

Ministry of Higher Education and Scientific Research

University Oran 1, Ahmed Ben Bella

Institute of Applied Sciences and Techniques

End-of-Study Project

By

MOKHEFI Manel

In preparation for obtaining the diploma of

Professional Master's degree

Specialty: Instrumentation and Metrology

Theme:

Design of an Intelligent MPPT Based on FLC Using a Photovoltaic System

**Defended on July, 2025 before the jury
composed of:**

President:	BOUBEKEUR Djamila	, ISTA, University Oran 1, Ahmed Ben Bella
Supervisor:	TAHRI Ghrissi,	, ISTA, University Oran 1, Ahmed Ben Bella
Examiner:	DAHANE Amine	, ISTA, University Oran 1, Ahmed Ben Bella

Academic Year 2024 / 2025

Remerciement

*Nous remercions Dieu tout-puissant qui nous a donné la force
et la patience pour accomplir ce travail.*

*Je tiens remercier particulièrement tout d'abord mon encadrant
Mr Tahri Ghrissi, pour sa disponibilité, ses conseils, et son
accompagnement tout au long de ce travail.*

*Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté
d'examiner ce mémoire de master*

*Je souhaite également remercier l'ensemble des enseignants
pour leur soutien durant mon parcours universitaire.*

*Un grand merci à mes parents et mes sœurs, mes amis pour
leur encouragement, leur patience et leur soutien moral tout
long de cette période.*

Dédicace

*Je dédie ce travail à mes parents, pour leur amour
inconditionnel, leur patience, leurs sacrifices et leur soutien
constant tout au long de mon parcours.*

*Ils ont toujours cru en moi, même dans les moments les plus
difficiles.*

*A mes sœurs, pour leur présence, leurs encouragements et
leurs mots de réconfort, qui m'ont donné la force d'avancer
A mes amis fidèles, qui ont partagé avec moi les moments de
doute comme les instants de réussite,*

Merci pour votre soutien moral, vos conseils et votre amitié

*A tous mes enseignants, pour les connaissances transmises,
leur accompagnement et leur bienveillance tout au long de
mon cursus*

Résumé :

Ce mémoire a pour objectif d'étudier, de modéliser et de comparer deux techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) appliquées à un système photovoltaïque associé à un convertisseur Boost. Il s'agit, d'un côté, de la méthode Perturb and Observe (P&O), reconnue pour sa simplicité et sa facilité d'intégration, et de l'autre, de la méthode fondée sur la logique floue (Fuzzy Logic Control - FLC), qui se distingue par son approche heuristique et sa capacité d'adaptation à des conditions variables.

L'étude repose sur des simulations réalisées dans l'environnement MATLAB/Simulink, visant à observer le comportement dynamique de chaque méthode en présence de changements d'ensoleillement et de température. Les performances sont évaluées selon plusieurs critères essentiels:

- La rapidité de convergence vers le point de puissance maximale (MPP),
- La stabilité du fonctionnement autour de ce point,
- l'ampleur des oscillations,
- Le rendement énergétique global du système,
- La robustesse face aux perturbations climatiques.

À travers cette analyse, le but final est d'identifier la méthode la plus performante pour optimiser la production d'énergie solaire dans un environnement réel, tout en envisageant des pistes d'amélioration futures, notamment par le recours à des approches hybrides ou intelligentes combinant les avantages des deux stratégies.

Abstract :

The objective of this thesis is to study, model, and compare two maximum power point tracking (MPPT) techniques applied to a photovoltaic system associated with a boost converter. These are, on the one hand, the Perturb and Observe (P&O) method, recognized for its simplicity and ease of integration, and on the other, the fuzzy logic-based method (Fuzzy Logic Control - FLC), which is distinguished by its heuristic approach and its ability to adapt to variable conditions.

The study is based on simulations performed in the MATLAB/Simulink environment, aiming to observe the dynamic behavior of each method in the presence of changes in sunlight and temperature. Performance is evaluated according to several essential criteria:

- Speed of convergence to the maximum power point (MPP),
- Operational stability around this point,
- The magnitude of oscillations,
- The overall energy efficiency of the system,
- Robustness in the face of climatic disturbances. Through this analysis, the ultimate goal is to identify the most efficient method for optimizing solar energy production in a real environment, while considering avenues for future improvement, particularly through the use of hybrid or intelligent approaches combining the advantages of both strategies.

Table des matières

Table des matières.....	i-iii
Liste des figures.....	v-viii
Introduction générale.....	2
CHAPITRE I.....	2
I.1. Introduction.....	4
I.2. Le rayonnement solaire.....	4
I.3. L'énergie photovoltaïque.....	5
I.4. Effet photoélectrique et jonction P-N	5
I.5. Historique du photovoltaïque	7
I.6. La cellule photovoltaïque:.....	8
I.7. Les différents types de cellules photovoltaïques	9
I.7.1. Cellules solaires de la première génération	9
I.7.1.1. Cellules en silicium monocristallin	9
I.7.1.2. Cellules en silicium polycristallines	9
I.7.1.3. Cellules en silicium amorphe	10
I.7.2. Les cellules solaires de deuxième génération.....	11
I.7.3. Cellules solaires de troisième génération: Les cellules à colorant.....	12
I.7.4. Les cellules de la quatrième génération : Les cellules organiques.....	13
I.8. Le module photovoltaïque :.....	13
I.9. Protection des installations photovoltaïques par diodes de By-pass et d'anti retour	14
I.9.1. Diode de dérivation ou (by-pass).....	14
I.9.2. La diode anti-retour	15
I.10. Modélisation d'un panneau photovoltaïque.....	15
I.10.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	15
I.10.2. Modélisation d'un module photovoltaïque	16
I.11. Tableau caractéristique du module photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC 200GT	19
I.12. Simulation de module photovoltaïque de la firme Kyocera KC 200 GT	19
I.13. Caractéristique I–V du module Kyocera Solar KC 200 GT.....	21
I.13.1. Caractéristique I–V du module Kyocera Solar KC 200 GT selon l'intensité d'ensoleillement.....	21

I.13.2. Caractéristique P–V du module Kyocera Solar KC 200 GT selon l’ensoleillement.....	22
I.13.3. Caractéristique I–V du module Kyocera Solar KC 200 GT selon la température.....	23
I.13.4. Caractéristique PV du module photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC 200 GT sous différentes valeurs d’intensité de température.....	23
I.13.5. Caractéristique IV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en série Ns = 1 et en variant le nombre de modules en parallèle Np sous des conditions météorologique constantes.....	24
I.13.6. Caractéristique PV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en série Ns = 1 et en variant le nombre de modules en parallèle Np sous des conditions météorologique constantes.....	25
I.13.7. Caractéristique IV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en parallèle Np = 1 et en variant le nombre de modules en série Ns sous des conditions météorologiques constantes	26
I.13.8. Caractéristique PV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en parallèle Np = 1 et en variant le nombre de modules en série Ns sous des conditions météorologiques constantes.....	26
I.14. Conclusion	27
CHAPITRE II.....	28
II.1. ntroduction.....	29
II.2. La commande de poursuite du point de la puissance maximal (Maximum Power Point Tracking: MPPT).....	29
II.3. Le principe de la méthode de recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	30
II.4. Méthode de perturbation et observation (P et O).....	31
II.5. Étude et Modélisation du Convertisseur C.C Élévateur (Boost).....	33
II.5.1. Convertisseur C.C Élévateur (Boost).....	33
II.5.2. Structure du convertisseur CC-CC élévateur (Boost)	34
II.5.3. Les modes de fonctionnement du convertisseur C.C	35
II.5.3.1. Mode de Conduction Continue (CCM).....	35
II.5.3.2. Principe du CCM pour un convertisseur Boost	35
II.6. Modélisation du CCM pour un convertisseur Boost	35
II.7. Principe du DCM pour un convertisseur Boost	36

II.8. La méthode perturbe and observe (P et O)	36
II.8.1. Explication de code	38
II.9. Résultats de la simulation de la méthode de MPPT perturber et observer (P et O)	39
II.10. Conclusion	43
 CHAPITRE III	44
III.1. Introduction.....	45
III.2. Historique de la logique floue	46
III.3. Etude fondamentale de la logique floue	47
III.3.1. Comparaison de la logique floue et classique	47
III.4. Notions fondamentales de la logique floue.....	48
III.4.1. Ensembles classiques et ensembles flous	48
III.4.2. Fonction d'appartenance.....	49
III.4.3. Univers de discours	50
III.4.4. Operations sur la logique floue	50
III.5. Structure d'un contrôleur flou	51
III.5.1. Contrôleurs flous	51
III.5.1.1. La fuzzification	52
III.5.1.2. Règles et opérateurs flous	53
III.5.1.3. Inférences floues	54
III.5.1.4. Agrégation des règles	54
III.5.1.5. La défuzzification.....	55
III.5.1.5.1. Méthode du centre de gravité (COG)	56
III.5.1.5.2. Méthode de la moyenne pondérée	56
III.6. Mise en œuvre du contrôleur flou sur la technique MPPT	56
III.7. Résultats de la simulation de la méthode de MPPT à base de la logique floue.....	60
III.8. Conclusion	63

CHAPITRE IV	64
IV.1. Introduction.....	65
IV.2. Présentation comparative des résultats de la simulation de la technique MPPT basée sur les deux méthodes proposées	65
IV.3. Calcule des indices de performances.....	68
IV.3.1.Les indices de performance évalués	68
IV.3.1.1. Erreur Fractionaire Moyenne (MFE).....	68
IV.3.1.2. Erreur Absolue Moyenne (MAE).....	68
IV.3.1.3. Erreur Relative Absolue (RAE).....	69
IV.3.1.4. Erreur Quadratique Moyenne (RMSE).....	69
IV. 4. Conclusion.....	69

Liste des figures

Chapitre I : Notions Fondamentales sur les Composants d'un Panneau Photovoltaïque et sa Modélisation sous Environnement Matlab/Simulink

Figure I- 1 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion la convention AM	5
Figure I- 2 Schéma de principe de la conversion photoélectrique	6
Figure I- 3 Installation des panneaux photovoltaïques	8
Figure I- 4. Cellules polycristallines	09
Figure I- 5. Cellules en silicium amorphe	10
Figure I- 6. Cellules hybrides en silicium	11
Figure I- 7. Cellule en Tellurure et Cadmium	12
Figure I- 8. Structure d'une cellule photovoltaïque	14
Figure I- 9. Connexion des diodes de Bypass entre les cellules photovoltaïques	15
Figure I- 10. Un modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	16
Figure I- 11 Modèle général du circuit électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque	17
Figure I- 12 Bloc diagramme du module photovoltaïque sous environnement Matlab/Simulink	20
Figure I- 13 Bloc diagramme du panneau photovoltaïque permettant de générer les caractéristiques IV et PV pour différentes variation des conditions météorologique sous environnement Matlab/Simulink	21
Figure I- 14 Caractéristique IV du module photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC 200 GT sous pour différentes valeurs d'intensité d'ensoleillement	22
Figure I- 15 Caractéristique PV du module photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC 200 GT sous pour différentes valeurs d'intensité d'ensoleillement	22
Figure I- 16 Caractéristique IV du module photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC 200 GT sous pour différentes valeurs d'intensité de température	23
Figure I- 17 Caractéristique PV du module photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC 200 GT sous pour différentes valeurs d'intensité de température	24
Figure I- 18 Caractéristique IV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en série $N_s = 1$ et en variant le nombre de modules en parallèle N_p sous des conditions météorologique constantes	24

<u>Figure I- 19 Caractéristique PV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en série $N_s = 1$ et en variant le nombre de modules en parallèle N_p sous des conditions météorologiques constantes</u>	25
<u>Figure I- 20 Caractéristique IV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en parallèle $N_p = 1$ et en variant le nombre de modules en série N_s sous des conditions météorologiques constantes</u>	26
<u>Figure I- 21 Caractéristique PV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en parallèle $N_p = 1$ et en variant le nombre de modules en série N_s sous des conditions météorologiques constantes</u>	27

Chapitre II : Stratégies de poursuite de point De puissance maximale

<u>Figure II.1: Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par Une commande (PPM) sur charge</u>	30
<u>Figure II.2 : la recherche du PPM</u>	30
<u>Figure II. 3 : Recherche de MPP avec la méthode conductance incrémentale</u>	31
<u>Figure II.4. PPM avec P&O</u>	32
<u>Figure II.5. Algorithme de P&O classique</u>	33
<u>Figure II.6. Convertisseur CC-CC abaisseur (Buck)</u>	34
<u>Figure II.7. Convertisseur CC-CC élévateur (Boost)</u>	34
<u>Figure II.8. Schéma Matlab/Simulink du MPPT d'un système photovoltaïque</u>	37
<u>Figure II.9. Les courbes de l'ensoleillement avec changement critique de 1000, 500 et 700 (W/m²) ainsi les allures des : courant, tension et puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps de la technique P et O MPPT</u>	40
<u>Figure II.10. Les courbes de courant, tension et puissance de charge du convertisseur CC-CC élévateur (Boost) avec changement critique de l'ensoleillement de 1000, 500 et 700 (W/m²) en fonction du temps de la technique P et O MPPT</u>	41
<u>Figure II.11. Caractéristique I-V avec ensoleillement 500, 700 et 1000 (W/m²) ainsi que celles de la technique P et O MPPT</u>	42
<u>Figure II.12. Caractéristique P-V avec ensoleillement 500, 700 et 1000 (W/m²) ainsi que celles de la technique P et O MPPT</u>	42

Chapitre III : Technique de poursuite du point de la puissance maximale MPPT a base de L'intelligence artificielle : Logique Floue

Figure III. 1 Logique classique et logique floue	48
Figure III. 2: les différentes formes d'un nombre flou.	49
Figure III. 3. Les opérations de la logique floue.	51
Figure III. 4. La structure de contrôleurs flous.....	51
Figure III.5. La fuzzification.	52
Figure III.6 Agrégation des ensembles.....	55
Figure. (III.7). Les fonctions d'appartenance de la variable erreur.....	58
Figure. (III.8). Les fonctions d'appartenance de la variable de variation de l'erreur.	58
Figure. (III.9). Les fonctions d'appartenance de la variable de sortie ou de la variation du rapport cyclique.....	58
Figure. (III.10). Les règles floue	59
Figure III.11. Les courbes de l'ensoleillement avec changement critique de 1000, 500 et 700 (W/m²) ainsi les allures des : courant, tension et puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps de la technique Logique floue MPPT.....	60
Figure III.12. Les courbes de courant, tension et puissance de charge du convertisseur CC-CC élévateur (Boost) avec changement critique de l'ensoleillement de 1000, 500 et 700 (W/m²) en fonction du temps de la technique logique floue MPPT.	61
Figure III.13. Caractéristique I-V avec ensoleillement 500, 700 et 1000 (W/m²) ainsi que celles de la technique de logique floue MPPT	62
Figure III.14. Caractéristique P-V avec ensoleillement 500, 700 et 1000 (W/m²) ainsi que celles de la technique de logique floue MPPT.	62

Chapitre IV : Etude comparative entre les deux techniques de poursuite du point de la puissance maximale proposées

Figure IV.1. Les courbes du rapport cyclique du convertisseur CC-CC élévateur (Boost) et le courant de sortie du panneau photovoltaïque par les deux commandes MPPT précédentes sous des conditions météorologiques variables.....	66
Figure IV.2. Les courbes du rapport cyclique du convertisseur CC-CC élévateur (Boost) et le courant de sortie du panneau photovoltaïque avec un plan agrandi par les deux commandes MPPT précédentes sous des conditions météorologiques variables	66

<u>Figure IV.3. Les courbes de la tension et de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque par les deux commandes MPPT précédentes sous des conditions météorologiques variables.</u>	67
<u>Figure IV.4. Les courbes de la tension et de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque avec un plan agrandi par les deux commandes MPPT précédentes sous des conditions météorologiques variables</u>	68

Introduction générale :

Depuis plusieurs décennies, la question énergétique s'impose comme l'un des enjeux majeurs des sociétés contemporaines. Longtemps fondé sur l'exploitation intensive des énergies fossiles telles que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, le modèle énergétique mondial se trouve aujourd'hui à un tournant décisif. En effet, les conséquences environnementales désastreuses liées à ces ressources — émissions massives de gaz à effet de serre, pollution atmosphérique, réchauffement climatique — couplées à la raréfaction progressive des réserves exploitables, imposent une transition urgente vers des solutions durables et respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte, les énergies renouvelables, et plus particulièrement l'énergie solaire photovoltaïque, apparaissent comme une alternative stratégique, à la fois propre, inépuisable et largement disponible.

L'énergie solaire, captée par le biais de modules photovoltaïques, permet de convertir le rayonnement solaire en électricité par effet photovoltaïque. Cette technologie, bien qu'éprouvée, reste confrontée à une série de défis techniques. En particulier, le rendement des panneaux solaires demeure relativement faible, oscillant généralement autour de 15 à 20 % dans les dispositifs commerciaux courants. Ce rendement limité résulte de plusieurs facteurs : la variation constante de l'irradiance solaire, les pertes liées à l'échauffement des cellules, ainsi que la nature non linéaire des caractéristiques électriques des modules photovoltaïques. En effet, les courbes courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) dépendent étroitement des conditions climatiques, rendant ainsi la production d'énergie instable, difficile à contrôler et à prédire. Face à cette problématique, la recherche scientifique s'est orientée vers le développement de dispositifs d'optimisation énergétique, dont les algorithmes de suivi du point de puissance maximale, ou MPPT (Maximum Power Point Tracking), constituent un élément central. Ces techniques visent à ajuster en temps réel le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque afin de maximiser l'énergie extraite, quelles que soient les conditions d'ensoleillement et de température. Pour ce faire, le système MPPT interagit avec un convertisseur statique DC-DC souvent de type Boost qui régule la tension d'entrée pour maintenir le générateur au niveau de son rendement optimal.

Diverses méthodes de MPPT ont été élaborées au fil des ans, allant des plus simples aux plus complexes. Parmi les plus répandues, la technique Perturb and Observe (P&O) reste largement utilisée en raison de sa facilité d'implémentation, de son faible coût computationnel et de sa compatibilité avec les microcontrôleurs embarqués. Son principe repose sur une perturbation progressive de la tension (ou du courant) du générateur, suivie de l'observation de la variation de la puissance ; selon la réponse observée, la perturbation est maintenue ou inversée. Toutefois, cette méthode classique souffre de certaines limites structurelles. Elle génère notamment des oscillations permanentes autour du MPP, réduisant l'efficacité globale du système, et elle peut échouer à localiser correctement le point optimal lors de changements rapides des conditions climatiques, comme un passage nuageux soudain.

Dans l'objectif de surmonter ces lacunes, la communauté scientifique s'est tournée vers des techniques de commande dites intelligentes, capables d'intégrer des incertitudes, des non-linéarités, et une dynamique complexe. Parmi ces approches, la commande par logique floue (Fuzzy Logic Control – FLC) a suscité un intérêt croissant. S'inspirant du raisonnement humain, la logique floue repose sur un système de règles linguistiques du type "SI... ALORS..." permettant de modéliser un comportement sans qu'un modèle mathématique rigoureux ne soit nécessaire. Appliquée au MPPT, cette technique s'appuie généralement sur deux variables d'entrée (variation de la puissance et de la tension) et produit un signal de commande adapté à appliquer au convertisseur DC-DC.

La commande floue présente de nombreux atouts : réduction significative des oscillations, réactivité accrue face aux changements brusques, robustesse dans des environnements perturbés, et capacité d'adaptation à des profils variés de fonctionnement. Elle permet ainsi une meilleure stabilisation du système PV autour du MPP, avec un rendement optimisé. Cependant, sa mise en œuvre requiert une conception rigoureuse : choix des fonctions d'appartenance, élaboration de la base de règles, et stratégie de défuzzification doivent être soigneusement définis pour garantir la cohérence et l'efficacité du système.

C'est dans cette double perspective évaluation critique d'une méthode classique d'une part, et exploration d'une approche intelligente d'autre part que s'inscrit le présent travail. Ce mémoire a pour ambition de modéliser, simuler et comparer les performances des méthodes MPPT P&O et FLC appliquées à un système photovoltaïque associé à un convertisseur Boost. Les simulations seront réalisées sous MATLAB/Simulink, environnement de référence dans le domaine de la modélisation et de la commande des systèmes dynamiques. L'étude portera sur l'évaluation des deux stratégies sous divers scénarios réalistes, incluant des variations d'irradiance, et de température

Ce mémoire est structuré en quatre parties complémentaires :

Premier chapitre Notions Fondamentales sur les Composants d'un Panneau Photovoltaïque et sa Modélisation sous Environnement Matlab/Simulink

Deuxième chapitre Stratégies de poursuite de point de puissance maximale

Troisième chapitre Technique de poursuite du point de la puissance maximale MPPT à base de L'intelligence artificielle : Logique Floue

Quatrième chapitre Etude comparative entre les deux techniques de poursuite du point de la puissance maximale proposées.

Chapitre I :

Notions Fondamentales sur les Composants d'un Panneau Photovoltaïque et sa Modélisation sous Environnement Matlab/Simulink

I. 1. Introduction :

Ce chapitre contribue à examiner de manière approfondie le processus de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique à travers une étude théorique rigoureuse des éléments de base d'une cellule photovoltaïque et sa modélisation mathématique en se basant sur le modèle électrique générale à base d'une diode. Tandis que la modélisation du module photovoltaïque de la firme Solar Kyocera KC 200 GT est prise en considération afin de générer les caractéristique I-V et P-V pour différentes valeurs de température et ensoleillement, Les diagrammes de simulation sont développés sous l'environnement Matlab/Simulink. Nous y analyserons également l'effet des grandeurs météorologique sur les caractéristiques I-V et P-V du module photovoltaïque.

I.2. Le rayonnement solaire :

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. Le Soleil constitue la principale source d'énergie pour la Terre. C'est une étoile située à une distance moyenne de 149 598 000 km de notre planète. Il émet un rayonnement électromagnétique couvrant une large gamme de longueurs d'onde, allant de 0,22 à 10 μm . Ce rayonnement est composé de particules de lumière appelées photons.

L'énergie de chaque photon dépend directement de sa longueur d'onde λ , selon la relation suivante

$$E_{ph} = \frac{h.c}{\lambda} \quad (\text{I. 1})$$

Avec :

E_{ph} : L'énergie du photon.

h : La constante de Planck.

c : La vitesse de la lumière.

λ : La longueur d'onde.

En 1905, Albert Einstein a reçu le prix Nobel pour avoir montré que l'énergie d'un photon augmente lorsque sa longueur d'onde diminue : plus λ est petite, plus E_{ph} est grande.

Pour décrire le spectre solaire en fonction de la position du Soleil, on utilise la notion de masse d'air (Air Mass ou AM). Ce paramètre mesure l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons du Soleil. Par exemple :

AM0 Correspond au rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère, avec une intensité d'environ 1353 W/m^2 ,

AM1.5, qui est la référence standard au niveau du sol, donne une puissance réduite à environ 1000 W/m^2 , à cause des pertes dans l'atmosphère.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit des pertes d'énergie à cause de l'absorption et de la diffusion provoquées par les gaz, la vapeur d'eau, les poussières et les particules en suspension. La couche d'ozone, notamment, absorbe une partie importante des rayons ultraviolets du Soleil, modifiant ainsi le spectre lumineux qui atteint la surface terrestre [1].

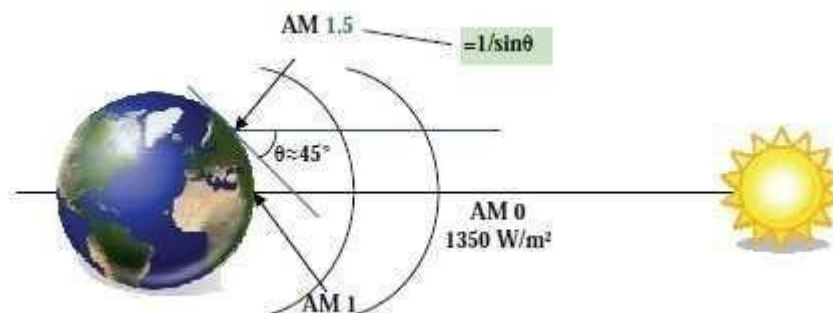


Figure I.1. Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion la convention AM

I.3. L'énergie photovoltaïque:

Le terme photovoltaïque désigne un phénomène physique permettant de transformer la lumière en électricité. Ce processus repose sur le transfert d'énergie des photons (particules de lumière) aux électrons d'un matériau semi-conducteur. Lorsqu'ils entrent en contact avec ce matériau, les photons issus du rayonnement solaire, sous forme d'ondes électromagnétiques, transmettent leur énergie aux électrons. Cette interaction provoque un déplacement des électrons, générant ainsi un courant électrique.

I.4. Effet photoélectrique et jonction P-N:

La transformation de l'énergie solaire en électricité repose sur l'effet photoélectrique. Lorsqu'un semi-conducteur est exposé à un rayonnement lumineux dont l'énergie des photons est au moins égale au gap énergétique du matériau, ces photons sont absorbés. Cela permet aux électrons de passer de la bande de valence à la bande de conduction, formant ainsi des paires électron-trou. Ces charges peuvent ensuite se déplacer dans le matériau et générer un courant électrique si une polarisation est appliquée : c'est le phénomène de photoconductivité. La figure. 2 présente le schéma de principe de la conversion photoélectrique.

