

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية 1
Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الآلية والكهروتقني
Département d'Automatique & Electrotechnique



Mémoire de Master

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Machines Electriques

Présenté par

BELHACHEMI Mohamed

&

HANAFI Badredine

Etude et simulation de la commande MPPT basée sur la logique floue

Proposé par : Mme. Boudissa E. & Mr. Bounekhla Mohamed

Année Universitaire : 2020-2021

Remerciement

Nous tenons à remercier, tout d'abord, Dieu le plus puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour achever ce travail.

Nos plus vifs remerciements s'adressent à notre enseignant le professeur M. Bounekhla pour l'aide et les conseils éclairés qu'il a su nous donner tout au long de la réalisation de ce travail, et notre promotrice Dr E. Boudissa pour sa patience, son orientation et ses remarques constructives et à notre Co-promoteur Mr. Mohamed Bounekhla pour le soutien et les conseils qui n'ont pas cessé de me prodiguer, et leurs apports sur le plan scientifique et personnel tout le long de notre travail.

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nousfont en participant au jugement de notre travail.

Nous remercions aussi tous les enseignants qui ont participé à notre formation.

Badredine&Mohamed

Je dédie ce modeste travail

*A MA TRÈS CHÈRE MERE, Paix à son âme pour tous les sacrifices,
l'amour, la tendresse, le soutien et les prières tout au long de mes études,
A mon fidèle collègue mon binôme Mohamed pour sa patience sans fin, sa
compréhension et son encouragement*

*A mes chers amis Tayeb, Aziz, Mounir, Mohamed, Oussama pour leurs
encouragements permanents, et leur soutien moral,*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre
soutien infaillible,*

Merci d'être toujours là pour moi.

Badredine

Je dédie ce modeste travail à mes

Chers parents

À tous les membres

de ma famille

Et

À tous mes amis

Mohamed.Bhm

ملخص: الهدف من هذه العمل هو الدراسة والمحاكاة في ظل بيئة ماطلاب لعنصر تحكم قائم على منطق ضبابي لرصد أقصى نقطة للطاقة للنظام الكهروضوئي. تعتمد الطاقة الخارجة للمولد الكهروضوئي على عدة عوامل مناخية، مثل ضوء الشمس ودرجة الحرارة. ومع ذلك، فإن التتبع في الوقت الفعلي لنقطة التشغيل المثلى بواسطة المنطق الضبابي ضروري لتحسين أداء النظام مهما كانت الظروف المناخية. تم تنفيذ نتائج المحاكاة أولاً، حيث تم ضبط درجة الحرارة عند 25 درجة مئوية والإضاءة عند 1000 واط / م². ثانياً، يتم الحفاظ على درجة الحرارة ثابتة (25 درجة مئوية) والإضاءة متغيرة. وأخيراً، تكون درجة الحرارة متغيرة ويتم تثبيت الإضاءة عند 1000 واط / م².

كلمات المفاتيح الكهروضوئي. نقطة الاستطاعة القصوى. ماطلاب. المنطق الضبابي

Résumé : L'objectif de ce mémoire est l'étude et la simulation sous l'environnement MATLAB-SIMULINK d'une commande basée sur la logique floue pour le suivi du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque. La puissance de sortie du générateur photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs climatiques, tels que l'ensoleillement et la température. Cependant, une poursuite en temps réel du point optimal de fonctionnement (MPP : Maximum Power Point) par la logique floue est nécessaire pour optimiser le rendement du système quelque soient les conditions climatiques. Les résultats de simulation ont été effectués dans un premier temps, en fixant la température à 25°C et l'éclairement à 1000 w/m². Dans un second temps, la température est maintenue constante (25°C) et l'éclairement est variable. Et en dernier, la température est variable et l'éclairement est fixé à 1000 w/m².

Mots clés : Photovoltaïque ; PPM ; MATLAB-SIMULINK ; Logique Floue.

Abstract : The objective of this work is the study and simulation under the MATLAB-SIMULINK environment of a control based on fuzzy logic for monitoring the maximum power point of a photovoltaic system. The output power of the photovoltaic generator depends on several climatic factors, such as sunlight and temperature. However, a real-time tracking of the optimum operating point (MPP : Maximum Power Point) by fuzzy logic is necessary to optimize the performance of the system whatever the climatic conditions. The simulation results were first carried out, setting the temperature at 25 ° C and the illumination at 1000 w / m². Secondly, the temperature is kept constant (25 ° C) and the lighting is variable. And lastly, the temperature is variable and the illumination is fixed at 1000 w / m².

Keywords : photovoltaic ; MPP ; Workspace : MATLAB/SIMULINK ; Fuzzy Logic.

Remerciement	
Dédicaces	
Résumé	
Sommaire	
Liste des abréviations et acronymes	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1&2

Chapitre 1 : Généralités sur les PV

1.1	Introduction.....	3
1.2	Définition et historiques du photovoltaïque.....	3
1.3	L'énergie solaire.....	4
1.4	Les cellules photovoltaïques.....	5
1.4.1	Types des cellules photovoltaïques.....	5
	a) Cellules amorphes.....	5
	b) Cellules monocristallines.....	5
	c) Cellules polycristallines.....	5
1.5	L'effet photovoltaïque.....	6
1.6	Modélisation de la cellule PV.....	7
	16.1 Cellule PV idéale.....	8
	16.2 Cellule PV réelle.....	10
1.7	Module photovoltaïque.....	11
1.8	Association des cellules photovoltaïques en série.....	11
1.9	Association des cellules photovoltaïques en parallèle.....	12
1.10	Influence des résistances série et parallèle sur la cellule.....	13
1.11	Influence de l'éclairement sur la cellule PV.....	14
1.12	Influence de la température sur la cellule PV.....	15
1.13	Définition de l'ombrage.....	16
1.14	Protection des systèmes solaires photovoltaïques.....	17
1.15	Installation photovoltaïque.....	17
1.16	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	18

1.16.1 Avantages.....	18
1.16.2 Inconvénients et limites.....	19
1.17 Conclusion.....	19

Chapitre 2 : Etage d'adaptation et commande MPPT

2.1 Introduction.....	20
2.2 Méthode de poursuite du point de puissance maximale.....	21
2.3 Connexion directe.....	21
2.4 Fonctionnement optimale d'un GPV.....	22
2.5 Définition de MPPT d'un système solaire photovoltaïque.....	22
2.6 Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature.....	23
2.7 Technique perturbation & Observation (P&O).....	24
2.8 Technique incrémentale conductance (IC).....	27
2.9 Avantages et inconvénients.....	30
2.10 Etage d'adaptation.....	31
2.10.1 Hacheur abaisseur (BUCK).....	32
2.10.2 Hacheur dévolteur-survolteur (BUCK-BOOST).....	33
2.10.3 Convertisseur boost.....	35
2.11 Principe de la commande PWM-MLI.....	39
2.12 Modélisation de la commande MLI.....	39
2.13 Conclusion.....	41

Chapitre 3 : Logique floue

3.1 Introduction.....	42
3.2 Théorie des ensembles flous.....	42
3.3 Ensemble flou.....	42
3.4 Fonction d'appartenance.....	43
3.5 Opérateur de la logique floue.....	44
3.6 Raisonnement en logique floue.....	44
3.7 Principe de la logique floue.....	44

3.8	Utilisation de la logique floue pour le contrôle.....	45
3.8.1	Contrôleur flou.....	46
a)	Fuzzification.....	46
b)	Inférence.....	49
c)	Défuzzification.....	52
3.9	Conclusion.....	53

Chapitre 4 : Simulation et résultats

4.1	Introduction.....	54
4.2	Simulation des caractéristiques de GPV.....	54
4.3	Principe de poursuite du point de puissance maximale par la logique floue.....	56
4.4	Simulation de la méthode MPPT logique floue.....	57
4.5	Systèmes globale (GPV, Convertisseur, MPPT, Charge).....	60
4.6	Résultats de simulation de la MPPT floue.....	61
4.6.1	Cas où la température (25°C) et l'éclairement 1000 w/m2 sont fixes.....	61
4.6.2	Cas d'une température constante (25°C) et l'éclairement variable.....	63
4.6.3	Cas de la température variable et l'éclairement fixe 1000 w/m2.....	65
4.7	Conclusion	67
	Conclusion générale.....	68
	Références bibliographiques.....	69
	Références bibliographiques.....	70
	Références bibliographiques.....	71

Liste des abréviations et acronymes

PV	Photovoltaïque
MPPT	Poursuite du point de puissance maximale (maximum power point tracking)
GPV	Générateur photovoltaïque
DC	Courant direct (direct current)
DC-DC	Conversion continu-continu
I	Intensité de courant
V	Tension
λ	Longueur d'onde
E _{ph}	Quantité de l'énergie transportée par un photon
C	Vitesse de lumière dans le vide ($C=3*10^8\text{m/s}$)
h	Constante de Planck ($6.62*10^{-34}\text{ J.S}$)
CPV	Cellule photovoltaïque
I _{ph}	Courant de générateur photovoltaïque
R _s	Résistance série
R _p	Résistance parallèle
I _d	Courant de diode
V _d	Tension de diode
I _{pv}	Courant de cellule photovoltaïque
V _{pv}	Tension de cellule photovoltaïque
I _s	Courant de saturation de la diode
α	Facteur d'idéalité de la jonction
K	Constant de Boltzmann ($K=1.38*10^{-23}\text{J/R}$)

Liste des abréviations et acronymes

t	Temperature de jonction de cellule
Q	Charge élémentaire de l'électron ($Q=1.6*10^{-19}C$)
Isc	Courant de court-circuit (short circuit current)
Voc	Tension de circuit ouvert (open circuit voltage)
ns	Nombre de cellules en série
Iscs	Courant de court-circuit série
Vsco	Tension de circuit ouvert série
np	Nombre de cellules parallèles
Ipcp	Courant de court-circuit parallèle
Vpcp	Tension de circuit ouvert parallèle
PPM	Point de puissance maximale
P&O	Perturbation et observation
IC	Conductance incrémentale
G	Conductance
D	Rapport cyclique
fs	Fréquence constante de commutateur
T	Période du signal
ton	Temps d'ouverture
toff	Temps de fermeture
Vout	Tension de sortie de convertisseur
Vin	Tension de l'entrée de convertisseur
Dav	Rapport cyclique moyenne

Liste des abréviations et acronymes

I_L	Courant d'inductance
V_C	Tension de condensateur
V_e	Tension de l'entrée de Boost
V_s	Tension de sortie de Boost
E	Energie stockée dans l'inductance
PWM	Pulse width modulation
MLI	Modulation largeur impulsion
V_{ref}	Tension de référence
FIS	Fuzzy inférence system
ΔV	Variation de tension
ΔP	Variation de puissance
FF	Facteur de forme
IGBT	Insulated gate bipolar transistor
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralités sur les PV

Figure 1.1 : Les principaux types de cellule.....	6
Figure 1.2 : L'effet photovoltaïque.....	7
Figure 1.3 : Schéma équivalent d'une cellule PV.....	8
Figure 1.4 : Schéma équivalent d'une photopile idéale.....	9
Figure 1.5 : Caractéristiques (I-V) et (P-V)	11
Figure 1.6 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques.....	12
Figure 1.7 : Caractéristique résultante d'un groupement constitué de n_P cellules identiques en parallèle.....	13
Figure 1.8 : Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs de R_s	13
Figure 1.9 : Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs de R_{sh}	14
Figure 1.10 a : Influence de l'éclairement caractéristique P-V du module.....	14
Figure 1.10 b : Influence de l'éclairement sur caractéristique du module I-V	15
Figure 1.11 : Influence de la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	15
Figure 1.12 : GPV dans des conditions d'ombrage partiel causé par le passage de nuage.....	16
Figure 1.13 : Protection par diodes en série.....	17
Figure 1.14 : Exemples d'installation des panneaux solaires PV.....	18

Chapitre 2 : Etage d'adaptation et la commande MPPT

Figure 2.1 : Schéma bloc d'un algorithme de recherche du PPM.....	21
Figure 2.2 : Connexion directe entre un GPV et une charge.....	23

Liste des figures

Figure 2.3 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec convertisseur Statique contrôlé par une commande MPPT sur charge quelconque.....	23
Figure 2.4 : Le fonctionnement de l'algorithme P&O.....	24
Figure 2.5 : Organigramme de la méthode P&O	25
Figure 2.6 : Programme et schéma bloc de la technique P&O	26
Figure 2.7 : Divergence de la commande P&O lors de variation d'irradiation.....	27
Figure 2.8 : Principe de la méthode IC.....	27
Figure 2.9 : Organigramme de la méthode IC.....	29
Figure 2.10: Programme et schéma bloc de la technique IC.....	30
Figure 2.11 : Forme du signal de commande du commutateur.....	31
Figure 2.12 : Convertisseur dévolteur réel.....	32
Figure 2.13 : Circuit topologies du convertisseur dévolteur.....	32
Figure 2.14 : Convertisseur dévolteur-survolteur réel.....	34
Figure 2.15 : Circuits des topologies du convertisseur Buck-Boost.....	34
Figure 2.16 : Schéma du hacheur survolteur.....	35
Figure 2.17 : Schéma équivalent à la phase d'accumulation d'énergie.....	36
Figure 2.18 : Schéma équivalent à la phase de roue libre.....	37
Figure 2.19 : l'étage d'adaptation Boost.....	38
Figure 2.20 : Obtention d'un signal MLI (PWM).....	40
Figure 2.21 : structures d'un générateur PWM sous Matlab/Simulink.....	41
 Chapitre 3 : Logique floue	
Figure 3.1 : Différence entre ensemble classique et ensemble Flou.....	43
Figure 3.2 : Formes usuelles des fonctions d'appartenance.....	43
Figure 3.3 : Variables linguistiques, termes linguistiques et univers de discours.....	45
Figure 3.4 : Principe du Contrôleur flou.....	46
Figure 3.5 : Degré d'appartenances des variables.....	47
Figure 3.6 : Éditeur de fichiers FIS.....	47

Liste des figures

Figure 3.7 : la fonction d'appartenance de ΔP après mise en œuvre.....	48
Figure 3.8 : la fonction d'appartenance de ΔV après mise en œuvre.....	48
Figure 3.9 : la fonction d'appartenance de « DELTAD » après mise en œuvre.....	49
Figure 3.10 : Interface de composition de la table de règles.....	50
Figure 3.11 : Principe de la MPPT floue.....	52
Figure 3.12 : Organigramme simplifié de flou contrôleur.....	53

Chapitre 4 : Simulation et résultats

Figure 4.1 : schéma bloc du générateur photovoltaïque (GPV).....	55
Figure 4.2 : Caractéristiques de PV Kyocera Solar KD210GX-LPU.....	55
Figure 4.3 : Les courbes de GPV.....	56
Figure 4.4 : Structure de la commande MPPT floue.....	57
Figure 4.5 : Schéma block de la commande MPPT logique floue.....	57
Figure 4.6 : schéma bloc de l'entrée ΔP	58
Figure 4.7 : schéma bloc de l'entrée ΔV	58
Figure 4.8 : schéma bloc de la sortie D.....	59
Figure 4.9 : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la Commande MPPT floue.....	60
Figure 4.10 : la tension de sortie pour $E=1000W/m^2$ et $T=25C^\circ$	61
Figure 4.11 : le courant de sortie pour $E=1000W/m^2$ et $T=25C^\circ$	62
Figure 4.12 : la puissance de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$	62
Figure 4.13 : Rapport cyclique de MPPT floue.....	63
Figure 4.14 : Changement de l'éclairement de $1000W/m^2$ à $800W/m^2$ avec une température fixe de $25^\circ C$	63

Liste des figures

Figure 4.15 : la tension de sortie pour un changement de l'éclairement de 1000W/m^2 à 800W/m^2 pour la MPPT logique floue.....	64
Figure 4.16 : le courant de sortie pour un changement de l'éclairement de 1000W/m^2 à 800W/m^2 pour la MPPT logique floue.....	64
Figure 4.17 : la puissance de sortie du système pour un changement de l'éclairement de 1000W/m^2 à 800W/m^2 pour la MPPT logique floue.....	65
Figure 4.18 : Changement de température de 25°C à 10°C pour la MPPT logique floue.....	65
Figure 4.19 : la tension de sortie pour un changement de température de 25°C à 10°C pour la MPPT logique floue.....	66
Figure 4.20 : le courant de sortie pour un changement de température de 25°C à 10°C pour la MPPT logique floue.....	66
Figure 4.21 : la puissance de sortie pour un changement de température de 25°C à 10°C pour la MPPT logique floue.....	67

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Rendement des différents types de cellules.....	6
Tableau 2.1 : Tableau de vérité de l'algorithme « perturbation & observation ».....	25
Tableau 3.1 : Tableau d'inférence à cinq classes.....	49

Introduction générale

L'énergie solaire est la fraction extraite, par des cellules photosensibles, de l'énergie électromagnétique qui provient du soleil sous forme de rayonnement. C'est une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle consiste à convertir, grâce à l'effet photovoltaïque, le rayonnement électromagnétique en électricité. Ce processus de conversion est à la fois accessible, rentable et non polluant à l'environnement. On parle alors d'énergie propre.

Le monde d'aujourd'hui voit le développement rapide de l'industrie, ceci nous convertit à être plus dépendant de l'énergie. L'industrie des cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser des panneaux avec le meilleur rapport rendement/prix.

Selon les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques et de leur association, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des méthodes de Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT).

Dans la plupart des systèmes de conversion des énergies PV, il existe un algorithme particulier nommé « maximum power point Tracking ». Cette technique, comme son nom l'indique, permet de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir.

La puissance recherchée dépend généralement du changement de conditions climatiques telles que le rayonnement solaire et la température. Par conséquent, la technique MPPT, destinée à contrôler le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, est nécessaire pour le fonctionnement optimal du système PV dans différentes conditions d'exploitation [1].

L'objectif de ce travail consiste en l'étude et la simulation dans l'environnement MATLAB-SIMULINK d'une commande MPPT d'un système photovoltaïque basée sur la logique floue.

Le mémoire comporte quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur le photovoltaïque et ses applications. Les caractéristiques de la cellule PV ont été tracées pour différents paramètres internes et externes influant sur la conversion d'énergie PV. Un aperçu sur les générateurs photovoltaïques (GPV), telles que la constitution, la protection et l'installation, a été donné. De plus, les différentes chaînes de production d'électricité PV sont présentées.

Le second chapitre consiste à étudier quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Les techniques MPPT usuelles permettant d'extraire le maximum d'énergie des modules PV, sont présentées.

Le troisième chapitre focalise sur le principe général et la théorie de base de la logique floue.

Introduction générale

Le quatrième chapitre est dédié aux résultats de simulation pour différentes conditions climatiques (température et ensoleillement sont constants, température constante et ensoleillement variable et enfin température variable et ensoleillement constant).

La conclusion générale clôture ce mémoire.

1.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité.

Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe (alimenté une charge) ou stockée en batteries.

Pour bien comprendre ce phénomène, un rappel des notions de base de l'effet photovoltaïque, le principe de la cellule photovoltaïque et leurs différents modèles est présenté.

1.2 Définition et historique du photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800.

L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque [2].

Quelques dates de l'histoire du photovoltaïque sont données dans ce qui va suivre:

1839 : Le physicien français Antoine Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur L'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs

1887 : L'effet photoélectrique a été compris et présenté en 1887 par Heinrich Rudolf Hertz qui en publia les résultats dans la revue scientifique Annalen der 1905 : Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1905 et obtint le prix Nobel de physique sur ses travaux en 1921.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince des laboratoires BELL mirent au point la première cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement de 4%, au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule photovoltaïque avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites Van Guard alimentés par des cellules photovoltaïques sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à L'Université de Wilmington dans l'État du Delaware, USA.

1983 : La première voiture alimentée par de l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

2000 : Entrée en application le 1er avril 2000 et modifiée en 2004 et en 2009, l'EEG Renewable Energy Sources Act (EEG) est le résultat de la transposition de la directive européenne relative à la promotion des énergies renouvelables dans le secteur de l'électricité.

2005 : En décembre 2005 mise en réseau de la première centrale solaire photovoltaïque du groupe Prime Energy à Weil Am Rhein (Baden, Württemberg), Hagen heimer strasse 17, 79576 Weil Am Rhein [3].

1.3 L'énergie solaire

Le rayonnement solaire reçu à la surface de la terre est un rayonnement électromagnétique comme les ondes utilisées en radiotélévision ou les rayons X. Sa particularité tient au fait que l'essentiel du rayonnement est composé de lumière visible, dans la gamme de longueur d'onde λ qui va de 0,38 à 0,78 μm , de rayonnement infrarouge ($\lambda > 0,78 \mu\text{m}$) et d'un peu de rayonnement ultraviolet ($\lambda < 0,38\mu\text{m}$).

Le rayonnement solaire est constitué d'un nombre incalculable de photons transportant chacun une énergie E_{ph} donnée par la relation suivante :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (1,1)$$

où

E_{ph} : Quantité de l'énergie transportée par un photon

λ : Longueur d'onde

C : Vitesse de la lumière dans le vide $C=3*10^8m/s$

h : Constante de Planck

1.4 Cellules photovoltaïques

Le principe d'une cellule photovoltaïque (CPV) est basé sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque (PV). Il consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée au rayonnement solaire. Donc, CPV est un composant électrique exposé à la lumière, elle génère de l'électricité grâce à l'effet PV. Les cellules solaires sont généralement associées en série et/ou en parallèle, pour permettre l'obtention d'une tension et/ou un courant élevé.

1.4.1 Types de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires, qui sont réalisées à base de silicium principal semi-conducteur employé dans la fabrication [4]. Les cellules sont différenciables par leurs rendements et leurs coûts.

a) Cellules amorphes

Les cellules amorphes (Figure 1.1.a) ne possèdent pas de structure cristalline. Leur fabrication et leur efficacité sont inférieures par rapport aux autres types. Cependant, leur rendement est faible. Elles sont utilisées dans les petits produits de consommation (les calculatrices solaires).

b) Cellules monocristallines

Les cellules au silicium monocristallines (Figure 1.1.b) représentent le type de plus haut pouvoir de conversion. Elles sont considérées parmi les cellules ayant le meilleur rendement.

c) Cellules polycristallines

Les cellules au silicium polycristallines (Figure 1.1.c) sont caractérisées par la conception la plus facile. Les composants des cristaux de silicium sont bien visibles, le coût de fabrication est moins important. Cependant, leur rendement est plus faible [5].

