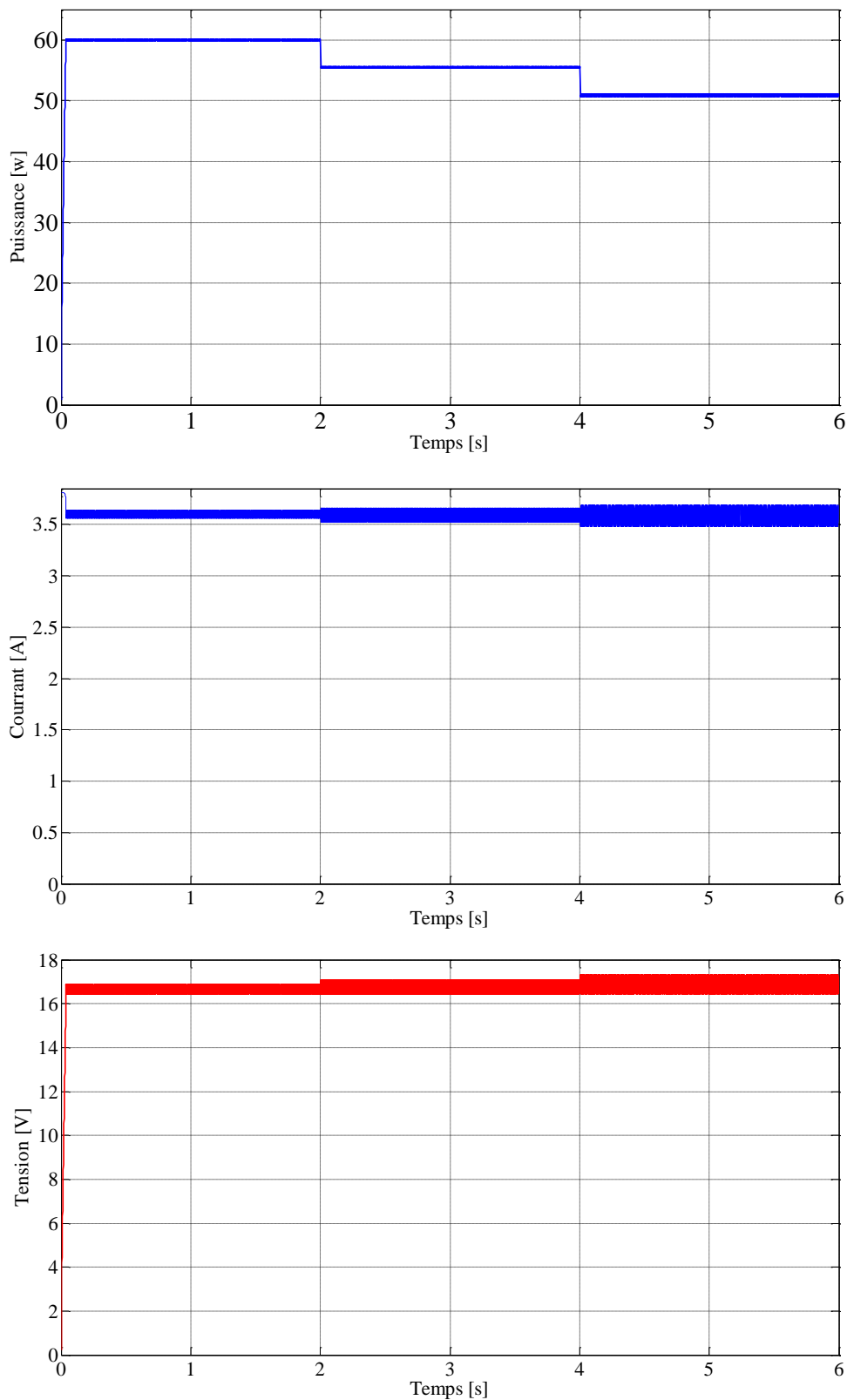


Figure III.8 Effet de la variation de la température.