Le semi-conducteur comporte deux zones distinctes :

Une zone dopée N, riche en électrons, et une zone dopée P, déficitaire en électrons (ou riche en trous). Quand ces deux régions sont mises en contact, les électrons de la zone N migrent vers la zone P, créant ainsi une zone de charge d'espace où s'installe un champ électrique interne. La zone N devient alors chargée positivement, et la zone P négativement.

En éclairant la jonction P-N, de nouvelles paires électron-trou sont créées dans cette zone. Le champ électrique sépare immédiatement ces charges : les électrons sont dirigés vers la zone N, les trous vers la zone P.

Si le circuit est ouvert, une photo-tension apparaît aux bornes du composant. Si une charge externe est connectée, un courant électrique circule : c'est ainsi que l'énergie lumineuse est convertie en électricité [2].

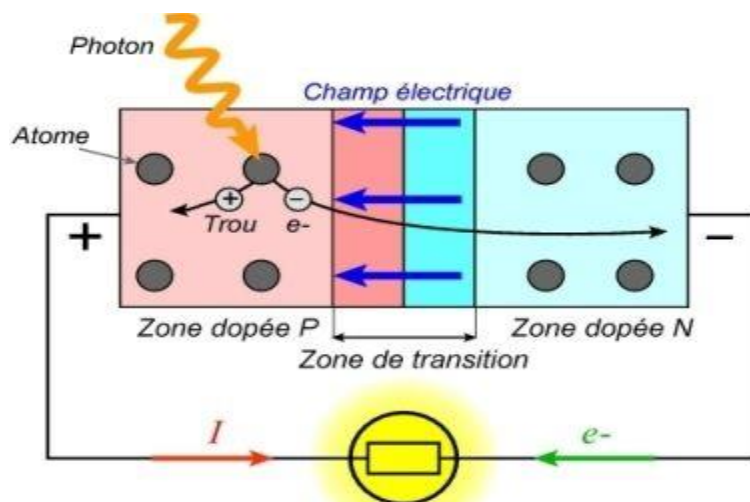


Figure I.2. Schéma de principe de la conversion photoélectrique.

I.5. Historique du photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque est passée du statut de simple curiosité scientifique à celui d'une base essentielle des énergies renouvelables. Cette évolution remarquable a été marquée par des découvertes décisives, des avancées technologiques majeures et des étapes clés qui ont façonné cette filière dynamique. Voici un retour sur l'histoire du photovoltaïque, à travers les moments marquants qui ont contribué à son développement.

1839 : Le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque, en observant qu'un matériau peut produire de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière.

1875 : Werner Von Siemens a publié un article à l'académie des sciences de Berlin sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, mais le phénomène reste sans application concrète jusqu'à la Seconde Guerre mondiale.

1954: Les chercheurs américains Chaplin, Pearson et Prince mettent au point la première cellule photovoltaïque à haut rendement, à destination du secteur spatial.

1958 : Une cellule solaire atteignant un rendement de 9 % est développée, et les premiers satellites alimentés par énergie solaire sont envoyés dans l'espace.

1973 : L'Université du Delaware construit la première maison fonctionnant grâce à des cellules photovoltaïques.

1983 : Une voiture solaire parcourt 4000 km à travers l'Australie, démontrant les capacités de cette technologie dans le domaine de la mobilité.

Années 1980 : Début de l'utilisation des systèmes photovoltaïques pour l'électrification rurale et le pompage d'eau dans les zones isolées.

Fin des années 1990 : Le photovoltaïque commence à être utilisé pour injecter de l'électricité dans les réseaux nationaux, notamment au Japon et en Allemagne.

Années 2000 : Mise en place de politiques de soutien à l'énergie solaire dans de nombreux pays et développement de centrales photovoltaïques de grande puissance, atteignant plusieurs dizaines de mégawatts.

2015: la puissance photovoltaïque totale installée au niveau mondial atteint plus de 220 GW

2020: la puissance totale installée des systèmes photovoltaïques dans le monde dépasse les 710 (GW), et atteint plus de 840 (GW) en 2021 [3].



Figure I.3. Installation des panneaux photovoltaïques.

I.6. La cellule photovoltaïque:

La cellule photovoltaïque est un élément de base dans la production de l'énergie électrique. Elle est constituée principalement de semi-conducteurs, généralement à base de silicium, un matériau capable de transformer la lumière du soleil en énergie électrique. L'électricité produite est initialement en courant continu, que l'onduleur convertit ensuite en courant alternatif délivrer aux industries et aux installations publiques. Cette énergie peut également être stockée dans des batteries pour être utilisée plus tard.

Pour capter d'avantage de lumière et produire plus d'énergie, les cellules sont assemblées en série/parallèle afin de construire un module ou panneau photovoltaïque. Ce dernier est installé sur les toits ou sur des champs photovoltaïques.

Chaque cellule est composée de plusieurs couches, dont :

- ✓ une couche active qui capte et absorbe les rayons solaires ;
- ✓ des contacts métalliques à l'avant et à l'arrière, jouant le rôle d'électrodes pour capter le courant ; d'autres couches techniques visant à optimiser les performances de la cellule.
- ✓ Le nombre de cellules dans un panneau varie selon sa taille, allant généralement de 36 à 120 unités, avec une épaisseur moyenne de 0,2 mm par cellule [4].

I.7. Les différents types de cellules photovoltaïques :

Il existe plusieurs technologies de cellules photovoltaïques, chacune ayant ses propres caractéristiques et domaines d'application :

I.7.1. Cellules solaires de la première génération :

I.7.1.1. Cellules en silicium monocristallin:

Les cellules solaires en silicium monocristallin sont l'une des technologies les plus anciennes du photovoltaïque, mais elles demeurent aujourd'hui les plus efficaces et les plus répandues. Elles sont fabriquées à partir de fines tranches découpées dans un unique cristal de silicium, cultivé avec précision dans des conditions strictement contrôlées. Chaque cellule mesure généralement quelques pouces de diamètre et plusieurs sont regroupées pour former un panneau solaire comparées à d'autres types de cellules photovoltaïques, elles offrent un rendement supérieur, atteignant jusqu'à 24,2 %.ce qui permet de produire plus d'électricité sur une surface réduite. Ce type de cellule est donc particulièrement adapté aux installations disposant de peu d'espace ou nécessitant un encombrement minimal. Toutefois, la fabrication de ces cristaux de silicium pur exige une grande quantité d'énergie et des procédés complexes, ce qui rend leur coût de production plus élevé que celui des autres technologies photovoltaïques [5].

I.7.1.2. Cellules en silicium polycristallines:



Figure I.4. Cellules polycristallines.

Les cellules polycristallines sont des cellules photovoltaïques fabriquées à partir de silicium composé de plusieurs cristaux. Contrairement aux cellules monocristallines, la production de plaquettes de silicium polycristallin consiste à faire croître plusieurs cristaux dans un moule,

ce qui est moins coûteux que la fabrication à partir d'un seul cristal, car les exigences de contrôle des conditions de croissance sont moins strictes. Cette technique donne naissance à une structure composée de cristaux de silicium imbriqués. Les panneaux solaires utilisant ces cellules sont plus abordables en termes de coût par surface, mais offrent un rendement légèrement inférieur à celui des panneaux monocristallins, avec une efficacité pouvant atteindre 19,3 % .

I.7.1.3. Cellules en silicium amorphe:



Figure I.5. Cellules en silicium amorphe

Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe sont basées sur une forme de silicium sans structure cristalline régulière, à la différence des cellules monocristallines ou polycristallines. les cellules solaires en silicium amorphe sont couramment utilisées dans des appareils électroniques compacts, tels que les calculatrices. Contrairement aux cellules cristallines, où des cristaux de silicium sont cultivés, le silicium amorphe est déposé sous forme de couche très mince sur un substrat, comme du métal, du verre ou du plastique. Parfois, plusieurs couches de silicium, dopées différemment pour capter des longueurs d'onde variées, sont superposées afin d'améliorer l'efficacité, bien que la fabrication de ces panneaux soit complexe, elle nécessite moins d'énergie que celle des panneaux cristallins, et le coût a diminué grâce à la production en grande quantité.

Une des caractéristiques notables des cellules en silicium amorphe est leur capacité à produire des panneaux flexibles, en raison de la minceur de la couche de silicium. Cependant, leur rendement est inférieur à celui des panneaux cristallins, ne dépassant généralement pas

10 % par unité de surface, ce qui les rend moins adaptées aux installations sur toiture où une grande surface est nécessaire pour obtenir la même quantité d'énergie.



Figure I.6. Cellules hybrides en silicium

Les cellules hybrides en silicium désignent une nouvelle génération de cellules photovoltaïques combinant différentes technologies, généralement du silicium cristallin et des couches minces (comme le silicium amorphe ou des matériaux organiques). L'objectif est d'optimiser les performances globales : ces cellules offrent une meilleure efficacité énergétique, une plus grande durabilité et un potentiel de réduction des coûts de production. Cette approche hybride permet de tirer parti des points forts de chaque matériau, tout en compensant leurs limites respectives. Elles représentent une avancée prometteuse dans le domaine de l'énergie solaire.

I.7.2. Les cellules solaires de deuxième génération:

Sont connues sous le nom de cellules à couches minces, se caractérisent par l'utilisation de très fines couches de matériaux semi-conducteurs, souvent de quelques micromètres seulement, contrairement aux cellules en silicium cristallin plus épaisses. Grâce à une consommation réduite de matériaux et à des procédés de fabrication moins onéreux, cette technologie permet de produire des panneaux solaires à un coût nettement inférieur.

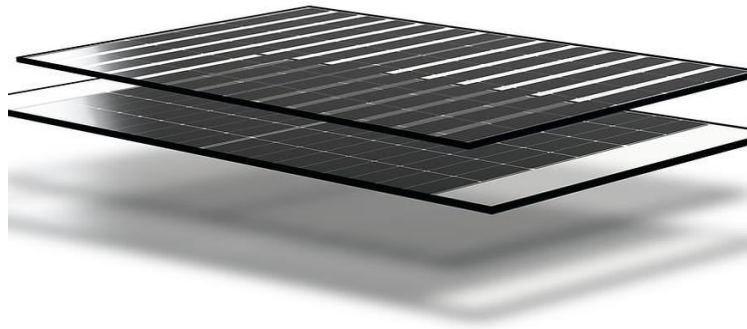


Figure I.7. Cellule en Tellure et Cadmium

Parmi les technologies à couches minces utilisées industriellement, on distingue :

CdTe : Tellure de cadmium (Cadmium Telluride)

CIS / CIGS : Sélénure de cuivre, indium et gallium (Copper Indium Gallium Selenide)

Silicium en couche mince : Silicium amorphe (aSi) et microcristallin.

L'efficacité de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique de ces technologies varie de 6 % pour le silicium amorphe (aSi) à des valeurs comprises entre 5 % et 11 % pour le Tellure de cadmium (CdTe).

I.7.3. Cellules solaires de troisième génération: Les cellules à colorant

Les cellules solaires de troisième génération sont au court de nombreuses recherches actuelles dans le domaine des énergies renouvelables. Contrairement aux cellules solaires traditionnelles, elles exploitent des matériaux innovants, tels que les nanotubes de carbone, les fils de silicium, des encres solaires adaptées à l'impression classique, des colorants organiques et des plastiques conducteurs. Ces technologies viennent compléter ou remplacer le silicium, permettant d'ouvrir de nouvelles perspectives pour les panneaux photovoltaïques.

L'objectif principal des cellules de troisième génération est d'augmenter l'efficacité des panneaux solaires en exploitant une plus grande partie du spectre solaire, y compris l'infrarouge. Cela permettrait de rendre l'énergie solaire plus performante et plus accessible. Par ailleurs, ces cellules ont pour but de réduire les coûts de production et de favoriser une adoption plus large de l'énergie solaire.

I.7.4. Les cellules de la quatrième génération : Les cellules organiques

Les cellules solaires organiques sont une technologie photovoltaïque qui utilise des matériaux à base de carbone (comme des polymères ou de petites molécules organiques) pour transformer la lumière en électricité. Contrairement aux cellules classiques en silicium, elles offrent une grande flexibilité de fabrication, notamment grâce à des procédés comme l'impression, ce qui les rend adaptées à des applications variées et innovantes.

Les cellules solaires organiques pourraient être utilisées dans des applications spécifiques, telles que les écrans flexibles, ainsi que pour la recharge de téléphones mobiles ou d'ordinateurs portables, entre autres.

I.8. Le module photovoltaïque :

Le module photovoltaïque, plus communément appelé panneau solaire, est un générateur électrique capable de convertir l'énergie des photons de la lumière du soleil en électricité, un phénomène connu sous le nom d'effet photoélectrique.

Il constitue l'unité de base d'un système solaire et se compose de cellules solaires interconnectées, soigneusement protégées contre les effets de dégradation extérieure telle que (intempéries, poussière, etc.). Pour garantir un fonctionnement sécurisé, des dispositifs de protection y sont intégrés, évitant ainsi les risques de dégradation. Les cellules peuvent être reliées entre elles en série ou en parallèle, selon les besoins de puissance ou de tension.

Ce type de module comprend généralement plusieurs cellules photovoltaïques, fabriquées majoritairement à partir de silicium. Sa structure est constituée à environ 80 % de verre, le reste étant composé de matériaux tels qu'un cadre en aluminium, des conducteurs en cuivre ou en argent, du plastique, ainsi que du silicium cristallin [6].



Figure I.8. Structure d'une cellule photovoltaïque

I.9. Protection des installations photovoltaïques par diodes de By-pass et d'anti retour:

Pour éviter les risques de détérioration liés au raccordement des cellules en série et des modules en parallèle, deux systèmes de protection sont généralement intégrés dans les installations photovoltaïques : la diode de dérivation (by-pass) et la diode de blocage (anti-retour) [7].

I.9.1. Diode de dérivation ou (by-pass) :

L'ombrage est un problème pour les panneaux solaires. Il se produit lorsque des objets (comme des arbres, des bâtiments ou des antennes) bloquent la lumière du soleil sur les panneaux . Pour éviter le fonctionnement inverse des cellules photovoltaïques lorsque certaines se trouvent à l'ombre ce qui influence leur échauffement et puis le risque de leur destruction pour cela, des diodes de by-pass sont insérer entre les cellules photovoltaïque est essentiel. L'effet bénéfique de ce type de diodes c'est qu'elles ne réduisent pas la performance des cellules qui sont complètement exposées au soleil dans un même panneau solaire, surtout dans les systèmes d'où les panneaux sont connectés en série.

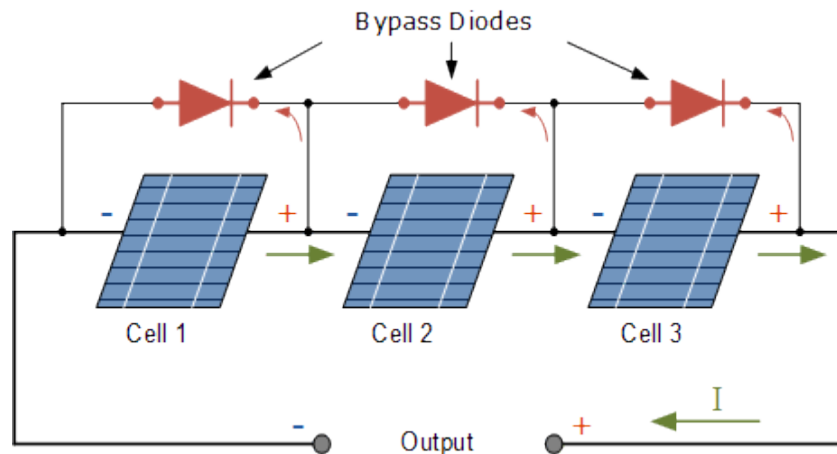


Figure I.9. Connexion des diodes de Bypass entre les cellules photovoltaïques.

I.9.2. La diode anti-retour :

Les diodes d'anti retour sont utilisées souvent dans les installations photovoltaïques lorsque les panneaux sont connectés en parallèle. Ces diodes empêchent la conduction des courants inverses ou négatifs cela veut dire que les panneaux à faible tension due à l'effet d'ombrage peuvent absorber des courants négatifs ou inverses cela provoque un rendement faible de l'installation photovoltaïque ainsi la destruction et la défaillance des panneaux parcourus par les courants inverses.

I.10. Modélisation d'un panneau photovoltaïque

I.10.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est un composant de base qui convertit directement l'énergie lumineuse (provenant du soleil) en énergie électrique, grâce à l'effet photovoltaïque. Pour étudier son comportement et simuler son fonctionnement dans différents environnements, on utilise un modèle électrique équivalent, souvent basé sur une source de courant, une diode, et parfois une ou deux résistances (série et parallèle)

Les principaux éléments du modèle sont :

- Source de courant (I_{ph}) : représente le courant généré par la lumière.
- Diode : modélise le comportement non linéaire de la cellule.
- Résistance en série (R_s) : tient compte des pertes dans les connexions et le matériau.
- Résistance en parallèle (R_{sh}) : représente les pertes par fuite [8].

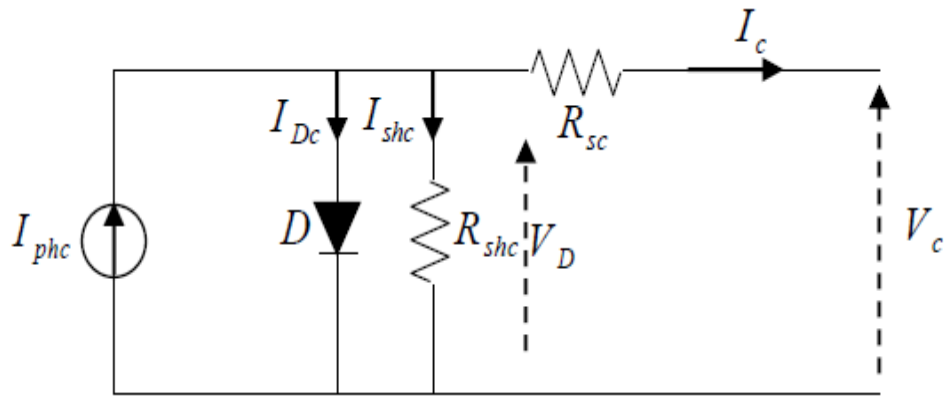


Figure I.10. Un modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

I.10.2. Modélisation d'un module photovoltaïque :

La modélisation constitue un outil fondamental pour simuler le fonctionnement d'un système réel, car elle permet de prédire son comportement dans diverses conditions. Elle offre également la possibilité d'étudier l'effet de plusieurs facteurs sur ce système.

Dans le cas du module photovoltaïque, celui-ci est représenté comme une jonction p-n, dont la réponse électrique suit un comportement non linéaire. Pour mieux comprendre ces caractéristiques, un modèle mathématique est établi à partir d'équations reliant les entrées (comme la température et l'ensoleillement) aux sorties (tension, courant) du module.

Ce modèle est généralement utilisé pour estimer la performance électrique du module photovoltaïque en fonction des conditions environnementales auxquelles il est exposé.

Un module photovoltaïque est un ensemble de cellules solaires connectées entre elles, souvent en série et/ou en parallèle, pour produire une puissance électrique suffisante pour une application (maison, système autonome, centrale solaire...).

Pour étudier ou simuler son comportement, on utilise un modèle électrique équivalent basé sur celui d'une cellule photovoltaïque [9].

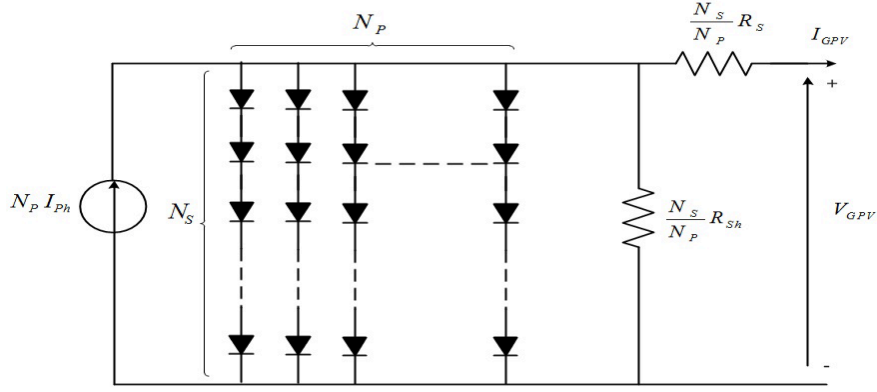


Figure I.11. Modèle général du circuit électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque.

La caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque (GPV) est donnée par l'équation suivante :

$$I_{GPV} = N_P I_{Ph} - N_P I_0 \left[\exp \left(q \frac{\left(\frac{V_{GPV}}{N_S} + \frac{I_{GPV} R_S}{N_P} \right)}{AKT} \right) \right] - \frac{\left(\frac{N_P V_{GPV}}{N_S} + I_{GPV} R_S \right)}{R_{Sh}} \quad (I.2)$$

L'équation de base qui décrit mathématiquement la caractéristique (I-V) de la cellule solaire à une seule diode est :

$$I_{PV \text{ cell}} = I_{Ph \text{ cell}} - I_{D \text{ cell}} - I_{sh \text{ cell}} \quad (I.3)$$

On distingue trois composantes principales :

- I_{ph_cell} , le courant photo-généré sous l'effet de l'ensoleillement,
- I_{D_cell} , le courant associé à la diode,
- I_{sh_cell} , le courant de fuite à travers la résistance parallèle R_{sh} .

Ces courants sont exprimés par les relations mathématiques suivantes :

$$I_{Ph \text{ cell}} = \frac{G}{G_n} \left(I_{SC} + K_I (T - T_{ref}) \right) \quad (I.4)$$

Tel que :

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad (I.5)$$

$$I_{D \text{ cell}} = I_{0 \text{ cell}} \left(\exp \left(\frac{V_{PV \text{ cell}} + I_{PV \text{ cell}} R_{S \text{ cell}}}{A V_t} \right) - 1 \right) \quad (I.6)$$

$$I_{sh \text{ cell}} = \left(\frac{V_{PV \text{ cell}} + I_{PV \text{ cell}} R_{S \text{ cell}}}{R_{sh \text{ cell}}} \right) \quad (I.7)$$

On suppose généralement que $I_{SC} \approx I_{PV}$ lors de la modélisation des dispositifs photovoltaïques. Cette approximation est justifiée par une résistance série négligeable et une

résistance parallèle très élevée. Le courant de saturation de la diode peut alors être déterminé à partir de l'équation suivante :

$$I_{0\ cell} = I_{RS} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(q E_G \frac{\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}{K A} \right) \quad (I.8)$$

Le courant de saturation inverse I_{RS} correspond à celui de la cellule photovoltaïque sous des conditions standard de rayonnement et de température. Il peut être exprimé à l'aide de l'équation suivante :

$$I_{RS} = \frac{I_{SC,n} + K_I(T - T_{ref})}{\exp \left(\frac{V_{OC,n} + K_V(T - T_{ref})}{A V_t} \right) - 1} \quad (I.9)$$

Une cellule solaire isolée fournit une faible tension, typiquement autour de 0,6 V pour les cellules au silicium cristallin (Si). Afin d'atteindre la puissance requise, plusieurs cellules sont donc associées en série et en parallèle. En considérant que toutes les cellules photovoltaïques sont identiques et soumises aux mêmes conditions de fonctionnement, la tension totale est proportionnelle au nombre de cellules en série N_S , tandis que le courant total est proportionnel au nombre de cellules en parallèle N_P . Ainsi :

$$N_{Ph} = N_P I_{Ph\ cell} \quad (I.10)$$

$$V_{PV} = N_S V_{PV\ cell} \quad (I.11)$$

$$I_{PV} = N_S I_{PV\ cell} \quad (I.12)$$

$$I_0 = N_P I_{0\ cell} \quad (I.13)$$

$$R_S = \frac{N_S}{N_P} R_{S\ cell} \quad (I.14)$$

$$R_{sh} = \frac{N_S}{N_P} R_{sh\ cell} \quad (I.15)$$

I.11. Tableau caractéristique du module photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC

200GT :

Paramètres :	Variables :	Valeurs :
Puissance maximale	$P_{max,e}$	200.143 (W)
Tension maximale	V_{mp}	26.3 (V)
Courant à la puissance maximale	V_{mp}	7.61 (A)
Courant de court-circuit	I_{sc}	8.21 (A)
Tension en circuit-ouvert	V_{oc}	32.9 (V)
Coefficient de température de courant de court-circuit	K_I	0.06 (A/°K)
Coefficient de température de tension en circuit-ouvert	K_V	-0.35502 (A/°K)
Nombre total de cellules solaires en série	N_S	45
Nombre total de cellules solaires en parallèle	N_P	1
Facteur d'idéalité de la diode	A	0.97736
Valeur d'énergie de gap	E_G	1.12 (e V)
Résistance en série	R_s	0.34483 (Ω)
Résistance en parallèle	R_{sh}	150.6921 (Ω)

I.12. Simulation de module photovoltaïque de la firme Kyocera KC 200 GT :

La figure. 12 représente un modèle de simulation d'un module photovoltaïque sous Simulink, ce modèle permet d'étudier le comportement électrique d'un panneau solaire en fonction des conditions d'ensoleillement (en W/m²) et de température (en °C). Ces paramètres influencent directement sur la production d'énergie du panneau solaire. Ils sont envoyés vers un bloc de calcul, nommé ici L_ctrl, qui calcule le courant de lumière i_{L1} , c'est-à-dire le courant généré par l'effet photoélectrique sous des conditions d'ensoleillement et température appropriés, i_{L1} Le courant alimente un circuit équivalent du module photovoltaïque basé sur un modèle à une diode, ce circuit comprend :

- Une source de courant représentant le courant généré par la lumière.
- Une diode modélisant la jonction PN de la cellule photovoltaïque.
- Une résistance en parallèle (R_{sh}) représentant les pertes par courant de fuite.