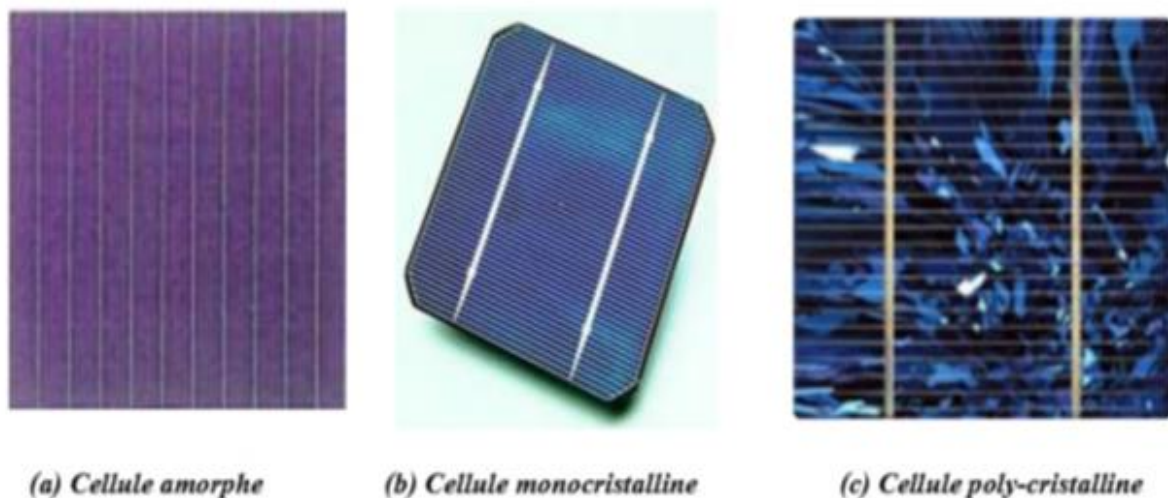


Figure 1.1 : Les principaux types de cellules

Une étude a été faite sur les différents types de cellules mettant en évidence leurs rendements. Les résultats sont représentés dans le tableau suivant [6] :

Technologie de cellule	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe	13 %	5-9 %
Silicium polycristalline	19,8 %	11-15 %
Silicium monocristallin	24,7 %	13-17 %

Tableau 1.1 Rendement des différents types de cellules

1.5 Effet photovoltaïque

Quand la cellule est exposée à la lumière, les photons pénètrent dans le matériau semi-conducteur, transfèrent leur énergie aux électrons qui se mettent en mouvement pour produire un courant électrique.

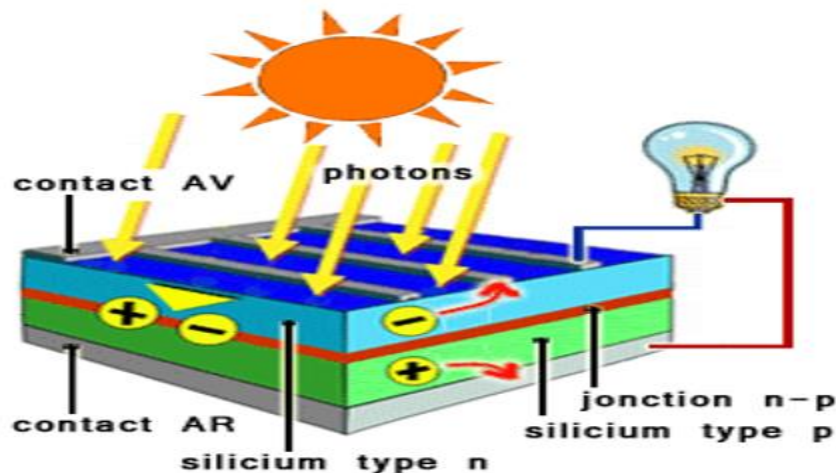


Figure 1.2 : L'effet photovoltaïque

Une cellule solaire est représentée comme une diode électronique de grande surface. La taille d'une cellule solaire est de l'ordre de 20cm avec une forme circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries [7].

1.6 Modélisation de la cellule PV

Pour établir le modèle mathématique de la cellule PV, il faut tout d'abord retrouver son circuit électrique équivalent. De nombreux modèles mathématiques de cellule PV a été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire dû à la jonction semi-conductrice. La référence [8] analyse trois types de modèle :

- Modèle à une diode
- Modèle à deux diodes [9]
- Modèle polynomial

Le modèle à une diode est le modèle classique [10-11]. Il consiste en un générateur de courant I_{ph} directement dépendant de l'ensoleillement et de la température pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode en antiparallèle pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contact et de connexion et une résistance parallèle R_p caractérisant les divers courants de fuite dus à la diode et aux effets de bord de la jonction. Le circuit électrique équivalent de la cellule est représenté par la figure 1.3.

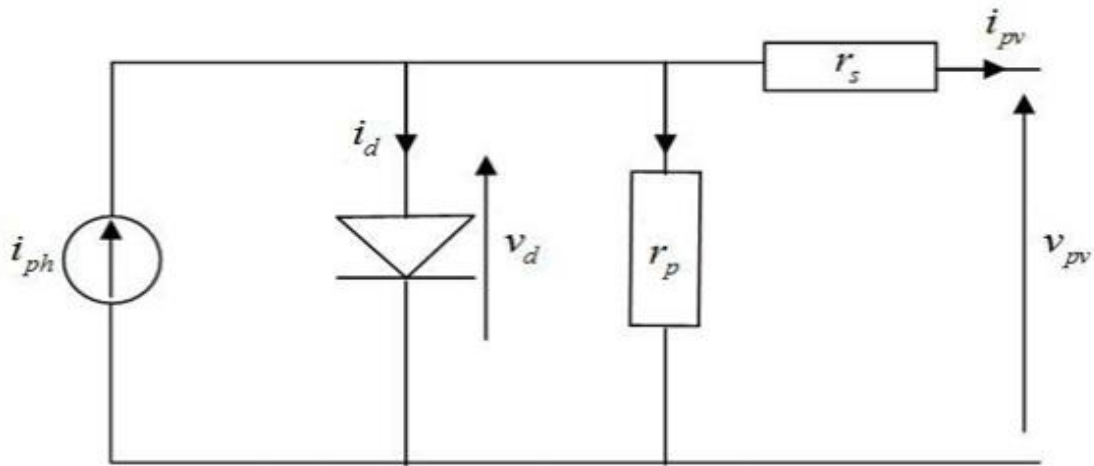


Figure 1.3 : Schéma équivalent d'une cellule PV

Où

I_d : Courant traversant la diode

V_d : Tension aux bornes de la diode

I_{pv} : Courant délivré par la cellule

V_{pv} : Tension à la sortie de la cellule.

Cependant, on peut distinguer deux cas dans l'étude de la cellule PV :

- Cas idéal
- Cas réel

1.6.1 Cellule PV idéale

La résistance série est très petite et la résistance parallèle est suffisamment grande. Le circuit équivalent de la photopile peut devenir comme suit (figure 1.4)

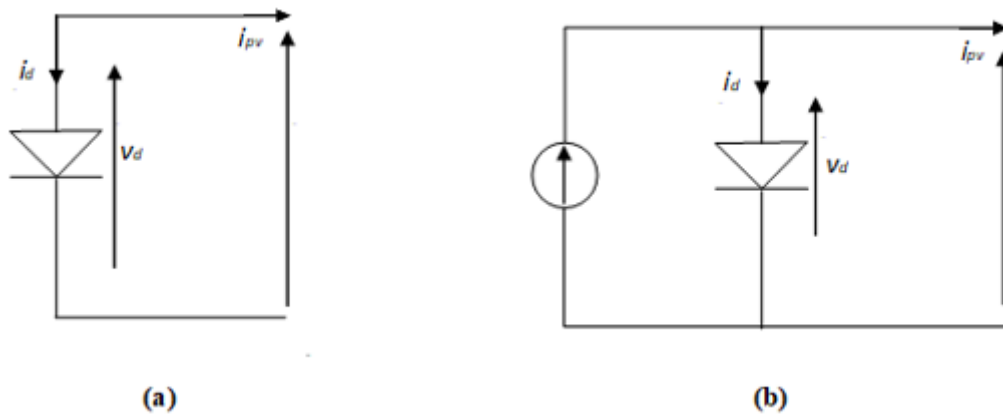


Figure 1.4 : Schéma équivalent d'une photopile idéale
(a) Sous l'obscurité ; (b) Sous l'éclairement

Une photopile dans l'obscurité (figure I.4.a) est régie par l'expression suivante de courant :

$$I_{pv} = -I_d = -I_s \left[\exp\left(\frac{QV_{pv}}{aKt}\right) - 1 \right] \quad (1,2)$$

Où :

I_s : Courant de saturation de la diode

α : Facteur d'idéalité de la jonction

K : Constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} J / K$)

t : Température de jonction des cellules

Q : Charge élémentaire de l'électron ($1.6 \times 10^{-19} C$)

Si la photopile est maintenant sous l'éclairement (Figure I.4.b), elle sera régie par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{QV_{pv}}{aKt}\right) \right] \quad (1,3)$$

Pratiquement, on utilise une charge résistive ajustable pour construire point par point la caractéristique courant-tension de la photopile (Figure 1.4).

Si la charge est nulle, cas de court-circuit, la tension de sortie est égale à zéro. Le courant de la cellule est à son maximum. Ce courant est appelé courant de court-circuit (short circuit current).

$$I_{SC} = I_{ph} \quad (1,4)$$

Si la charge est suffisamment grande, cas du circuit ouvert, le courant de sortie est égal à zéro. La tension de la cellule est à son maximum. Cette tension est appelée la tension de circuit ouvert (open circuit voltage) :

$$V_{oc} = \frac{\alpha Kt}{Q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (1,5)$$

- **Facteur de forme**

La puissance fournie au circuit extérieure par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule), cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement $P_m(I_m, V_m)$ de la courbe courant tension.

(I_{CC}, V_{CO}) Le facteur de forme FF c'est le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et le produit

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{CC} V_{CO}} \quad (1,6)$$

1.6.2 Cellule PV réelle

En réalité, la résistance série est très petite. Elle est de l'ordre de quelques milli-ohms. Alors que la résistance parallèle est suffisamment grande, elle est de l'ordre du méga ohm. Dans ce cas, le circuit équivalent de la photopile est celui de la figure 1.2. Ainsi, l'expression du courant de la cellule peut avoir la forme suivante [12] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - \frac{V_{pv}}{R_p} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{Q \cdot (V_{pv} + R_s I_{pv})}{\alpha Kt} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + V_s * I_{pv}}{R_p} \quad (1,7)$$

En utilisant cette expression, on peut tracer la caractéristique I-V de la cellule PV (Figure 1.5 en rouge). Etant donné que la puissance de la cellule est le produit du courant par la tension, alors de même, on peut tracer la caractéristique P-V de la cellule PV (Figure 1.5 en bleu)

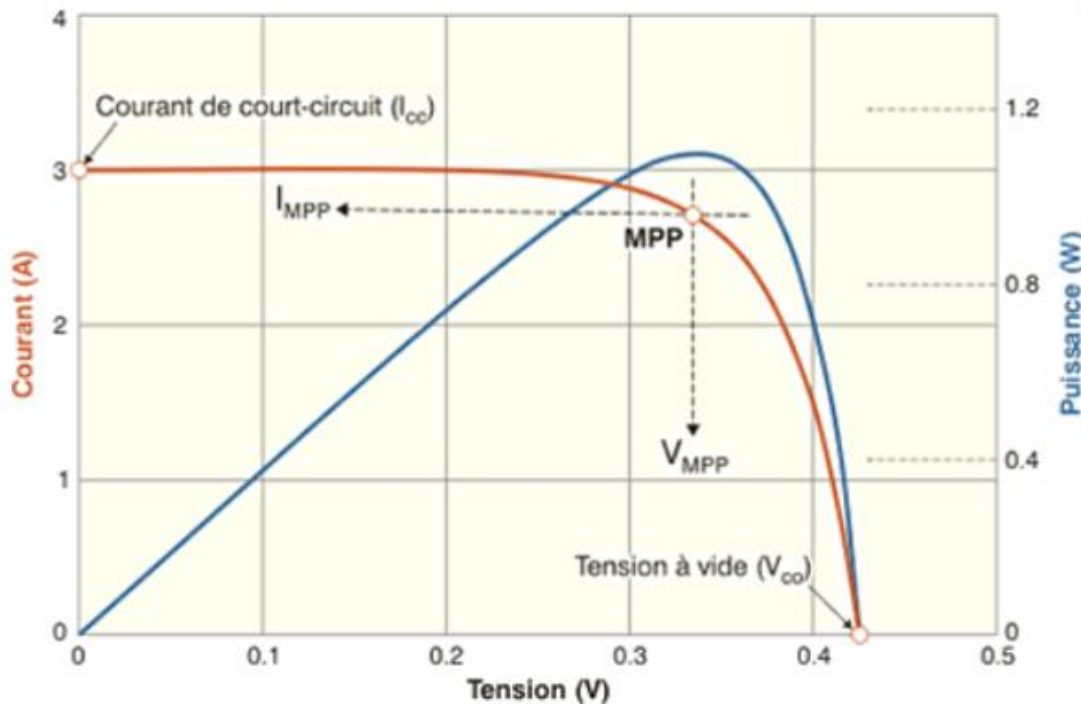


Figure 1.5 : Caractéristiques (I-V) et (P-V)

1.7 Module photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque ou un module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires monté en série ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert.

En effet, dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m^2 ; 25°C), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm^2 est d'environ 2.3W sous une tension de 0.5V . Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de faible puissance, insuffisante pour la plupart des applications domestiques ou industrielles.

1.8 Association de cellules photovoltaïques en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

Une association de n s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la

caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule (Figure 1.6). L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules [14] comme suit :

$$I_{SCC} = I_{CC} \quad (1,8)$$

$$V_{SCO} = n_s V_{OC} \quad (1,9)$$

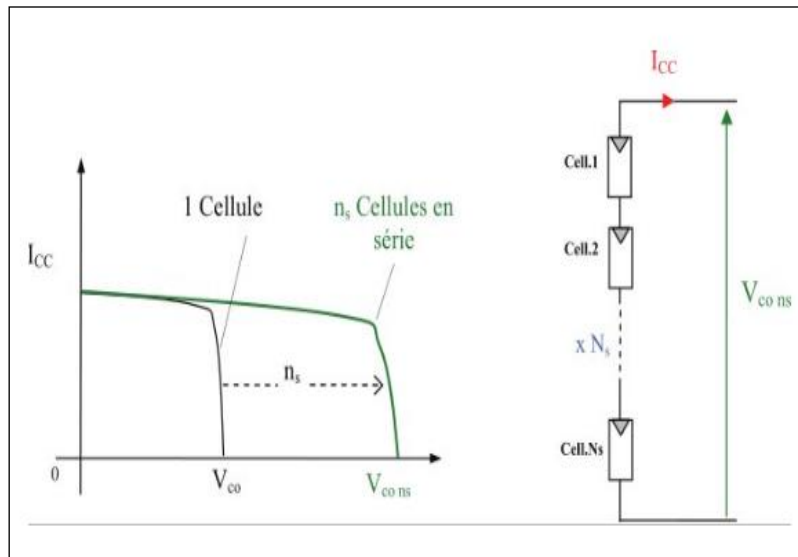


Figure 1.6 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques

1.9 Association de cellules photovoltaïques en parallèle

Une association parallèle de n_p cellules est possible et permettant d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants (Figure 1.7). L'équation résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n_p cellules [14].

$$I_{PCC} = n_{PCC} \quad (1,10)$$

$$V_{PCO} = V_{CO} \quad (1,11)$$

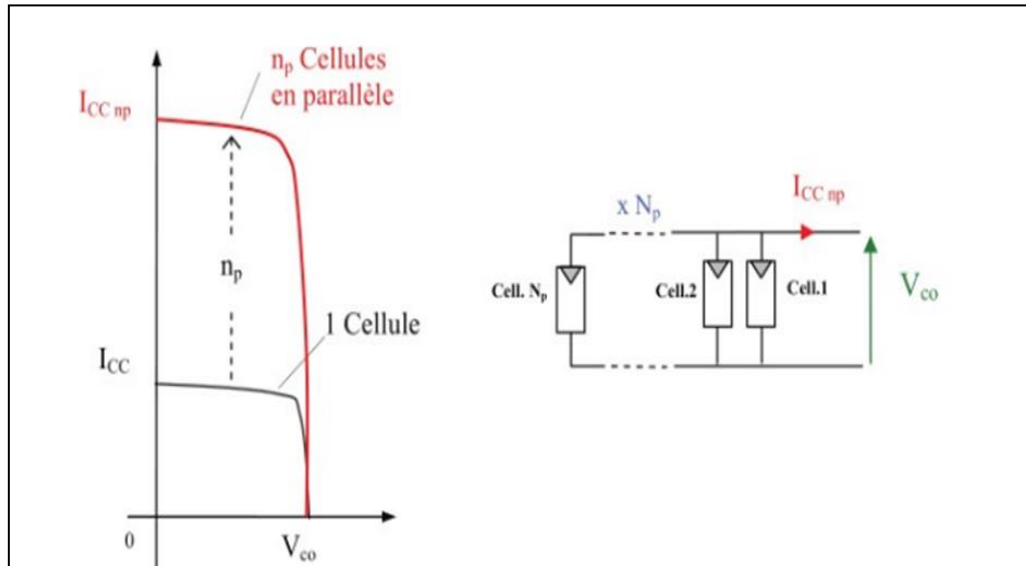


Figure 1.7 : Caractéristique résultante d'un groupement constitué de n_p cellules identiques en parallèle [13].

1.10 Influence des résistances série et parallèle sur la cellule

A partir du circuit équivalent d'une photopile réelle, on constate que d'autant que la résistance série est faible, la résistance shunt est grande : on collecte un maximum de courant ce qui implique un maximum de puissance. La figure 1.8 (a, b) illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V pour différentes résistances séries. La figure 1.9 (a, b) montre respectivement les caractéristiques I-V et P-V pour différentes résistances shunt. En augmentant R_s ou en diminuant R_p , on s'éloigne du rectangle idéal. V_{oc} , I_{sc} de la caractéristique I/V qui correspond au Facteur de forme et de même la puissance diminue

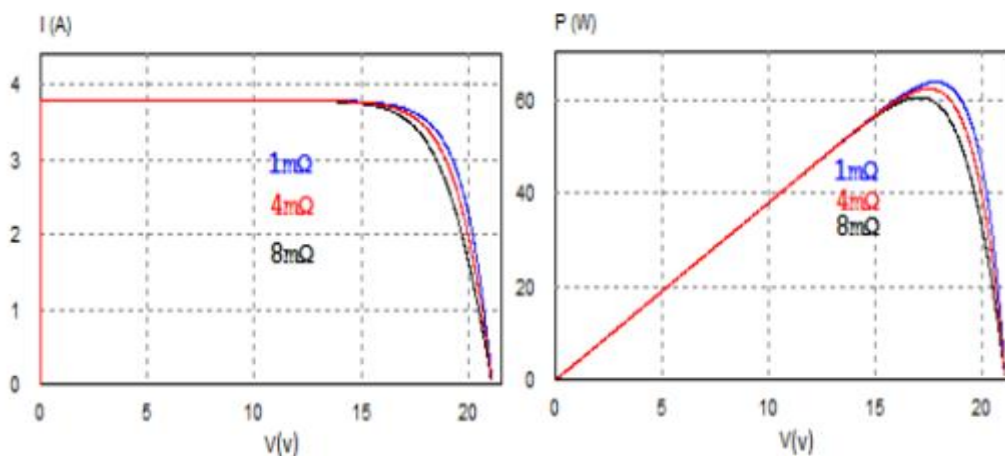


Figure 1.8 : Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs de R_s

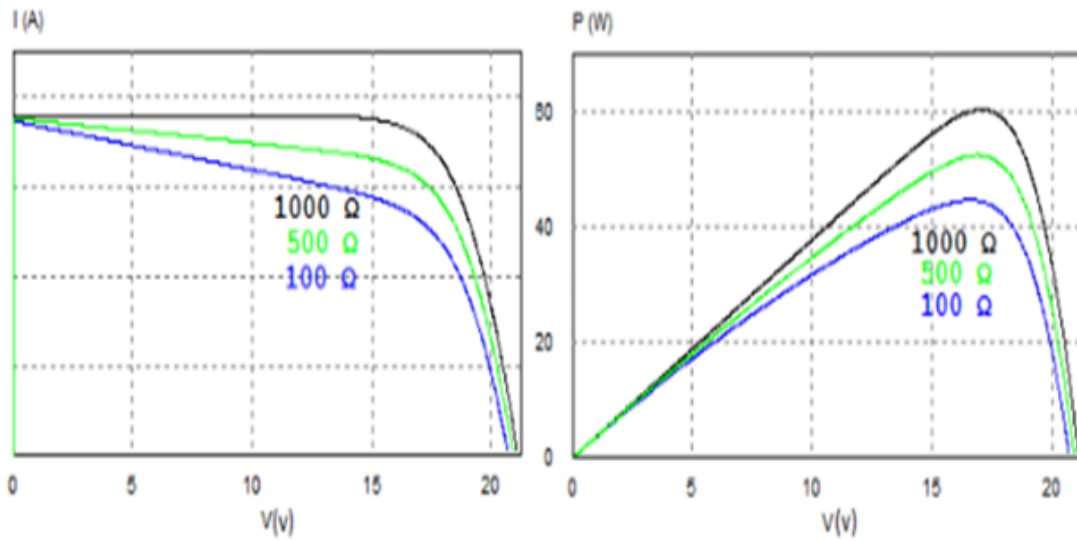


Figure 1.9 : Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs de Rsh

1.11 Influence de l'éclairement sur la cellule PV

L'énergie électrique produite par une cellule dépend fortement de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure 1.10 (b) représente la caractéristique I (V) d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température constante. Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension de circuit ouvert qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [15]