III.5.2 Résultats de la technique floue :

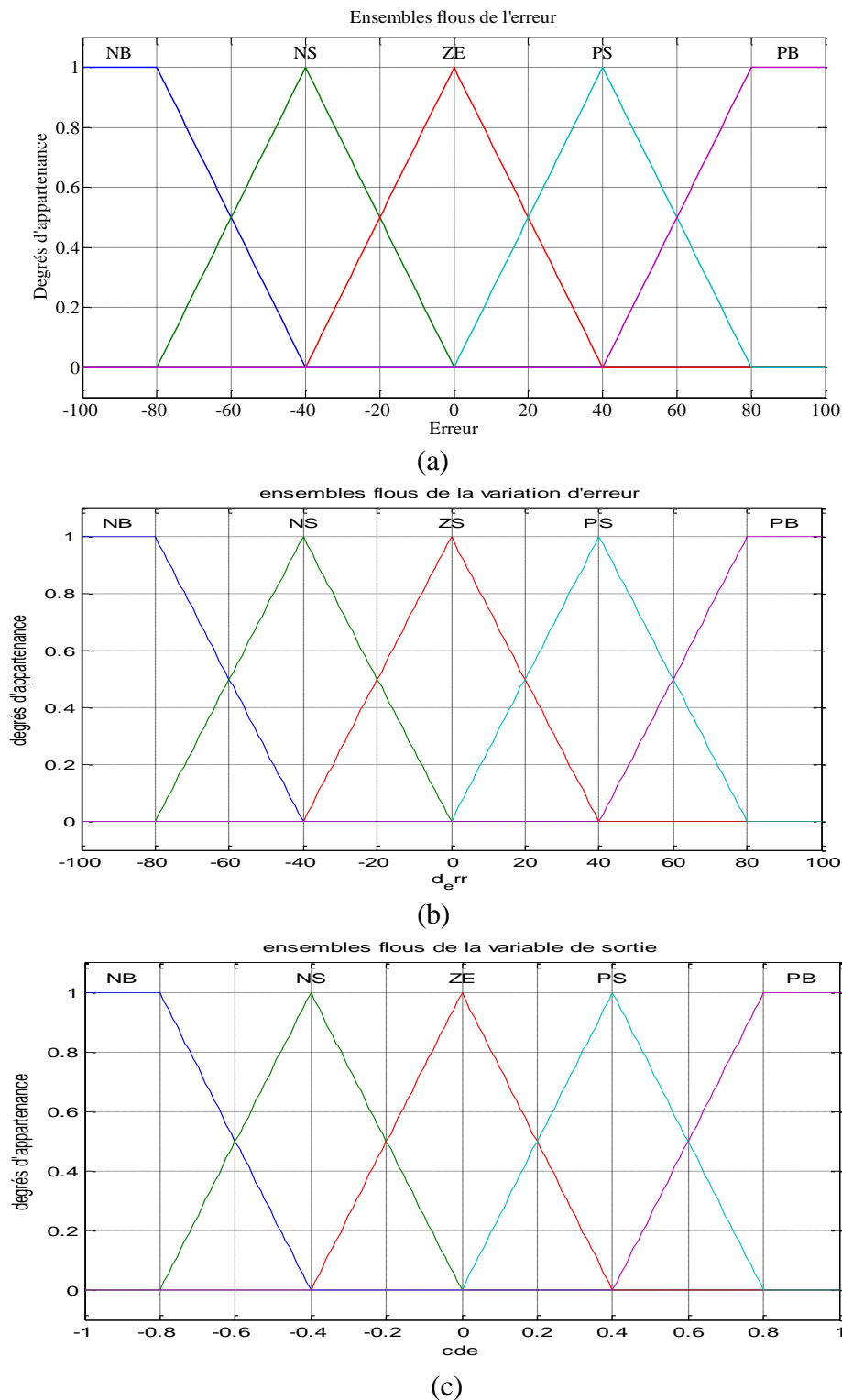


Figure III.9 :Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et la sortie

La variable d'erreur (e) est transformée en termes de variable linguistique à l'aide de cinq sous-ensembles flous qui sont désignés par NB (négatif grand), NS (négatif petit), ZE (zéro), PS (petite positive), et PB (positif grand) avec NB et PB fonctions d'appartenance sous forme trapézoïdale et NS, ZE et PS sous forme triangulaire. Les fonctions

d'appartenance pour les premières variables d'entrée sont montrées dans la figure (III.9.a). L'ensemble de la seconde variable d'entrée (Δe) qui est les mêmes sous-ensembles flous de la première. Le sous-ensemble de fuzzification pour la variable de sortie Δd est représenté par la figure.(III.9.c).