- Une résistance en série (R_s) modélisant les pertes internes dues aux connexions et au matériau.

Les grandeurs électriques, notamment la tension de sortie V_{pv} et le courant de sortie I_{pv} , sont déterminées à partir de l'équation caractéristique du panneau photovoltaïque. Cette équation prend en compte les effets de la température et de l'ensoleillement sur la diode, les résistances, et la génération de courant. Les signaux sont ensuite filtrés via des blocs de filtrage (I Filter et V Filter) pour lisser les courbes de tension et de courant.

Un bloc de multiplication permet de calculer la puissance instantanée délivrée par le panneau solaire selon la formule

$$P = V_{PV} \times I_{PV} \quad (I.16)$$

Le modèle permet également de calculer la puissance de sortie du panneau et utilise des blocs de surveillance pour suivre des grandeurs internes. Il est utile pour analyser le comportement

du module PV sous différentes conditions et pour tester des stratégies de commande comme le MPPT.

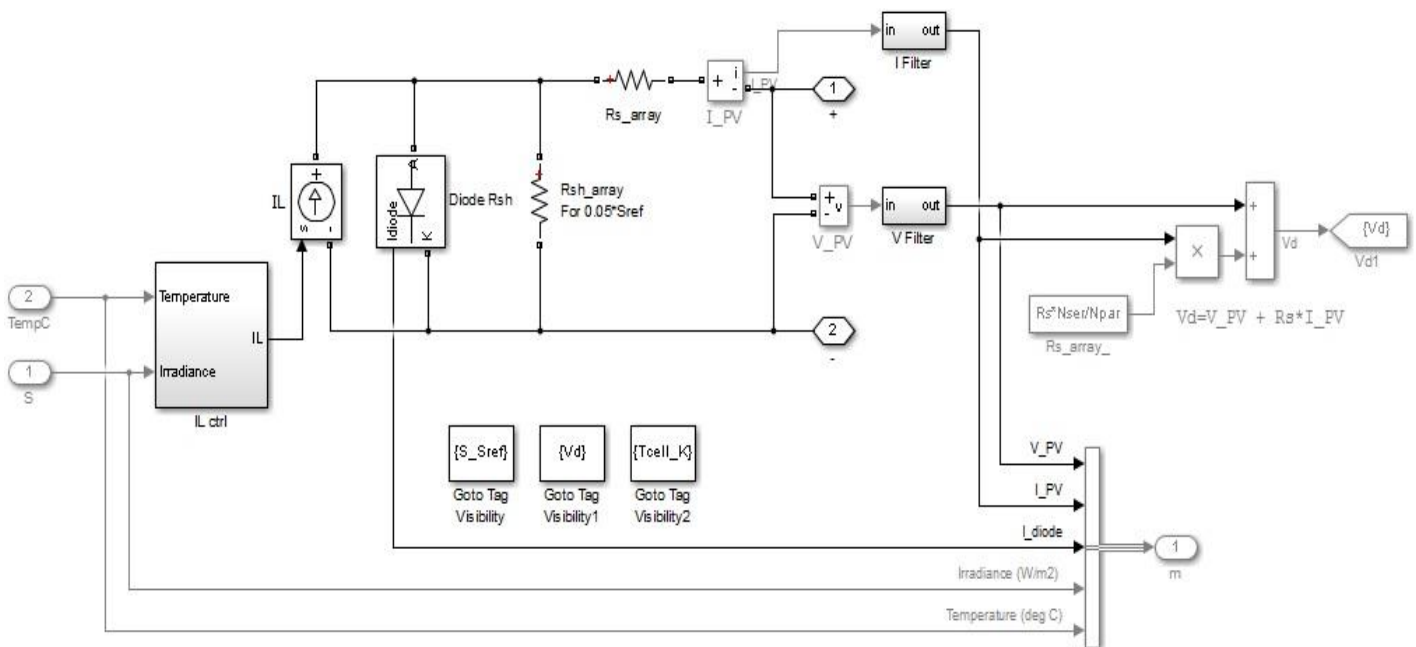


Figure I.12. Bloc diagramme du module photovoltaïque sous environnement Matlab/Simulink.

La figure. 13 présente un modèle de simulation basé sur un circuit pour un panneau photovoltaïque sous environnement simulink qui permet d'estimer les courbes caractéristiques I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque en fonction des variations des paramètres environnementaux (température et ensoleillement) et des paramètres de la cellule (résistance parasite et facteur d'idéalité). Ce modèle pourrait servir à analyser le développement d'un algorithme MPPT (suivi du point de puissance maximale). À l'aide d'une équation de diode de Shockley, un modèle de panneau photovoltaïque Simulink précis a été développé. Un panneau photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC 200 GT de 200.143 (W) a été choisi pour évaluer le modèle développé.

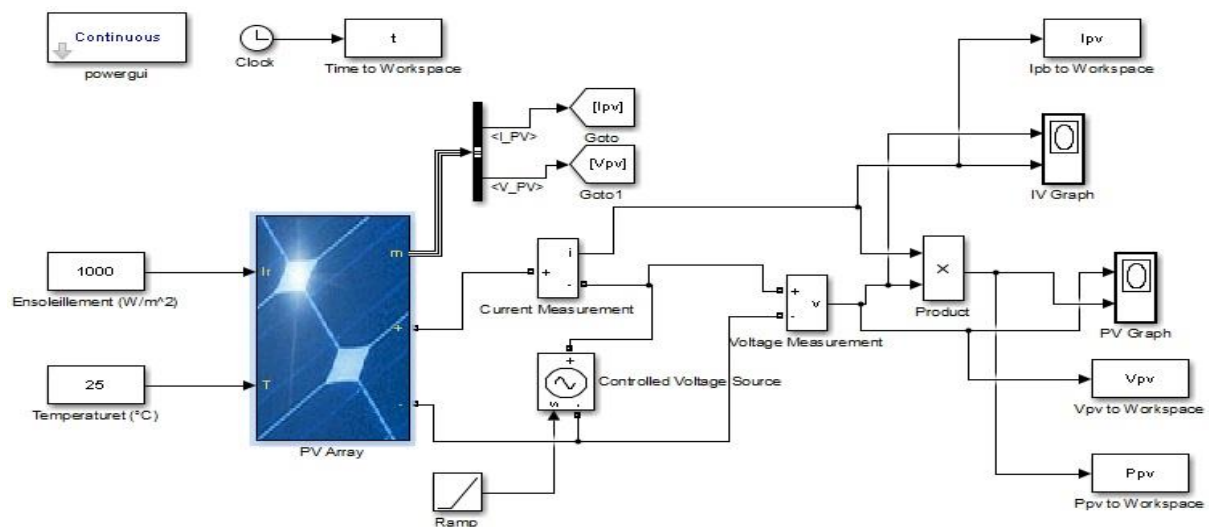


Figure I.13. Bloc diagramme du panneau photovoltaïque permettant de générer les caractéristiques IV et PV pour différentes variation des conditions météorologique sous environnement Matlab/Simulink.

I.13. Caractéristique I–V du module Kyocera Solar KC 200 GT

I.13.1. Caractéristique I–V du module Kyocera Solar KC 200 GT selon l'intensité d'ensoleillement

La caractéristique I–V (courant-tension) d'un module photovoltaïque décrit la relation entre le courant de sortie (I) et la tension (V) du module pour une condition donnée. Cette courbe dépend fortement de l'irradiance solaire (ou intensité d'ensoleillement, exprimée en W/m²) dans le cas du module Kyocera KC 200 GT, lorsqu'on fait varier l'intensité d'ensoleillement, voici ce qu'on observe sur la courbe I–V de figure 14 :

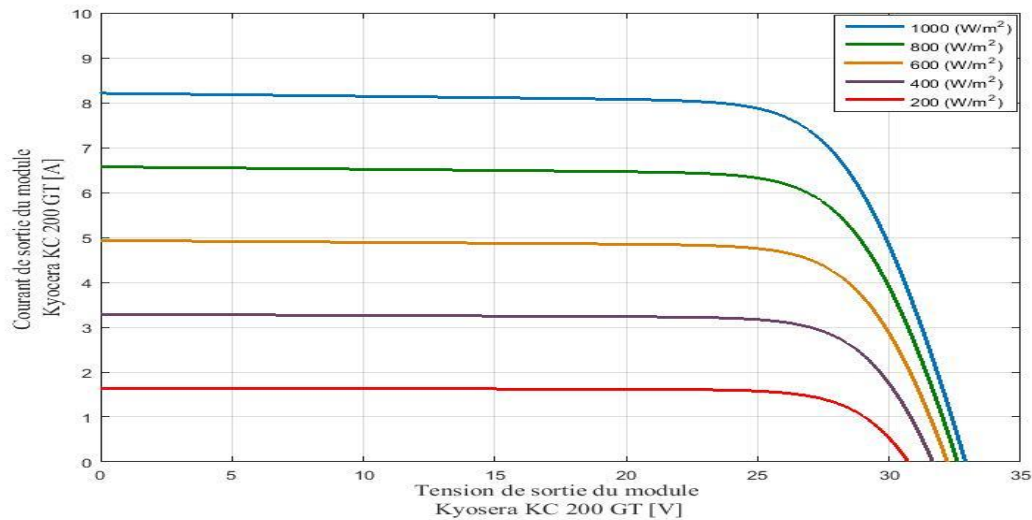


Figure I.14. Caractéristique IV du module photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC 200 GT sous pour différentes valeurs d'intensité d'ensoleillement.

- Lorsque l'irradiance augmente de 200 à 1000 W/m², le courant augmente presque proportionnellement.
- la tension augmente légèrement mais de manière non linéaire.

I.13.2. Caractéristique P–V du module Kyocera Solar KC 200 GT selon l'ensoleillement

La caractéristique P–V représente la relation entre la puissance de sortie d'un module Kyocera KC 200 GT photovoltaïque et sa tension. A partir de la courbe de figure 15, lorsque l'ensoleillement augmente de 200 à 1000 W/m², la puissance produite augmente aussi.

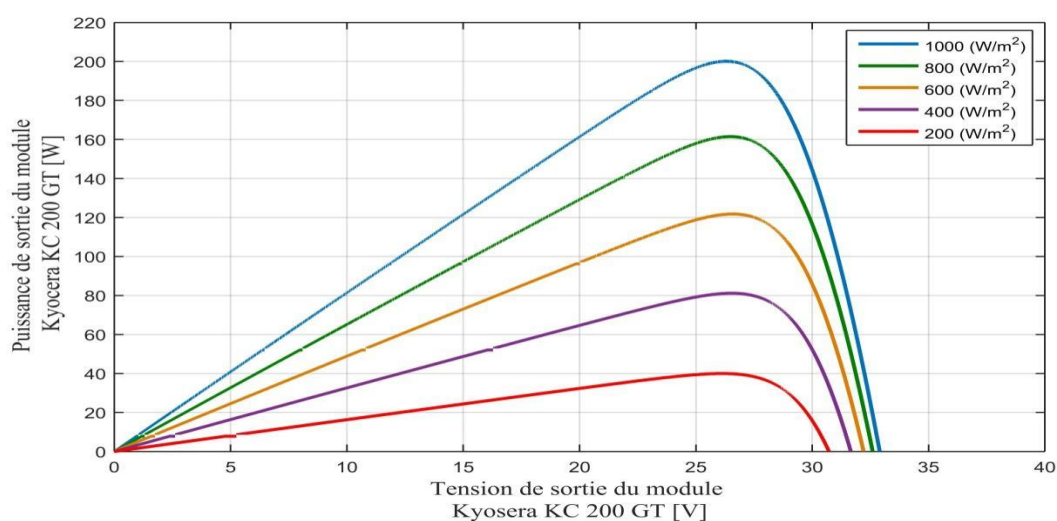


Figure I.15. Caractéristique PV du module photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC 200 GT sous pour différentes valeurs d'intensité d'ensoleillement.

Cela s'explique par le fait que plus il y a de lumière, plus le panneau peut générer de courant, donc plus de puissance ($P = V \times I$), et Le MPP se déplace légèrement avec les conditions.

I.13.3. Caractéristique I–V du module Kyocera Solar KC 200 GT selon la température

La figure 16 représente Caractéristique I–V du module Kyocera Solar KC 200 GT selon la température, il est influencée non seulement par l'ensoleillement, mais aussi par la température ambiante, lorsqu'on observe le module Kyocera Solar KC 200 GT à différentes températures de 0 (°C) à 100 (°C), on remarque que :

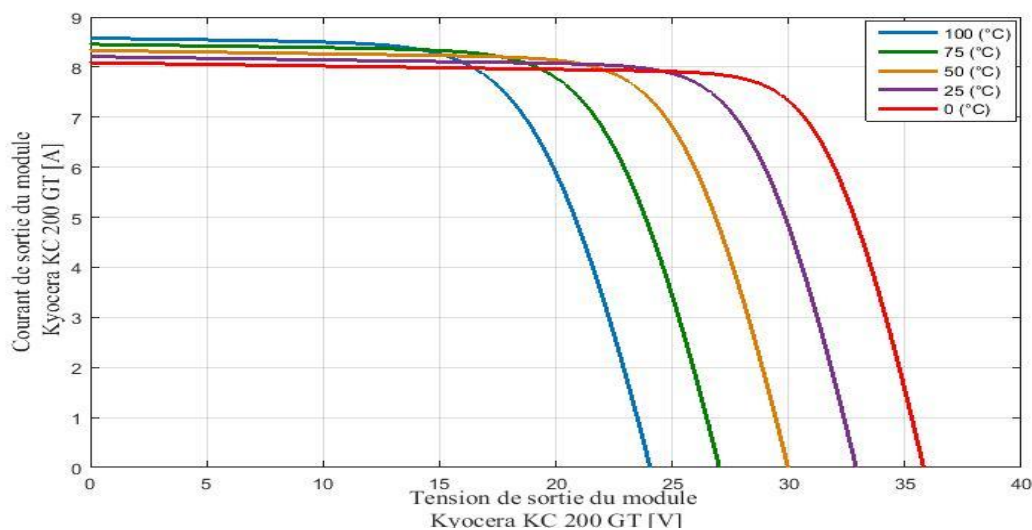


Figure I.16. Caractéristique IV du module photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC 200 GT sous pour différentes valeurs d'intensité de température.

- Le courant augmente légèrement avec la température.
- la tension diminue de façon plus marquée.
- Cela fait que la puissance maximale produite par le panneau diminue lorsque la température augmente

I.13.4. Caractéristique PV du module photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC 200 GT sous pour différentes valeurs d'intensité de température

La courbe P–V (puissance en fonction de la tension) d'un module photovoltaïque Kyocera KC 200 GT permet de visualiser la puissance que le panneau peut fournir à différentes tensions, lorsque la température augmente, on remarque dans la figure 17 les effets suivants :

- La tension de fonctionnement du panneau diminue.
- Une baisse du point de puissance maximale (MPP)

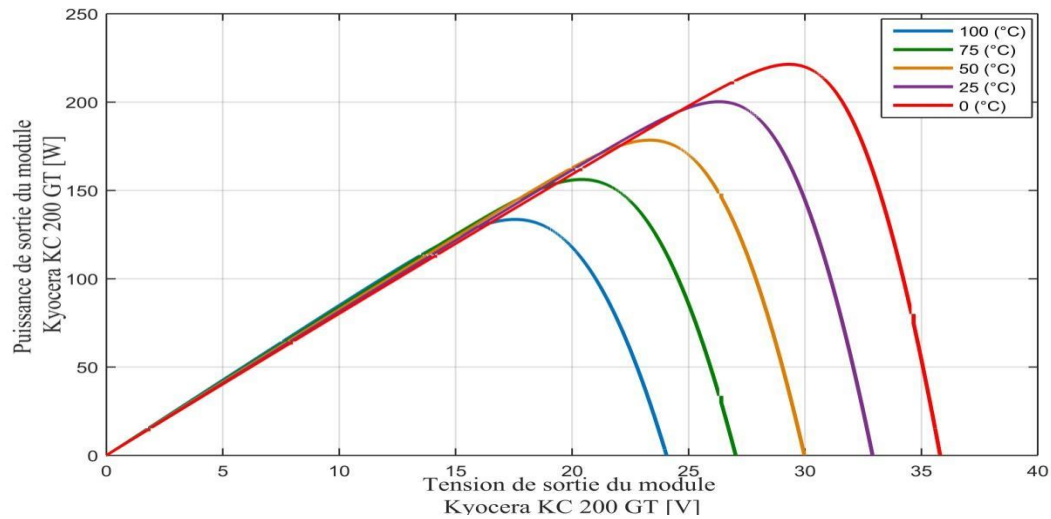


Figure I.17. Caractéristique PV du module photovoltaïque de la firme Kyocera Solar KC 200 GT sous pour différentes valeurs d'intensité de température.

I.13.5. Caractéristique IV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en série $N_s = 1$ et en variant le nombre de modules en parallèle N_p sous des conditions météorologique constantes.

L'étude de la courbe I-V (courant en fonction de la tension) d'un panneau solaire, on fixe $N_s=1$, c'est-à-dire qu'on utilise un seul module en série, et on fait varier le nombre de modules en parallèle (N_p). Lorsque le nombre de modules en parallèle (N_p) augmente figure 18 :

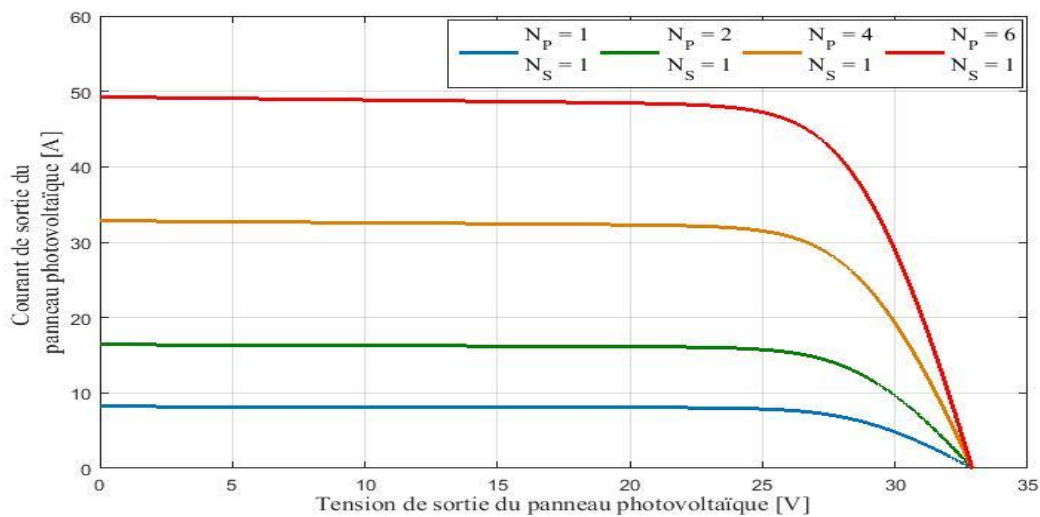


Figure I.18. Caractéristique IV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en série $N_s = 1$ et en variant le nombre de modules en parallèle N_p sous des conditions météorologique constantes.

- La tension du système reste constante, car le nombre de modules en série (N_s) est fixé à 1.
- Le courant total augmente.

I.13.6. Caractéristique PV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en série $N_s = 1$ et en variant le nombre de modules en parallèle N_p sous des conditions météorologique constantes.

Dans ce cas, on étudie comment la puissance électrique du système photovoltaïque varie en fonction de la tension, en gardant un seul module en série ($N_s = 1$), et en changeant le nombre de modules en parallèle (N_p). Les conditions ensoleillement et température sont constantes.

Apartir de la figure 19 on remarque que :

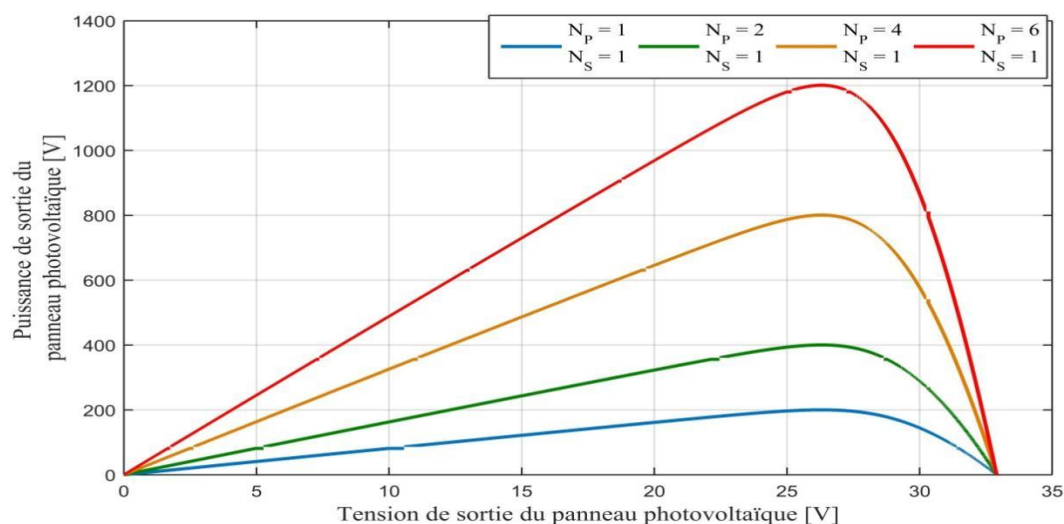


Figure I.19. Caractéristique PV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en série $N_s = 1$ et en variant le nombre de modules en parallèle N_p sous des conditions météorologique constantes.

- Le point de puissance maximale (MPP) reste à la même tension, mais la valeur de puissance augmente avec N_p .

I.13.7. Caractéristique IV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en parallèle $N_p = 1$ et en variant le nombre de modules en série N_s sous des conditions météorologiques constantes.

Dans ce cas, on étudie comment évolue la courbe I-V (courant en fonction de la tension) d'un panneau photovoltaïque en gardant un seul module en parallèle ($N_p = 1$), et en faisant varier le nombre de modules en série (N_s). Les conditions sont constantes (ensoleillement et température).

- Puisqu'on garde $N_p = 1$, le courant total reste constant
- Augmentation la tension totale du module photovoltaïque par l'augmentation de N_s

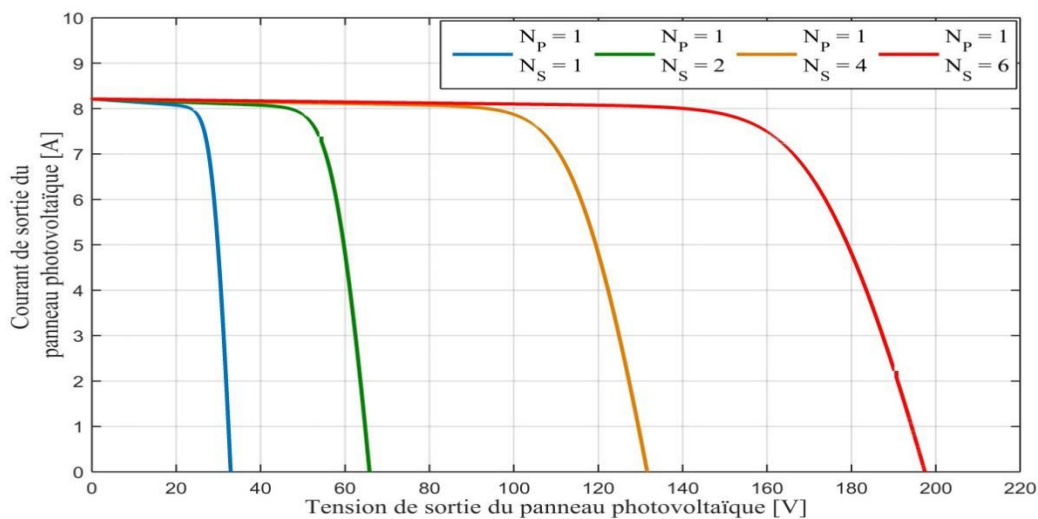


Figure I.20. Caractéristique IV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en parallèle $N_p = 1$ et en variant le nombre de modules en série N_s sous des conditions météorologiques constantes.