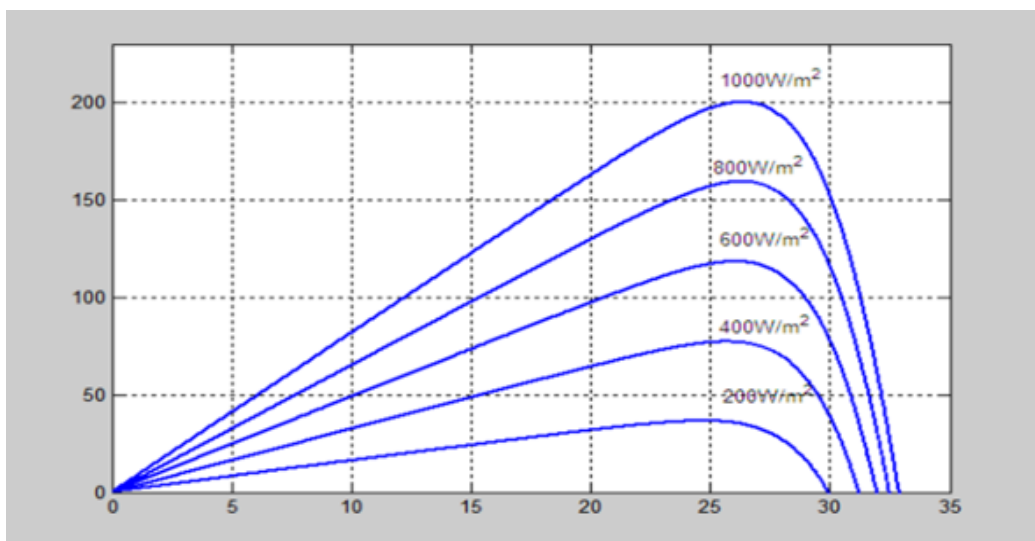


Figure 1.10 a : Influence de l'éclairement caractéristique P-V du module

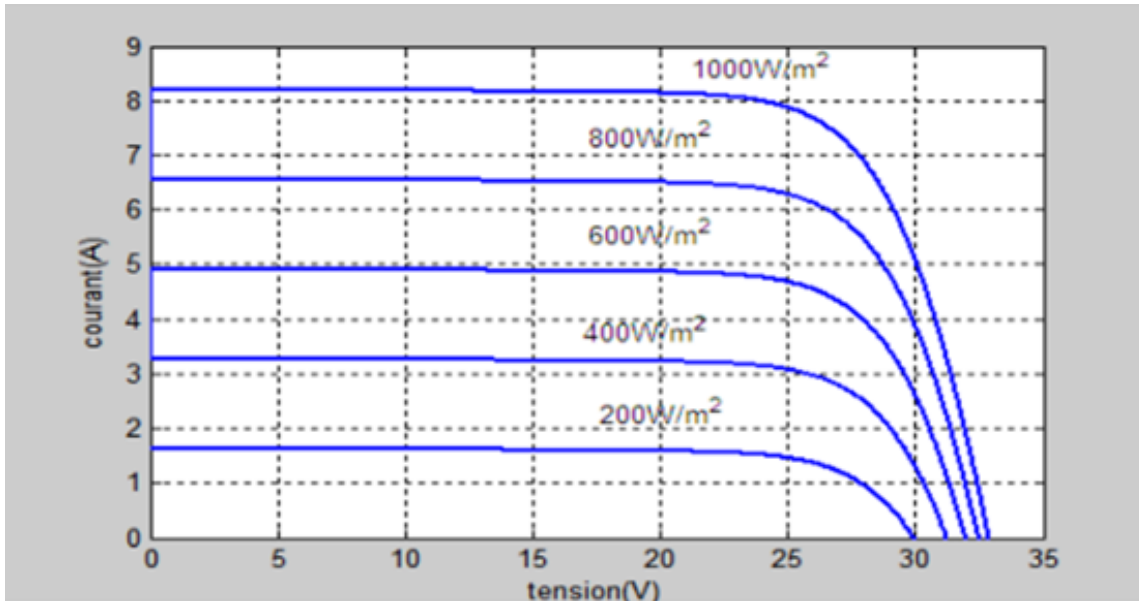


Figure 1.10b : L'influence de l'éclairement sur caractéristique I-V du module

1.12 Influence de la température sur la cellule PV

La base des cellules photovoltaïques est une jonction PN. Ceci nous laisse envisager que son rendement variera selon la température de la jonction. La figure 1.11 représente les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ pour différentes températures de fonctionnement du panneau PV Kyocera Solar KD210GX-LPU

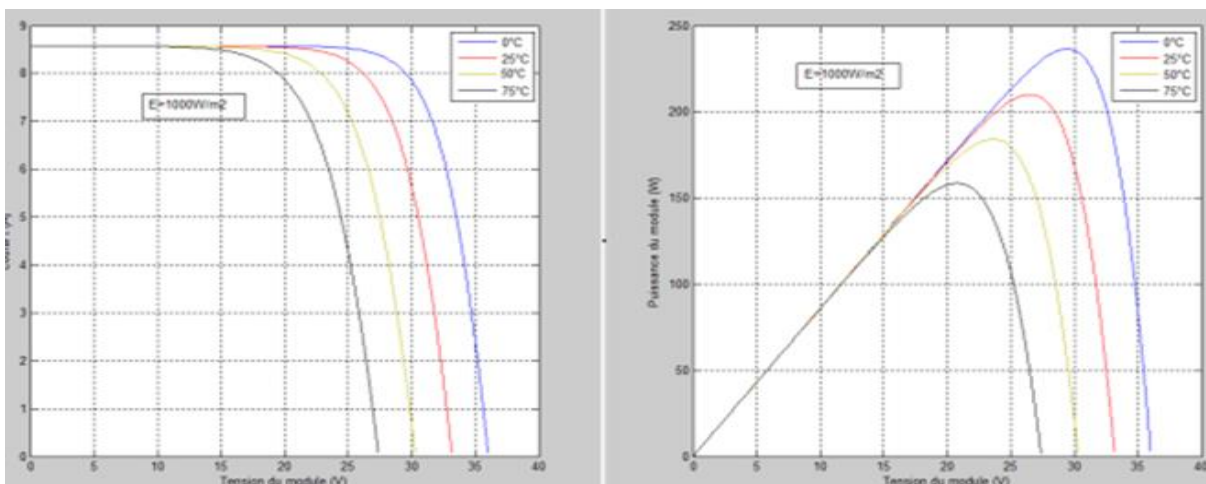


Figure 1.11 : Influence de la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$.

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue.

1.13 Définition d'Ombrage

Tout type d'obstacle (bâtiment, arbre, etc.) peut bloquer les panneaux solaires. Les ombres portées sur les capteurs photovoltaïques peuvent entraîner des pertes de production d'énergie. Cette perte de production dépend de la taille et de la densité des obstacles. Il est préférable de quantifier le degré de perte avant de commencer à installer des panneaux photovoltaïques. On peut distinguer deux types de coloration : la coloration partielle et la coloration complète. On appelle la partie qui recouvre le panneau plein ou pleine coloration (revêtement, accros, tout type de salissures, etc.). Des ombres partielles laissent passer quelques rayons du soleil.

Il faut savoir que les cellules photovoltaïques sont connectées en série. Par conséquent, la batterie la plus faible affectera les performances des autres batteries. Par conséquent, l'ombrage total d'une rangée de cellules rendra l'ensemble du module photovoltaïque inefficace. Or, les panneaux photovoltaïques sont désormais équipés de diodes bypass, ce qui permet de limiter l'impact des ombres sur des parties du panneau. Par exemple, pour un panneau de batteries équipé d'un jeu de 3 diodes de by-pass, si l'ombre affecte une batterie, une série de batteries connectées à la même diode de by-pass se court-circuitera, et le reste du panneau continuera à produire [16].

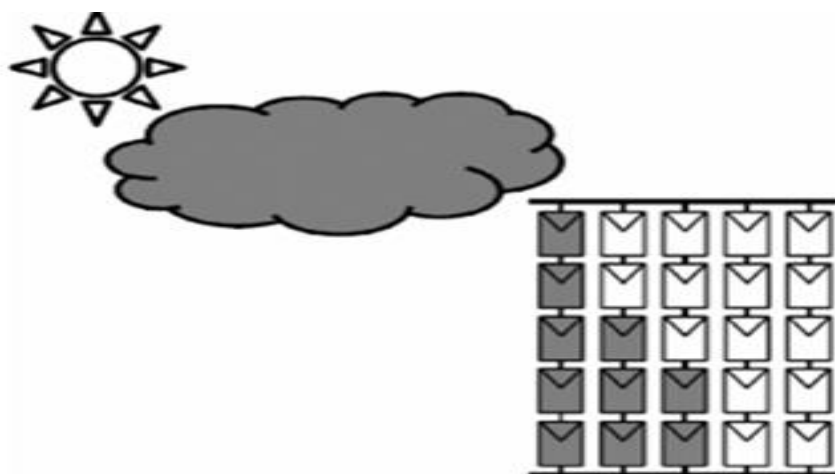


Figure 1.12 : GPV dans des conditions d'ombrage partiel causé par le passage de nuage

1.14 Protection des systèmes solaires photovoltaïques

Le groupement des cellules photovoltaïques présente un effet indésirable lorsque le module est partiellement à l'ombre ou lorsque les cellules ne sont pas éclairées équitablement (éclairage non homogène). donc pour résoudre ce problème et pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèles[17]

Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (Figure1.13).

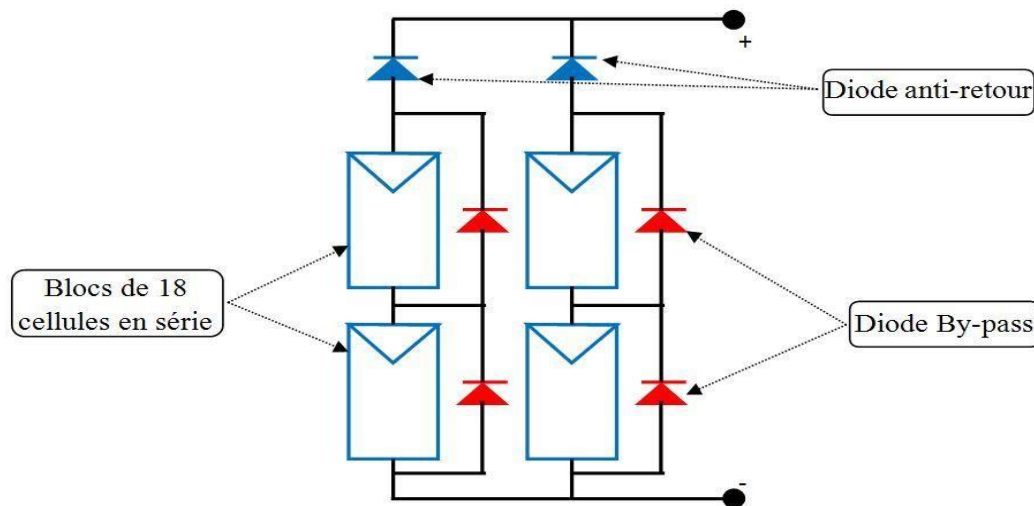


Figure 1.13 : Protection par diodes en série

- La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairage n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

1.15 L'installation photovoltaïque

L'installation des panneaux solaires PV peut être sur des supports fixes au sol ou sur des systèmes mobiles de poursuite du soleil appelés : trackers. Dans ce dernier cas, la production

électrique augmente d'environ 30 % par rapport à une installation fixe. En dehors de centrales solaires, les installations fixes se font actuellement plutôt sur les toits des logements ou des bâtiments, soit en intégration de toiture, soit en surimposition. L'endroit de la pose doit être bien dégagé, aéré et protégé. Il est conseillé de laisser environ 10 cm sous les modules et de les poser avec une inclinaison d'au-moins de 10° pour assurer un auto-nettoyage lors des pluies. Pour plus de performance, une inclinaison de 30° à 60° est recommandée. Dans certains cas, on pose des panneaux verticaux en façade d'immeuble. Cette inclinaison n'est pas optimale pour la production d'électricité, mais comme ces panneaux remplacent le revêtement de façade, l'économie réalisée sur le revêtement compense au moins partiellement une production plus faible. Il faut également éviter que des éléments fassent de l'ombre aux panneaux.



Figure 1.14 : Exemples d'installation des panneaux solaires PV

1.16 Avantages et inconvénients

L'énergie solaire dispose d'une gamme de fonctionnalités d'où on peut noter les avantages les plus importants :

1.16.1 Avantages [18]

On peut citer les avantages de l'énergie photovoltaïque comme suit :

- Sa gratuité
- Pas de pollution
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation

- Sa structure fixe
- Son coût de maintenance bas
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts pourrait alimenter la planète entière

1.16.2 Inconvénients et Limites [18]

Les limites et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont présentés comme suit:

- Le coût élevé de l'installation
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages)
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution. La fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

1.17 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé le principe de la conversion PV et la modélisation d'une cellule photovoltaïque. L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) a été élucidée.

Dans le chapitre suivant, l'étage d'adaptation entre le générateur PV /charge ainsi que la commande MPPT seront présentées, pour pouvoir assurer un fonctionnement optimal du système photovoltaïque.

2.1 Introduction

Les lois spécifiques de commande existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximaux de leurs caractéristiques sans qu'a priori ses points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment, ils ont été modifiés, ni qu'elles sont les raisons du changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par les points de puissance maximale. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance [19].

Dans le but de concevoir une interface de puissance plus performante, une étude détaillée est faite sur les convertisseurs statiques DC-DC non isolés en mode de conduction continu. L'analyse porte sur le gain en courant et en tension du convertisseur ainsi que sur les contraintes sur les semi-conducteurs. Le convertisseur Boost est choisi dans cette étude grâce à sa structure simple et son rapport de transformation en tension le plus élevé par rapport aux autres topologies.

Après avoir déterminé la structure du convertisseur adopté, on présentera quelques techniques MPPT existantes qui permettent de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale. La conception d'un étage d'adaptation muni d'un algorithme MPPT permet d'optimiser la conversion énergétique et de relier aisément un GPV à sa charge.

Cette recherche est faite par l'association d'un étage d'adaptation entre le panneau solaire et la charge en plus de la commande MPPT. La figure 2.1 présente le schéma de principe d'un tel fonctionnement.

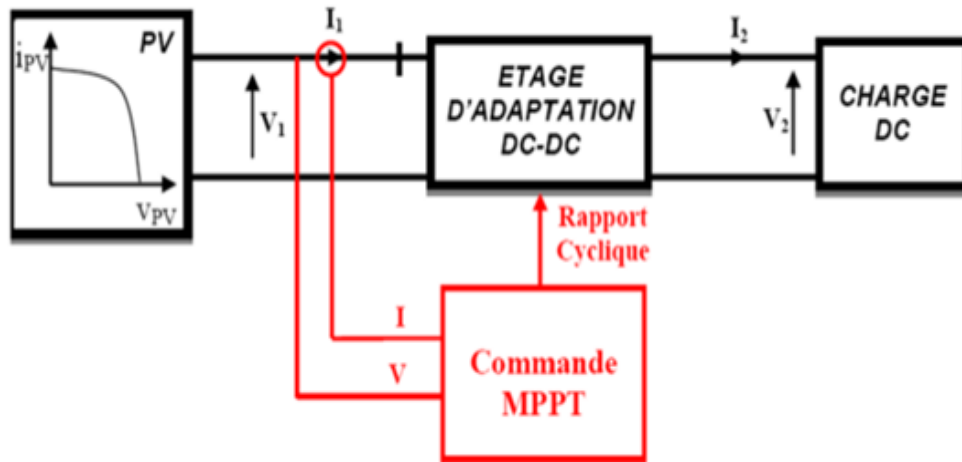


Figure.2.1 : Schéma bloc d'un algorithme de recherche du PPM [20]

2.2 Méthode de poursuite de point de puissance maximale

Afin d'obtenir une meilleure efficacité dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, une technologie appelée Maximum Power Pursuing (MPPT) consiste à transmettre toute la puissance extraite de l'énergie photovoltaïque à la charge de manière optimale pour l'alimentation. Il doit être utilisé dans toute application où ces générateurs sont utilisés, et il sera nécessaire voire indispensable selon la théorie du transfert de puissance optimal. La technique de contrôle utilisée pour le suivi des points de puissance [21].

2.3 Connexion directe

Entre GPV et charge, le raccordement direct des panneaux solaires photovoltaïques à la charge est actuellement le principe de fonctionnement le moins coûteux et le plus répandu. Son application se résume dans le domaine photovoltaïque, et sa tension V est fixée par la tension nominale de la charge à alimenter. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût de fonctionnement. L'existence de la diode anti-retour est essentielle pour empêcher le courant négatif de circuler vers le module PV.

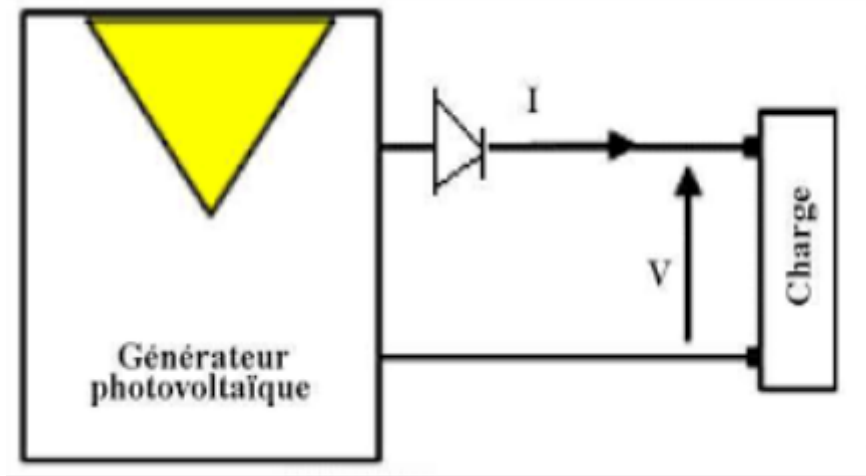


Figure.2.2 : Connexion directe entre un GPV et une charge.

2.4 Fonctionnement optimale d'un GPV

Le fonctionnement optimal du système GPV est important pour améliorer l'efficacité des panneaux solaires. Les caractéristiques du système GPV sont non linéaires et changent avec la température ambiante et l'éclairement. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser la technologie MPPT pour obtenir une puissance maximale du GPV afin d'améliorer son efficacité à la borne du générateur.

2.5 Définition de MPPT d'un système solaire photovoltaïque

La technologie MPPT est un type de contrôle associé à la phase d'adaptation, qui permet de faire fonctionner un générateur non linéaire de manière à produire en permanence sa puissance maximale. Les systèmes MPPT sont généralement associés à des générateurs photovoltaïques voire à des éoliennes. Ensuite, le contrôleur MPPT peut contrôler le convertisseur statique connecté à la charge et le panneau photovoltaïque, de manière à fournir en permanence la puissance maximale à la charge [22]. La figure montre la chaîne de conversion photovoltaïque avec des convertisseurs statiques contrôlés par des commandes MPPT et n'importe quelle charge.

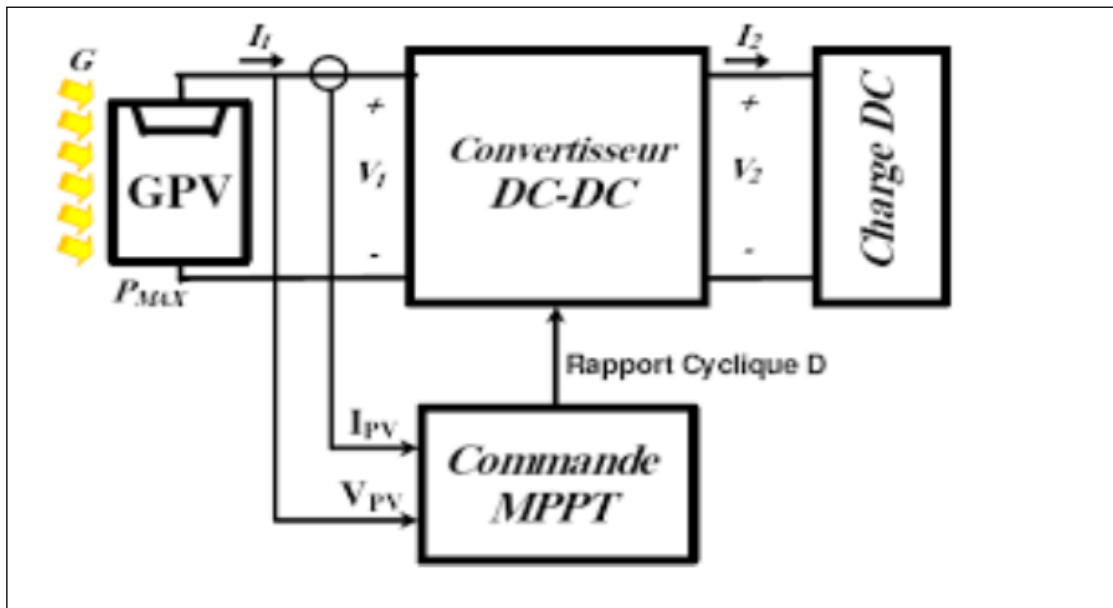


Figure.2.3 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT sur charge quelconque [23].

2.6 Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature

Depuis 1968, diverses publications sur les opérations de contrôle de type MPPT sont souvent apparues dans la littérature. A cette époque, ce type de loi de contrôle a d'abord été émis et appliqué aux énergies renouvelables de type photovoltaïque. Au vu du grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons classé les différentes technologies MPPT existantes selon leurs principes de base. En plus des principes, la classification effectuée également une évaluation comparative basée sur des critères tels que la précision ou la vitesse de recherche [23].

Les méthodes classiques du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale d'un système photovoltaïque sont citées comme suit :

- ❖ Méthode de perturbation et observation (P&O).
- ❖ Méthode de conductance incrémentale (IC).

2.7 Technique perturbation & observation (P&O)

L'algorithme P&O consiste à modifier le point de fonctionnement du module PV, en augmentant ou diminuant le facteur de marche d'un convertisseur continu-continu, et à mesurer la puissance de sortie avant et après la perturbation. Si la puissance augmente, l'algorithme perturbe le système dans le même sens. Sinon, le système est perturbé dans la direction opposée. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV [24].

La figure 2.4 montre les quatre options possibles lors du suivi du MPP. Le point 1 étant la position précédente et le point 2 la position actuelle de chaque cas (a, b, c et d)

a Cas A : $\Delta P < 0$ et $\Delta V < 0$

b Cas B : $\Delta P < 0$ et $\Delta V > 0$

c Cas C : $\Delta P > 0$ et $\Delta V > 0$

d Cas D : $\Delta P > 0$ et $\Delta V < 0$

Dans les cas a et c, le rapport cyclique doit diminuer, entraînant une augmentation de la tension du module PV.

Alors que dans les cas b et d, le rapport cyclique doit être augmenté de façon à ce que la tension du module PV diminue.