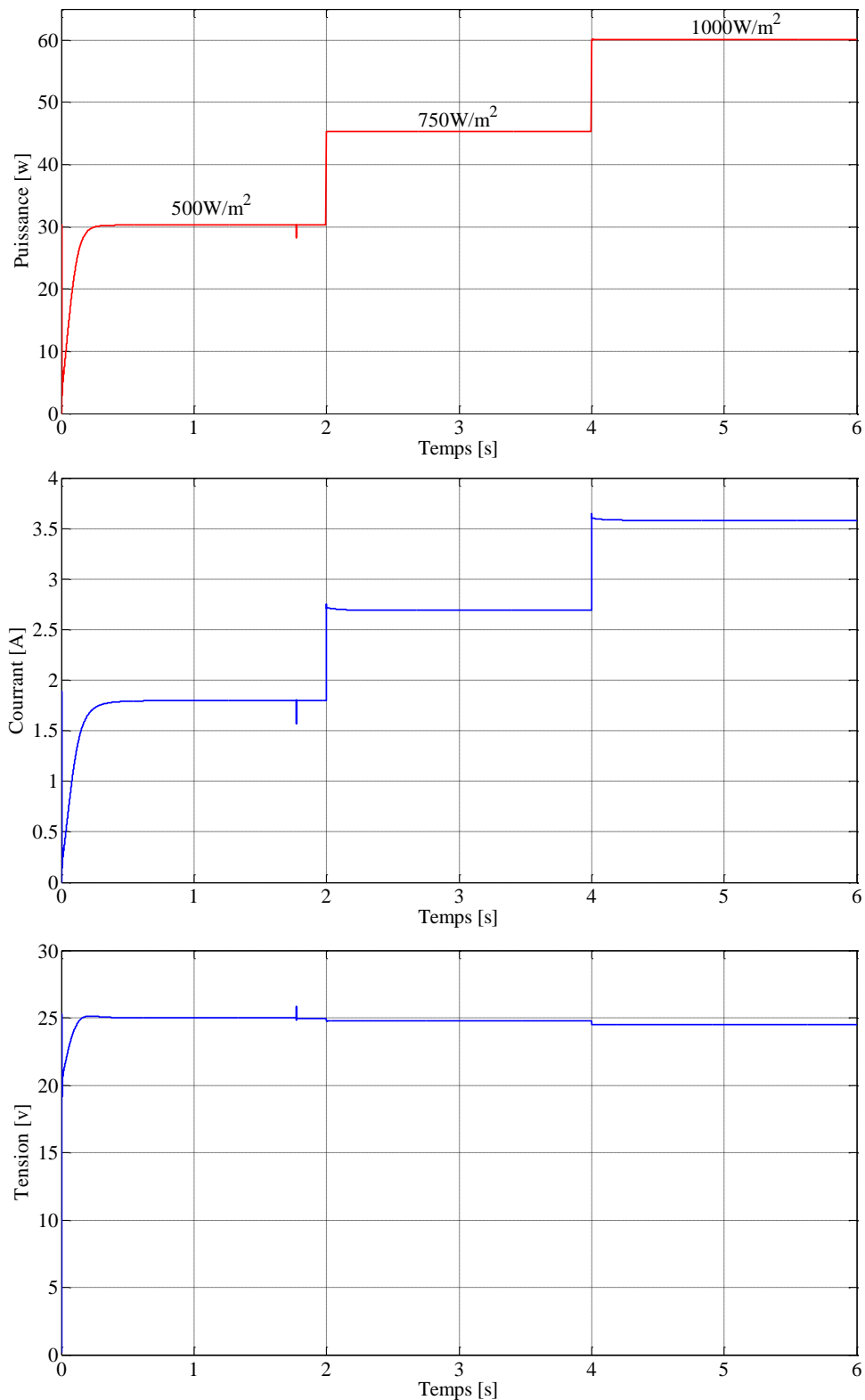


Figure III.10 : Effet de la variation de l'ensoleillement.

Les courbes résultant de la simulation montrent la réponse du système aux variations de l'irradiance (500, 750, 1000 W/m²). Le courant (I_{pv}) et la puissance (P_{pv}) augmentent significativement avec l'augmentation de l'irradiance, tandis que la tension (V_{pv}) reste relativement stable. Le rapport cyclique (Duty Cycle) reflète l'ajustement rapide du système aux changements d'irradiance, se stabilisant après chaque changement. Ces résultats démontrent l'efficacité du système à s'adapter aux conditions variables et à maintenir des performances optimales.