I.13.8. Caractéristique PV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en parallèle $N_p = 1$ et en variant le nombre de modules en série N_s sous des conditions météorologiques constantes

Dans ce cas de la courbe la puissance en fonction de la tension en remarque que :

- Comme $N_p = 1$, le courant reste le même que celui d'un seul module.
- La puissance maximale augmente avec N_s , car la tension augmente

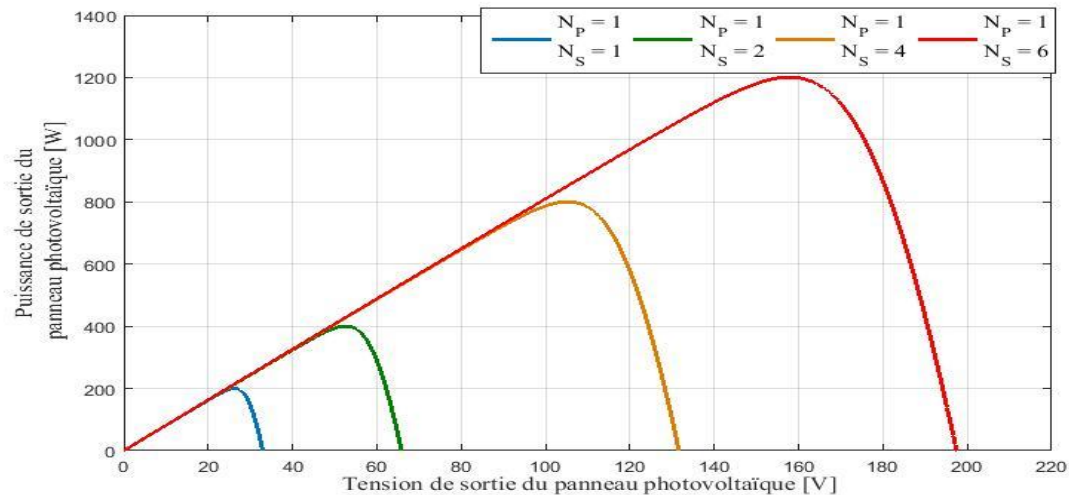


Figure I.21. Caractéristique PV du panneau photovoltaïque en fixant le nombre de modules en parallèle $N_p = 1$ et en variant le nombre de modules en série N_s sous des conditions météorologiques constantes

I.14. Conclusion :

Ce chapitre a permis d'introduire les bases nécessaires à la compréhension d'un système photovoltaïque, en détaillant ses principaux composants. Nous avons tout d'abord présenté le principe de l'effet photovoltaïque, puis les différentes technologies de fabrication des cellules solaires. L'étude s'est également intéressée aux dispositifs de protection, comme les diodes by-pass et les diodes d'anti retour, qui permettent de préserver les modules en cas de dysfonctionnement ou d'ombrage.

La modélisation du module photovoltaïque de la firme (Kyocera Solar KC 200 GT) a été réalisée sous l'environnement Matlab/Simulink, nous avons analysé l'influence des variations de l'ensoleillement et de la température sur les performances électriques du module afin en analysant les courbes $I-V$ et $P-V$.

Ce travail constitue une base pour le chapitre suivant, qui sera dédié à la modélisation et L'évaluation de techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) cette étape essentielle conçue pour l'analyse, l'optimisation et le dimensionnement du système photovoltaïque en vue d'une meilleure efficacité énergétique.

Chapitre II :

Stratégies de poursuite de point De puissance maximale

II.1. Introduction :

Dans les systèmes de production d'énergie photovoltaïque (PV), l'un des enjeux majeurs consiste à capter la quantité maximale d'énergie fournie par les panneaux solaires, indépendamment des variations de l'ensoleillement, de la température ou de la charge connectée. Cela s'explique par la nature non linéaire de la courbe courant-tension (I-V) caractéristique d'un module photovoltaïque, qui entraîne une variation de la puissance selon le point de fonctionnement. Pour garantir un rendement optimal, il est indispensable de mettre en œuvre une méthode capable d'identifier et de suivre en temps réel le point de puissance maximale, connu sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Les techniques de suivi MPPT reposent sur des algorithmes capables de modifier en continu le point de fonctionnement du système photovoltaïque afin d'extraire la puissance maximale disponible. Ces algorithmes s'appuient généralement sur l'analyse des grandeurs électriques telles que la tension, le courant ou la puissance, et ajustent des paramètres du système, comme le rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC, pour améliorer la captation d'énergie.

Ce chapitre aborde les différentes approches utilisées pour la poursuite du point de puissance maximale, en détaillant leur mode de fonctionnement. On y retrouve notamment les méthodes classiques telles que le Perturb and Observe (P&O) ou la méthode incrémentale de conductance (IncCond), ainsi que des stratégies plus modernes basées sur l'intelligence artificielle ou des techniques adaptatives. Le choix de la méthode dépendra principalement du compromis recherché entre simplicité, rapidité, précision et robustesse face aux fluctuations environnementales.

L'analyse et la compréhension de ces stratégies sont fondamentales pour développer des systèmes photovoltaïques efficaces, stables et capables de s'adapter aux conditions réelles d'exploitation.

II.2. La commande de poursuite du point de la puissance maximal (Maximum Power Point Tracking: MPPT)

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode utilisée pour optimiser la production d'énergie des panneaux solaires. Elle permet de suivre en temps réel le point de fonctionnement où la puissance délivrée, produit de la tension et du courant, est maximale.

Ce point varie en fonction des conditions d'ensoleillement et de température. Pour l'atteindre, la commande agit sur un convertisseur DC-DC (tel qu'un boost ou un Buck) afin d'ajuster la tension du panneau. L'élément modifié est généralement le rapport cyclique, qui détermine la tension d'entrée du convertisseur, influençant ainsi directement la puissance extraite [10].

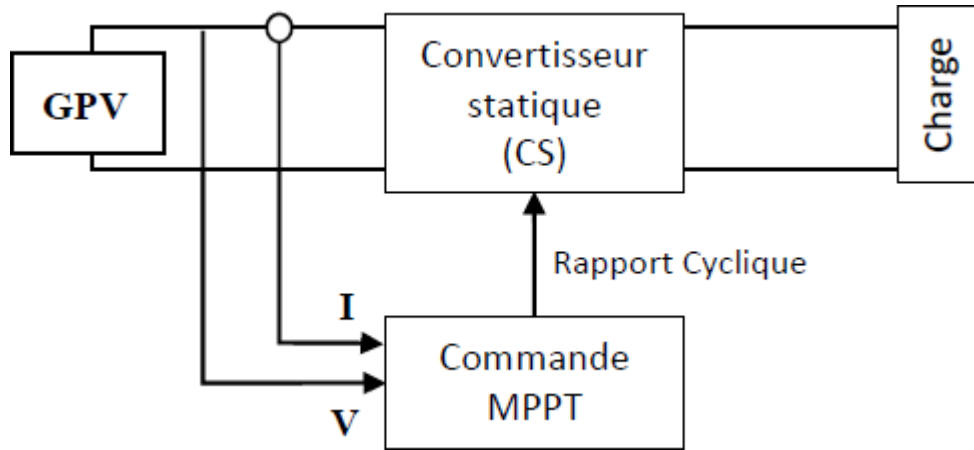


Figure II.1: Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par Une commande (PPM) sur charge

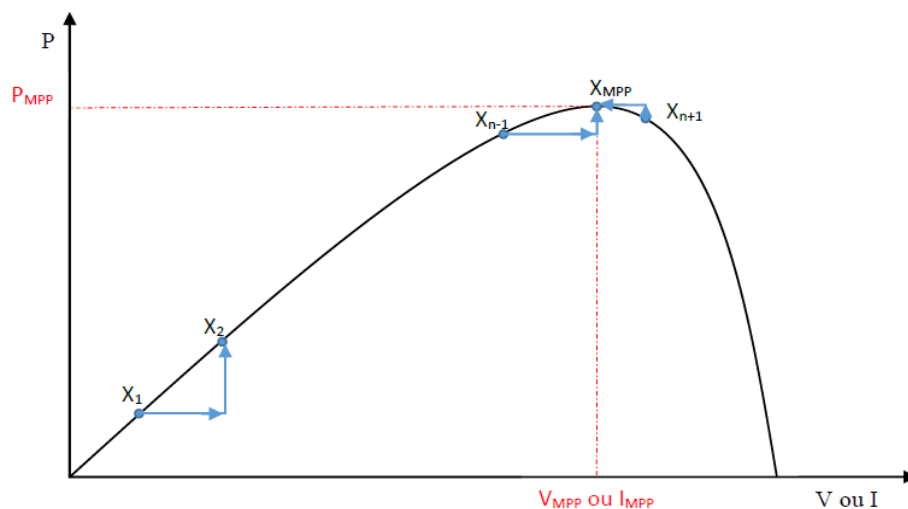


Figure II.2 : la recherche du PPM

II.3. Le principe de la méthode de recherche du point de puissance maximale (MPPT) :

Afin de garantir un fonctionnement optimal des systèmes photovoltaïques, plusieurs algorithmes ont été développés pour assurer le suivi du point de puissance maximale (MPPT). Ces techniques permettent d'adapter dynamiquement le fonctionnement du panneau solaire aux variations climatiques et des conditions [11]

- Méthode de conductance Incrémentale (IC).
- Méthode de logique floue (FL).
- Méthode de perturbation et observation (PO).

La méthode de conductance incrémentale est un algorithme MPPT qui repose sur le calcul de la dérivée de la puissance par rapport à la tension (dP/dV). Elle utilise la relation entre la conductance instantanée (I/V) et la conductance incrémentale (dI/dV) pour déterminer si le système est au point de puissance maximale [12].

Le principe est le suivant :

Lorsque $dP/dV = 0$, le système est au point de puissance maximale.

- Si $dP/dV > 0$, il faut augmenter la tension.
- Si $dP/dV < 0$, il faut la diminuer.

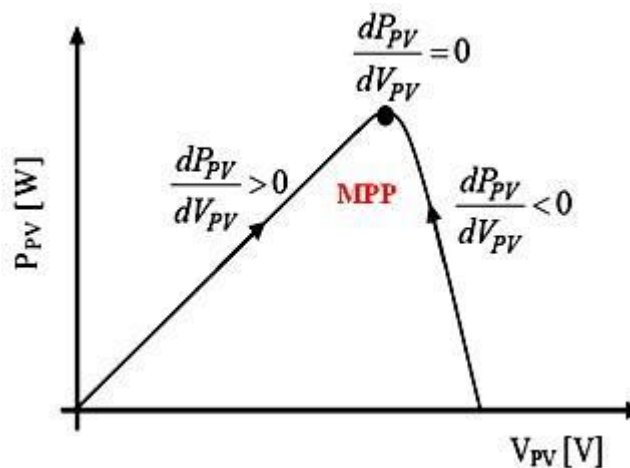


Figure II. 3 : Recherche de MPP avec la méthode conductance incrémentale

II.4. Méthode de perturbation et observation (P et O) :

La méthode P&O repose sur le principe de perturber périodiquement la tension du panneau photovoltaïque (V_{pv}) avec une faible variation (ΔV) autour de sa valeur de fonctionnement initiale, puis d'observer l'effet de cette perturbation sur la puissance produite (P_{pv}).

Lorsque l'incrément positive de la tension entraîne une augmentation de la puissance (soit $\Delta P > 0$), cela signifie que le point de fonctionnement s'est rapproché du point de puissance maximale (MPP). Dans ce cas, la perturbation est poursuivie dans la même

direction, afin de continuer à déplacer le point de fonctionnement vers le MPP. Ce processus se répète jusqu'à ce que le MPP soit atteint.

Ainsi, si la puissance diminue ($\Delta P < 0$) après la perturbation, cela indique que le point de fonctionnement s'éloigne du MPP. Il est alors nécessaire d'inverser le signe de la perturbation appliquée à la tension, afin de corriger la trajectoire et faire converger à nouveau le système vers le MPP.

Ainsi, l'analyse des variations de puissance en réponse à de légères modifications de la tension permet de déterminer la position relative du point de fonctionnement par rapport au MPP. Grâce à une commande adaptée, il devient possible de diriger le système vers le point de puissance maximale [13].

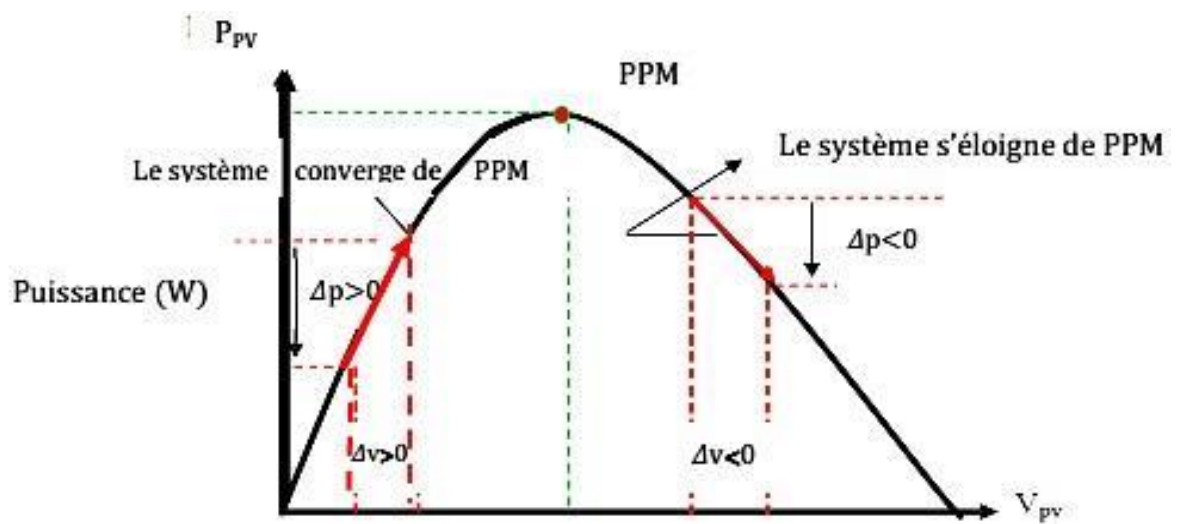


Figure II.4. PPM avec P&O

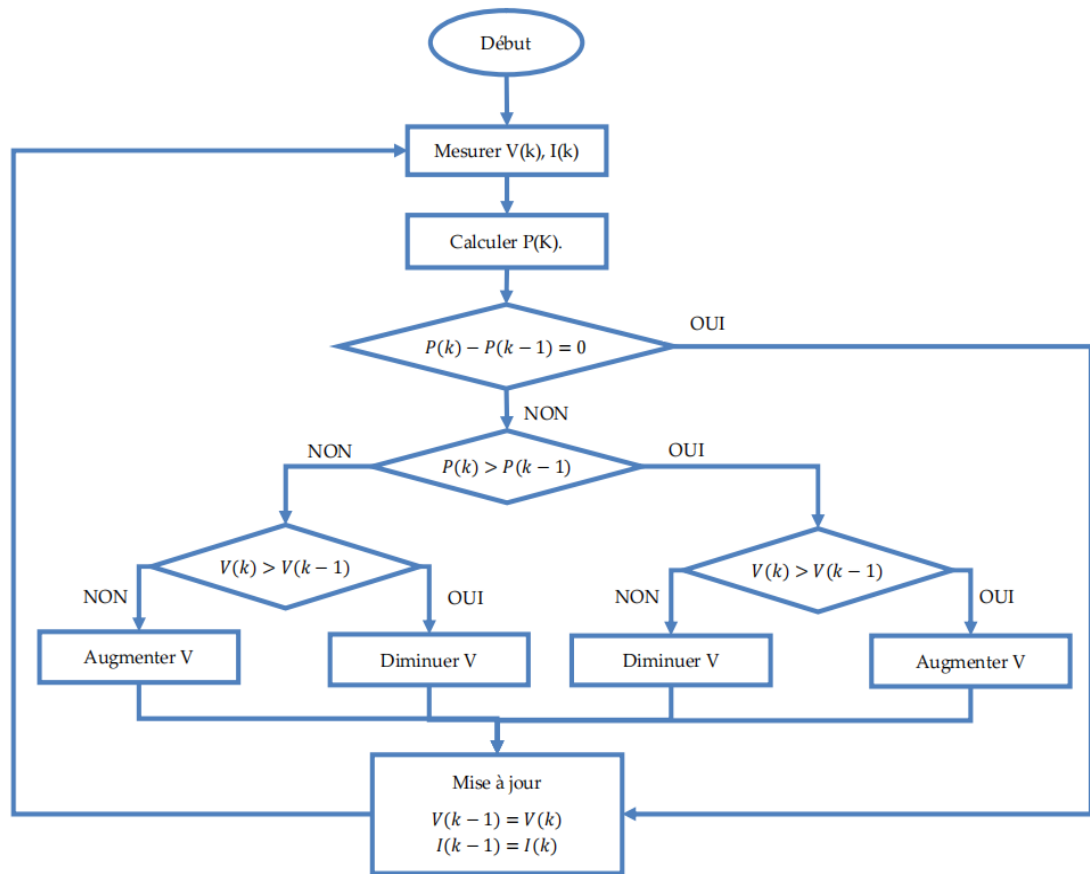


Figure II.5. Algorithme de P&O classique

Dans cet algorithme, la tension du panneau photovoltaïque fluctue autour de sa valeur optimale, ce qui entraîne une perte de puissance proportionnelle à l'amplitude du pas de perturbation. Un pas de perturbation élevé permet au système de réagir rapidement aux variations soudaines de l'ensoleillement, mais engendre des pertes accrues dues aux oscillations. À l'inverse, un pas faible réduit ces oscillations, mais ralentit la réponse du système face aux changements rapides des conditions de fonctionnement. Le choix du pas optimal se fait généralement de manière expérimentale, en fonction des exigences spécifiques du système.

II.5. Étude et Modélisation du Convertisseur C.C Élévateur (Boost)

II.5.1. Convertisseur C.C Élévateur (Boost)

Un système d'électronique de puissance se compose généralement d'un ou plusieurs convertisseurs de puissance, qui permettent de transformer une forme ou un niveau d'énergie électrique en une autre

forme, adaptée à la charge, grâce à des dispositifs à semi-conducteurs de puissance à commutation contrôlée.

Depuis les années 1970, de nombreux circuits convertisseurs CC-CC ont fait plusieurs d'études et de conceptions. Un tel convertisseur peut être élévateur ou abaisseur de la tension de sortie [14].

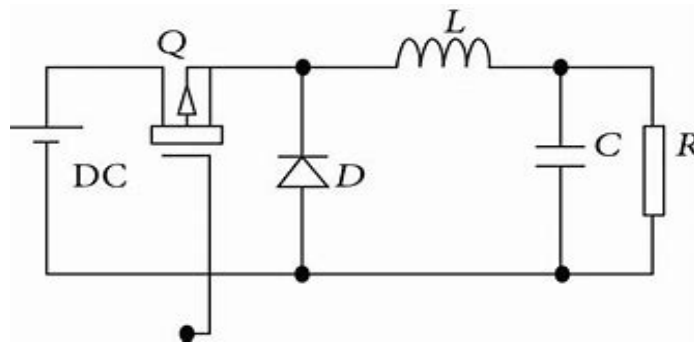


Figure II.6. Convertisseur CC-CC abaisseur (Buck).

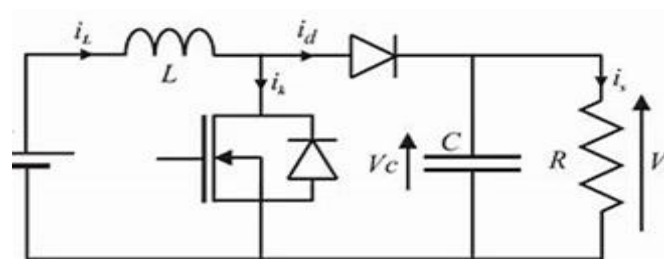


Figure II.7. Convertisseur CC-CC élévateur (Boost).

Le convertisseur C.C élévateur (Boost) a pour objectif d'augmenter une tension d'entrée continue V_{in} pour obtenir une tension de sortie V_{out} plus élevée. Ce processus se fait grâce à une commande en modulation de largeur d'impulsion (*PWM*), qui détermine le rapport cyclique α

II.5.2. Structure du convertisseur CC-CC élévateur (Boost) :

Le convertisseur Boost est composé des éléments suivants :

Une source de tension continue u_{in}

Une inductance L

Un interrupteur (MOSFET) Q_s

Une diode D

Un condensateur de filtrage C

Une résistance de charge R_{ch}

II.5.3. Les modes de fonctionnement du convertisseur C.C

Le comportement de ce convertisseur dépend fortement des conditions de fonctionnement, et plus particulièrement du rapport cyclique appliqué au signal de commande du commutateur. En fonction de la charge, de la fréquence de commutation et des valeurs des composants (inductance et capacité), le convertisseur peut fonctionner selon deux régimes principaux :

- Le mode de conduction continue (CCM) : où le courant dans l'inductance ne tombe jamais à zéro.
- Le mode de conduction discontinue (DCM) : où le courant de l'inductance devient nul pendant une partie du cycle.

II.5.3.1. Mode de Conduction Continue (CCM)

Dans ce mode, l'inductance est toujours en conduction pendant tout le cycle de commutation. Cela signifie que le courant à travers l'inductance ne tombe jamais à zéro au cours du cycle. Ce mode se produit généralement à charge élevée ou lorsque le rapport cyclique est suffisamment élevé.

II.5.3.2. Principe du CCM pour un convertisseur Boost :

Lorsque le commutateur (transistor) est fermé, le courant passe par l'inductance, qui commence à stocker de l'énergie. L'inductance empêche un changement brusque du courant, le courant constant pendant cette période. Lorsque le commutateur s'ouvre, l'énergie stockée dans l'inductance est transférée à la charge via la diode, et la tension de sortie augmente par rapport à la tension d'entrée [15].

II.6. Modélisation du CCM pour un convertisseur Boost :

La relation de la tension de sortie en mode CCM est donnée par :

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (II.1)$$

Où :

V_{out} est la tension de sortie.

V_{in} est la tension d'entrée.

D est le rapport cyclique du commutateur (la fraction du temps pendant lequel le commutateur est fermé).

Équations du Circuit en CCM :

Voici un résumé des principales relations et équations mathématiques utilisées dans le modèle du convertisseur Boost en mode CCM :

- Phase 1 (Commutateur fermé) :

$$\frac{Ldi}{dt} = V_{in} - V_{out} \quad (II.2)$$

- Phase 2 (Commutateur ouvert) :

$$\frac{Ldi}{dt} = -V_{out} \quad (II.3)$$

II.7. Principe du DCM pour un convertisseur Boost :

Dans le mode de conduction discontinue, le courant à travers l'inductance tombe à zéro pendant une partie du cycle de commutation. Ce mode se produit souvent à faibles charges ou lorsque le rapport cyclique est faible. Lorsque le commutateur est fermé, l'énergie est stockée dans l'inductance. Lorsque le commutateur s'ouvre, l'inductance libère cette énergie à la charge. Cependant, dans le DCM, après un certain temps, le courant de l'inductance atteint zéro avant la fin du cycle, et il n'y a plus de conduction jusqu'à la prochaine période de commutation.

II.8. La méthode perturbe and observe (P et O) :

La figure ci-dessous représente la modélisation d'un système photovoltaïque associé à un convertisseur Courant Continu–Courant Continu CC-CC de type élévateur (Boost), commandé par la méthode (P et O) de poursuite du point de puissance maximale (MPPT)

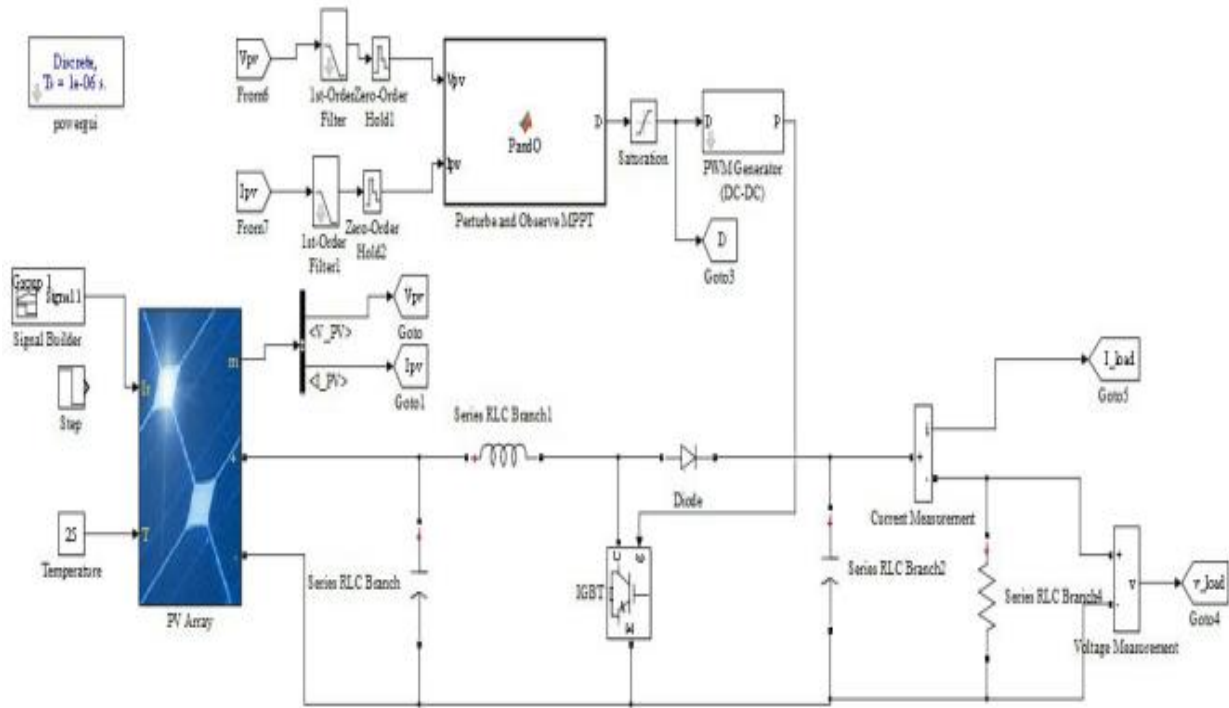


Figure II.8. Schéma Matlab/Simulink du MPPT d'un système photovoltaïque.