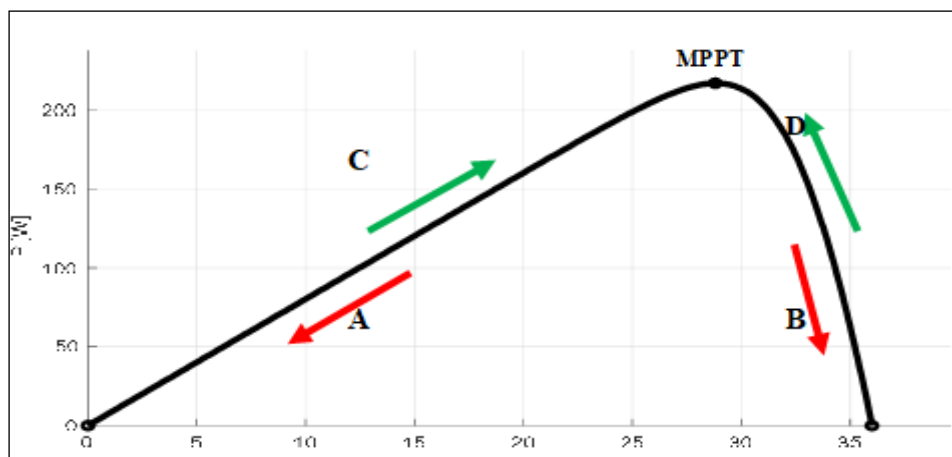


Figure.2.4 : fonctionnement de l'algorithme P&O

Chapitre 2 Etage d'adaptation et commande MPPT

L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression suivante:

$$V(k) = V(k - 1) + dv \quad (2,1)$$

Perturbation de la puissance	Observation de la puissance	Prochaine perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative (-)	Négative (-)	Positive (+)

Tableau. 2.1 Table de vérité de l'algorithme « perturbation & observation »

L'organigramme mis en œuvre pour le contrôleur P&O est illustré par la Figure 2.5 suivante:

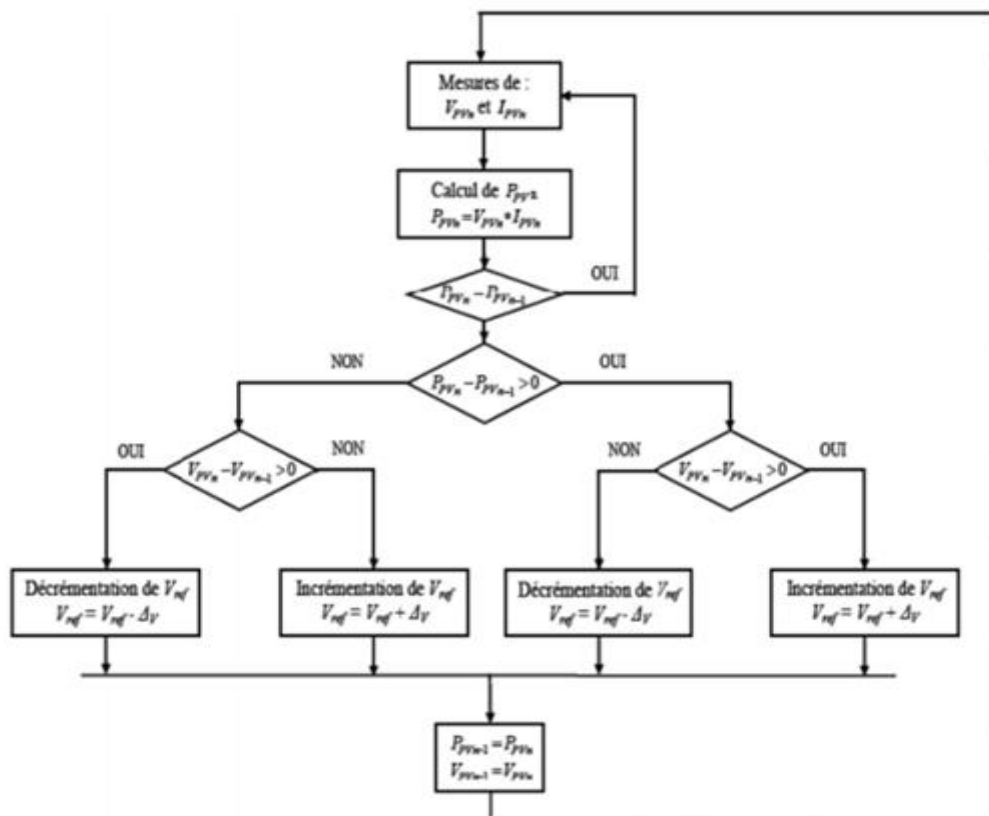


Figure 2.5 : Organigramme de la méthode P&O

Chapitre 2 Etage d'adaptation et commande MPPT

On a réalisé le schéma bloc suivant (Figure 2.6) sous l'environnement MATLABSIMULINK, d'après l'organigramme de la figure 2.5

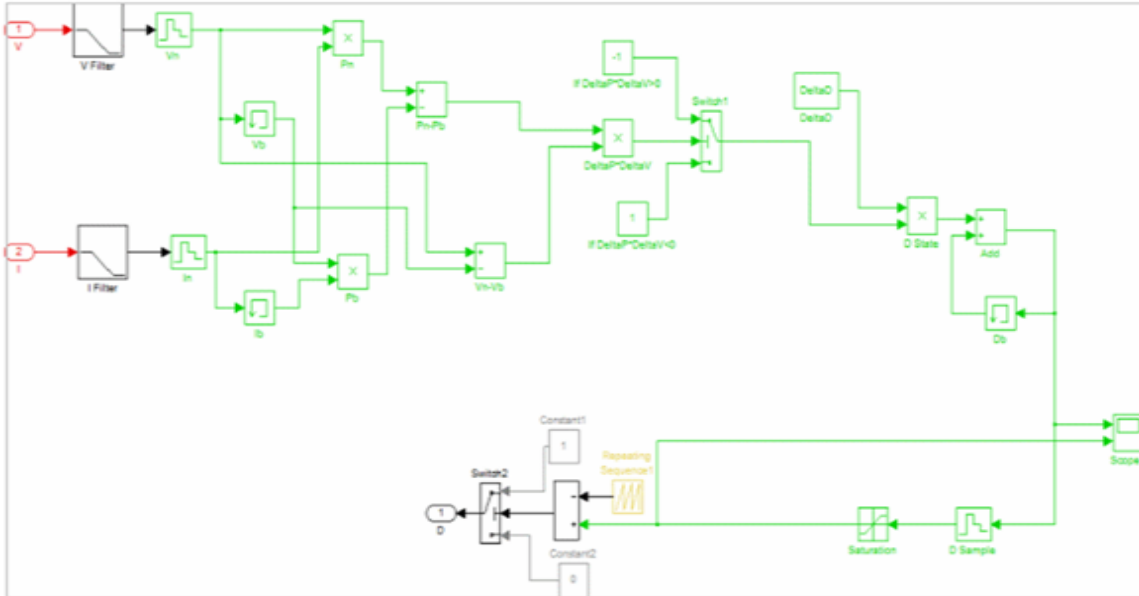


Figure 2.6 : Programme et schéma bloc de la technique P&O

Comme le montre la figure 2.6, les entrées du système MPPT sont les ΔP et ΔV calculées à partir des signaux $P(k)$, $P(k-1)$, $V(k)$ et $V(k-1)$. Les signes de ces deux entrées sont exploités pour savoir dans quelle position de la courbe P-V, on se trouve.

L'inconvénient de la méthode de P&O est décrit par l'échec lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. Si l'ensoleillement augmente, on aura une augmentation de la puissance du panneau, alors que le système va réagir comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente. Il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale.

Ce processus continue jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement, moment où il revient vers le vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance.

Ces oscillations peuvent être minimisées lorsqu'on réduit les valeurs de la variable de perturbation [25].

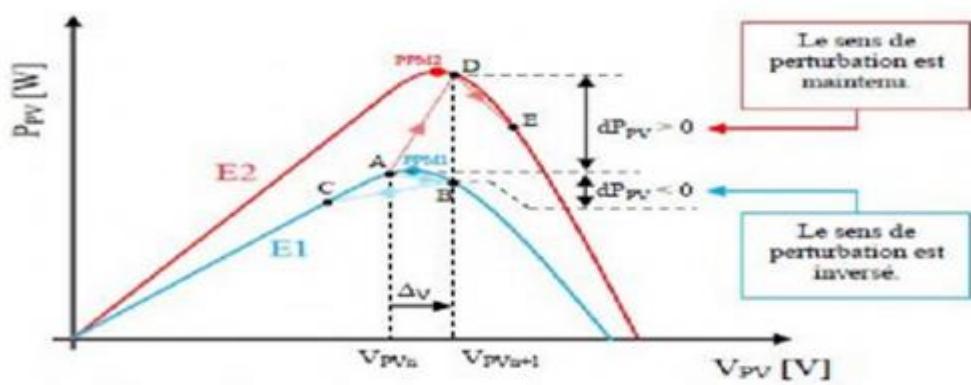


Figure 2.7 : Divergence de la commande P&O lors de variation d'irradiation

2.8 Technique incrémentale conductance (IC)

Cette technique est basée sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous [22.23].

$$G = \frac{I}{V} \quad (2,2)$$

Donc une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{dI}{dV} \quad (2,3)$$

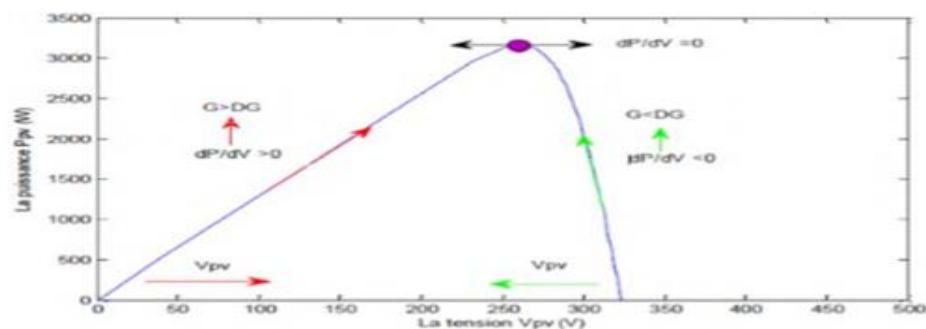


Figure 2.8. Principe de la méthode IC

On va trouver le point d'annulation maximum de la dérivée de puissance dans la Figure 2.8. La conductance G est comparée à la conductance incrémentale G . La puissance de sortie de la

Chapitre 2 Etage d'adaptation et commande MPPT

source peut être écrite comme suit :

$$P = V * I \quad (2,4)$$

L'expression de la dérivée de la puissance P est donnée comme suit:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{VdI}{dV} + \frac{dV}{dV} * I \quad (2,5)$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{VdI}{dV} + I \quad (2,6)$$

$$\frac{dP}{dV} \approx V \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \quad (2,7)$$

Donc :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad \text{(a) au point du MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{Ou} \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad \text{(b) à gauche point du MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad \text{(c) à droite point du MPP}$$

Le lien entre la conductance donnée par l'équation et la dérivée de la puissance dP/dV peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (2,8)$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$: Le point de fonctionnement est situé à gauche du PPM, donc on augmente la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en diminuant le rapport cyclique.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$: Le point de fonctionnement est sur le PPM, donc la tension et le rapport cyclique restent constants.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$ Le point de fonctionnement est situé à droite du PPM, donc on diminue la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en augmentant le rapport cyclique.

Chapitre 2 Etage d'adaptation et commande MPPT

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance G avec celle de l'incrément de conductance $\frac{\Delta I}{\Delta V}$

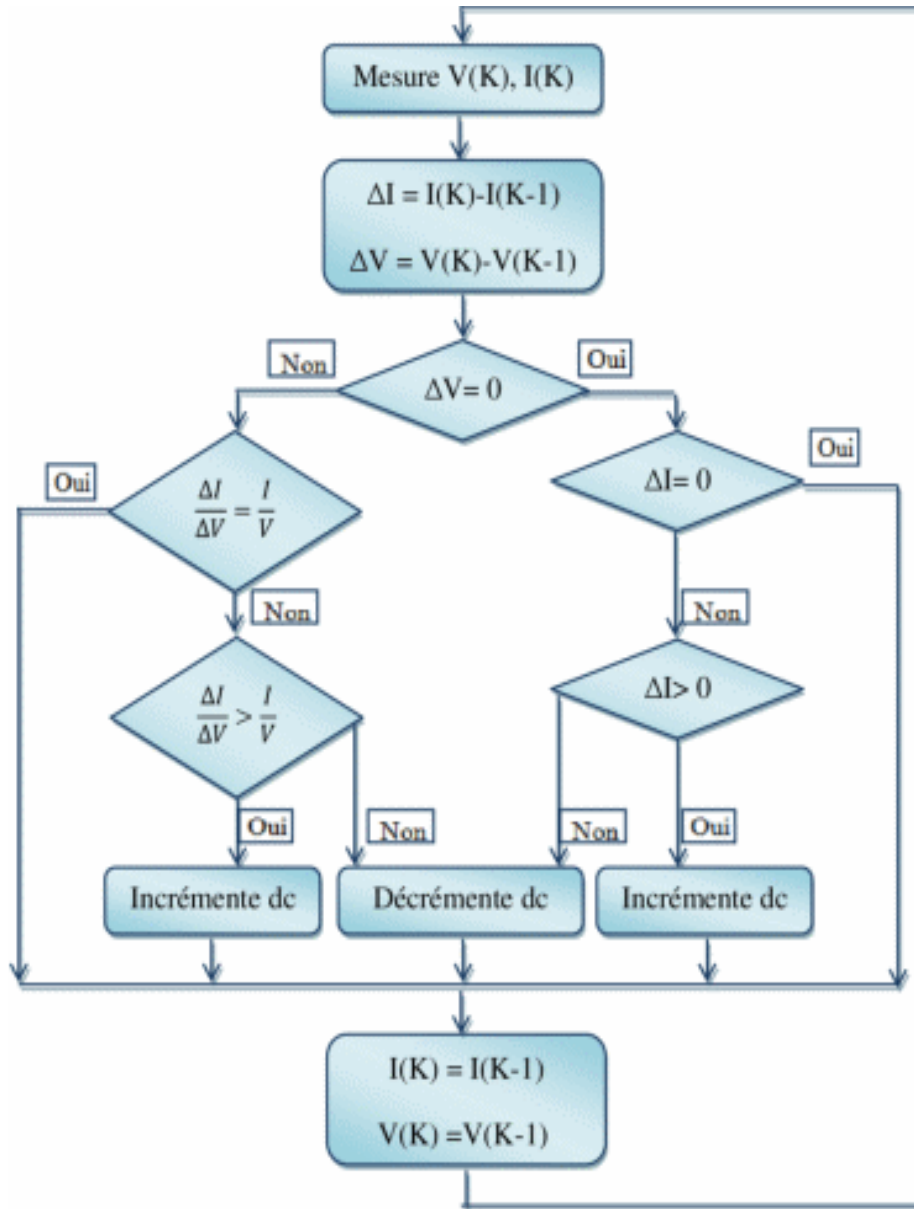


Figure.2.9 : Organigramme de la méthode IC

Cet algorithme est une modification de l'algorithme P&O, Car il permet de calculer la direction de la perturbation du point de fonctionnement vers le point MPP.

D'après l'organigramme de la Figure 2.9, on a réalisé le schéma bloc suivant :

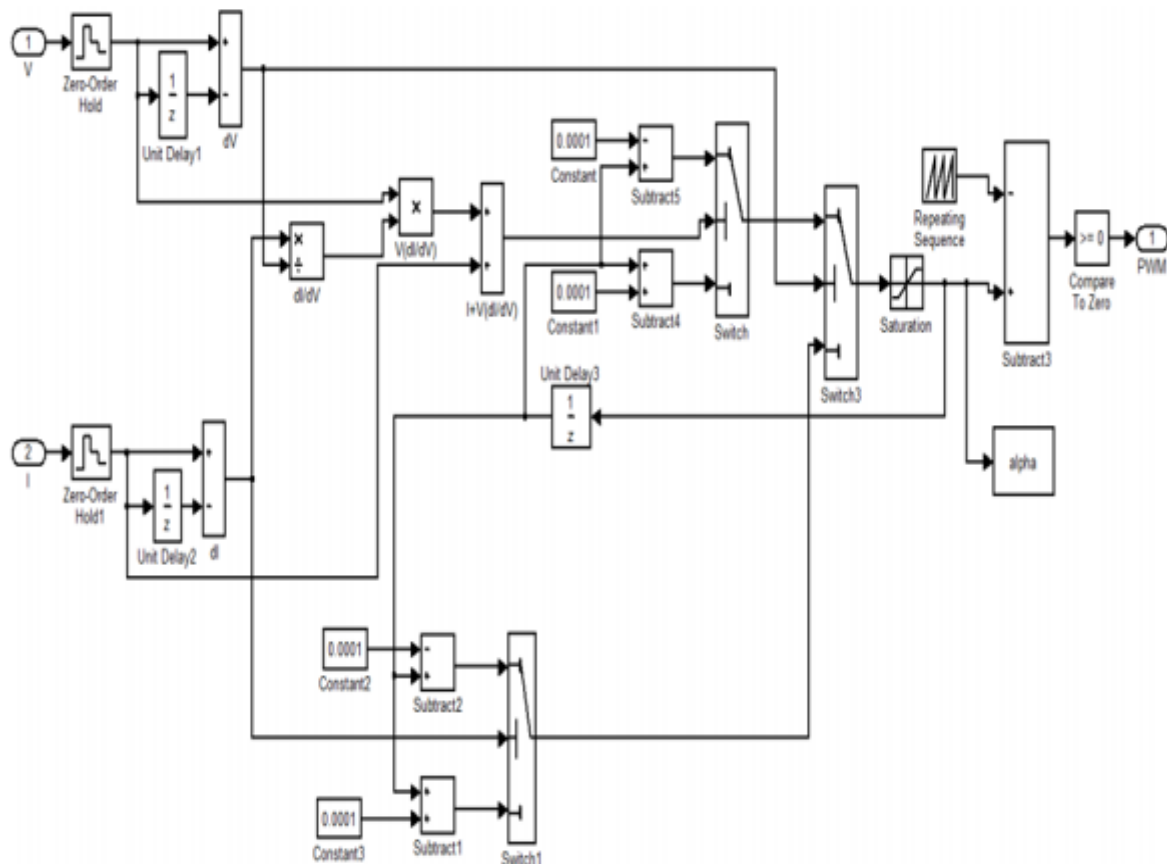


Figure 2.10 : Programme et schéma bloc de la technique IC.

2.9 Avantages et inconvénients

- **Avantages**

En parlant de la méthode P&O, l'un des avantages que l'on peut citer est la structure réglementaire simple et le nombre réduit de paramètres de mesure. Pour la méthode IC, le principal avantage de cet algorithme est qu'il peut fournir une bonne efficacité même sous des changements rapides de conditions atmosphériques. En revanche, l'efficacité MPPT des algorithmes de conductance incrémentielle et de P&O est essentiellement la même.

- **Inconvénients**

Pour la méthode P&O, un dépassement du point maximal optimal se produira dans le cas de changements rapides des conditions atmosphériques. Cependant, l'inconvénient de l'IC est que le circuit de commande est complexe et très coûteux [5].

Chapitre 2 Etage d'adaptation et commande MPPT

2.10 Etage d'adaptation

L'utilisation d'un convertisseur DC-DC permet de contrôler la puissance dans un circuit fonctionnant en DC avec une grande flexibilité et un rendement élevé, ce qui permettra de rechercher le meilleur point de fonctionnement. Le hacheur est composé de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Idéalement, tous ces appareils ne consommeront aucune puissance active, c'est pourquoi nous avons une bonne efficacité. Le commutateur est constitué d'un dispositif semi-conducteur, généralement un transistor MOSFET ou bien un IGBT.

Pendant le fonctionnement de le hacheur, le transistor commutera à une fréquence constante f_s , le temps de fermeture est égal à $(D \cdot T)$, et le temps d'ouverture est égal à $(1-D) \cdot T$

Où

T: étant la période du signal de commande [29]

Et avec un rapport cyclique D défini comme étant le rapport de fermeture du commutateur t_{on} et la somme $T = t_{on} + t_{off}$ des temps de fermeture et d'ouverture de ce commutateur:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2,9)$$

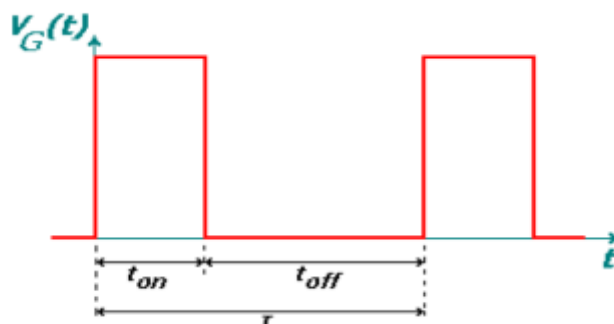


Figure 2.11 : Forme du signal de commande du commutateur S [30].

Il existe différents types de convertisseurs DC-DC :

Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_{out} > V_{in}$.

Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_{out} < V_{in}$.

Les élévateurs-abaisseurs (BUCK-BOOST) qui est un mélange entre les deux précédents.

2.10.1 Hacheur abaisseur (Buck)

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur, Ce type de convertisseur est utilisé pour des applications que l'on peut classer en deux catégories :

Les applications visant à obtenir une tension continue fixe (et parfois réglée) à partir d'un générateur de tension continue supérieure.

Les applications permettant d'obtenir une tension réglable mais toujours inférieure à celle présente à l'entrée [31].

La figure présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur.

Les applications permettant d'obtenir une tension réglable mais toujours inférieure à celle présente à l'entrée [31].

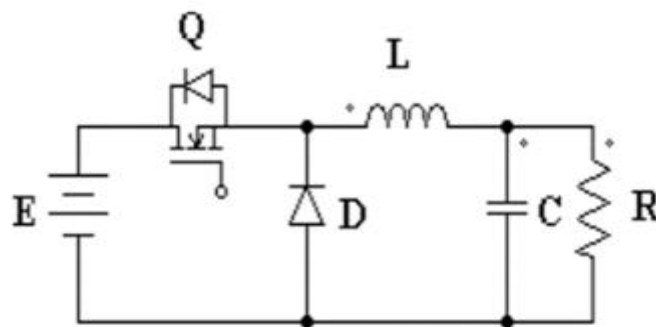
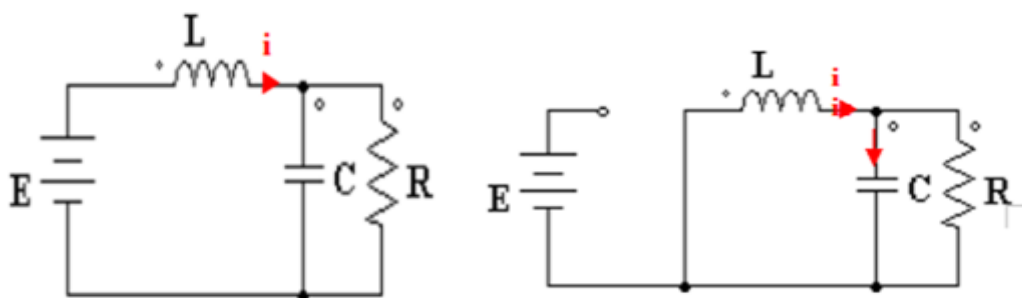


Figure 2.12 : Convertisseur dévolteur réel.



(a) État passante $u=1$.

(b) État bloquée $u=0$.

Figure 2.13 : Circuit topologies du convertisseur dévolteur.

Si on considère que l'interrupteur est fermé ($u=1$) et en appliquant les lois de Kirchhoff au circuit on obtient les équations suivantes :

Pour $u=0$ (l'interrupteur ouvert) :

$$L \frac{di}{dt} = -V \quad (2,10)$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R} \quad (2,11)$$

En comparant les deux situations on peut obtenir un seul modèle unifié qui est :

$$L \frac{di}{dt} = DE - V \quad (2,12)$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R} \quad (2,13)$$

Le modèle moyen du convertisseur Buck est décrit par :

$$L \frac{di}{dt} = D_{Av}E - V \quad (2,14)$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R} \quad (2,15)$$

En utilisant la normalisation :

$$x_1 = \frac{I}{E} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad x_2 = \frac{v}{E}, \quad T = \frac{t}{\sqrt{L^*C}}, \quad Q = R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

On obtient alors le modèle moyen normalisé suivant :

$$\frac{dx_1}{dT} = -x_2 + u_{av} \quad (2,16)$$

$$\frac{dx_2}{dT} = x_1 - \frac{x_2}{Q} \quad (2,17)$$

2.10.2 Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

Un convertisseur Buck-BOOST est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue de plus faible en une plus grande. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de bornes reliées au zéro, compliquant ainsi sa commande.