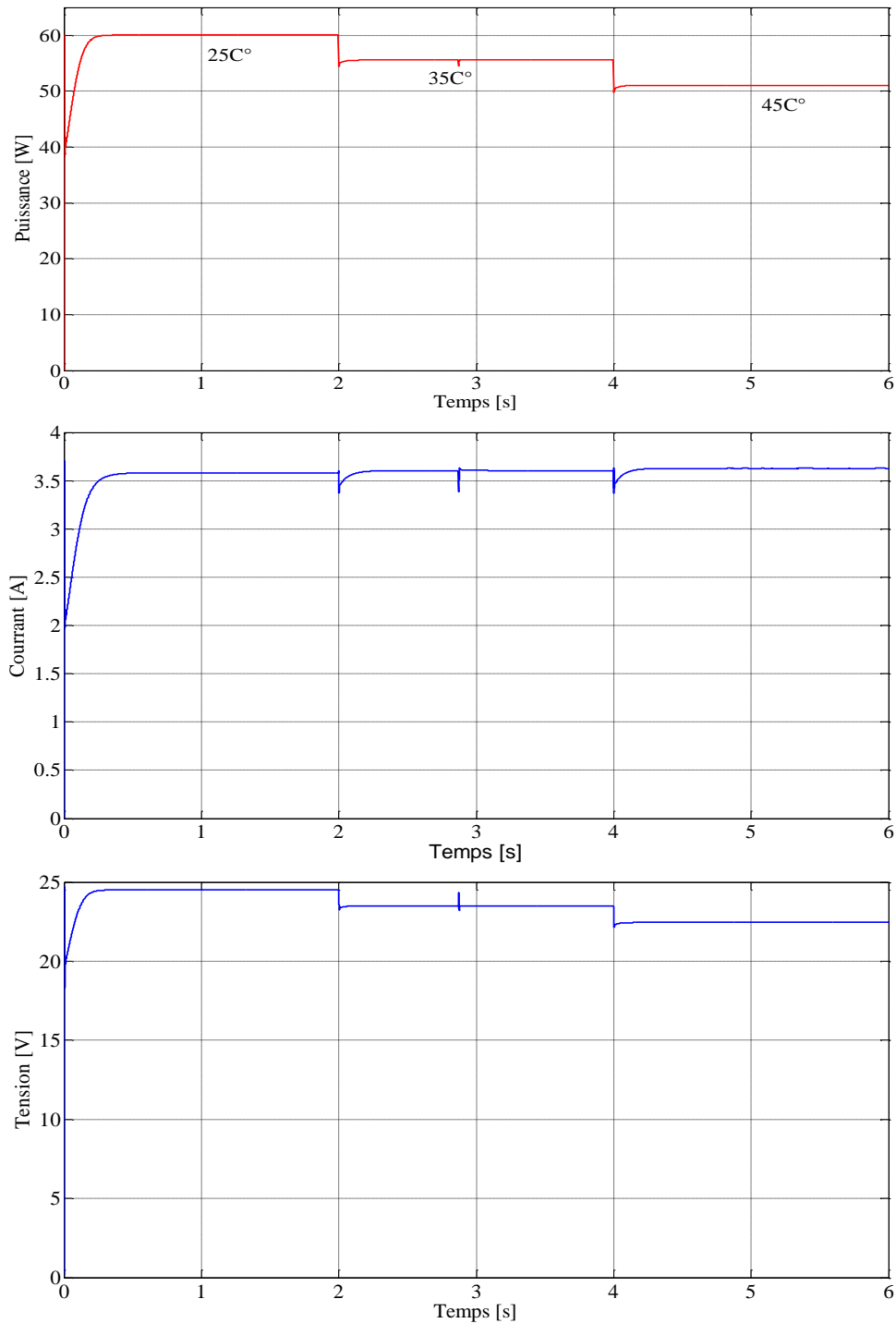


Figure III.11 : Effet de la variation de la température.

Les courbes montrent l'effet de l'augmentation de la température sur les performances du système photovoltaïque. Avec l'augmentation de la température de 25°C à 35°C puis à 45°C, la tension et la puissance diminuent significativement, tandis que le courant est moins affecté. Le rapport cyclique s'adapte à ces changements, montrant des oscillations à chaque variation de température. Cela indique la réponse de la logique floue pour maintenir les performances du système malgré les conditions changeantes, avec une baisse globale d'efficacité à mesure que la température augmente.