Le bloc PV Array représente le générateur photovoltaïque, simulant le comportement électrique d'un panneau solaire réel. Il reçoit en entrée les conditions environnementales, telles que la température et l'ensoleillement, fournies respectivement par un générateur de signal (Signal Builder) et une constante. Les sorties du panneau sont la tension V_{pv} et le courant I_{pv} , qui sont mesurés et utilisés pour calculer la puissance instantanée délivrée par le panneau

$$P = V_{pv} \times I_{pv} \quad (II.4)$$

Cette puissance est transmise au bloc de commande MPPT (Perturbe and Observe). Ce dernier compare la puissance actuelle à la précédente pour en déduire la variation, et en fonction du résultat, il ajuste le rapport cyclique de commande (Duty cycle). Si la puissance augmente, la perturbation se poursuit dans la même direction, sinon elle est inversée, ce rapport cyclique est ensuite transmis à un générateur PWM (Pulse Width Modulation), qui génère un signal de commande pour l'interrupteur de puissance (IGBT) du convertisseur Boost.

Le convertisseur Boost est composé d'une inductance, d'un interrupteur IGBT, d'une diode et d'un condensateur. Son rôle est d'élever la tension issue du panneau afin d'alimenter la charge à une tension plus élevée, lorsque l'IGBT est fermé, l'inductance stocke de l'énergie. Lorsqu'il s'ouvre, cette énergie est transférée à la charge via la diode.

La tension et le courant de sortie sont mesurés par des blocs de mesure pour le suivi du système. Des filtres passe bas sont également intégrés dans le circuit pour lisser la tension et le courant de sortie du panneau photovoltaïque.

Le panneau photovoltaïque utilisé dans la simulation inclue 2 modules en série et 8 en parallèle de la firme Kyocera Solar KC 200 GT.

Ce tableau représente tous les paramètres qu'on a utilisant dans le schéma de la figure 8.

Puissance maximal du panneau (PV)	Courant a puissance max	Courant C.C	La tension en circuit ouvert	Condensateur entrée
3200 (watt)	60.88 (A)	65.68 (A)	66 (V)	$4.4880 \cdot 10^{-4}$ (F)
La bobine	Résistance de la bobine	Condensateur de sortie Cout	Résistance de charge Ro	Tension à la puissance max
66 (μ H)	0.015 (Ω)	$4.4880 \cdot 10^{-4}$ (F)	3.1 (Ω)	52.6 (V)

II.8.1. Explication de code :

Le code est une fonction de régulation dynamique qui ajuste la valeur d'un paramètre D en fonction des variations de la tension et de la puissance dans le système.

Fonctionnement :

Initialisation des variables :

Trois valeurs sont définies pour D : D_{init} (C'est la valeur initiale D), D_{max} (valeur maximale), D_{min} (valeur minimale de D)

ΔD : Est défini, ce qui représente l'ajustement à appliquer à D lors des variations de puissance et de tension.

Variables persistantes :

Dans le code on utilise des variables persistantes pour garder une trace de la tension, de la puissance et de D des appels précédents, cela permet de calculer les variations de ces valeurs entre chaque appel de la fonction.

Calcul de la puissance :

La fonction calcule la puissance instantanée P en multipliant la tension v_{pv} par le courant i_{pv} , le calcule ensuite la différence entre la tension actuelle et la précédente

$$dV = v_{pv} - V_{old} \quad (II.5)$$

Ainsi que la différence de puissance $dP = P - P_{old} \quad (II.6)$

Mise à jour de D

Si la variation de la puissance dP est non nulle, la fonction ajuste D en fonction de deux critères :

- Si la puissance a diminué et que la tension a également diminué, D est réduit de δD , si la tension a augmenté, D est augmenté de δD .
- Si la puissance a augmenté et que la tension a diminué, D est augmenté, si la tension a augmenté, D est réduit

Vérification des bornes de D :

Pour éviter que D dépasse les limites définies par D_{max} et D_{min} , la fonction vérifie, si D est dans l'intervalle acceptable, si ce n'est pas le cas, D est réinitialisé à sa valeur précédente.

Mise à jour des anciennes valeurs :

Les valeurs actuelles de D , V et P sont stockées pour être utilisées lors du prochain appel de la fonction, permettant ainsi de calculer les nouvelles variations à chaque itération.

II.9. Résultats de la simulation de la méthode de MPPT perturber et observer (P et O) :

Figure (II.9) présente les réponses du courant, tension et puissance générés par le panneau photovoltaïque en fonction du temps avec un changement critique d'ensoleillement de 500, 1000 puis 700 [W/m²] qui s'effectuent aux instants 0.1 et 0.2 second par la stratégie de MPPT à base de la méthode de perturber et observer (P et O MPPT). Tandis que la figure (II.10) présente les réponses du rapport cyclique ainsi les grandeurs électriques de courant, tension et puissances du convertisseur CC-CC élévateur (Boost) lorsque le panneau photovoltaïque est sous des conditions météorologiques de température fixe de 25 (°C) et changement critique d'ensoleillement.

Les deux figures (II.11) et (II.12) présentent respectivement les allures d'évolution des caractéristiques I-V et P-V avec la méthode de MPPT à base de la méthode perturber et observer (P et O MPPT) avec les caractéristiques du panneau sans technique MPPT afin de constater que la technique MPPT utilisée présente des résultats de simulation satisfaisante en maintenant le fonctionnement du panneau photovoltaïque autour du point de la puissance maximale et donc cette technique atteint aussi rendement contentable.

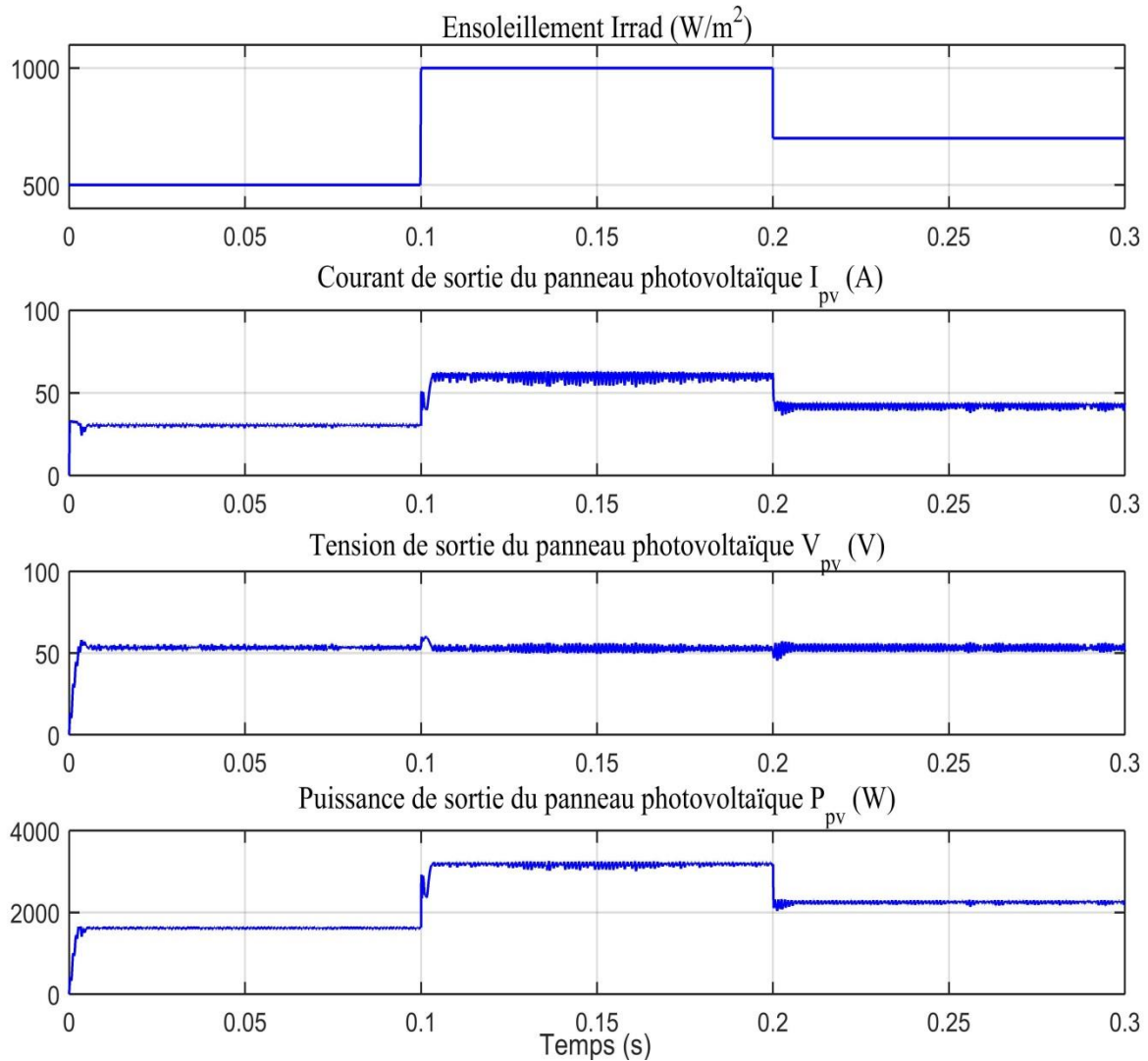


Figure II.9. Les courbes de l'ensoleillement avec changement critique de 1000, 500 et 700 (W/m^2) ainsi les allures des : courant, tension et puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps de la technique P et O MPPT.

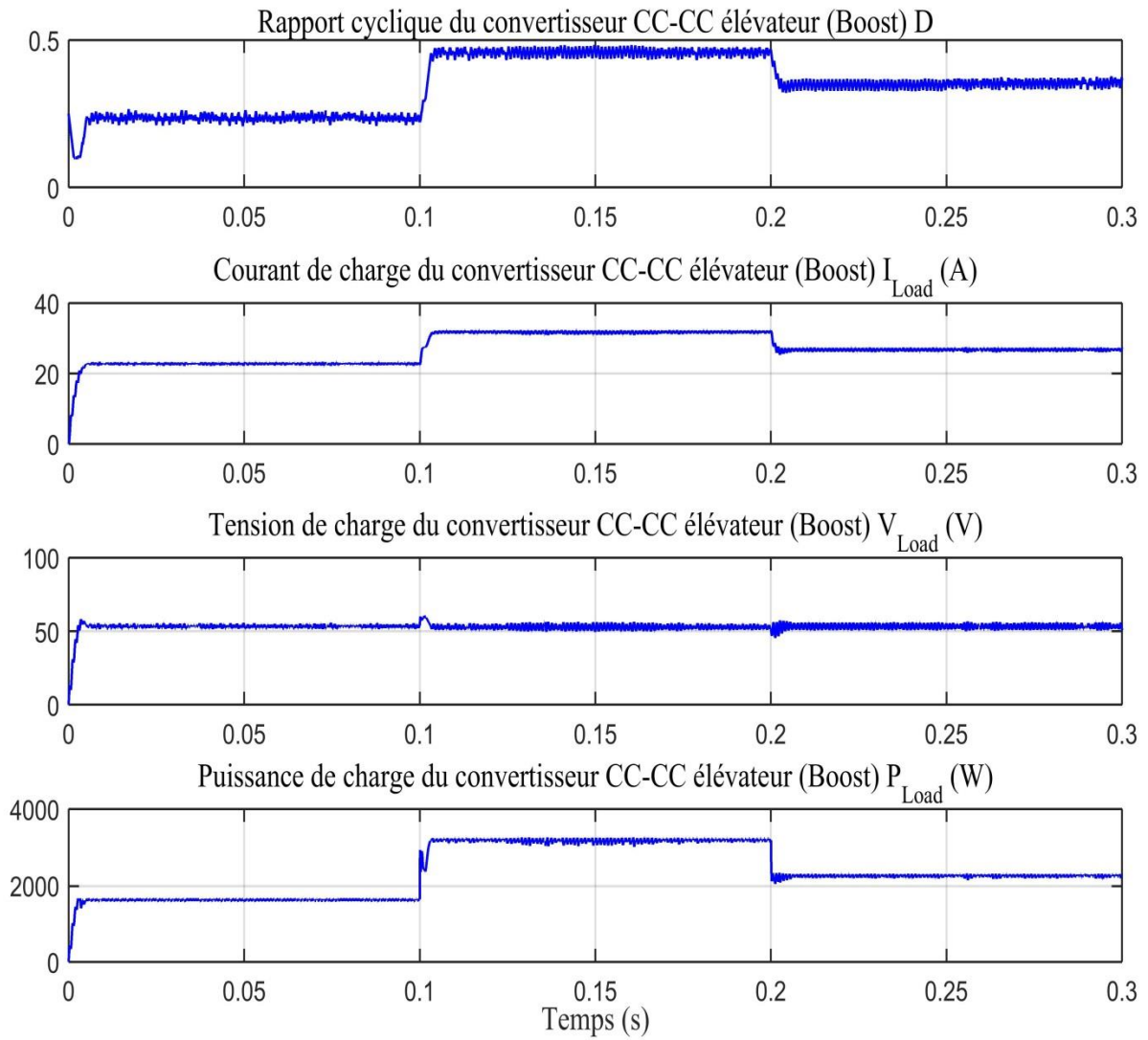


Figure II.10. Les courbes de courant, tension et puissance de charge du convertisseur CC-CC éleveur (Boost) avec changement critique de l'ensoleillement de 1000, 500 et 700 (W/m^2) en fonction du temps de la technique P et O MPPT.

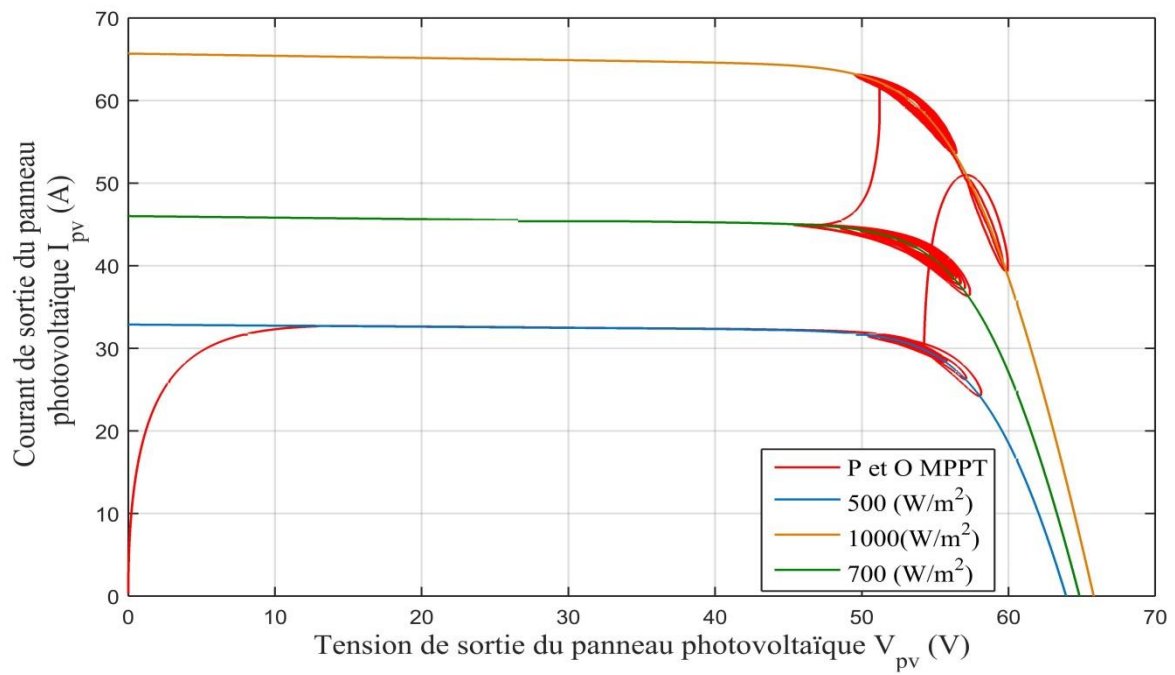


Figure II.11. Caractéristique I-V avec ensoleillement 500, 700 et 1000 (W/m²) ainsi que celles de la technique P et O MPPT.

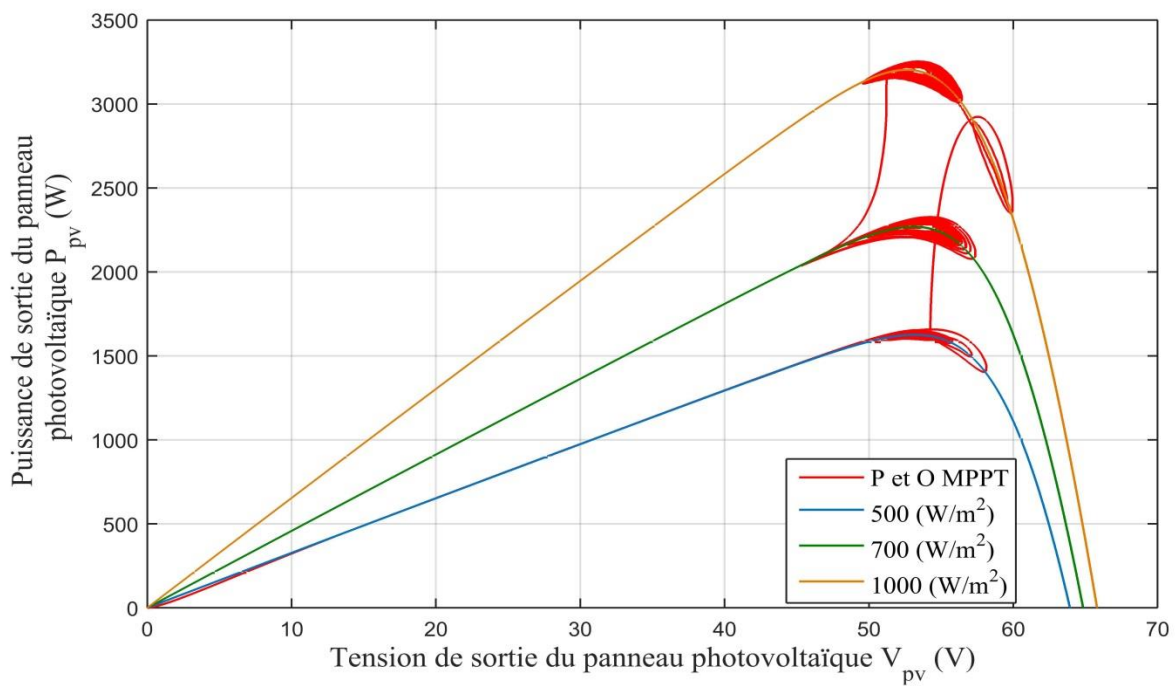


Figure II.12. Caractéristique P-V avec ensoleillement 500, 700 et 1000 (W/m²) ainsi que celles de la technique P et O MPPT.

II.10. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technique de poursuite du point de la puissance maximal (MPPT) à base de la méthode perturber et observer (P et O) et utiliser ainsi un modèle de hacheur de type convertisseur CC-CC de type élévateur (Boost) qui est utilisé comme étage d'adaptation entre le panneau photovoltaïque et la charge. D'autre part, nous avons fait une étude rigoureuse et la synthèse détaillée en précisant les étapes de l'algorithme de la technique MPPT à base de la méthode perturber et observer afin de contrôler le convertisseur CC-CC élévateur (Boost) et la simulation et les résultats obtenues ont été effectuée sous environnement Matlab/Simulink.

Les résultats présentés dans ce chapitre de la technique MPPT à base de la méthode perturber et observer ont été faits pour des changements critiques de l'ensoleillement. Les résultats obtenus montrent des performances satisfaisantes de cette méthode avec la présence des fluctuations aux réponses des grandeurs électriques.

Pour la commande MPPT, la technique s'est avérée efficace pour suivre des points de puissance maximale, ce qui permettrait de générer en permanence une puissance maximale et d'augmenter le rendement du panneau photovoltaïque qui est conçu de la connexion de 8 modules parallèle et 2 en série des modules de la firme Kyocera Solar KC 200 GT.

Chapitre III :

**Technique de poursuite du point de la puissance maximale
MPPT a base de L'intelligence artificielle : Logique Floue**

III.1. Introduction

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine en pleine croissance qui vise à doter les machines de capacités intellectuelles proches de celles de l'être humain, telles que l'apprentissage, le raisonnement, la perception et la prise de décision. Son ambition est de permettre aux systèmes de s'adapter et de fonctionner efficacement dans des environnements complexes, incertains ou mal définis, où les méthodes traditionnelles se montrent insuffisantes.

Parmi les nombreuses techniques développées dans ce domaine, la logique floue (Fuzzy Logic) occupe une place prépondérante, notamment pour la modélisation et le contrôle de systèmes complexes. Contrairement à la logique classique, fondée sur des valeurs binaires strictes (vrai ou faux), la logique floue prend en compte la réalité souvent imprécise et ambiguë des phénomènes observés, elle repose sur la notion d'ensembles flous, qui permettent de représenter des concepts graduels, reflétant ainsi le raisonnement humain. Grâce à des règles linguistiques du type « SI... ALORS... » associées à des degrés d'appartenance, cette méthode offre un cadre mathématique souple et adapté pour traiter des informations incomplètes, incertaines ou approximatives.

Cette capacité d'adaptation rend la logique floue particulièrement utile pour concevoir des systèmes de commande lorsque les modèles mathématiques précis sont difficiles à établir. En effet, dans bien des situations, les relations entre variables ne peuvent être exprimées par des équations exactes. La logique floue permet alors d'élaborer des modèles plus intuitifs, basés sur l'expérience et le savoir-faire humain, ce qui simplifie la conception et la mise en œuvre des contrôleurs, et elle permet un raisonnement efficace pour gérer des systèmes dynamiques, résiste bien aux incertitudes, s'implémente souvent plus facilement que les méthodes probabilistes, et facilite la création de règles décisionnelles simples, ce qui la rend adaptée à la modélisation de systèmes complexes dans divers secteurs industriels.

Compte tenu de ces avantages, la logique floue apparaît comme une méthode particulièrement adaptée pour optimiser la gestion des systèmes énergétiques complexes. Plus spécifiquement, dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, le suivi du point de puissance maximale (MPPT) représente un défi majeur, nécessitant des algorithmes capables de s'adapter rapidement aux variations environnementales. Le chapitre suivant se concentre donc sur l'application de la logique floue au MPPT, en détaillant les principes, les stratégies

de contrôle, ainsi que les résultats obtenus, afin de démontrer l'efficacité de cette approche dans l'amélioration des performances des systèmes photovoltaïques.

III.2. Historique de la logique floue :

La logique floue tire ses origines du concept d'incertitude, tel qu'introduit dans le domaine de la physique par le principe d'incertitude de Heisenberg dans les années 1920. Ce principe a profondément remis en question la manière classique de concevoir la réalité, en montrant que certaines grandeurs physiques ne peuvent être connues avec une précision absolue. Cette idée a ouvert la voie à une logique alternative à celle, binaire, qui ne connaît que deux valeurs : vrai (1) ou faux (0).

C'est dans ce contexte que les scientifiques ont commencé à envisager une troisième valeur logique, généralement notée $\frac{1}{2}$, comme représentant une forme de vérité partielle. Cette valeur permettait de mieux modéliser des situations ambiguës ou paradoxales que la logique classique était incapable de gérer.

Dans les années 1930, le logicien polonais Jan Lukasiewicz a été le premier à formaliser cette idée en développant une logique à trois valeurs, qu'il a ensuite étendue à un système plus général, dans lequel la vérité pouvait prendre n'importe quelle valeur rationnelle entre 0 et 1. Cette avancée marque une étape fondamentale vers la naissance de la logique floue, dont le principe repose sur l'idée qu'une affirmation peut être partiellement vraie, avec un degré de vérité situé sur un continu entre 0 et 1.