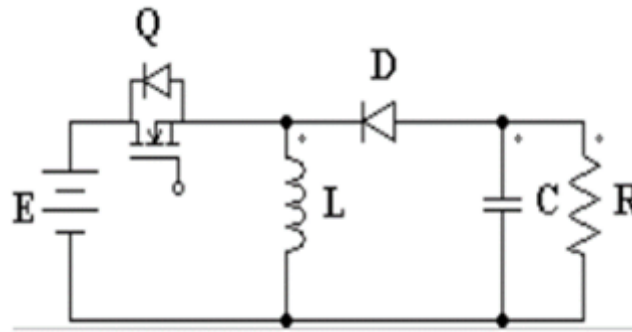
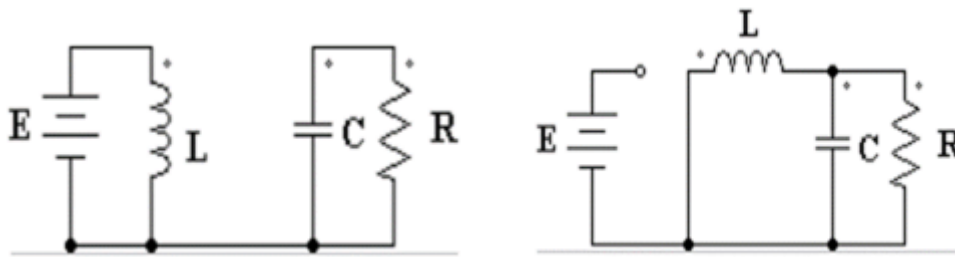


Figure 2.14 : Convertisseur dévolteur-survolteur réel.



(a) État passant $u=1$.

(b) État bloquée $u=0$.

Figure 2.15 : Circuits des topologies du convertisseur Buck-Boost.

Si on considère que l'interrupteur est fermé ($u=1$) et en appliquant les lois de Kirchhoff au circuit on obtient les équations suivantes :

$$L \frac{di}{dt} = E \quad (2,18)$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} \quad (2,19)$$

Lorsque l'interrupteur est ouvert ($u=0$) on obtient la dynamique suivante :

$$L \frac{di}{dt} = V \quad (2,20)$$

$$C \frac{dv}{dt} = -i - \frac{v}{R} \quad (2,21)$$

En comparant les deux dynamiques on obtient le modèle commuté suivant :

$$L \frac{di}{dt} = (1 - D)i + DE \quad (2,22)$$

$$C \frac{dv}{dt} = -(1 - D)i - \frac{v}{R} \quad (2,23)$$

En utilisant la normalisation :

$$x_1 = \frac{I}{E} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad x_2 = \frac{v}{E}, \quad T = \frac{t}{\sqrt{L \cdot C}}, \quad Q = R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Alors le modèle moyen normalisé est :

$$\frac{dx_1}{dT} = (1 - D_{av})x_2 + D_{av} \quad (2,24)$$

$$\frac{dx_2}{dT} = -(1 - D_{av})x_1 - \frac{x_2}{Q} \quad (2,25)$$

2.10.3 Convertisseur Boost

Lorsqu'on souhaite augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur. Ce dispositif de l'électronique de puissance est un convertisseur continu-continu mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs. Le découpage se fait à une fréquence très élevée ce qui a pour conséquence de créer une tension moyenne.

La figure ci-dessous donne la forme la plus simple du hacheur BOOST.

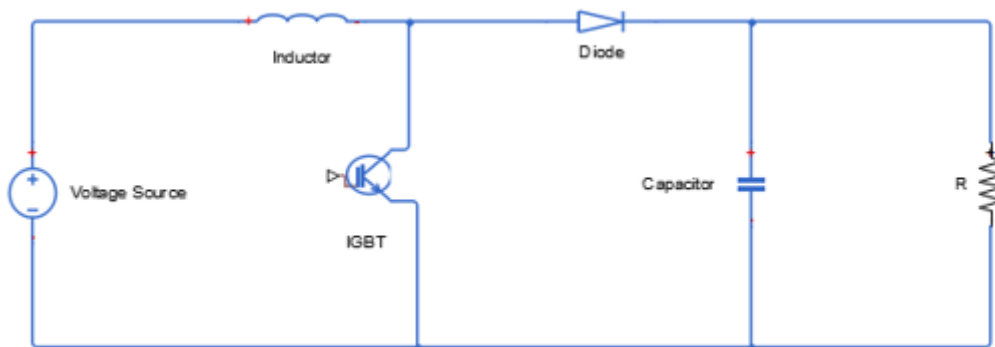


Figure 2.16 : Schéma du hacheur survolteur.

Nous allons diviser en deux phases distinctes le fonctionnement de le hacheur survolteur selon l'état de l'interrupteur sur une période T du signal de commande.

Chapitre 2 Etage d'adaptation et commande MPPT

- **De 0 à DT : phase d'accumulation d'énergie**

L'interrupteur est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique.

La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation. $U=1$, la **figure 2.17** est équivalente au schéma suivant

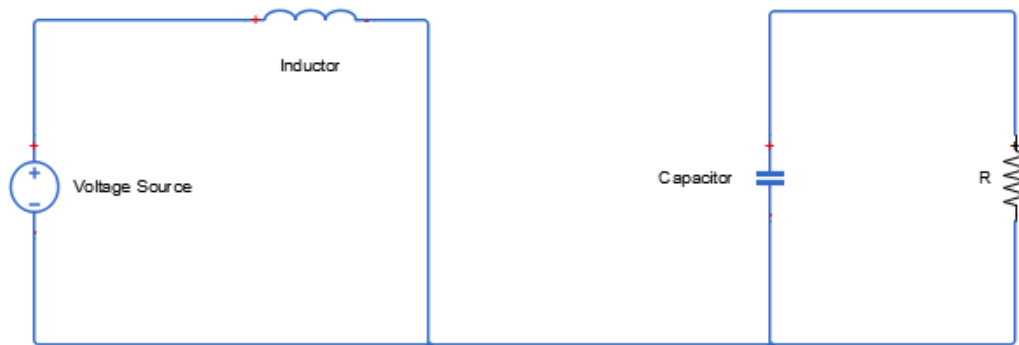


Figure 2.17 : Schéma équivalent à la phase d'accumulation d'énergie

Les deux équations qui régissent le fonctionnement de hacheur sur l'intervalle $[0, DT]$ sont données par le système d'équations :

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_e \quad (2,26)$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = \frac{-V_C}{R} \quad (2,27)$$

- **De DT à T : phase de roue libre.**

L'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur. Sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité, qui va fixer la tension de sortie.

$U=0$, la **Figure 2.18** est équivalente au schéma ci-dessous.



Figure 2.18 : Schéma équivalent à la phase de roue libre.

Dans ce cas, le fonctionnement peut être décrit par le système d'équation suivant :

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_e - V_C \quad (2,28)$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = \frac{-V_C}{R} + I_L \quad (2,29)$$

Ainsi, il est possible de caractériser le fonctionnement du hacheur sur une période $[0 T]$ en combinant les deux systèmes d'équations sous forme condensé :

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_e - (1 - D)V_C \quad (2,30)$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = \frac{-V_C}{R} + (1 - D)I_L \quad (2,31)$$

- **Régime de la conduction :**

Le convertisseur BOOST est caractérisé par trois régimes de fonctionnement distincts [14] :

conduction continue : le courant I_L ne s'annule jamais.

Conduction critique : le courant s'annule ponctuellement

Conduction discontinue : le courant I_L prend une valeur nulle, pendant une durée supérieure à zéro.

Nous étudierons, ici le mode conduction continu pour déduire le rapport entre l'entrée et la sortie en fonction du rapport cyclique

De $(0 \text{ à } DT)$ Le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais.

Chapitre 2 Etage d'adaptation et commande MPPT

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_e}{L} dt = \frac{D \cdot V_e \cdot T}{L} \quad (2,32)$$

$$\Delta I_{Loff} = \int_{DT}^{(1-DT)} dI_L = \frac{\int_{DT}^{(1-DT)} V_e - V_s}{L} dt = \frac{(V_e - V_s)(1-D)T}{L} \quad (2,33)$$

Et l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_L^2 \quad (2,34)$$

Le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation, on aura alors :

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = 0 \quad (2,35)$$

Donc :

$$\frac{D \cdot V_e \cdot T}{L} + \frac{(V_e - V_s)(1-D)T}{L} = 0 \quad (2,36)$$

La résolution de cette équation donne :

$$V_s = \frac{V_e}{1-D} \quad (2,37)$$

La figure suivante illustre le modèle schématique sous Matlab/Simulink de l'étage d'adaptation Boost.

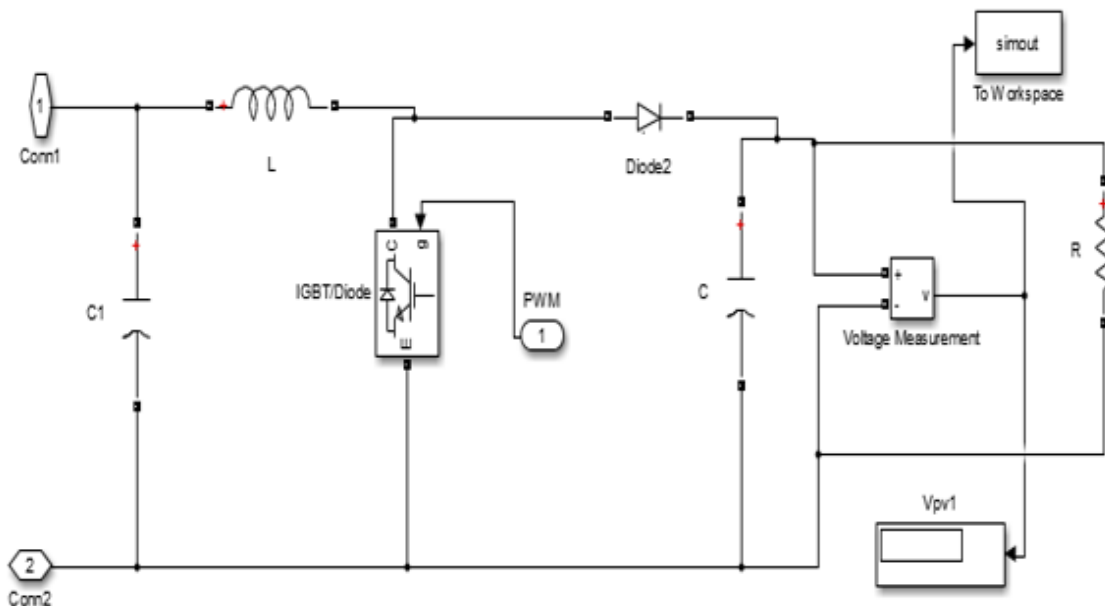


Figure 2.19 : l'étage d'adaptation Boost

2.11 Principe de la commande PWM-MLI

Le principe de base de la commande PWM est fondé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie est formée par une succession de créneau d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation et de largeur variable. La technique la plus répandue pour l'obtention d'un signal PWM est de comparer deux signaux :

Le premier, appelé signal de référence, est un signal continu qui varie entre deux seuils définis en fonction de l'application.

Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs [32].

2.12 Modélisation de la commande MLI

L'électronique de régulation et commande détermine, à partir des consignes imposées de l'extérieur et des mesures prélevées sur le générateur et la charge, la séquence de conduction et de blocage de l'interrupteur et élabore les signaux logiques nécessaires à sa commande en fonction du type de convertisseur utilisé. Dans le cas de la commande MLI [33], on fait varier l'état de l'interrupteur à une cadence qui ne dépend pas de la manière dont évoluent les grandeurs relatives aux systèmes interconnectés par le convertisseur électronique de puissance, cette cadence étant fixée essentiellement en fonction de la vitesse de commutation de l'interrupteur. Comme toute commutation revient à modifier le potentiel d'une borne d'accès du système à caractère de source de courant en la connectant d'une borne à une autre du système à caractère de source de tension, la commande par modulation en largeur d'impulsions ou commande MLI consiste à choisir une fréquence de commutation pour l'interrupteur et à fixer à l'intérieur de la période de commutation, les intervalles de conduction des interrupteurs connectés à une borne de la « source de courant » en d'un signal de référence qui correspond au potentiel souhaité pour cette borne. Sous forme numérique ce type de commande est réalisé en fixant à l'aide de « timers » les intervalles de conduction des différents interrupteurs sur chaque période où chaque demi-période de modulation, comme le montre la figure suivante.

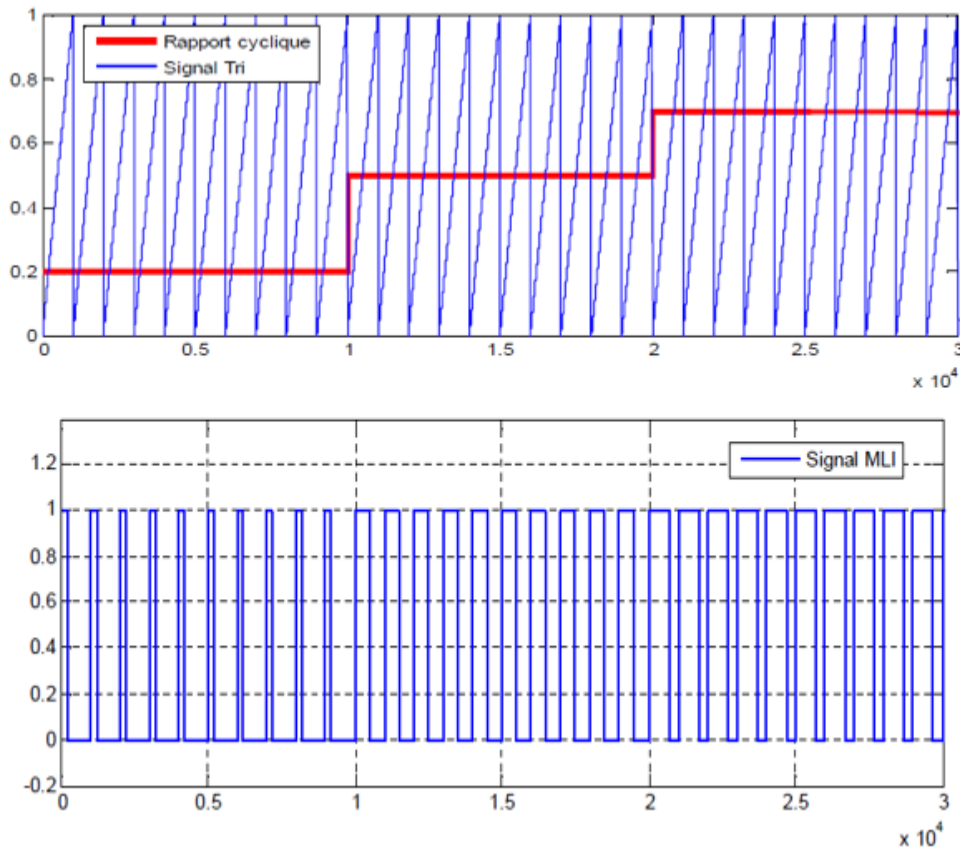


Figure 2.20 : Obtention d'un signal MLI (PWM)

Le comparateur permet de générer à sa sortie une tension rectangulaire modulée en largeur (rapport cyclique variable : signal MLI). Ceci est le résultat de la comparaison entre le signal à la sortie de l'intégrateur (V_{ref}) et celui généré par un générateur triangulaire, ou en dent de scie, de fréquence fixée par le fonctionnement du convertisseur.

Lorsque la tension V_{ref} augmente (diminue), le rapport cyclique α augmente (diminue). Les variations de la tension V_{ref} induisent, pour un éclairage et une température donnée, le déplacement du point de fonctionnement sur la caractéristique puissance – tension.

Un driver est inséré entre la sortie du comparateur et le convertisseur DC-DC, et son rôle est de transmettre, sans déformation, le signal modulé en largeur à l'interrupteur (transistor Mosfet) commandant le convertisseur d'énergie.

Ceci nous permet de modéliser la commande MLI sous Matlab/Simulink, de la manière suivante :

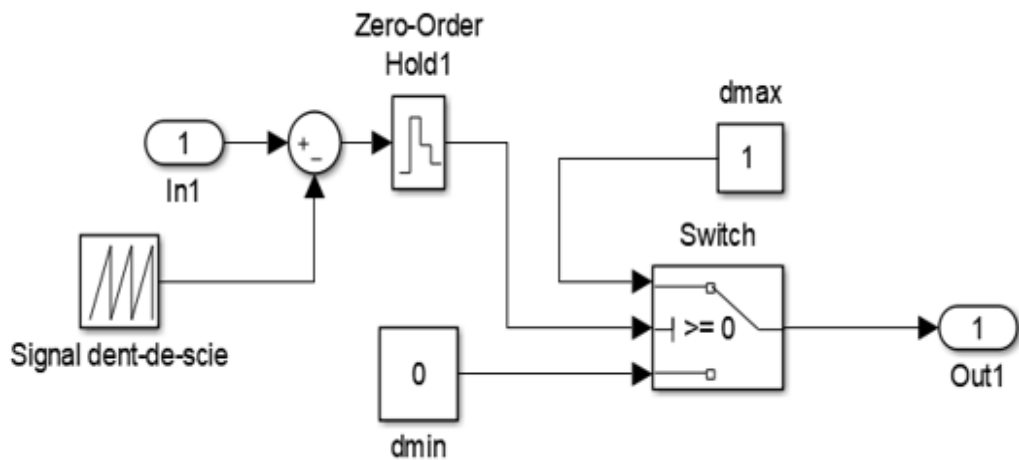


Figure 2.21 : structure d'un générateur PWM sous Matlab/Simulink

2.13 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différents types d'algorithmes MPPT qui permettent le transfert d'un maximum de puissance du générateur photovoltaïque à la charge. Et on a présenté les méthodes classiques de la commande MPPT. Ainsi que les divers convertisseurs DC/DC, avec le fonctionnement détaillé du hacheur Boost.

3.1 Introduction

Une des caractéristiques du raisonnement humain est qu'il est généralement fondé sur des données imprécises ou même incomplètes. En effet, les connaissances dont nous disposons sur un système quelconque sont généralement incertaines ou vagues, soit parce que nous avons un doute sur leur validité ou alors nous éprouvons une difficulté à l'exprimer clairement. De ce fait on a eu besoin d'un nouveau type de raisonnement qui se rapproche plus de celui-ci et qu'on peut traiter de façon mathématique rigoureuse.

Le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Berkeley (Californie) fut le premier à avoir effectué des travaux sur la logique floue en 1965, il a ainsi introduit une théorie qui présente une extension de la logique classique (booléenne), et la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de flexibilité du raisonnement humain. Quelques années plu-tard cette théorie fut appliquée à des problèmes de réglage et de commande.

3.2 Théorie des ensembles flous

La théorie des ensembles flous est un pas vers un rapprochement entre la précision des mathématiques classiques et le mode réel, c'est le premier rapprochement du concept d'incertitude développé par des chercheurs américains, mais ce n'est qu'en 1965 que le professeur L. Zadeh, automaticien de réputation internationale a proposé les bases théoriques de cette logique dans un article intitulé « fuzzy set » [34].

3.3 Ensemble floue

La théorie des sous-ensembles flous est une théorie mathématique développée pour l'imprécision relative à certaines classes d'objets et sert de fondement à la logique floue.

On note « X » un ensemble de référence ou univers de recherche et « x » un ensemble de « X ». On dit qu'une partie A de l'ensemble de référence X est un ensemble flou lorsqu'elle est définie de la manière suivante alors :

$$A = \{ (x, u(x)) \mid x \in X \} \quad (3,1)$$

Ou, $u_A: X \rightarrow [0,1]$, est la fonction d'appartenance d'un ensemble flou « A ».

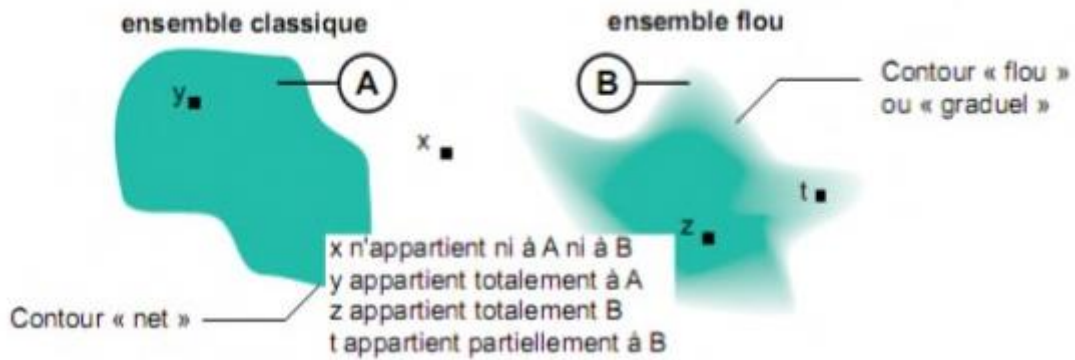


Figure 3.1 : Différence entre ensemble classique et ensemble Flou.

3.4 Fonction d'appartenance

Au lieu d'appartenir à l'ensemble « vrai » ou à l'ensemble « faux » de la logique binaire traditionnelle, la logique floue admet des degrés d'appartenance à un ensemble donné. Le degré d'appartenance à un ensemble flou est matérialisé par un nombre compris entre 0 et 1. Une valeur précise de la fonction d'appartenance liée à une valeur de la variable est notée μ et appelée « facteur d'appartenance » [35].

Les fonctions d'appartenances les plus utilisées sont :

- La fonction triangulaire.
- La fonction trapézoïdale.
- La fonction en cloche
- La fonction gaussienne.

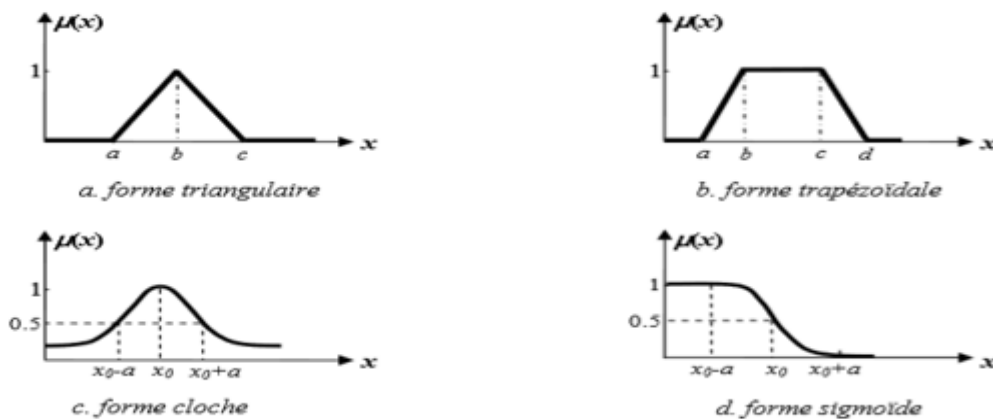


Figure3.2 : Formes usuelles des fonctions d'appartenance.

3.5 Opérateur de la logique floue

Dans la théorie des ensembles Classique, l'ensemble flou est traduit par les opérateurs d'union, d'intersection aussi de négation, et des opérations habituelles telles qu'addition, soustraction et multiplication.