III. 6 Comparaison

Commande perturb and observe repose sur la modification périodique de la tension ou du courant pour déterminer le point de puissance maximale, ce qui facilite sa mise en œuvre mais peut entraîner des fluctuations autour de ce point, surtout dans des conditions de fonctionnement variables.

le contrôle flou utilise la logique floue pour améliorer la précision de la détermination du point de puissance maximale, permettant une meilleure adaptation aux variations environnementales telles que les changements de température des cellules solaires et l'intensité de la lumière. Ce type de contrôle est plus complexe à configurer et programmer, mais il offre des performances supérieures et une réponse précise dans une gamme variée de conditions de fonctionnement.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une analyse approfondie et des résultats précis des simulations liées à l'amélioration de la chaîne de conversion de l'énergie solaire. Nous avons commencé par la conception et la modélisation d'un générateur photovoltaïque, ainsi que l'analyse de sa performance sous différentes conditions. Ensuite, nous avons exploré l'impact de l'utilisation d'un convertisseur boost sur l'efficacité du système et sa capacité à extraire l'énergie de manière plus efficace.

En outre, nous avons présenté et expliqué les résultats de l'application d'un algorithme de suivi du point de puissance maximale basé sur la logique floue, démontrant comment cette technique contribue à améliorer les performances du système dans diverses conditions de fonctionnement. Nous avons également comparé les résultats entre la technique de perturb and observe (P&O) et la technique basée sur la logique floue, mettant en évidence les avantages de cette dernière pour stabiliser le système et augmenter son efficacité.

Conclusion Générale

Au terme de cette étude approfondie sur l'amélioration de la chaîne de conversion de l'énergie solaire, nous pouvons affirmer que les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) jouent un rôle crucial dans l'optimisation de la performance des systèmes photovoltaïques. Les défis posés par les variations constantes des conditions environnementales nécessitent des approches innovantes et adaptatives pour maximiser l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Les techniques traditionnelles de MPPT, telles que "perturb and observe" (P&O) et est prouvé leur efficacité de manière générale, mais elles présentent des limites lorsqu'il s'agit de réagir rapidement aux changements soudains de l'ensoleillement et de la température. Ces limitations ont conduit à l'exploration de méthodes plus sophistiquées, notamment l'utilisation de la logique floue, qui offre une approche plus flexible et robuste pour gérer les incertitudes et les variations des conditions environnementales.

Dans cette recherche, nous avons d'abord exploré et analysé les techniques classiques de MPPT en détaillant leur historique, leurs principes de fonctionnement et leurs performances sous différentes conditions. Cette analyse nous a permis de mieux comprendre les forces et les faiblesses de chaque méthode et de poser les bases pour l'intégration de techniques plus avancées.

L'application de la logique floue dans le contrôle MPPT a été l'élément central de notre étude. Nous avons montré comment cette approche permet de mieux gérer les imprécisions inhérentes aux systèmes photovoltaïques et d'améliorer la réactivité et la précision du suivi du point de puissance maximale. En détaillant les étapes de conception et de mise en œuvre d'un contrôleur flou, nous avons mis en évidence les avantages substantiels que cette technologie peut apporter, notamment en termes de stabilité, de réactivité et d'efficacité énergétique.

Les résultats des simulations ont confirmé les bénéfices de l'approche basée sur la logique floue. Comparée aux techniques traditionnelles, la méthode floue a démontré une meilleure performance dans des conditions variées, assurant une extraction plus optimale de l'énergie des panneaux solaires. Les comparaisons entre les résultats des techniques P&O et celles basées sur la logique floue ont clairement montré une supériorité de cette dernière, renforçant notre hypothèse initiale sur l'efficacité des systèmes de contrôle flou.