À la même époque, le philosophe et mathématicien Max Black a élargi l'application de cette logique aux ensembles d'éléments. Contrairement à la logique classique des ensembles, qui considère qu'un élément appartient ou non à un ensemble (0 ou 1), Max Black a introduit la notion d'appartenance partielle, qu'il a appelée imprécision. Il a ainsi proposé la première représentation graphique d'une fonction d'appartenance floue, ouvrant la voie à une nouvelle manière de décrire les catégories floues ou graduellement définies (comme « grand », « chaud » ou « rapide »).

C'est cependant en 1965 que la logique floue a véritablement été fondée comme discipline formelle, grâce aux travaux du chercheur Lotfi Zadeh. Dans son article pionnier intitulé "Fuzzy Sets", il introduit le terme fuzzy pour désigner les ensembles dont les frontières sont floues, c'est-à-dire dont l'appartenance des éléments n'est pas absolue. Il propose une nouvelle méthode de modélisation pour les systèmes complexes, où l'incertitude, l'ambiguïté et l'approximation sont la norme. L'idée principale est de remplacer les règles rigides par des

règles floues, plus proches du raisonnement humain, notamment dans le domaine des systèmes experts.

Les premières applications concrètes de la logique floue en commande automatique sont apparues en 1975, grâce aux travaux de Mamdani et Assilian. Ils ont démontré qu'il était possible de concevoir un contrôleur intelligent en utilisant des règles linguistiques floues du type :

« Si la température est élevée, alors diminuer la puissance. »

Cette approche a suscité un vif intérêt dans plusieurs pays européens comme le Royaume-Uni, le Danemark et la France, où de nombreux chercheurs se sont investis dans le développement de systèmes flous.

Toutefois, à partir des années 1980, l'intérêt pour la logique floue a quelque peu diminué en Europe. C'est alors que le Japon a pris le relais et a lancé un grand nombre d'applications industrielles reposant sur cette technologie. Les entreprises japonaises ont intégré la logique floue dans une large gamme de produits de consommation, tels que les machines à laver, les climatiseurs intelligents, les caméras, ou encore les systèmes de navigation et de transport. Grâce à cette adoption massive, la logique floue est devenue un outil fondamental dans l'ingénierie japonaise moderne.

Aujourd'hui, la logique floue est reconnue comme un puissant moyen de modélisation des systèmes imprécis ou incertains, avec des applications dans de nombreux domaines tels que l'automatisation, l'intelligence artificielle, le traitement du signal, la robotique, ou encore les systèmes embarqués [1].

III.3. Etude fondamentale de la logique floue :

III.3.1. Comparaison de la logique floue et classique :

La logique classique constitue une branche bien établie des mathématiques, largement connue et appliquée, notamment dans le fonctionnement des ordinateurs, des processeurs et de la majorité des dispositifs numériques. Elle repose sur une prise de décision binaire, où chaque assertion est soit vraie, soit fausse. C'est précisément à ce niveau que la logique floue se distingue. En effet, cette dernière introduit la possibilité qu'une même situation puisse être à la fois vraie et fausse dans une certaine mesure, en attribuant à chaque état un degré d'appartenance, dans ce contexte, des règles telles que « si un objet est à moins de 20 mètres, alors il est considéré comme proche » et « s'il est à plus de 20 mètres, alors il est loin »

seraient traitées de manière exclusive en logique classique. Un objet situé à 19 mètres, par exemple, serait catégoriquement considéré comme proche. En logique floue, en revanche, un tel objet pourrait être considéré comme proche à 60 % et loin à 40 %, traduisant ainsi une interprétation graduelle et plus souple de la réalité [16].

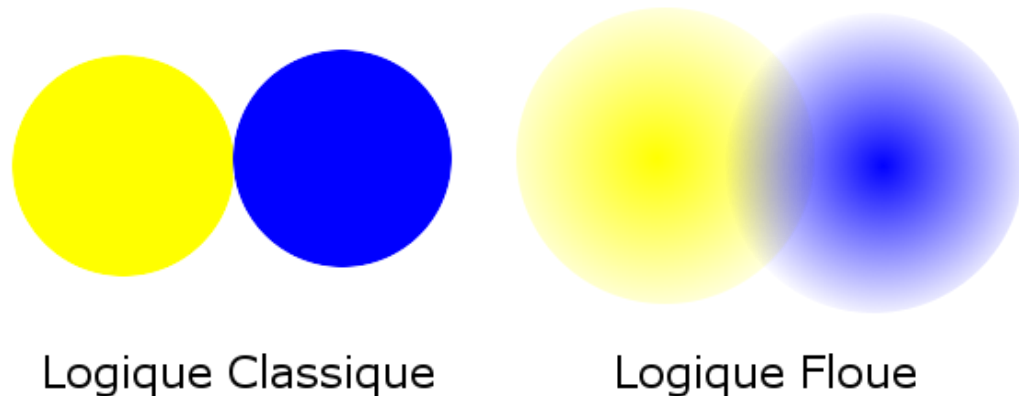


Figure III. 1 Logique classique et logique floue.

III.4. Notions fondamentales de la logique floue :

III.4.1. Ensembles classiques et ensembles flous :

Pour débiter, il est utile de rappeler brièvement les notions fondamentales liées aux ensembles classiques. La théorie des ensembles classiques, en dépit de sa terminologie parfois complexe, correspond simplement à la discipline mathématique qui étudie les ensembles.

On peut définir un ensemble comme une collection d'éléments partageant une caractéristique commune. Ces éléments peuvent être des nombres, des lettres, des mots, mais aussi des entités plus abstraites comme des fonctions, des hypothèses, des définitions, des groupes d'individus représentant, par exemple, une population ou encore des ensembles eux-mêmes.

La logique classique repose sur une connaissance précise du système, s'appuyant sur des équations rigoureuses et des valeurs déterminées avec exactitude.

Mais la logique floue adopte une approche différente, permettant de représenter des systèmes complexes en intégrant un certain niveau d'abstraction basé sur l'expérience humaine. Elle s'appuie sur des notions imprécises, telles que « lourd », « moins fort » ou « chaud », qui sont

converties en plages numériques bien définies, correspondant à des valeurs et des variables linguistiques appartenant à des ensembles flous [17].

III.4.2. Fonction d'appartenance :

Dans la logique floue, un élément ne se limite pas à appartenir totalement ou non à un ensemble, comme c'est le cas dans la logique binaire. Il peut appartenir partiellement à un ensemble, selon un certain degré. Ce degré d'appartenance est exprimé par une valeur comprise entre 0 et 1. La fonction qui établit ce lien est appelée fonction d'appartenance, et le coefficient associé à chaque valeur de la variable est noté μ , appelé « degré d'appartenance ». Cette fonction, propre aux ensembles flous, répond à quatre propriétés spécifiques.

- ❖ Le type : Il s'agit de la forme que peut prendre un nombre flou. Celle-ci peut être, entre autres, triangulaire, trapézoïdale, gaussienne ou sigmoïdale.
- ❖ La hauteur : Elle est définie par $H(A) = \sup_{x \in X} (\mu_A(x))$, soit la valeur maximale de la fonction d'appartenance. Un sous-ensemble flou est dit normalisé lorsque sa hauteur est égale à 1.
- ❖ Le noyau : Noté $N(A) = \{x \mid \mu_A(x) = 1\}$, il représente l'ensemble des éléments qui appartiennent complètement à A. Dans le cas d'une fonction d'appartenance triangulaire, le noyau se réduit à un seul élément, appelé aussi valeur modale.
- ❖ Le support : Défini par $S(A) = \{x \mid \mu_A(x) \neq 0\}$, il regroupe les éléments qui possèdent un degré d'appartenance strictement positif à l'ensemble A, autrement dit, les éléments qui y appartiennent partiellement [4].

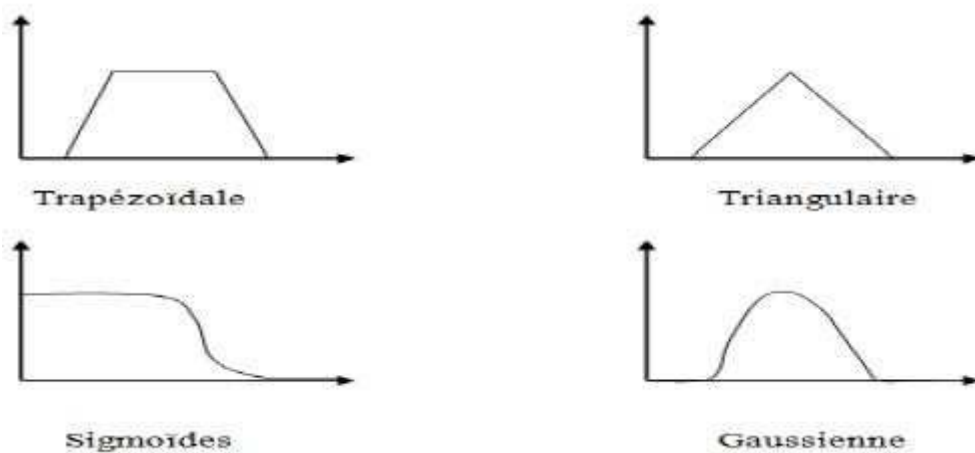


Figure III. 2: les différentes formes d'un nombre flou

III.4.3. Univers de discours :

Après avoir défini les fonctions d'appartenance et le partitionnement des variables, l'étape suivante consiste à établir les univers de discours des entrées et de la sortie du contrôleur flou.

L'univers de discours désigne l'intervalle de valeurs possibles qu'une variable peut prendre dans un contexte donné, il constitue le domaine de définition sur lequel sont appliquées les fonctions d'appartenance associées aux termes linguistiques, ce cadre de référence est essentiel pour permettre au système flou de traiter les données de manière cohérente et adaptée au processus considéré. [18]

III.4.4. Operations sur la logique floue :

Les ensembles flous peuvent être traités à l'aide d'opérations similaires à celles de la théorie des ensembles classiques. Parmi les plus utilisées figurent l'union, l'intersection et le complément.

- L'union permet de regrouper deux ensembles flous en conservant, pour chaque élément, le degré d'appartenance le plus élevé.
- L'intersection, elle retient le plus faible degré d'appartenance entre les deux ensembles pour chaque élément.
- L'opération de complément inverse le degré d'appartenance, traduisant ainsi le niveau de non-appartenance à l'ensemble [19].

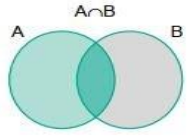
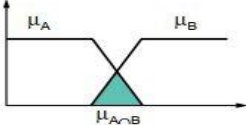
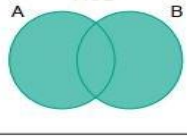
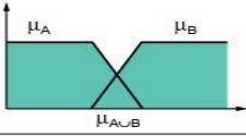
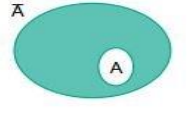
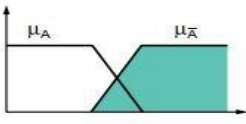
		Opérateur de ZADEH	Opération logique	
Intersection		$\mu_{A \cap B} = \text{MIN} (\mu_A, \mu_B)$	ET	
Union		$\mu_{A \cup B} = \text{MAX} (\mu_A, \mu_B)$	OU	
Négation		$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$	NON	

Figure III. 3. Les opérations de la logique floue.

III.5. Structure d'un contrôleur flou :

III.5.1. Contrôleurs flous :

Les systèmes utilisant des contrôleurs flous fonctionnent sur la base de règles linguistiques plutôt que sur des équations mathématiques précises. Les variables d'entrée et de sortie sont d'abord transformées en valeurs floues à l'aide du bloc de fuzzification. Une fois l'ensemble des règles défini selon les exigences de l'application, le processus de commande débute par l'évaluation des conséquences de ces règles. Le résultat flou obtenu est ensuite converti en une action de commande précise par le bloc de défuzzification.

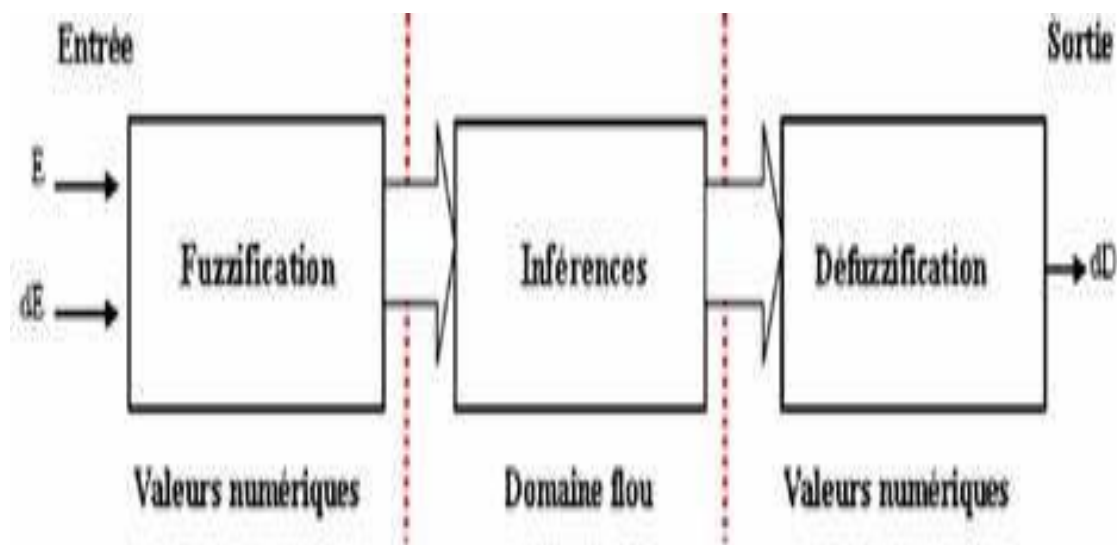


Figure III. 4. La structure de contrôleurs flous.

III.5.1.1. La fuzzification :

Étapes de la fuzzification

La fuzzification comprend les étapes suivantes :

- La mesure des variables d'entrée.
- La conversion analogique/numérique (A/N) et le traitement des grandeurs mesurées.
- L'attribution, à chaque valeur d'entrée, d'un ensemble de degrés d'appartenances

La fuzzification est un procédé qui consiste à transformer des valeurs précises en valeurs floues. Pour effectuer cette opération, il est nécessaire de définir au préalable les variables linguistiques ainsi que les termes associés. Ce procédé n'emploie pas de valeurs numériques, mais utilise plutôt des mots ou des expressions issues du langage naturel pour représenter les variables d'entrée et de sortie.

Le processus débute par la décomposition d'une variable linguistique donnée en ses différents termes linguistiques constitutifs. Par exemple, dans un système de climatisation, la température (T) est une variable linguistique représentant la température ambiante, qui peut être qualifiée par des termes généraux tels que « chaud » ou « froid ».

On peut alors définir l'ensemble des termes décomposés de la température comme suit : température (T) = {trop froid, froid, tiède, chaud, trop chaud}. Chaque terme linguistique correspond à une caractéristique spécifique, représentant une portion des valeurs possibles de la température, et pour convertir des données d'entrée précises en termes linguistiques flous on applique des fonctions d'appartenance [20].

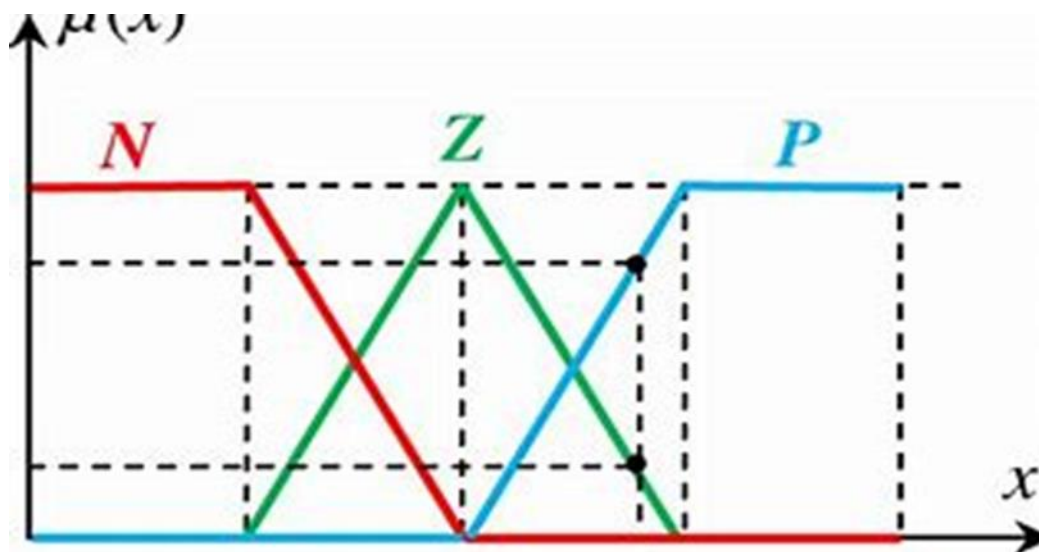


Figure III.5. La fuzzification.

Chaque valeur d'entrée réelle est associée à un terme linguistique défini dans l'univers du discours. Une même entrée peut correspondre à plusieurs étiquettes floues. Un nombre élevé d'étiquettes améliore la précision, mais augmente le temps de calcul. Ainsi, leur nombre est généralement limité à une valeur impaire dans une plage donnée, pour assurer un équilibre et une symétrie des ensembles flous.

III.5.1.2. Règles et opérateurs flous :

Dans tout système basé sur la logique floue, la sortie est obtenue à partir des valeurs réelles d'entrée à travers les étapes de fuzzification et de défuzzification. Ces étapes reposent sur un ensemble de règles floues, qui constituent la base du raisonnement flou [21].

Une règle floue de type *IF – THEN*, également appelée implication ou instruction conditionnelle floue, prend généralement la forme suivante :

$$SI \text{ (antécédent) } ALORS \text{ (conséquent)}$$

Elle peut s'écrire sous la forme :

$$SI \text{ (} x \text{ est } A \text{) } ALORS \text{ (} z \text{ est } Z \text{)}$$

Les règles floues, souvent employées dans les systèmes de contrôle, se présentent principalement sous deux formes : Mamdani et Takagi–Sugeno (TS).

La plupart des systèmes utilisent des règles composées, où plusieurs antécédents sont reliés par des opérateurs logiques de type conjonction (ET) ou disjonction (OU).

L'opérateur conjonctif (AND) traduit l'intersection des conditions et s'exprime ainsi :

$$SI \text{ (antécédent1 ET antécédent2 ET ... ET antécédent) } ALORS \text{ (conséquent)}$$

L'opérateur disjonctif (OR) correspond à l'union des conditions et s'écrit :

$$SI \text{ (antécédent1 OU antécédent2 OU ... OU antécédent) } ALORS \text{ (conséquent)}$$

Ainsi, des règles complexes peuvent être décomposées en plusieurs expressions simples reliées par "ET" ou "OU", par exemple :

$$SI \quad X_1 = A_1 \quad ET \quad X_2 = A_2 \quad ALORS \quad Y = B$$

$$SI \quad X_1 = A_1 \quad ET \quad X_2 = A_3 \quad ALORS \quad Y = B.$$

III.5.1.3. Inférences floues :

La procédure d'inférence prend en entrée les variables floues ainsi qu'un ensemble de règles afin de calculer leurs degrés de vérité. Le résultat de cette étape est une variable floue en sortie.

Parmi les méthodes d'inférence floue les plus courantes figurent celles de Mamdani

- ❖ Mamdani : la sortie de chaque règle est un ensemble flou (comme un "groupe" de valeurs possibles).
- ❖ Takagi-Sugeno (TS) : la sortie de la règle est une fonction mathématique basée sur les variables d'entrée.
- ❖ Tsukamoto : la sortie est aussi un ensemble flou, mais avec une fonction spéciale qui monte ou descend de façon régulière (monotone).

Dans le cadre d'une méthode comme celle de Mamdani, pour relier les degrés d'appartenance des entrées aux sorties, plusieurs méthodes d'inférence sont employées afin de calculer précisément ces degrés

- ❖ Méthode min-max : l'opérateur logique "ET" est modélisé par le minimum des degrés d'appartenance, et l'agrégation des règles par le maximum.
- ❖ Méthode max-produit : l'opérateur "ET" est réalisé par le produit des degrés d'appartenance, avec une agrégation par maximum.
- ❖ Méthode somme-produit : combinaison des degrés par somme et produit.

III.5.1.4. Agrégation des règles :

Dans un système flou, plusieurs règles peuvent être activées simultanément en fonction des entrées. Chaque règle produit un résultat partiel, appelé conséquent., l'objectif de l'agrégation est de combiner l'ensemble de ces conséquences individuelles pour générer une sortie globale cohérente.

Ce processus utilise des opérateurs logiques pour relier les résultats issus de chaque règle. Lorsqu'on utilise l'opérateur AND, on parle d'agrégation conjonctive, qui correspond à l'intersection des sorties, et l'utilisation de l'opérateur OR conduit à une agrégation disjonctive, fondée sur l'union des résultats.

L'agrégation représente ainsi une étape essentielle dans la procédure d'inférence floue, car elle permet de fusionner les effets de toutes les règles activées en une seule réponse floue, sur laquelle sera ensuite appliquée la défuzzification.

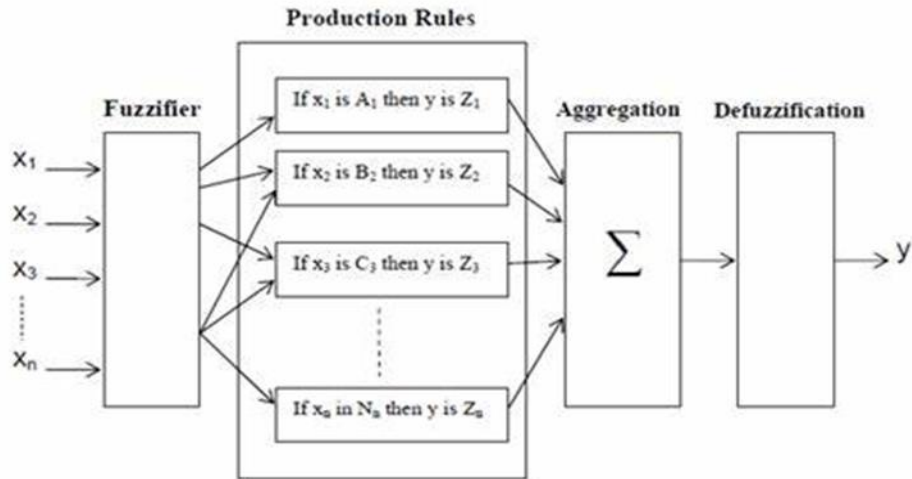


Figure III.6 Agrégation des ensembles.

III.5.1.5. La défuzzification :

Elle consiste à convertir l'ensemble flou obtenu après l'agrégation des règles en une valeur de sortie unique, déterministe et précise, pouvant être appliquée au système à contrôler.

Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour effectuer cette opération, parmi lesquelles on peut citer :

- ❖ Méthode du centre de gravité.
- ❖ Méthode de la moyenne pondérée.
- ❖ Adhésion moyenne-max.
- ❖ Centre des sommes.
- ❖ Principe d'adhésion maximale.
- ❖ Centre de la plus grande zone.
- ❖ Premier des maxima ou dernier des maximas.

Les plus utilisées sont les suivantes :

La méthode du principe d'appartenance maximale consiste à choisir comme sortie la valeur où la fonction d'appartenance atteint son maximum, également connue sous le nom de méthode de la hauteur, ce qui permet une défuzzification rapide surtout efficace pour les fonctions avec un pic bien défini [22].

$$\mu_A(Z^*) \geq \mu_A(Z)$$

III.5.1.5.1. Méthode du centre de gravité (COG) :

Développée par Sugeno en 1985, la méthode du centre de gravité (COG), également appelée méthode du centroïde ou du centre de surface, est la technique de défuzzification la plus couramment utilisée.

Elle consiste à calculer la sortie défuzzifiée Z^* comme le centre de masse de la surface formée par la fonction d'appartenance agrégée. Cette valeur est donnée par la formule suivante :

$$Z^* = \frac{\int \mu A(Z) \cdot Z dz}{\mu A(Z)}$$

- $\mu A(z)$ représente la fonction d'appartenance agrégée
- z Est la variable de sortie.

Cette méthode est réputée pour fournir des résultats très précis. Toutefois, elle peut s'avérer complexe à mettre en œuvre lorsque les fonctions d'appartenance sont de forme irrégulière ou mathématiquement compliquées.

III.5.1.5.2. Méthode de la moyenne pondérée :

La méthode de la moyenne pondérée calcule la sortie défuzzifiée en effectuant la moyenne pondérée des sorties de chaque fonction d'appartenance du système, cette méthode est applicable uniquement aux fonctions d'appartenance de sortie symétriques.

III.6. Mise en œuvre du contrôleur flou sur la technique MPPT :

La conception et l'application de la logique floue sur la technique de poursuite du point de la puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques est devenue souvent utile en raison de sa simplicité de sa structure et de son application en raison qu'elle est basée sur le raisonnement humain et elle ne nécessite pas le modèle mathématique du système.

La logique floue se consiste de trois étapes cruciales qui sont en particulier : la fuzzification, l'inférence floue et la défuzzification.