- **Opérateur NON**

$$c = \bar{a} = NON(a) \quad (3,2)$$

$$u_c = 1 - u_a(x) \quad (3,3)$$

- **Opérateur ET**

C'est l'intersection de deux ensembles « $a \cap b$ », mais dans la logique floue l'opérateur « ET » est représenté par une fonction de minimum appliquée aux fonctions d'appartenances.

$$u_c(x) = \min\{u_a(x), u_b(x)\} \quad (3,4)$$

Où :

u_a, u_b, u_c Signifient respectivement les degrés d'appartenances aux ensembles a, b et On parle alors d'opérateur minimum.

- **Opérateur OU**

C'est l'union de deux ensembles « $a \cup b$ » mais dans la logique floue l'opérateur « OU » est représenté par une fonction de maximum appliquée aux fonctions d'appartenances.

$$\mu_c(x) = \max\{\mu_a(x), \mu_b(x)\} \quad (3,5)$$

On constate que la logique classique est un cas particulier de la logique floue.

Autrement dit la logique floue est une extension de la logique classique.

3.6 Raisonnement en logique floue

La base utilisée sous forme règle flou, appelée règle d'inférence exprimée par la

Connaissance humaine sous forme :

$$SI(\text{Prémisse}) \text{ ALORS}(\text{Conclusion})$$

Pour plusieurs conditions nommées prémisse, la combinaison entre elle se fait avec des opérateurs ET, OU, NON

3.7 Principe de la logique floue

La logique floue est une technique opérationnelle dans le contrôle avancé qui fait une entrée discrète, mais appréciée par les automaticiens, dans de contrôle industriel. Notamment la commande par logique floue a été utilisée dans des systèmes de poursuite de puissance maximale. Et comme bonus, elle présente l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer même si elle nécessite l'expertise humaine et une bonne connaissance modèle à réguler [36].

Le principe de la commande a pour le but d'obtenir une loi de commande efficace à partir d'une description linguistique qualitative du système. Étudier un tel problème par des méthodes classiques exige souvent des notions avancées en mathématique, cette étude est souvent entachée des erreurs et des imprécisions qui accompagnent la modélisation. La commande floue exploite des connaissances et des expériences acquises par l'opérateur à l'aide des réglés basées sur un vocabulaire symbolique.

Donc l'idée de la logique floue et de transmettre cette richesse de raisonnement humain à un ordinateur. Cette logique peut être considérée comme une technique puissante pour le traitement de connaissances incertaines, prenant comme exemple des mots ou des expressions naturelles telle que froid, tiède, chaud...etc.

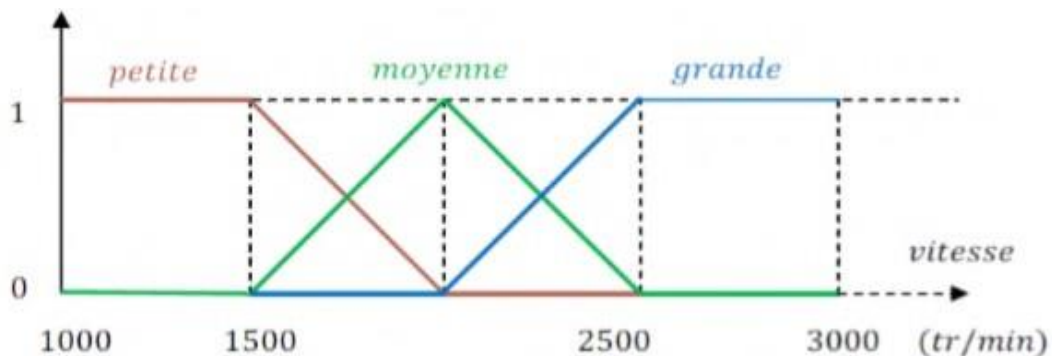


Figure 3.3 : Variables linguistiques, termes linguistiques et univers de discours.

3.8 Utilisation de la logique floue pour le contrôle

La logique floue est bien connue des ingénieurs en automatisation en raison de son application dans le contrôle de processus, et est généralement appelée "contrôle flou". Tout comme un contrôleur (ou correcteur) traditionnel, le contrôleur flou s'insère dans la boucle de

régulation et calcule la commande à appliquer au process en fonction d'une ou plusieurs consignes et d'une ou plusieurs mesures effectuées dessus.

3.8.1 Contrôleur flou

La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, le moteur d'inférence et la défuzzification **Figure 3.4 [35]**.

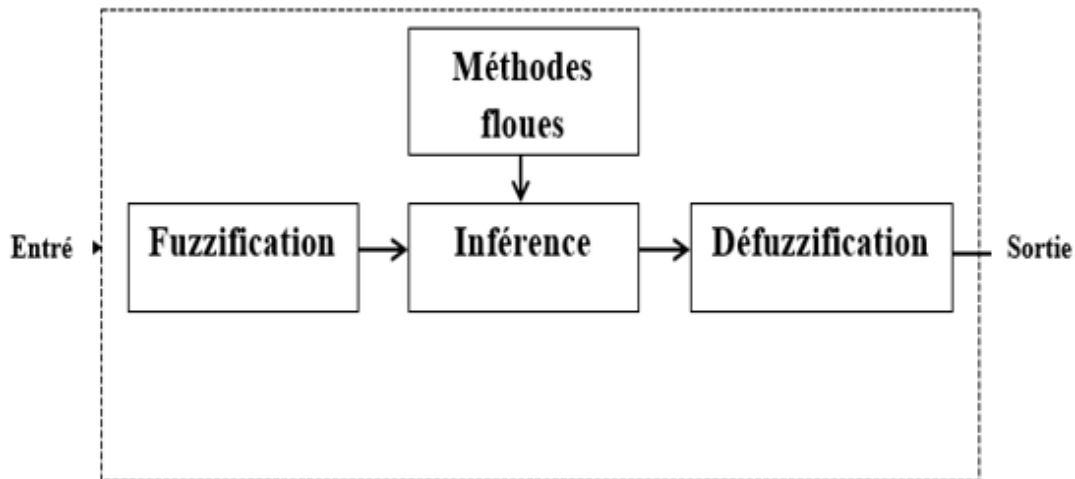


Figure 3.4 : Principe du Contrôleur flou

a) La fuzzification

Est l'opération qui transforme toute grandeur numérique en une partie floue (variables linguistiques). Dans notre cas, on a deux variables d'entrées qui sont la variation de la puissance $\Delta(P)$ et la variation de la tension $\Delta(V)$ à l'instant k qui sont définis comme suit:

$$\Delta P(k) = P(k + 1) - P(k) \quad (3,6)$$

$$\Delta V(k) = V(k + 1) - V(k) \quad (3,7)$$

Comme le montre la figure 3.5, cinq sous-ensembles flous qui sont : PG (Positif Big), PS (Positif Small), ZE (Égale Zéro), NP (Négatif Small) et NG (Négatif Big), ont été choisis pour les variables d'entrée variation de puissance ΔP et variation de tension ΔV .

Les formes triangulaires et trapézoïdales ont été adoptées pour les fonctions d'appartenances.

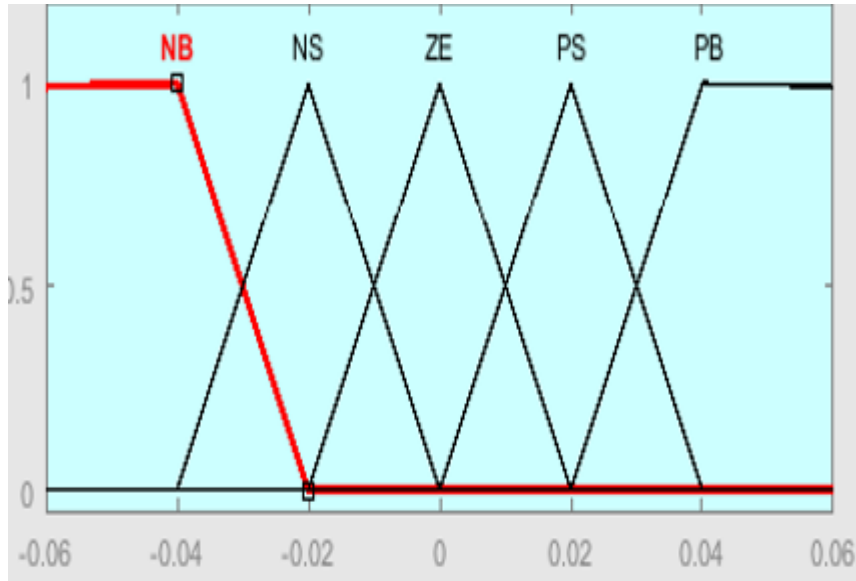


Figure 3.5 : Degré d'appartenances des variables

La Figure 3.6 montre interface d'accueil du fichier FIS (Fuzzy Inférence System) dans lequel on peut ajouter ou supprimer les entrées et les sorties. Dans ce cas, le fichier présente deux variables d'entrées qui sont la variation de la puissance ΔP et la variation de la tension ΔV à l'instant k qui sont définis par les équations (3,6) et (3,7), et une seule sortie DELTAD, qui représente la variation du rapport cyclique, le schéma de notre régulateur est donné par la figure 3.6

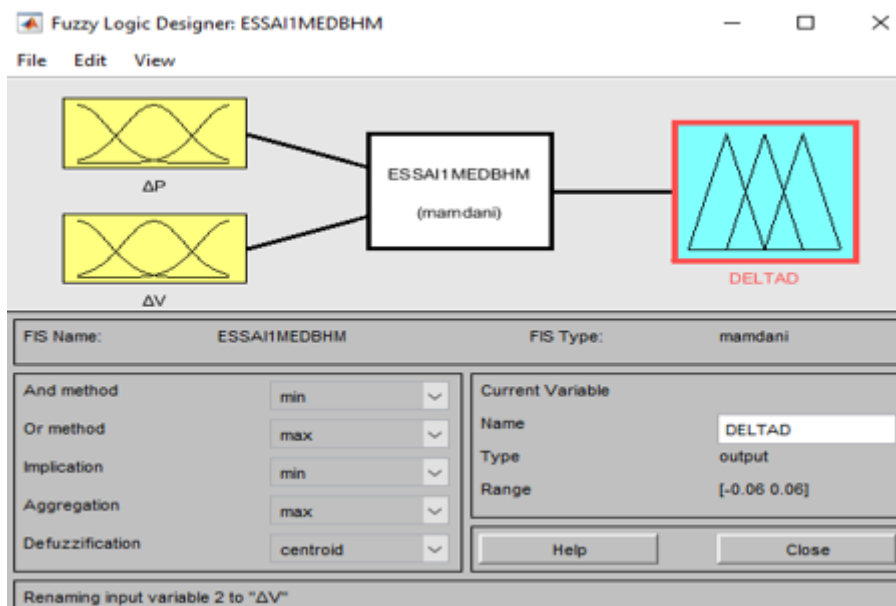


Figure 3.6 : Éditeur de fichiers FIS

Les figures 3.7, 3.8 et 3.9 montrent les fonctions d'appartenance des différentes variables.

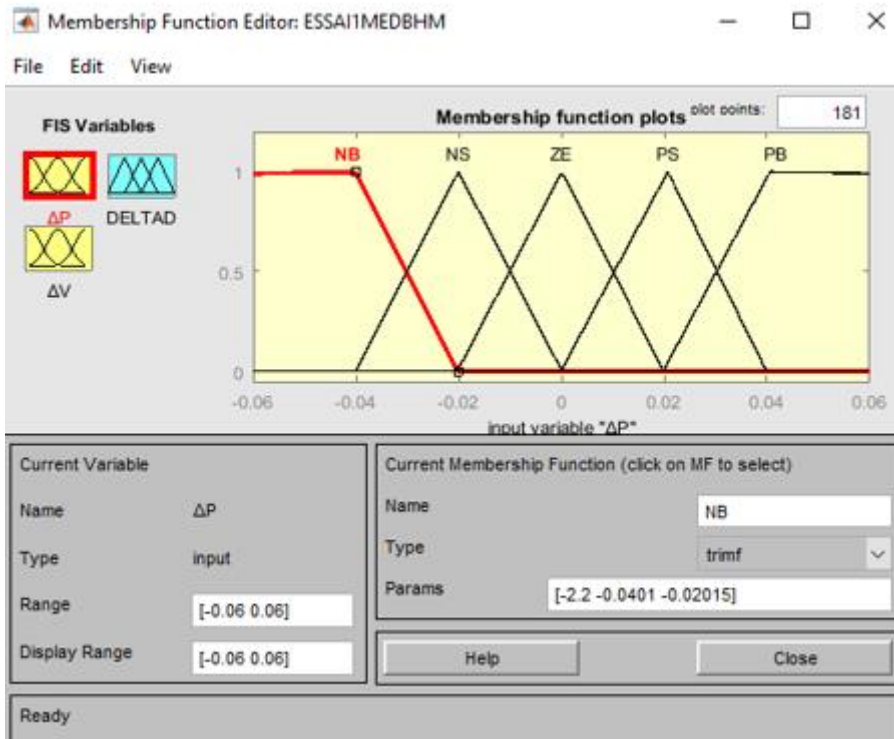


Figure 3.7 : la fonction d'appartenance de ΔP après mise en œuvre

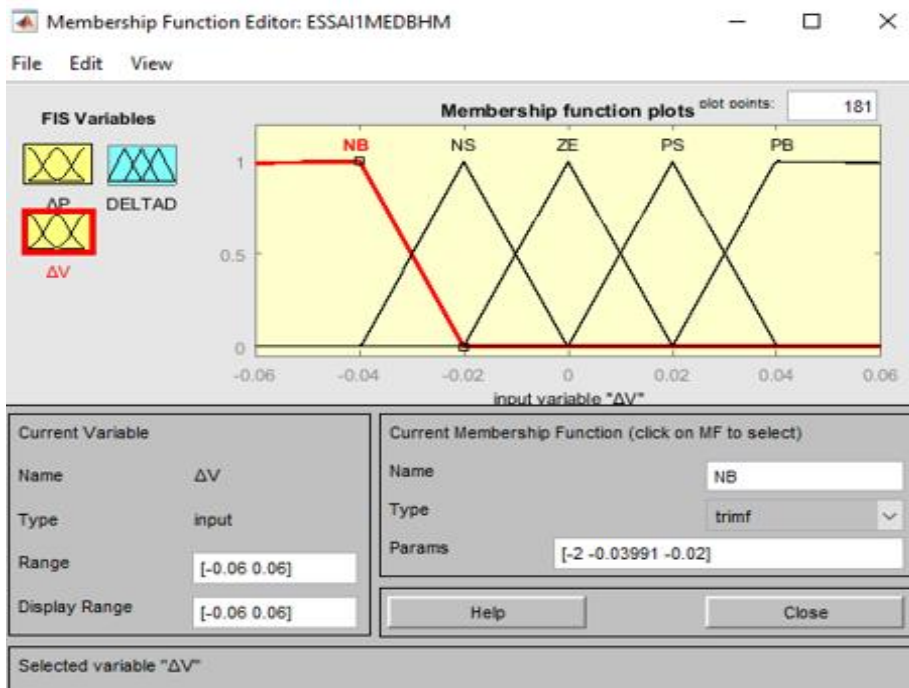


Figure 3.8 : la fonction d'appartenance de ΔV après mise en œuvre*

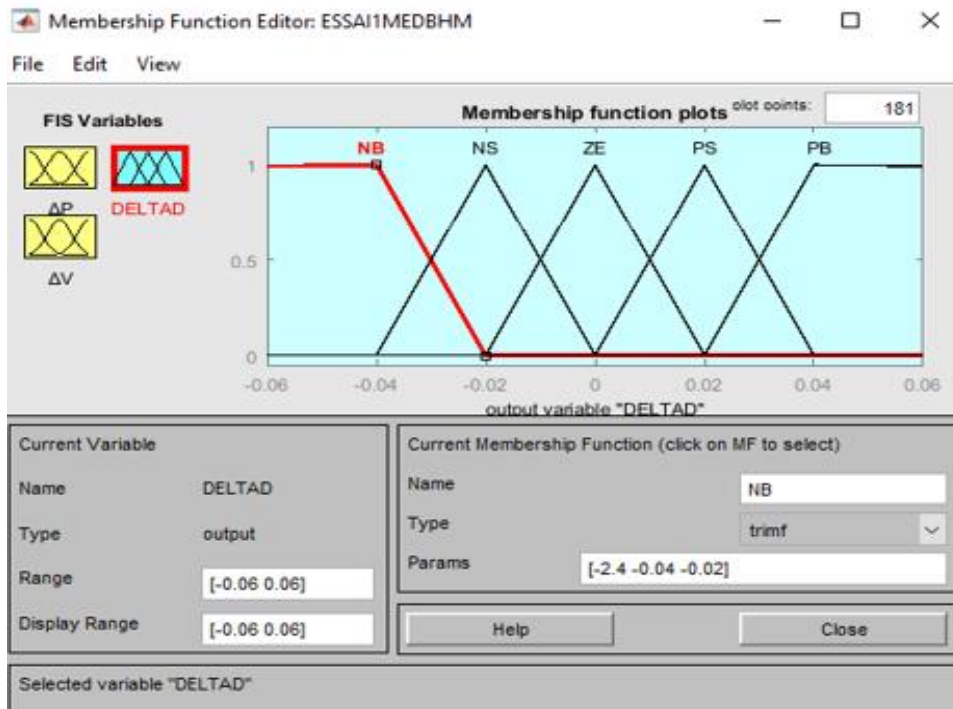


Figure 3.9 : la fonction d'appartenance de « DELTAD » après mise en œuvre

b) L'inférence

Est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. En effet, des règles d'appartenance vont être définies pour la sortie comme c'était fait pour les entrées, grâce à ces règles un tableau d'inférence peut être dressé (Tableau.3.1) [34,35].

Ces règles sont obtenues à partir de l'analyse du comportement du système.

$\Delta P / \Delta V$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Tableau.3.1. Tableau d'inférence à cinq classes

La base de règles de notre contrôleur flou à la forme suivante :

Si (« ΔP Condition 1 » Et Si « ΔV Condition 2 ») ALORS « Conclusion 1 » OÙ

Si (« ΔP Condition 1 » Et Si « ΔV Condition 3 ») ALORS « Conclusion 2 » OÙ

On a choisi la méthode Mamdani comme une méthode d'inférence floue avec (opération Min/Max). Elle consiste à utiliser l'opérateur Min pour le ET, l'opérateur Max pour le OU.

Enfin, il nous faut réaliser l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue c'est le but de la défuzzification.

La méthode choisie, dans notre travail, est celle du centre de gravité pour le calcul de la sortie « DELTAD », le rapport cyclique du convertisseur DC-DC

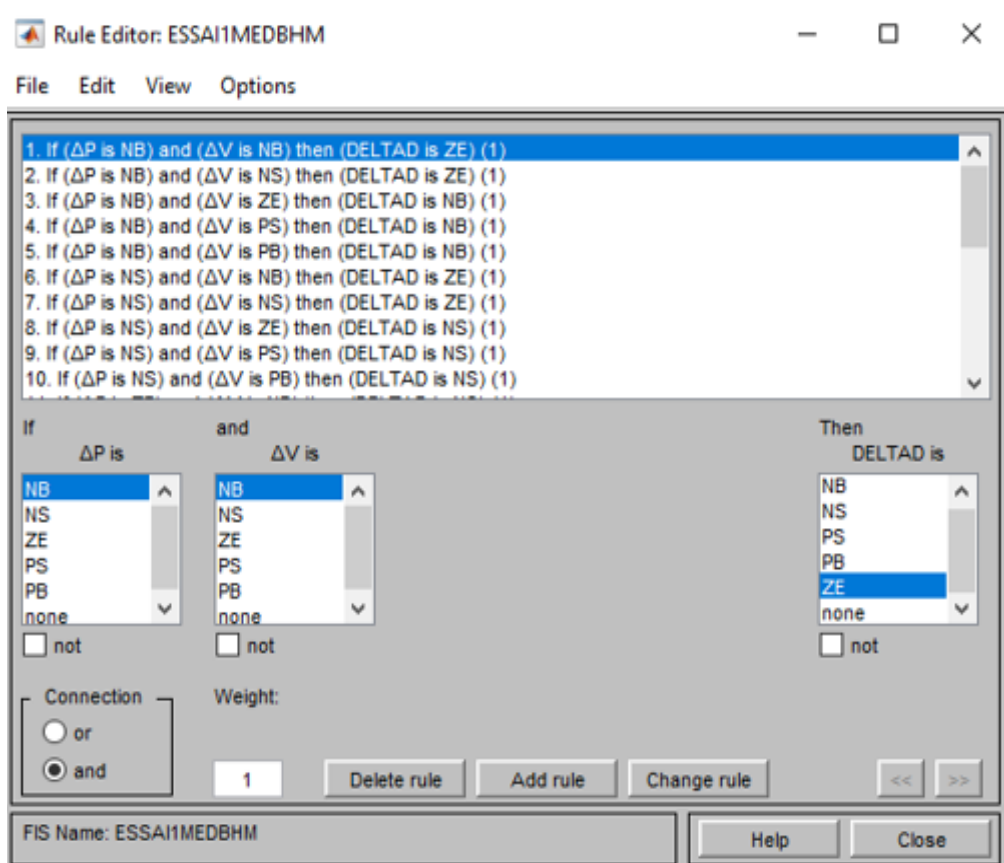


Figure3.10 : Interface de composition de la table de règles

Le **Tableau.3.1**. Illustre le principe de la MPPT avec la logique floue ce qui peut aider à remplir la matrice d'inférence, en effet :

• SI $E = N$ (négatif), le point se situe à droite ; ET $\Delta E = D$ (décroît), on se déplace vers la droite ;
ALORS $\Delta V = -$, il faut changer de direction et se déplacer vers la gauche (diminuer V).

• SI $E = Z$ (zéro), on est au PPM ; ET $\Delta e = D$ (décroît), on se déplace vers la droite ;
ALORS $\Delta V = -$, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la gauche (diminuer V).

• SI $E = P$ (positif), le point se situe à gauche ; ET $\Delta E = D$ (décroît), on se déplace vers la droite ;
ALORS $\Delta V = \mathbf{00}$, il faut rester dans cette direction (continuer à augmenter V).

• SI $E = N$ (négatif), le point se situe à droite ; ET $\Delta E = S$ (Stable), pas de déplacement ;
ALORS $\Delta V = -$, il faut se déplacer vers la gauche (diminuer V).

• SI $E = Z$ (zéro), on est au PPM ; ET $\Delta E = S$ (Stable), pas de déplacement ;
ALORS $\Delta V = \mathbf{00}$, pas besoin de se déplacer.

• SI $E = P$ (positif), le point se situe à gauche ; ET $\Delta E = S$ (Stable), pas de déplacement ;
ALORS $\Delta V = +$, il faut augmenter V .

• SI $E = N$ (négatif), le point se situe à droite ; ET $\Delta E = C$ (Croît), on se déplace vers la gauche ;
ALORS $\Delta V = \mathbf{00}$, il faut rester dans cette direction (continuer à diminuer V).

• SI $E = Z$ (zéro), on est au PPM ; ET $\Delta E = C$ (Croît), on se déplace vers la gauche ; ALORS $\Delta V = +$,
il faut revenir au PPM et se déplacer vers la droite (augmenter V).

• SI $E = P$ (positif), le point se situe à gauche ; ET $\Delta E = C$ (Croît), on se déplace vers la gauche ;
ALORS $\Delta V = +$, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la droite (augmenter V).