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] .Abdel-Salam, M., M.-T. EL-Mohandes, and M. Goda, History of maximum power point tracking. *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*, 2020: p. 1-29.
- [2] .Ahmed, J. and Z. Salam, An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency. *Applied Energy*, 2015. 150: p. 97-108.
- [3] .Bennett, T., A. Zilouchian, and R. Messenger, A proposed maximum power point tracking algorithm based on a new testing standard. *Solar Energy*, 2013. 89: p. 23-41.
- [4] .Hua, C.-C. and J.-R. Lin. Fully digital control of distributed photovoltaic power systems. in *ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No. 01TH8570)*. 2001. IEEE.
- [5] .Altas, I. and A. Sharaf, A novel on-line MPP search algorithm for PV arrays. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1996. 11(4): p. 748-754.
- [6] .Kuo, Y.-C., T.-J. Liang, and J.-F. Chen, Novel maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2001. 48(3): p. 594-601.
- [7] .Noguchi, T. and H. Matsumoto, Maximum power point tracking method of photovoltaic using only single current sensor. *EPE2003, Toulouse*, 2003. 8.
- [8] .Liu, F., et al., A variable step size INC MPPT method for PV systems. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2008. 55(7): p. 2622-2628.
- [9] .Gomathy, S., S. Saravanan, and S. Thangavel, Design and implementation of maximum power point tracking (MPPT) algorithm for a standalone PV system. *International journal of scientific & engineering research*, 2012. 3(3): p. 1-7.
- [10] .Selmi, T., et al. P&O mppt implementation using matlab/simulink. in *2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. 2014. IEEE.
- [11] .West, M., *Solar Energy Basics--and More*. 1993: University of Florida, Florida Cooperative Extension Service.

- [12] .Djamila, K. and O. Fetta, Commande d'un système de pompage photovoltaïque. 2010, Université Mouloud Mammeri.
- [13] .HIZI, N. and T.-E. DJABOREBBI, Etude comparative des commandes MPPT pour les systèmes photovoltaïques. UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA.
- [14] .AMAMRA, M.S. and Y. DJEDIDI, optimisation de la production d'un générateur photovoltaïque. 2015.
- [15] .Zahra, A., C. Imane, and B. Ahmed, MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE ADAPTÉ PAR LA COMMANDE MPPT. 2012.
- [16] .Ravindra, H., et al. Impact of PV on distribution protection system. in 2012 North American Power Symposium (NAPS). 2012. IEEE.
- [17] Hajar Bagheri "advances in electric power engineering" publisher: lulu (usa), 2015
- [18] Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi "active power control for a single-phase grid connected pv system", international journal of scientific & technology 3, research vol 2, issue 2013.
- [19] Bisker Asma, Chiri Meriem, «< commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau », diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, école nationale polytechnique, 10, av. Hassen badi, elharrach, algérie, 2012
- [20] L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets, Information and control", Vol. 8, pp. 29-44, 1965.
- [21] E. Mamdani, " An Exprimint in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", International Journal on Man-Machine Studies, Vol. 7, pp. 1-13, 1975.
- [22] J.J. Ostergaad. "Fuzzy logic control of a heat exchange process". In Fuzzy Automata and Decision Processes, M.M. Gupta, G.N. Saridis, and B.R. Gaines, Eds., pages 285-320, 1977.
- [23] D. Willaeyns, N. Malvache, et P. Hammad." Utilization of fuzzy sets for systems modelling and control". Dans IEEE International Conference on Decision and Control, 1977.
- [24] D. Willaeyns, P. Mangin, et N. Malvache." Use of fuzzy sets for systems modelling and control: Application to the speed control of a strongly perturbed motor". Dans IFAC/IFIP International Conference on Digital Computer Applications to Process Control, 1997.

- [25] D. Willaëys et N. Malvache." Use of fuzzy model for process control. Dans IEEE International Conference on Cybernetics and Society, 1978.
- [26] M. Sugeno et K. Murakami. " Fuzzy parking control of model car". In 23rd IEEE Conf.on Decision and Control, 1984.
- [27] J.B. Kiszka, M.M. Gupta, et P.N. Nikiforuk. "Energetic stability of fuzzy dynamic systems". IEEE Trans. on Syst. Man Cybern., SMC-15(5):783-792, 1985.
- [28] M. Togai et H. Watanabe." Expert system on a chip: An engine for real-time approximate reasoning". IEEE Expert Syst. Mag., 1:55-62, 1986.
- [29] T. Tamakawa." High speed fuzzy controller hardware system". Proc. 2nd Fuzzy System Symp., pages 122-130, 1986.
- [30] LOTFI BAGHLI, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques". Université de Henri Poincaré, Nancy – I, thèse de doctorat, 1999.
- [31] NIJAZ DIZDAREVIĆ, " Unified power flow controller in alleviation of voltage stabilityproblem". Doctoral thesis, Faculty of electrical engineering and computing, university of Zagreb, 2001.
- [32] Michel Marie et Mohand Mokhtari « Livre Applications de MATLAB 5 et SIMULINK 2 : Contrôle de procédés, Logique floue, Réseaux de neurones, Traitement du signal ». Springer, 15/09/1998.
- [33] Ismail H. Altas, Adel M. Sharaf « A generalized direct approach for designing fuzzy logic controllers in matlab / simulink gui environment », Int. J. IT&IC no.4 vol.1, 2007
- [34] FAUCHER, J., « thèse : les plans d'expériences pour le réglage de commande à base de logique floue », Institut National Polytechnique de Toulouse, Septembre 2006
- [35] Jérôme Faucher « Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue. », thèse de doctorat, INP de Toulouse, 26/9/2006.
- [36] <http://www.ferdinandpiette.com/blog/2011/08/les-systemes-flous-fonctionnement/>
- [37] Alain Bonardi & Isis Truck, Une introduction à la logique floue, pour une approche prospective pour la visualisation du son. Séminaire IARM, Université Paris8 2006.