Durant l'étape de la fuzzification, les variables d'entrée réelles ou physiques sont converties en variables linguistiques en sous forme de fonctions d'appartenances qu'on peut les trouver sous forme triangulaire, trapézoïdale, gaussienne, singleton...ext. Les niveaux floue sont de types : NG (Négatif grand), NP (Négatif Petit), ZE (Zero), PP (Positif Grand), PG (Positif Grand)...

Les entrées du contrôleur flou prise en compte sont l'erreur (E) et sa variation (ΔE) et la sortie prise en compte est la variation du rapport cyclique (Δd) du convertisseur CC-CC élévateur pour traquer le point de la puissance maximale.

L'opérateur a la possibilité de calculer l'erreur et sa variation ainsi la variation de la sortie par les équations (III.1), (III.2) et (III.3) respectivement.

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (\text{III.1})$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (\text{III.2})$$

$$\Delta d(k) = d(k) - d(k-1) \quad (\text{III.3})$$

Les fonctions d'appartenance utilisées dans l'étape de la fuzzification pour la variable de l'erreur inclue cinq fonctions d'appartenances trois triangulaires et deux trapézoïdales en extrémité, dont elles sont illustrées par la figure (III.7). Tandis que les fonctions d'appartenances appliquées pour la variable de variation de l'erreur sont présentées par la figure (III.8) et consistent de sept fonctions de type triangulaire. Et finalement la figure (III.9) illustre les sept fonctions d'appartenances de type triangulaire de la variable de sortie qui s'agit de la variation du rapport cyclique du convertisseur CC-CC élévateur (Boost).

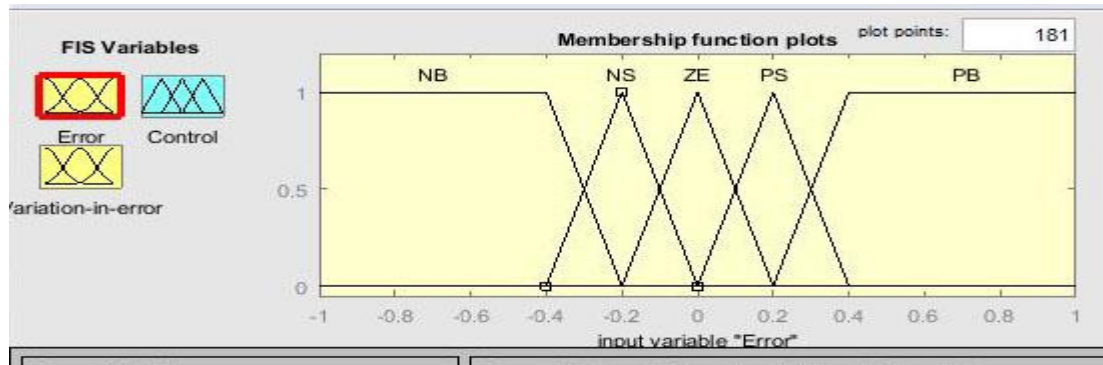


Figure. (III.7). Les fonctions d'appartenance de la variable erreur.

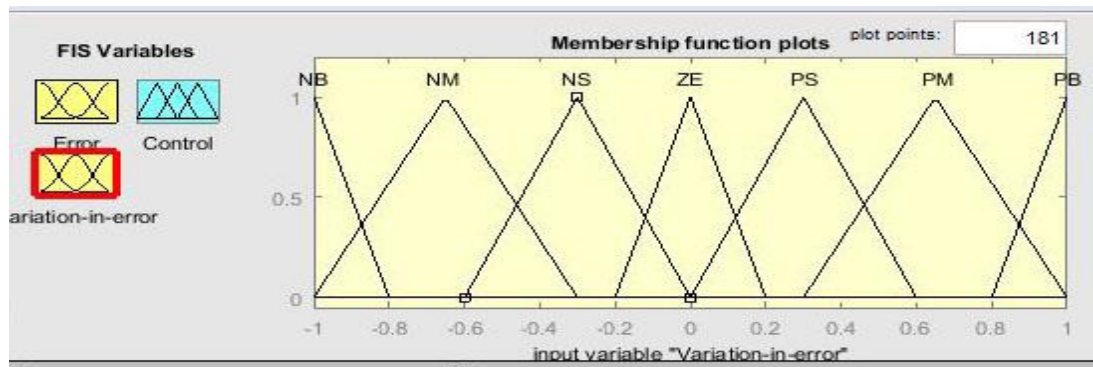


Figure. (III.8). Les fonctions d'appartenance de la variable de variation de l'erreur.

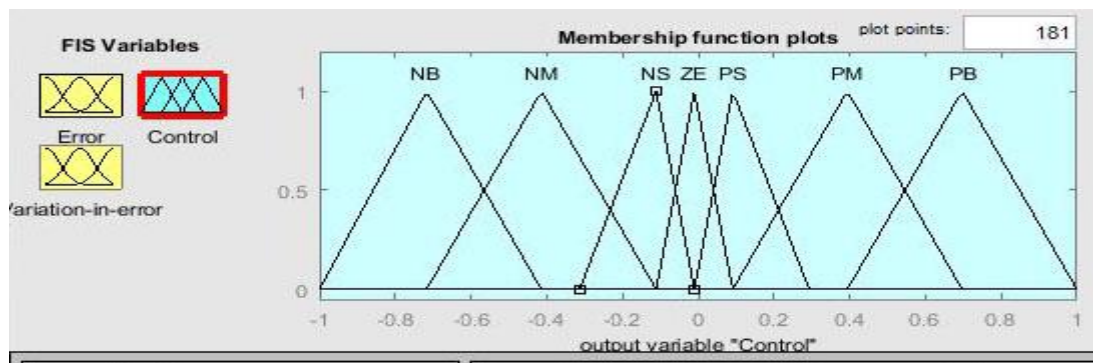


Figure. (III.9). Les fonctions d'appartenance de la variable de sortie ou de la variation du rapport cyclique.

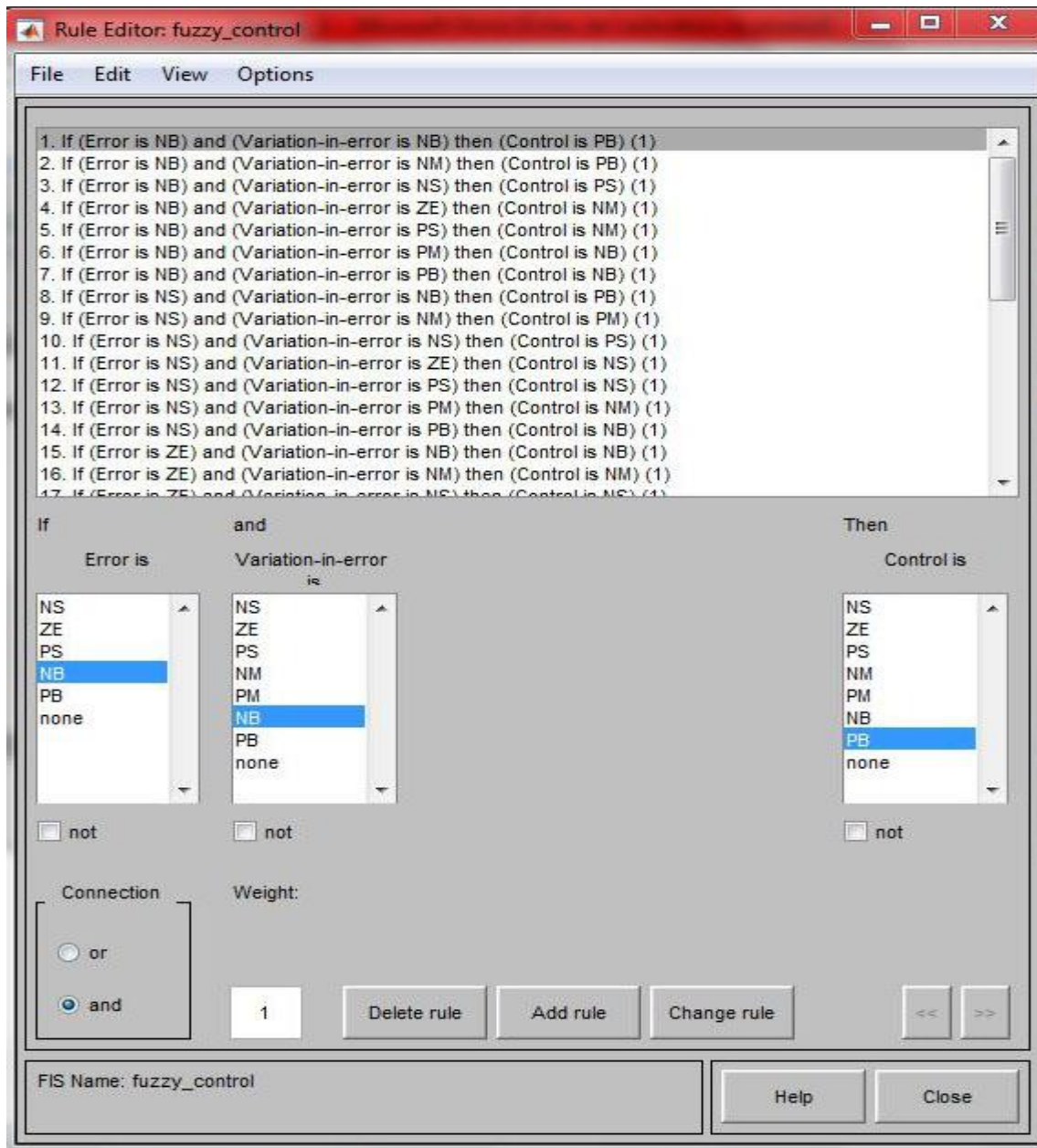


Figure. (III.10). Les règles floue.

La structure du contrôleur flou appliqué à la technique MPPT utilise une inférence floue qui se compose de 35 règles floues. Ces règles floues sont présentées par la figure (III.10). Par conséquent ces règles floues sont constituées des relations entre les entrées et la sortie et effectuées selon le principe de Mamdani.

Finalement durant l'étape de la défuzzification le calcul de la valeur numérique de la variable de sortie floue par le principe du centre de gravité qui consiste à calculer le centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $\mu(x)$.

III.7. Résultats de la simulation de la méthode de MPPT à base de la logique floue :

La figure (III.11) présente les allures des grandeurs électriques du panneau photovoltaïque utilisé tel que le courant, tension et puissance de sortie en fonction du temps avec un changement critique de la variable de l'ensoleillement en valeur de 500, 1000 et 700 (W/m^2), ces changements s'établissent durant les intervalle $[0, 0.1]$, $[0.1, 0.2]$ et $[0.2, 0.3]$ second.

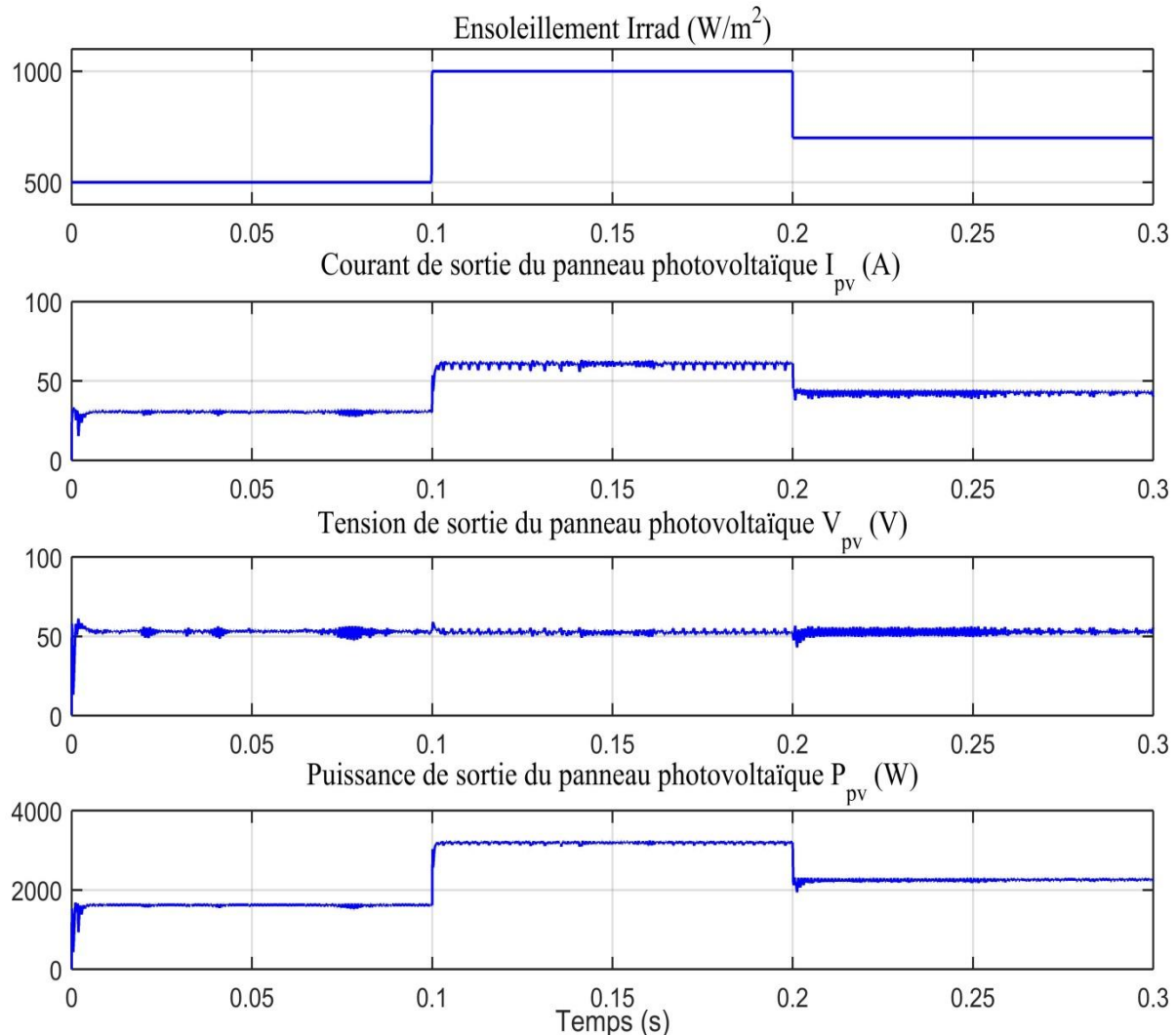


Figure III.11. Les courbes de l'ensoleillement avec changement critique de 1000, 500 et 700 (W/m^2) ainsi les allures des : courant, tension et puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps de la technique Logique floue MPPT.

Tandis que la figure (III.12) illustre les grandeurs électrique du convertisseur CC-CC élévateur tel que le rapport cyclique, courant, tension et puissance de charge respectivement et cela lorsque le panneau photovoltaïque est sous des conditions météorologiques, d'où la température est maintenue à 25 ($^{\circ}\text{C}$) et changement brusque de l'intensité d'ensoleillement de 500, 1000 et 700 (W/m^2).

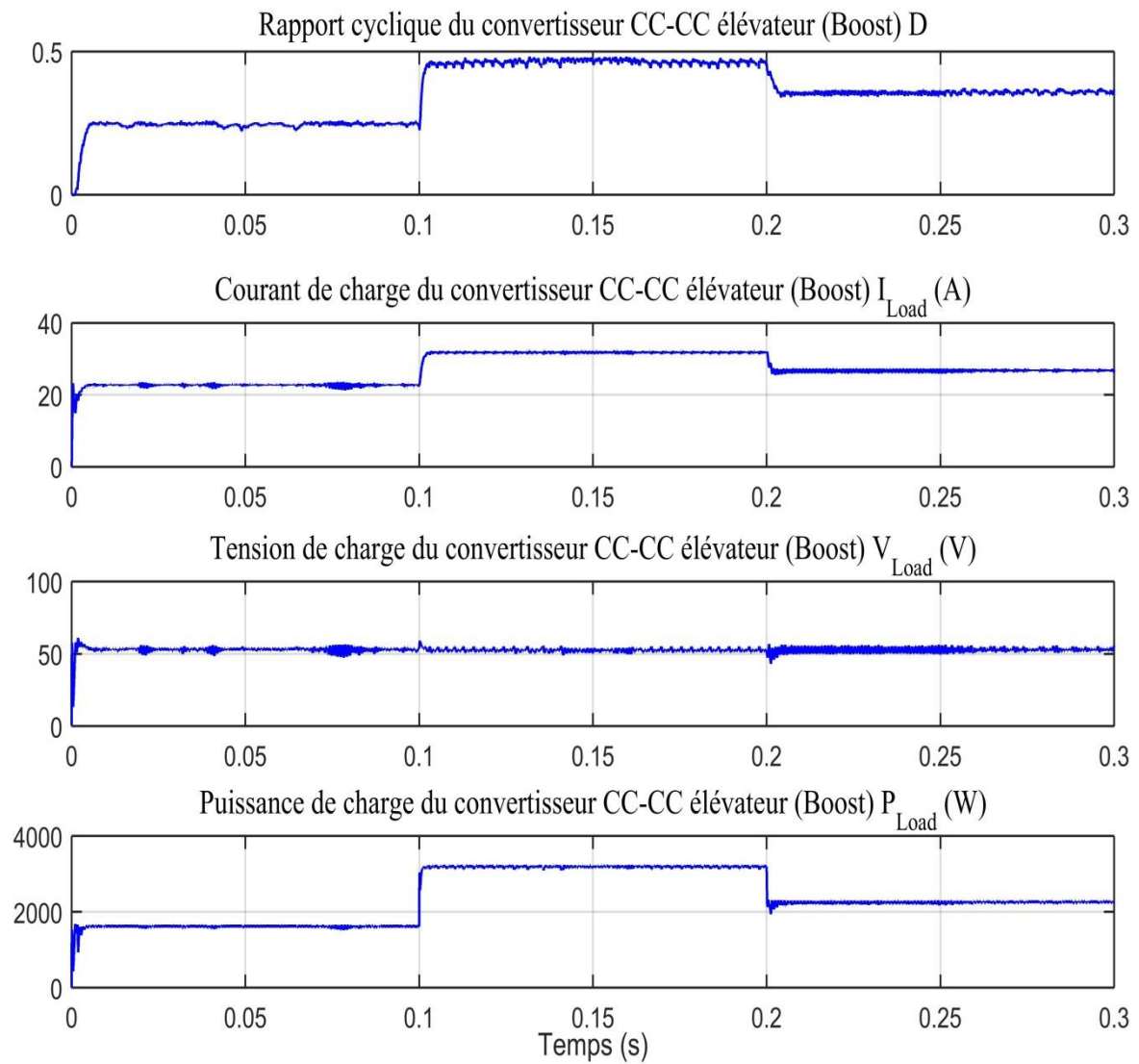


Figure III.12. Les courbes de courant, tension et puissance de charge du convertisseur CC-CC élévateur (Boost) avec changement critique de l'ensoleillement de 1000, 500 et 700 (W/m^2) en fonction du temps de la technique logique floue MPPT.

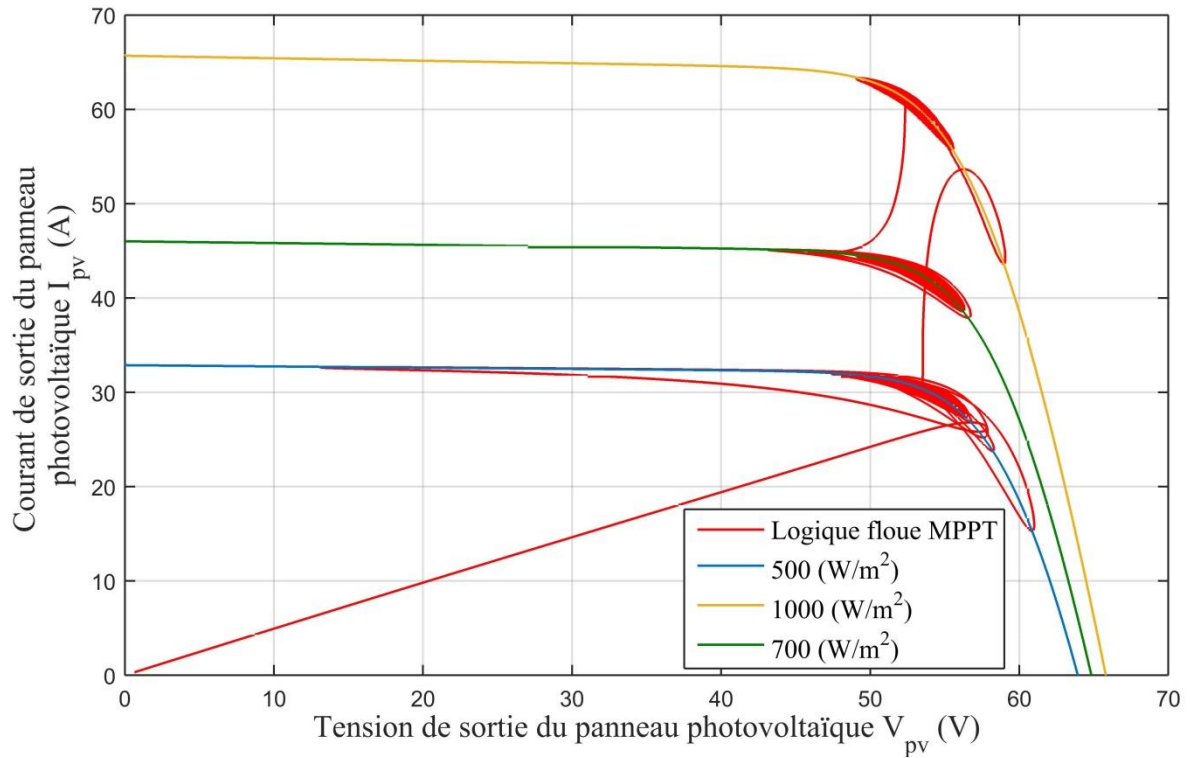


Figure III.13. Caractéristique I-V avec ensoleillement 500, 700 et 1000 (W/m²) ainsi que celles de la technique de logique floue MPPT.

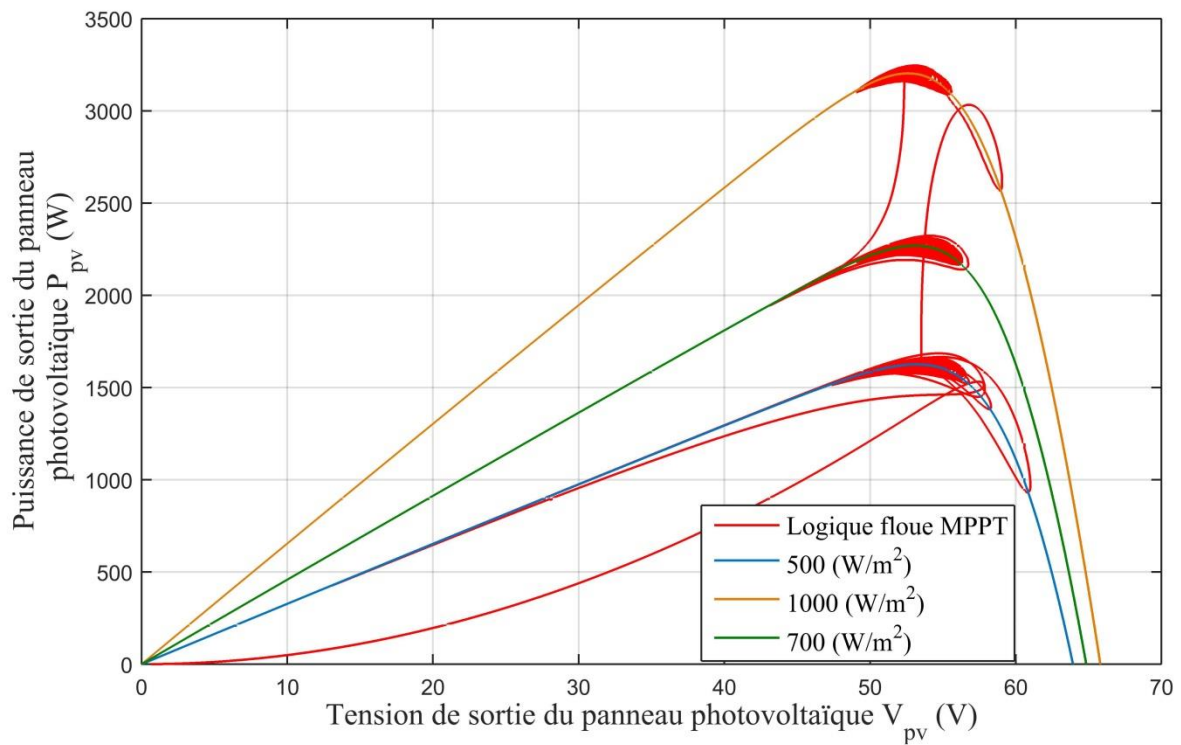


Figure III.14. Caractéristique P-V avec ensoleillement 500, 700 et 1000 (W/m²) ainsi que celles de la technique de logique floue MPPT.