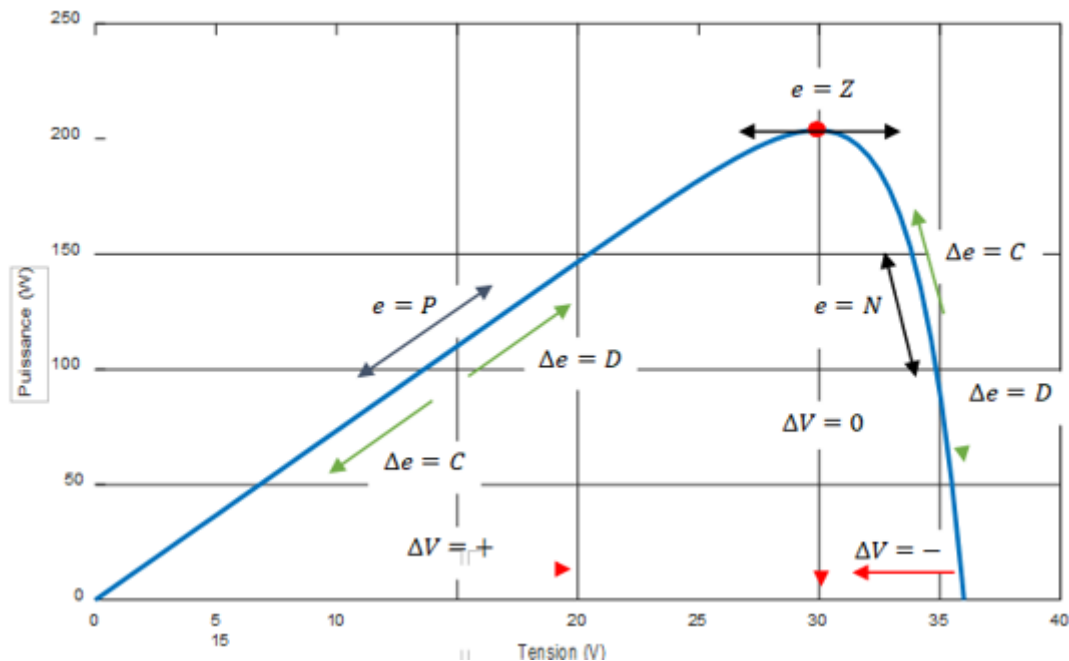


Figure 3.11 : Principe de la MPPT floue

La prochaine étape consiste à déterminer les règles qui sont activées (dans la matrice d'inférences) et à donner leurs degrés d'appartenance. En effet, en règle générale, une valeur d'entrée est définie par deux fonctions floues avec des degrés différents, ainsi la sortie sera elle aussi définie par plusieurs fonctions, la question étant de savoir avec quels degrés d'appartenance. Plusieurs méthodes peuvent répondre à cette question. La méthode de Mamdani [36] est la méthode d'inférence floue la plus utilisée avec la loi de combinaison d'opération floue MIN- MAX.

c) La défuzzification

Enfin, il nous faut réaliser l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur (notre cas ΔV) à partir d'une définition floue, c'est l'objectif de la défuzzification

La méthode de défuzzification la plus utilisée est l'opérateur "centre de gravité", il est donné par l'équation suivante :

$$\Delta V = \frac{\int \mu(\Delta V) \cdot \Delta V}{\int \mu(\Delta V)} \tag{3,8}$$

Pour connaître l'ensemble des solutions de ΔV il suffit de faire varier e et Δe sur l'univers de discours, nous obtenons une fonction à trois dimensions.

Le logigramme suivant (Figure 3.12) donne un aperçu sur le fonctionnement la technique MPPT basée sur le contrôleur flou.

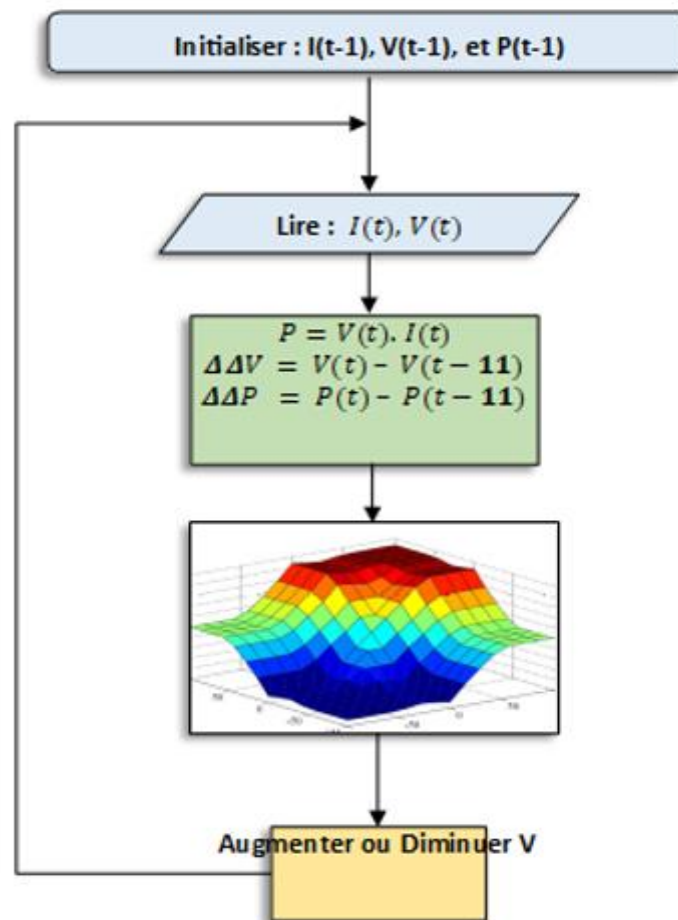


Figure 3.12 : Organigramme simplifié de flou contrôleur

3.9 Conclusion

La logique floue s’est imposée dans divers domaine notamment celui de l’électronique, du contrôle et de l’automatisation, en effet elle permet la modélisation et le traitement rigoureux d’informations imprécises, incertaines et subjectives, et donc une théorie tout à fait adaptée au problème de l’optimisation que nous sommes en train de traiter ici. Dans ce chapitre nous nous somme intéressé aux concepts de la commande en logique flou afin de comprendre et concevoir un contrôleur MPPT flou.

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la commande (MPPT) de poursuite du point de puissance maximale par la logique floue. Nous avons commencé par présenter la caractéristique courant tension (I-V) et puissance tension (P-V) du GPV.

Ensuite, on va illustrer l'algorithme logique floue suivi d'une simulation de la commande logique floue pour trois cas différents :

- La température et l'éclairement sont fixes ;
- Cas d'une température constante (25° C) et l'éclairement variable ;
- Cas de la température variable et l'éclairement fixe 1000 w/m2.

4.2 Simulation des caractéristiques de GPV

- **Modèle d'un photovoltaïque sous Simulink**

La Figure (4.1) représenté le schéma bloc du générateur photovoltaïque (GPV) comportant tous les paramètres. Deux variables d'entrées qui sont : l'éclairement (W/m2), la température T (C°) et deux variables de sortie : courant fourni par le GPV I (A) et tension aux bornes du GPV V_s (V).

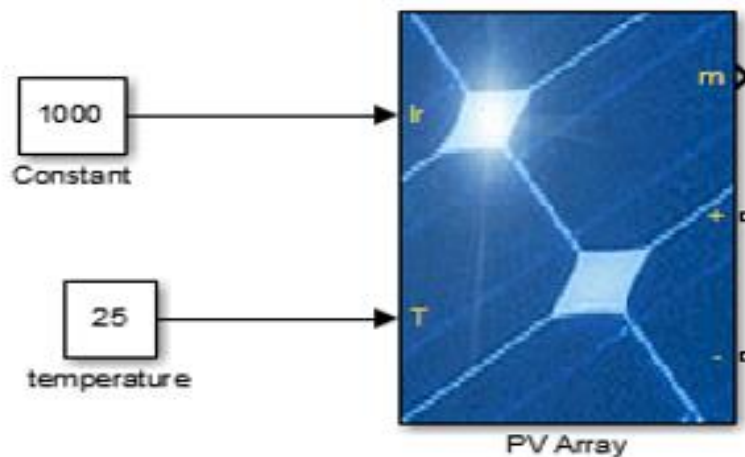


Figure 4.1 : schéma bloc du générateur photovoltaïque (GPV)

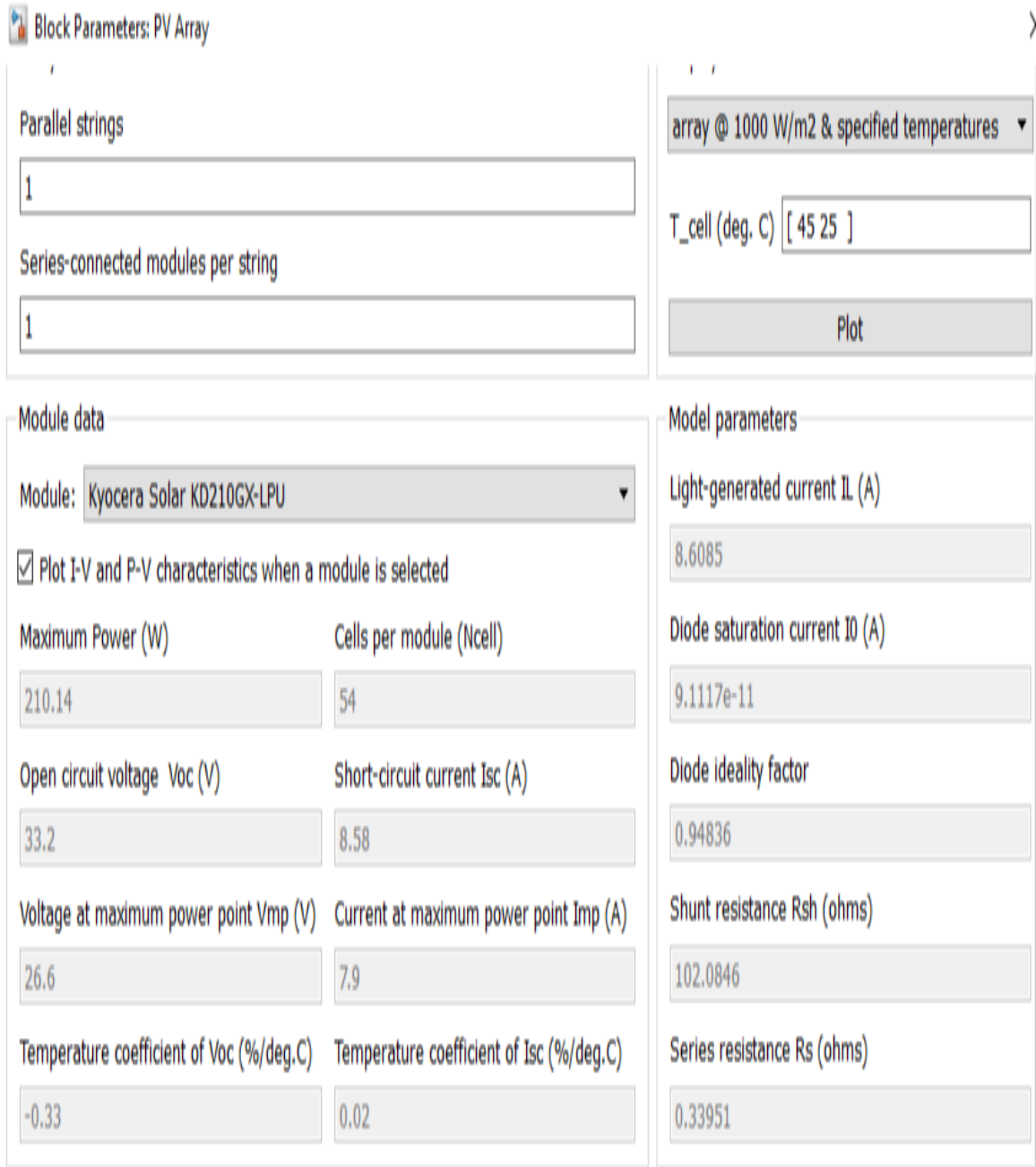


Figure 4.2 : Caractéristique de PV Kyocera Solar KD210GX-LPU

La figure (4.3) représente respectivement les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ de GPV :

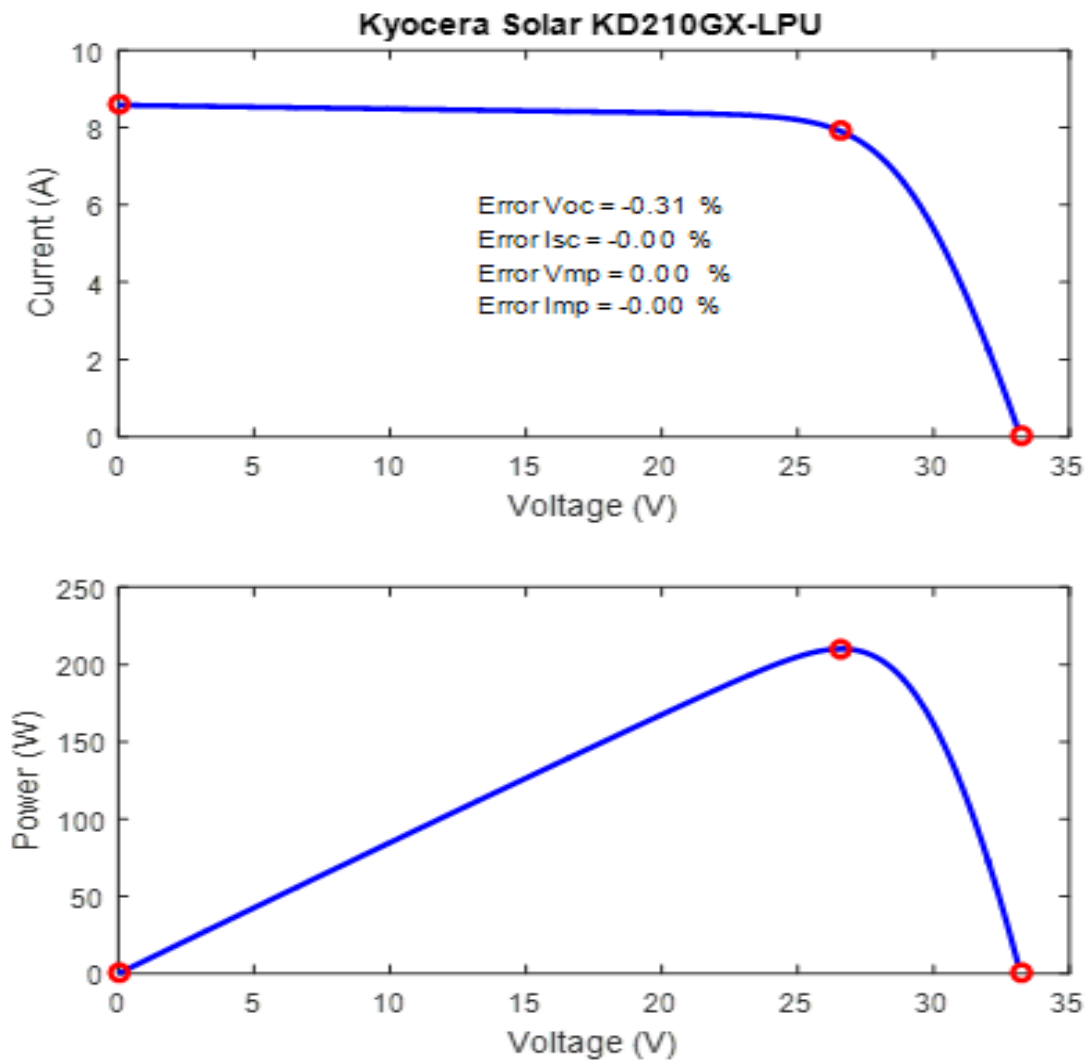


Figure 4.3 : Les courbes de GPV

4.3 Principe de poursuite du point de puissance maximale par la logique floue

Tout comme nous l'avons dit (dans le chapitre 3) le contrôleur floue se compose par les trois blocs suivants :

- La Fuzzification : déclaration les variables d'entrée.
- L'inférence : consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. Elles lient les grandeurs mesurées, qui sont les variables d'entrées à la variable de sortie.
- La défuzzification : pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs numériques.

La structure de base de la commande floue est donnée par la Figure suivante :

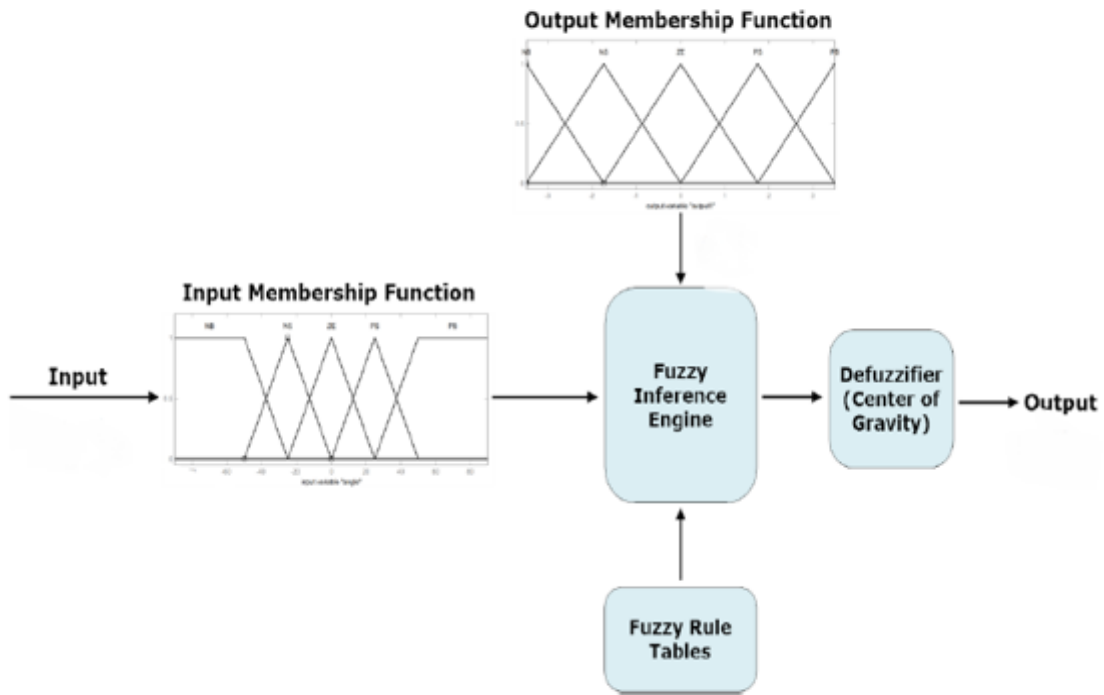


Figure 4.4 : Structure de la commande MPPT floue.

4.4 Simulation de la méthode MPPT logique floue

La figure (4.5) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT floue

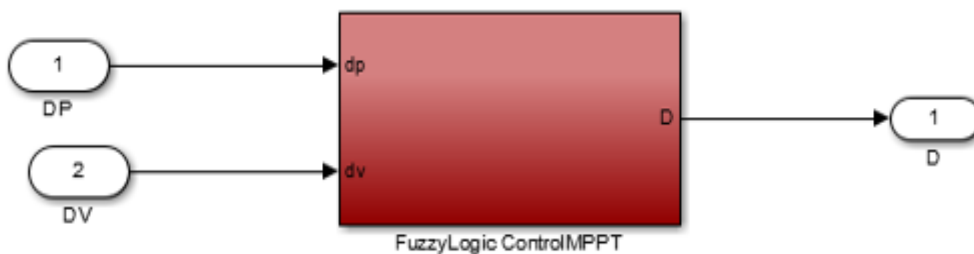


Figure 4.5 : Schéma block de la commande MPPT logique floue.