BIBLIOGRAPHIQUES

- [38] François CHEVRIE & François GUÉLY, La logique floue Cahier Technique Schneider n° 191 Edition mars 1998.
- [39] T. Tafticht, K. Agbosso, M.L. Doumbia, A. Chériti « An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems » Renewable Energy N°33, (2008), PP.1508–1516, université du Québec Canada, 2007.
- [40] MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules. Catalogue, www.solarex.com.
- [41] Y. Nettari, "Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Setif, 2014.
- [42] M.S. Aït Cheikh, B. Hadj Aïssa, A. Malek et M. Becherif « mise au point d'une régulation floue pour serre agricole à énergie solaire ». Energies Renouvelables Vol.13 N°3 (2010) pp 421 – 443, 25/09/2010.
- [43] Adam Mirecki « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance. », thèse de doctorat, INP de Toulouse, 25/04/2005.
- [44] Chen-Chi Chu a, Chieh-Li Chen. « Robust maximum power point tracking method for photovoltaic cells: A sliding mode control approach », Elsevier solener.2009.03.005, 02/03/2009

Abstract

L'énergie solaire joue un rôle crucial dans l'avenir des énergies renouvelables en raison de sa durabilité et de son impact environnemental positif. Cependant, pour tirer pleinement parti de cette technologie, il est nécessaire d'améliorer l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité grâce à des solutions innovantes.

Dans ce mémoire, nous examinons les principes de fonctionnement des cellules photovoltaïques et les facteurs influençant leur performance, en mettant en lumière la technique classique MPPT (P&O) et en présentant ses avantages et inconvénients dans le contexte de la conversion de l'énergie solaire.

Dans la deuxième partie, nous discutons d'une technologie avancée et prometteuse dans ce domaine, à savoir la logique floue, capable d'ajuster précisément le point de fonctionnement des cellules solaires en fonction des variations de température et d'intensité lumineuse.

Enfin, nous présentons les résultats de la simulation du système MPPT utilisant la commande floue, avec une analyse de sa performance et une comparaison avec la technique classique dans diverses conditions de fonctionnement, mettant en évidence la supériorité de l'unité de commande floue dans la précision de la détermination du point de puissance maximale.

ملخص

الطاقة الشمسية تلعب دورًا حيويًا في مستقبل الطاقات المتجددة بفضل استدامتها ونظافتها البيئية، ولكن لاستفادة قصوى من هذه التكنولوجيا، يتطلب تحسين كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء باستخدام حلول مبتكرة.

نناقش في هذه الأطروحة مبادئ تشغيل الخلايا الكهروضوئية والعوامل التي تؤثر على أدائها، ونسلط الضوء على التقنية الكلاسيكية MPPT (P&O) ونقدم نظرة على مزاياها وعيوبها في سياق تحويل الطاقة الشمسية.

في القسم الثاني، نناقش التقنية المتقدمة والواعدة في هذا المجال وهي المنطق الضبابي، الذي يمكنه تعديل نقطة تشغيل الخلايا الشمسية بدقة استنادًا إلى تغييرات درجة حرارتها وشدة الإضاءة.

في الجزء الأخير، نُقدم نتائج محاكاة نظام MPPT باستخدام التحكم الضبابي، مع تحليل أدائه ومقارنته بالتقنية الكلاسيكية في مختلف ظروف التشغيل، مما يبرز تفوق وحدة التحكم الضبابية في دقة تحديد نقطة القدرة القصوى.