Les deux figures (III.13) et (III.14) présentent respectivement les allures d'évolution des caractéristiques I-V et P-V avec la méthode de MPPT à base de l'intelligence artificielle en particulier la logique floue avec les caractéristiques du panneau sans technique MPPT afin de constater que la technique MPPT à base de la logique floue utilisée présente des résultats de simulation avec une dynamique efficace et rapide en maintenant le fonctionnement du panneau photovoltaïque autour du point de la puissance maximale et donc cette technique atteint aussi un rendement parfait.

III.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, Nous avons contribué à une l'étude approfondie de la commande de poursuite de point de puissance maximale à base de la commande par logique floue qui est sélectionnée parmi les commande de l'intelligence artificielle. Cette commande ne nécessite pas une modélisation mathématique du processus commandé et elle est basée sur le raisonnement humain. En addition, ces concepts mathématiques sont simples à comprendre et facile à appliquer.

D'après les résultats obtenus en simulation, on peut constater que la stratégie de poursuite de point de puissance maximale à base de la logique floue est efficace, robuste et rapide en termes de dynamique. En effet, La sortie de la technique MPPT est le rapport cyclique qui a une évolution stable.

Dans le prochain et dernier chapitre une étude comparative entre les deux stratégies de commande proposées en particulier : P et O et la logique floue à base de la technique MPPT sera effectuer afin d'évaluer la meilleur commande. Cette étude comparative sera élaboré en calculent des coefficients de performance appropriés.

Chapitre IV :

**Etude comparative entre les deux techniques de poursuite
du point de la puissance maximale proposées**

IV.1. Introduction :

La comparaison entre les deux stratégies de poursuite du point de la puissance maimale proposées est effectuée en tème de robustesse et rapidité de la dnamique des réponses des grandeurs électrique du panneau photovoltaïque ou du convertisseur CC-CC élévateur (Boost). L'objectif de ce chapitre est de comparer les performances de la stratégie de MPPT classique basée sur la méthode de Pertuber et Observer (P et O MPPT) avce celle de lintelligence artificielle basée sur la logique floue (Fuzzy Logic Controller MPPT) (FLC MPPT). Cette comparaison sera basée sur l'observation des réponses des grandeurs tel que le rapport cyclique du convertisseur élévateur et le courant, tension et puissance du panneau photovoltaïque et en calculant des caractéristique des réponses dynamique tel que l'erreur statique, temps de réponse, temps de monté, ainsi des performances métriques tel que l'erreur quadratique moyenne (Mean Squared Error (MSE)), Racine de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Squared Error (RMSE))... ext.

IV.2. Présentation comparative des résultats de la simulation de la technique MPPT basée sur les deux méthodes proposées :

Les deux méthodes de poursuite du point de la puissance maximale sont etablies de tel façon d'avoir obtenu des performances parfaites au niveau de la dynamique et robustesse. Pour cela, la figure (IV.1) présente les allures du rapport cyclique qui pilote le convertisseur CC-CC élévateur (Boost) ainsi le courant généré par le panneau photovoltaïque et la figure (IV.2) présente les allures précédentes mais dans un plan agrandi sous des conditions météorologiques de variation brusque. D'après l'observation de ces figures, la méthode de (P et O MPPT) est basée sur les conditions initiales de l'algorithme, tandis que la méthode de (Logique floue MPPT) est basée sur l'expérience de l'utilisateur du contrôleur par logique floue et l'ajustement des gains de normalisation d'échelle qui permettent d'ajuster l'univers de discours des sous ensembles floue afin de converger autour du point de la puissance maimale désiré.

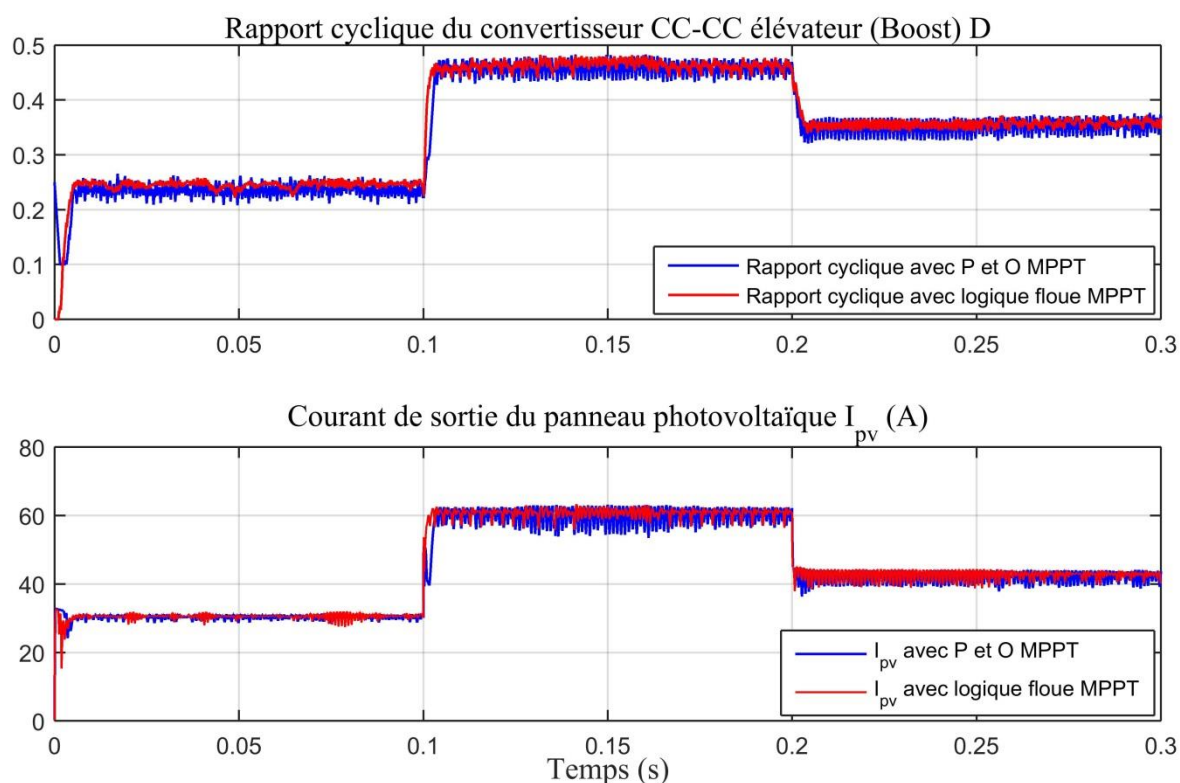


Figure IV.1. Les courbes du rapport cyclique du convertisseur CC-CC élévateur (Boost) et le courant de sortie du panneau photovoltaïque par les deux commandes MPPT précédentes sous des conditions météorologiques variables.

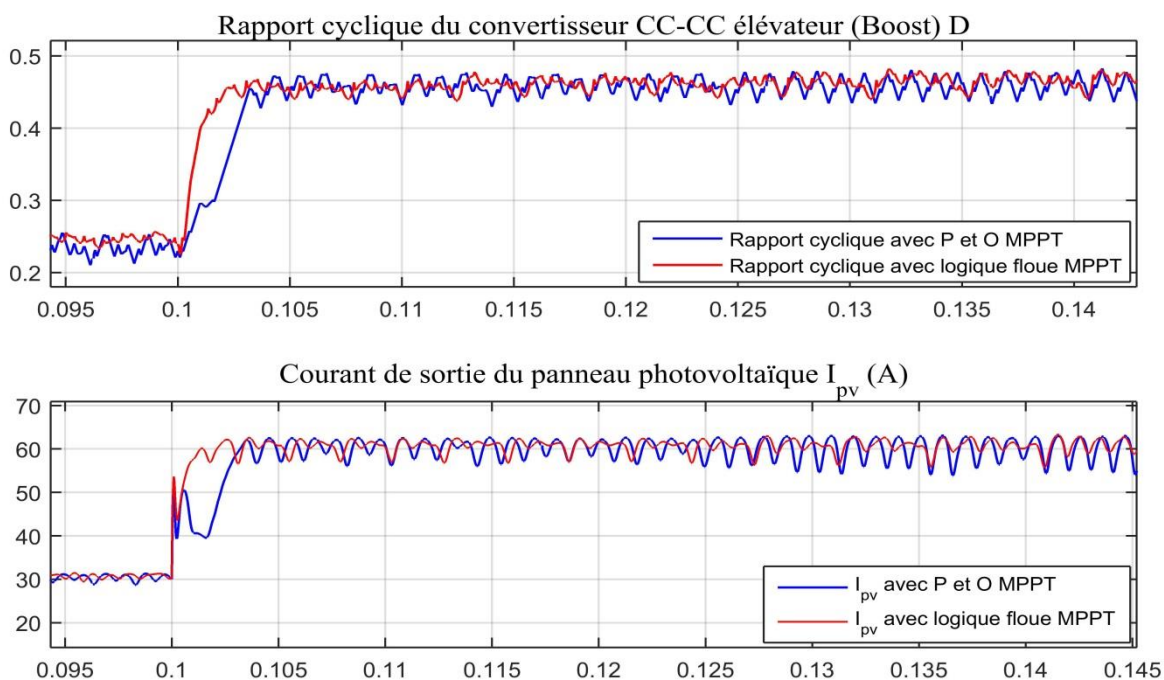


Figure IV.2. Les courbes du rapport cyclique du convertisseur CC-CC élévateur (Boost) et le courant de sortie du panneau photovoltaïque avec un plan agrandi par les deux commandes MPPT précédentes sous des conditions météorologiques variables.

La figure (IV.3) présente les courbes de la tension ainsi la puissance générés par le panneau photovoltaïque en fonction du temps par les deux techniques de MPPT (P et O) et (logique floue). Il est constaté par l'observation de la figure (IV.4) qui présente les résultats de la figure précédente mais dans un plan agrandi, il est constaté que la (logique floue MPPT) présente de meilleur performances et moins d'ondulations et une rapidité de converger autour des points de puissances maximales désirés en fonction du changement brusque des conditions météorologique tel que l'ensoleillement.

Finalemnt il bien clair que les méthodes d'intelligence artificielle montrent et assurent des performances meilleurs par rapport aux méthodes classiques.

Afin de prouver ces observations, il est recommandé de calculer quelques performances métriques dans la prochaine section.

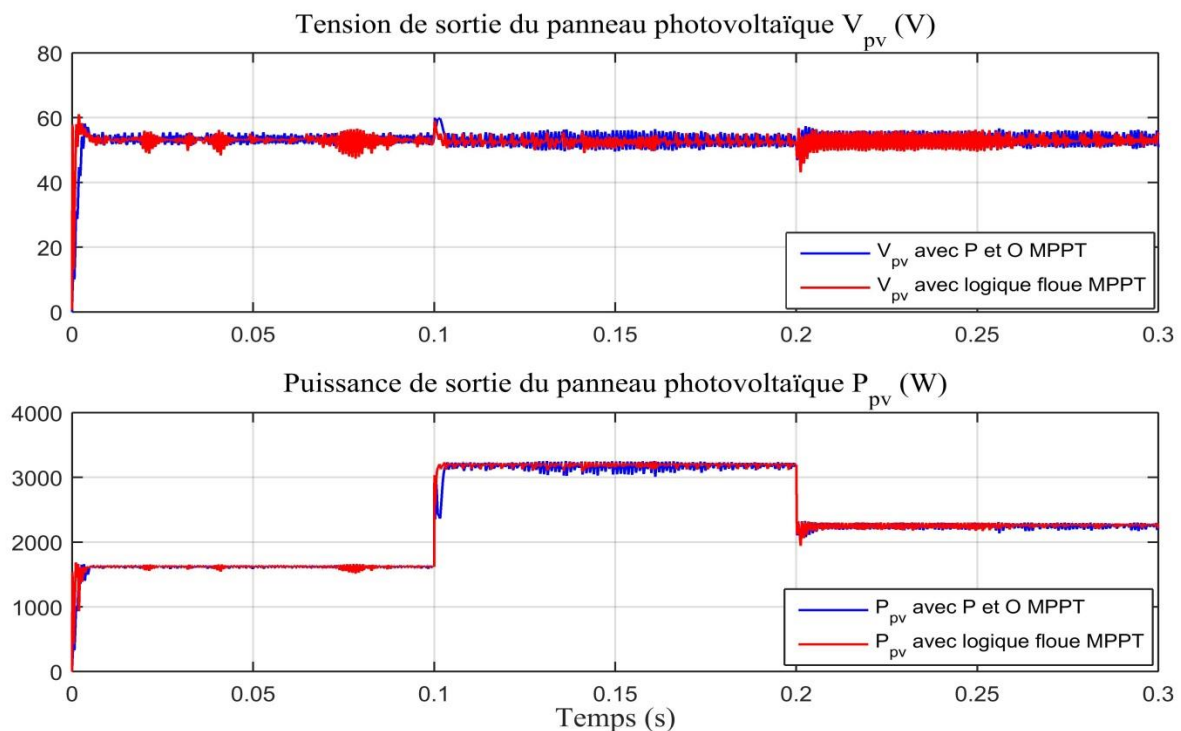


Figure IV.3. Les courbes de la tension et de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque par les deux commandes MPPT précédentes sous des conditions météorologiques variables.

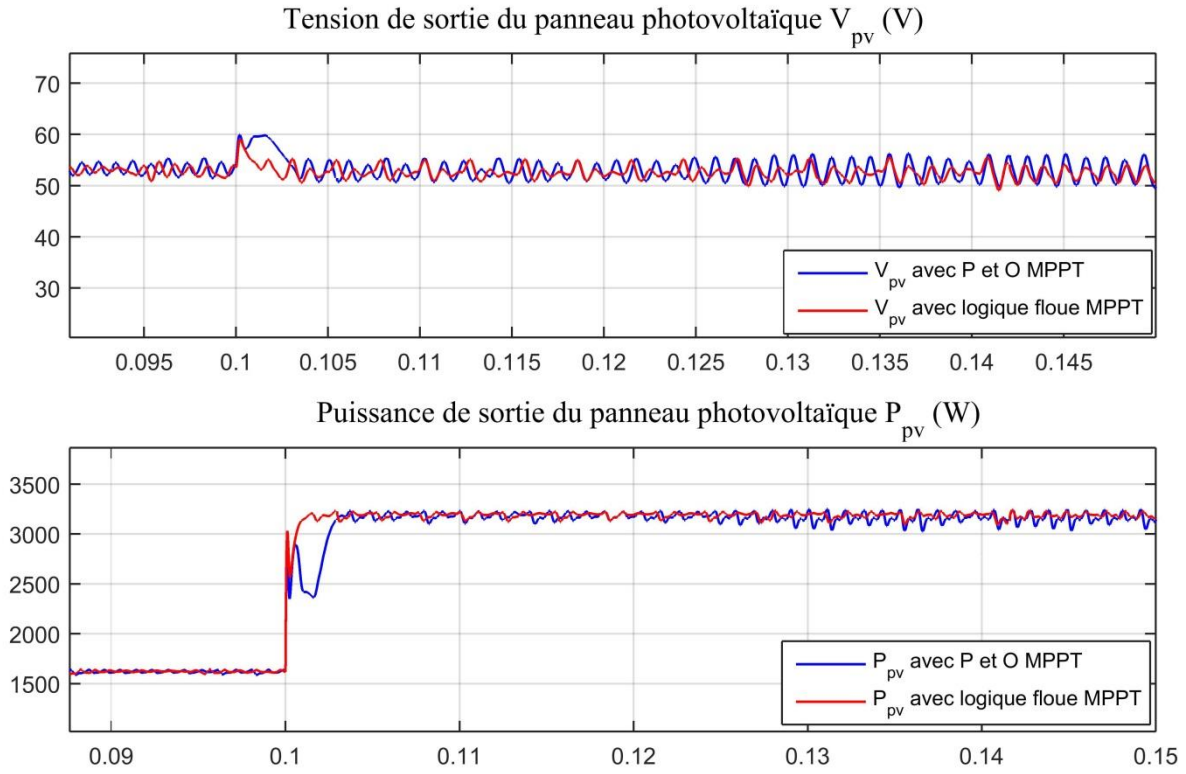


Figure IV.4. Les courbes de la tension et de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque avec un plan agrandi par les deux commandes MPPT précédentes sous des conditions météorologiques variables.

IV.3. Calcule des indices de performances :

Les mesures des indices de performance peuvent nous aider à évaluer les résultats des algorithmes utilisés qui donnent les meilleurs résultats et ceux qui doivent être améliorés. les mesures de quelques indices de performance sont etablies dans la table suivante :

IV.3.1. Les indices de performance évalués :

Soit O_i l'observation et P_i est la prédiction pour $i = 1, 2, \dots, n$. Par la suite nous allons proposer des fonctions programmées par le logiciel Matlab pour calculer les indices :

IV.3.1.1. Erreur Fractionnaire Moyenne (MFE):

$$MFE = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - O_i}{P_i + O_i} \right|$$

IV.3.1.2. Erreur Absolue Moyenne (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|$$

IV.3.1.3. Erreur Relative Absolue (RAE):

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - \bar{P}|}$$

IV.3.1.4. Erreur Quadratique Moyenne (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

Performances	P et O MPPT	Logique floue MPPT
MFE	0.0187	0.0116
MAE	28.2766	13.4629
RAE	0.0674	0.0425
RMSE	105.9174	60.5110

D'après les résultats obtenus des indices de performance on constate que le contrôleur logique floue présente de meilleures performances par rapport au contrôleur classique perturber et observer qui ont été appliqués pour traquer les points de puissances maximale du panneau photovoltaïque.

IV. 4. Conclusion :

Dans ce dernier chapitre du mémoire, une contribution à l'étude comparative entre les techniques de poursuite du point de la puissance maximale du panneau photovoltaïque à base des méthodes perturber et observer et à base de la logique floue a été établie. Cette étude comparative a été basée sur l'observation des résultats de simulation des deux techniques ainsi par le calcul de certains indices de performance qui ont évalué les résultats de la simulation et on a déduit que le contrôleur floue présente de meilleures performances en dynamique et rapidité et robustesse.

Conclusion générale :

Dans ce présent travail de mémoire de master une étude approfondit d'un système photovoltaïque à base d'un panneau qui est composée d'une connexion de 2 modules série et 8 modules parallèles de la firme Kyocera Solar KC 200 GT et un convertisseur CC-CC élévateur (Boost) et un commande de poursuite du point de la puissance maximale sous des conditions météorologiques variables.

Afin d'atteindre les objectifs de ce travail, nous avons commencé par l'établissement d'une étude théorique rigoureuse sur la conversion de l'énergie photovoltaïque en énergie électrique par la modélisation d'un module photovoltaïque à base des équations mathématiques qui relient entre les différentes grandeur électrique d'une cellule photovoltaïque afin de déterminer le modèle finale d'un module puis celui d'un panneau. Cette étude a été développée sous environnement Matlab/Simulink et a fait l'objet d'une étude de l'effet de variation des conditions météorologiques sur les caractéristiques.

Par la suite, nous avons abordé l'étude théorique des deux stratégies de commandes de poursuite du point de la puissance maximale la première était basée sur la méthode perturber et observer (P et O MPPT) et la deuxième était à base de l'intelligence artificielle précisément le contrôle par la logique floue (FLC MPPT), ces deux méthodes ont été établies dans le but de rendre le panneau photovoltaïque opérationnelle autour de sa puissance maximale sous des conditions météorologiques variables, ces stratégies de commande s'appliquent sur l'ensemble d'un panneau photovoltaïque et un convertisseur CC – CC de type élévateur (Boost) pour avoir une puissance de sortie d'un rendement le plus parfaits possible.

Conclusion générale :

Dans un contexte mondial où la transition énergétique s'impose comme une nécessité urgente, le développement de systèmes photovoltaïques performants revêt un rôle stratégique essentiel. Bien que l'énergie solaire soit une ressource abondante et renouvelable, son rendement reste limité par divers facteurs externes. Dès lors, l'optimisation du processus de conversion photovoltaïque, notamment via le suivi du point de puissance maximale (MPPT), apparaît comme une voie de recherche déterminante pour améliorer l'efficacité des installations solaires.

Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective en se concentrant sur l'étude, la modélisation et la comparaison de deux techniques MPPT appliquées à un système photovoltaïque associé à un convertisseur Boost : la méthode traditionnelle Perturbe and Observe (P&O) et la commande intelligente par logique floue (FLC). Grâce à des simulations approfondies réalisées sous MATLAB/Simulink, le comportement de chacune de ces méthodes a été évalué face à des variations d'ensoleillement et de température, ainsi que dans des conditions dynamiques transitoires, les résultats ont révélé les forces et les faiblesses propres à chaque approche. La méthode P&O, appréciée pour sa simplicité d'implémentation et sa faible consommation de ressources, a montré une bonne réactivité dans des conditions stables. Cependant, elle présente des oscillations persistantes autour du point de puissance maximale et une baisse de performance en cas de changements rapides d'irradiance. En comparaison, la commande par logique floue s'est distinguée par sa meilleure stabilité, sa robustesse et sa capacité à s'adapter efficacement aux fluctuations environnementales, malgré une complexité de conception plus importante.

Ces constats permettent de conclure que si la méthode P&O demeure adaptée aux systèmes simples et à faible coût, la logique floue constitue une solution plus performante pour des applications nécessitant une plus grande précision, une stabilité renforcée et une réactivité accrue. De plus, les résultats obtenus encouragent le développement d'approches hybrides, tirant profit à la fois de la rapidité de P&O et de l'intelligence adaptative de la FLC.

Pour l'avenir, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées, notamment l'optimisation automatique des paramètres flous via des algorithmes d'intelligence artificielle (réseaux de neurones, algorithmes génétiques, etc.), l'intégration en temps réel sur des dispositifs embarqués, ainsi que l'extension du modèle à des systèmes multi-sources ou connectés au réseau électrique. Ces orientations prometteuses contribueront à rendre les systèmes photovoltaïques plus intelligents, autonomes et performants, participant ainsi activement à la transition énergétique mondiale.

Les références :

- [1] Maifi Iyes, Étude et modélisation d'un panneau solaire thermique photovoltaïque, Université Frères Mentouri, Constantine 1, 2018.
- [2] Benabd Ellah Abd Hadi , Noui Abdenmour , Université Kasdi Merbah, Ouargla , 2023.
- [3] Ann Carrie, la fabuleuses histoires du photovoltaïque , origines, découvertes , et évolutions, 2025 .
- [4] Helali Kamelia, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.
- [5] Abdeloui Lakhdar , Beghni Fathi, Hefaia Abdelbasset , Simulation d'un cellules solaires a base de silicium par logiciel PCID, Institute des sciences technologies , Alger , 2022.
- [6] Bookaraa Yasmine, Aidoud Mohamed Chiha, Faculté des sciences et de la technologie , Université 8 Mai 1945, 2024.
- [7] Bourabah lahcen, Zitouni Djallel, Etude et détection de défauts dans un système photovoltaïque, Faculté des science et de la technologie , Bourdj Bou Arreridj , 2020.
- [8] Zehri Nassim , Modélisation et Simulation d'un system photovoltaïque, école national polytechnique, 2015.
- [9] Tahri Ghrisi , Contribution à l'étude et à la commande d'un système photovoltaïque a base d'onduleur multi-Nivea, Université des sciences et de la technologie Mohames Boudiaf , Oran 2022.
- [10] Cylia TIGRINE, Ourdira Ait Ouali, Étude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque, Faculté de technologie, Département de Génie électrique, Bejaia , 2018.
- [11] Hassaine, L., & Mellit, A. (2014). Smart DC/DC Converters for Photovoltaic Applications. Springer, (2014).
- [12] Khalika ZAKRIA, Dou Abdel Ghani, Zelaci Asma, Étude comparative de poursuite de point de puissance MPPT pour système photovoltaïque, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El -Oued, 2022.
- [13] M. Bayoud BABAAISSA, Etude et Simulation de Commande MPPT, École Nationale Polytechnique, 10 AV. Hassen Badi, El Harrach, 2013
- [14] Mr Tahri Ghrissi, Contribution A la modélisation et à la commande d'un convertisseur CC-CC de type élévateur, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf
- [15] Lahmar Oussama , Djeddi Seif Eddin , Étude comparative entre la commande par logique floue et régulateur PI d'un MCC , Faculté des sciences de l' Ingéniorat , Université Badji Mokhtar- Annaba, 2019
- [16] Compraison Piette F. la logique floue intérêts et limites , 2011.

- [17] Claud , P. Concepts fondamentaux de la logique floue , 2019 .
- Dubois Dier , Prade Henni , Idées nettes sur la logique floue , 1997.
- [18] Mohamed Ahmed Sasi , Fuzzy logic control of MPPT Controller for4 Pv systems , Faculty of Enginering and Applied Science , Canada ,2019 .
- [20] Faiza Bellhachat , Commande floue d'un hacheur MPPT , École national polytechnic, El harrach ,Allger 2007.
- [21] Hachama Mohamed , la logique floue théorie et Application Dynamique , Faculté des Sciences mathématiques pures et Appliquées , Blida 2003.
- [22] Iten Adel, Belaidi Ahmed Amine , Commande par4 la logique floue et Neuro- floue d'une cologne d'absorption , école4 nationa polytychnique d'Alger, 2006.