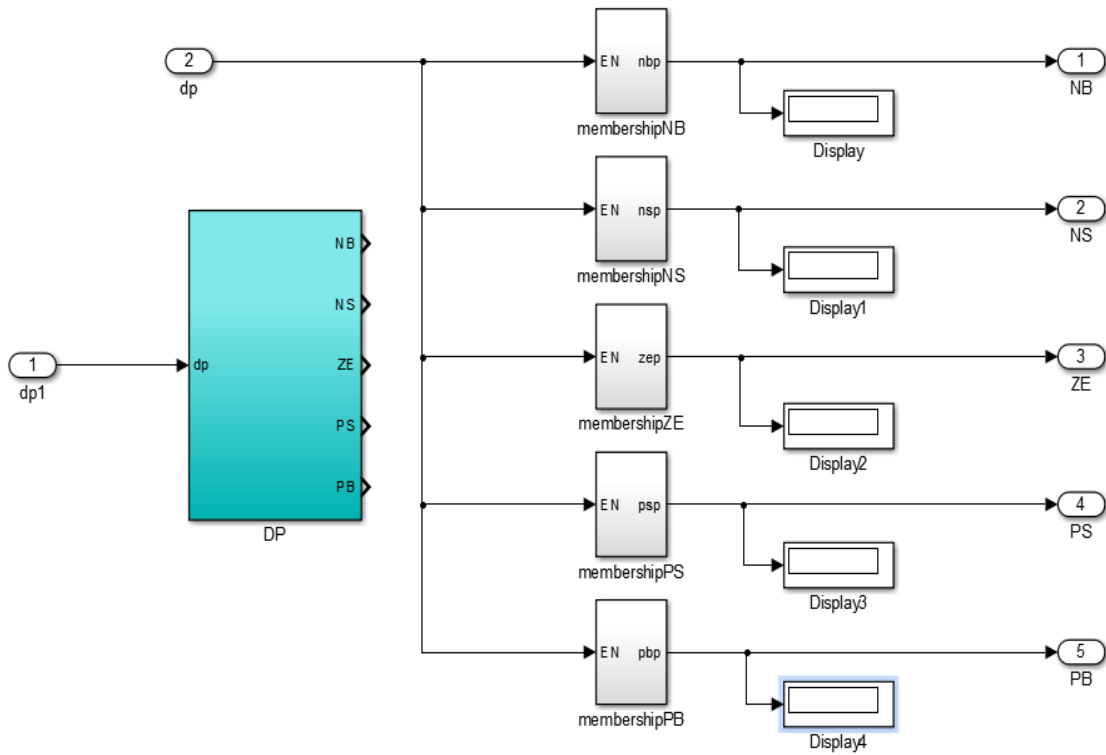


Figure 4.6 : schéma bloc de l'entrée ΔP

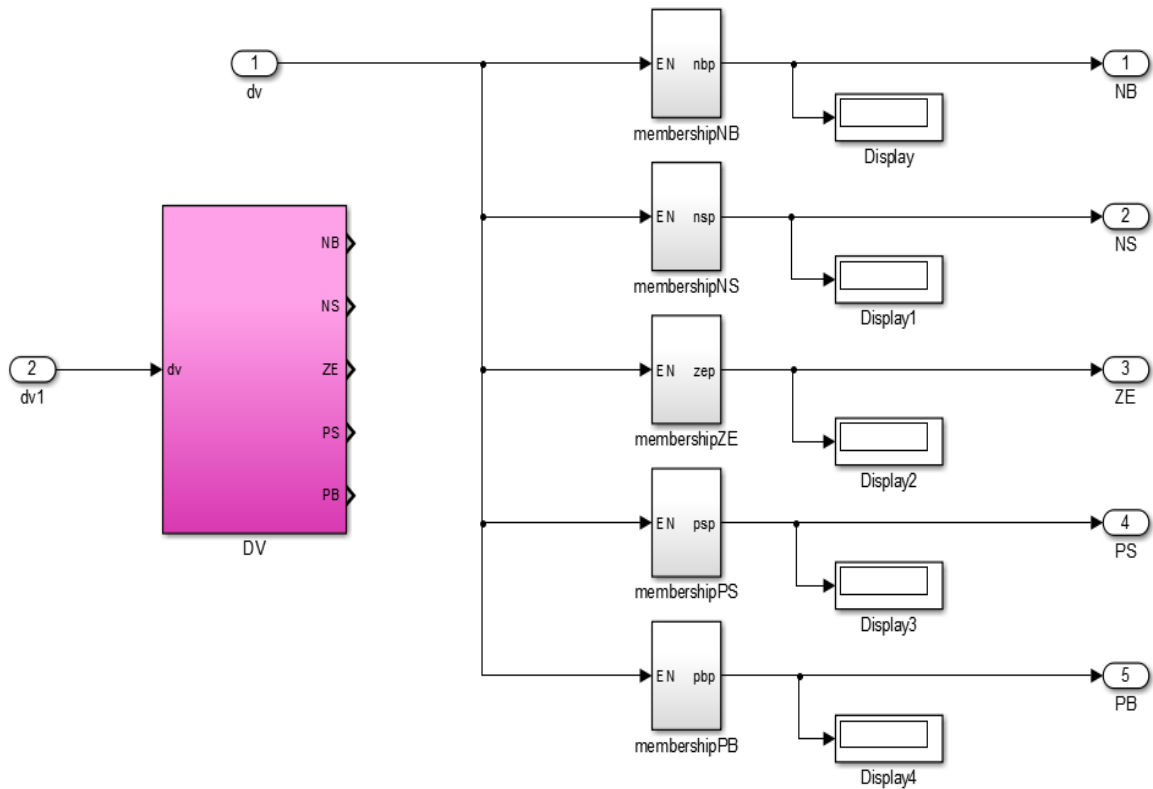


Figure 4.7 : schéma bloc de l'entrée ΔV

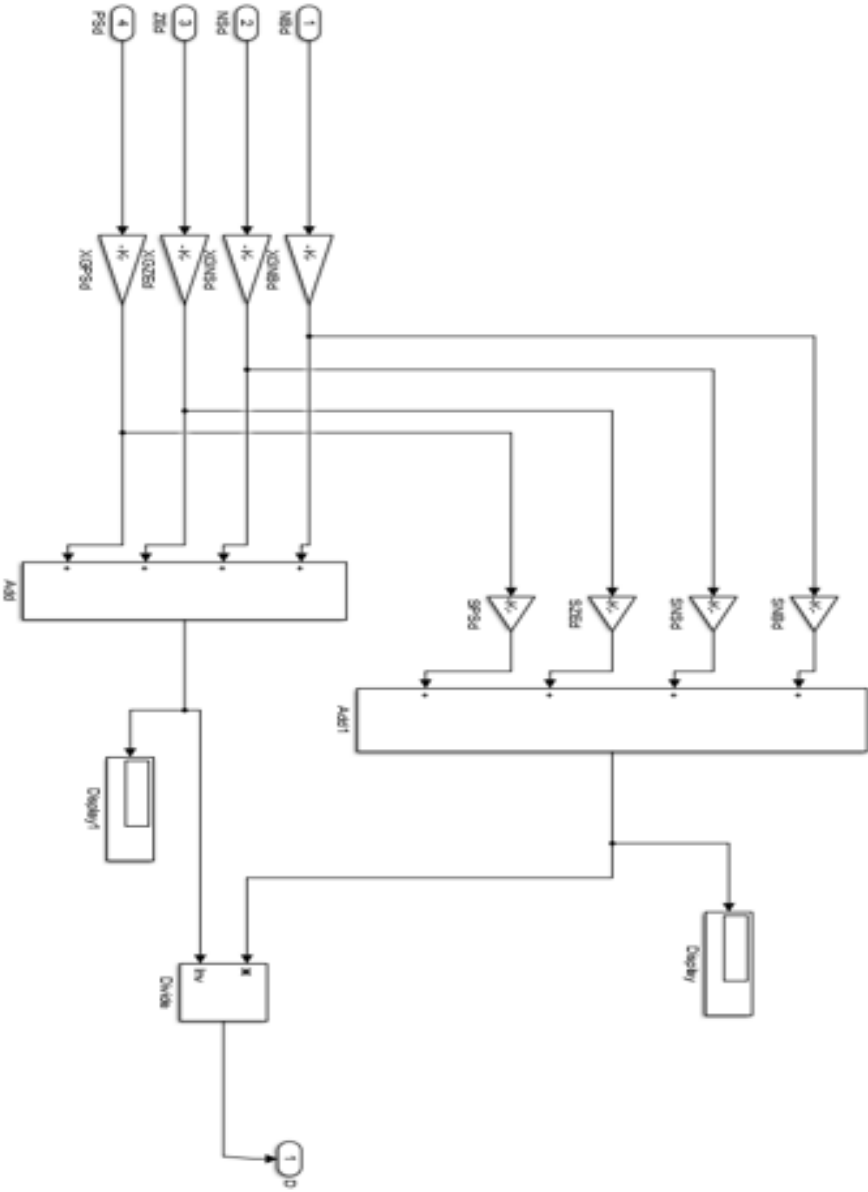


Figure 4.8 : schéma bloc de la sortie D

4.5 Systèmes globaux (GPV, Convertisseur, MPPT, Charge)

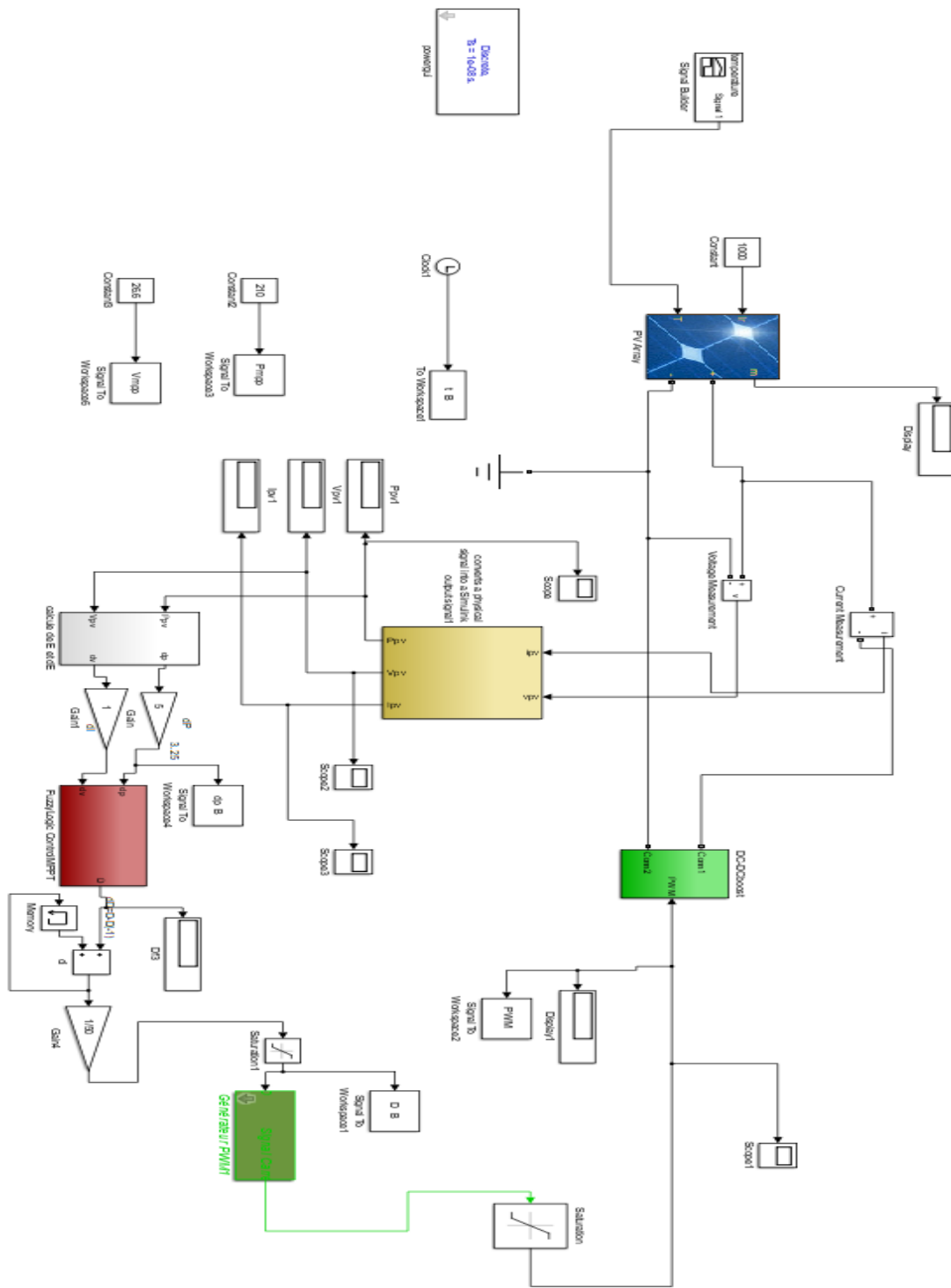


Figure 4.9 : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la Commande MPPT floue

4.6 Résultats de simulation de la MPPT floue

Dans cette partie nous effectuons une simulation de la commande MPPT logique floue pour les trois cas suivants :

- ✓ Le cas où la température et l'éclairement sont fixes.
- ✓ Cas d'une température constante (25°C) et l'éclairement variable.
- ✓ Cas de la température variable et l'éclairement fixe 1000 w/m^2 .

Les figures suivantes représentent Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « logique floue ».

4.6.1 Cas où la température et l'éclairement sont fixes

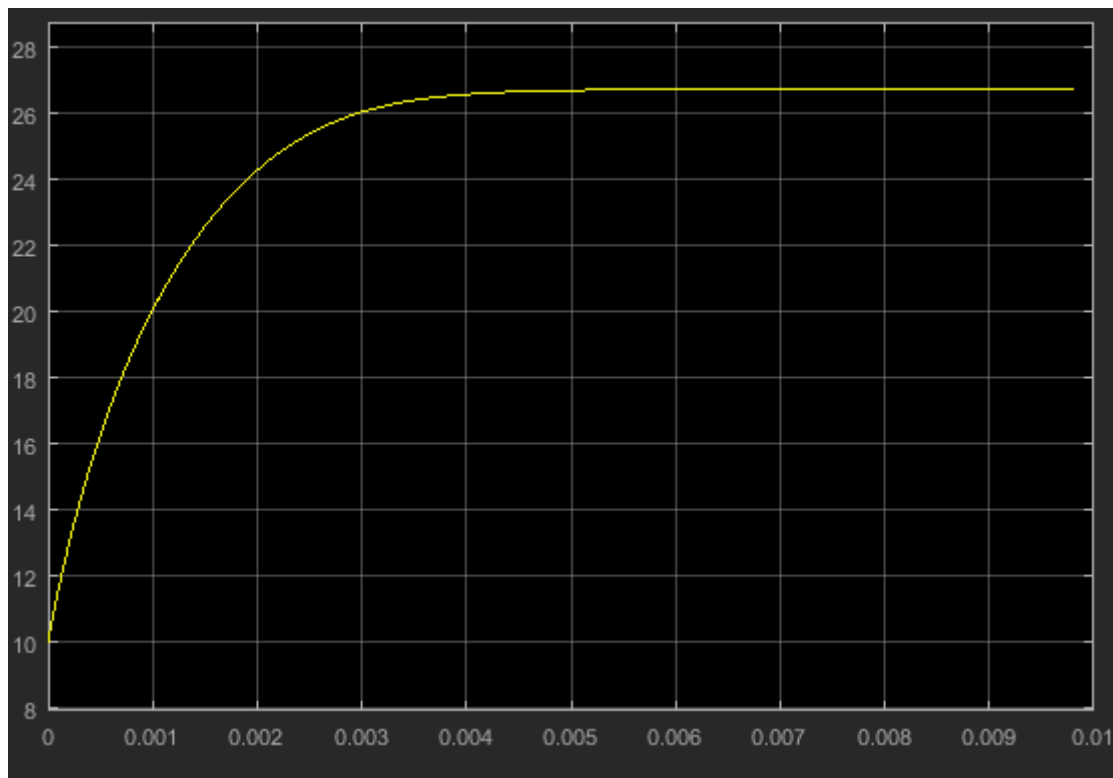


Figure 4.10 : la tension de sortie pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$

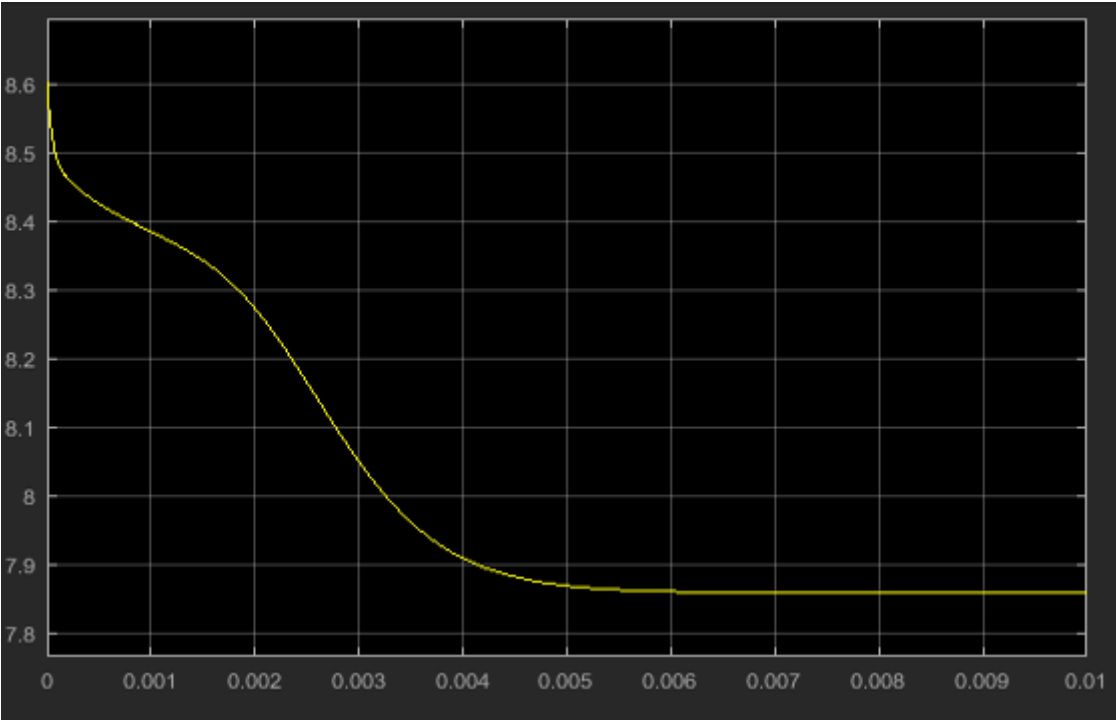


Figure 4.11 : le courant de sortie pour $E=1000W/m^2$ et $T=25C^\circ$

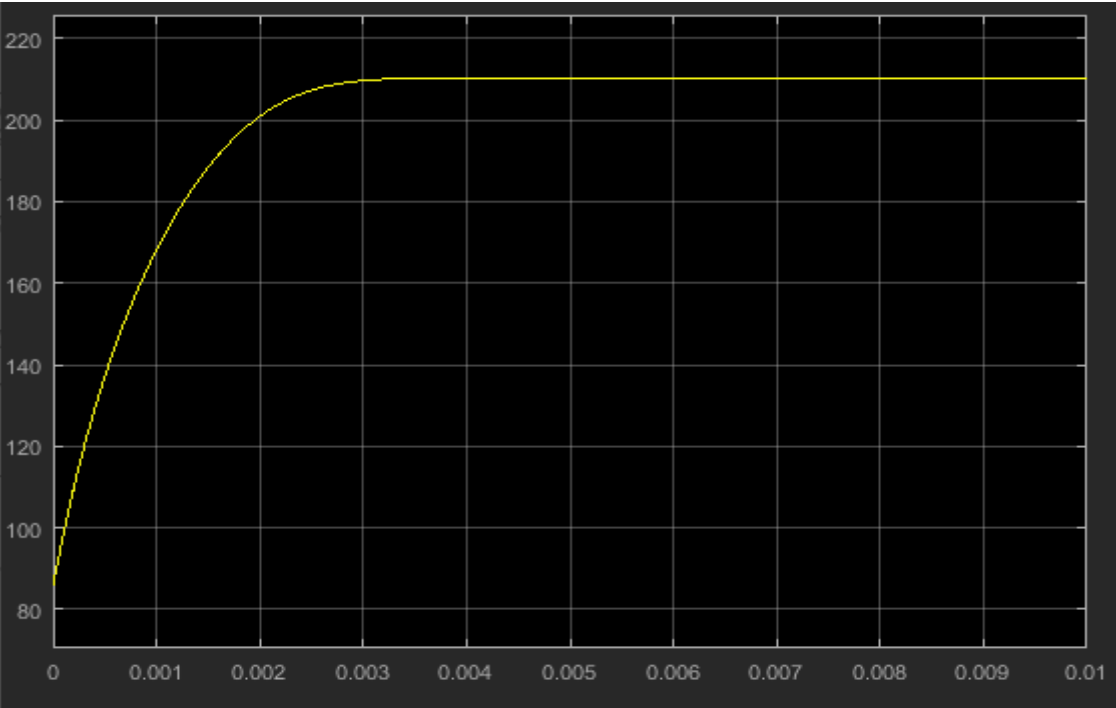


Figure 4.12 : la puissance de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$

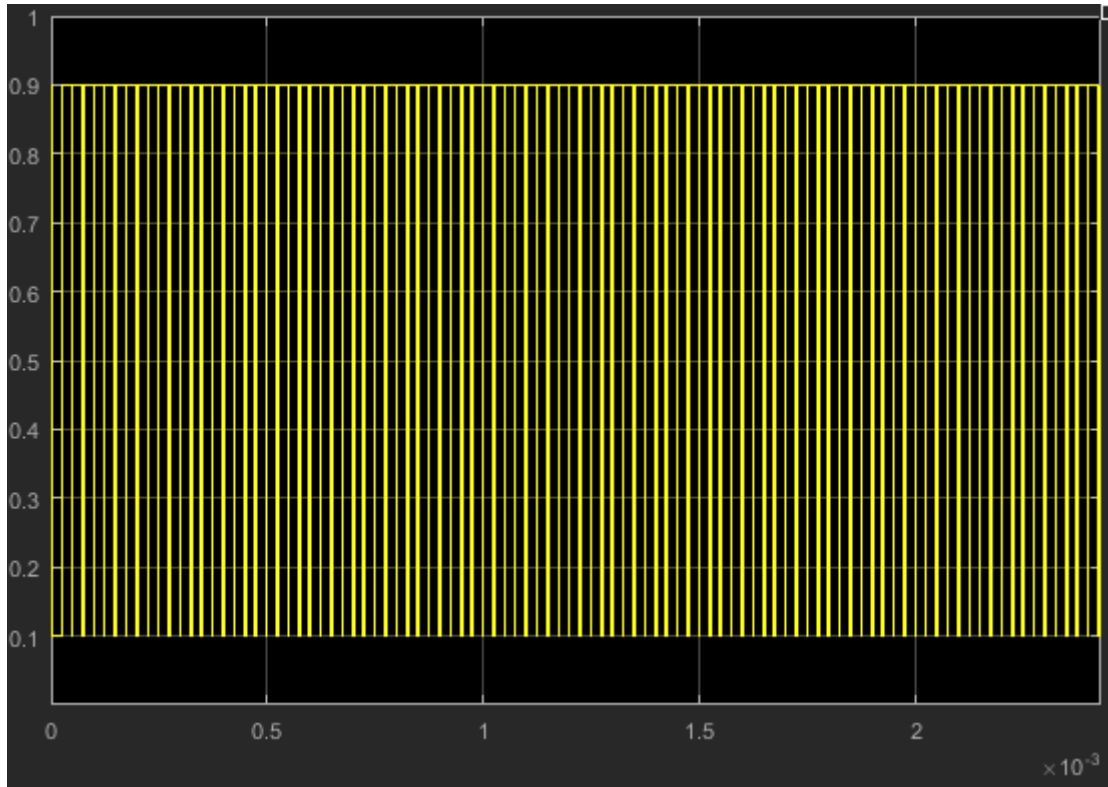


Figure 4.13 : Rapport cyclique de MPPT floue

4.6.2 Cas d'une température constante (25° C) et l'éclairement variable

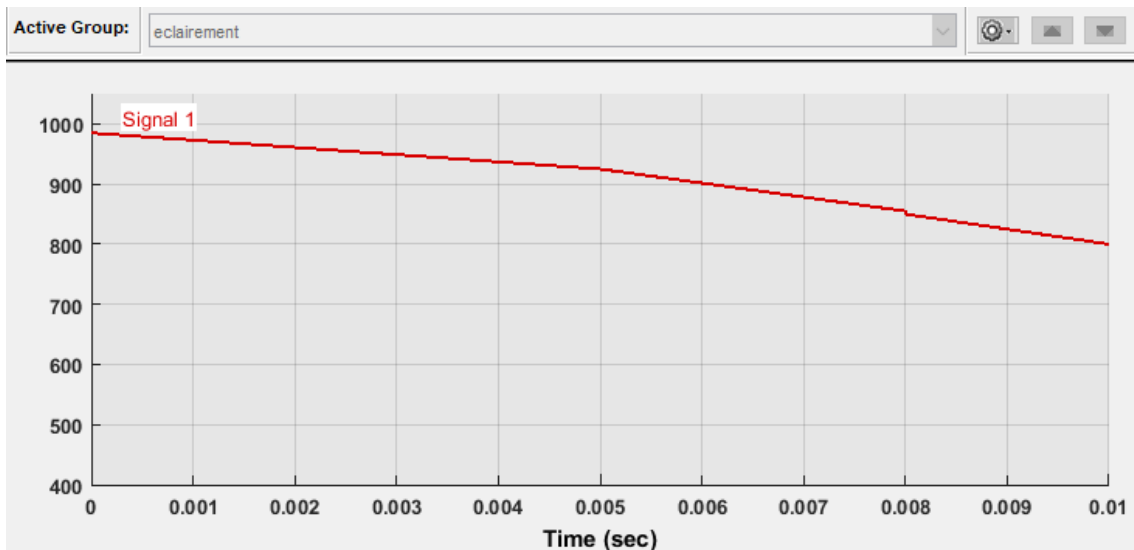


Figure 4.14 : Changement de l'éclairement de 1000W/m² à 800W/m² avec une température fixe de 25°C.

On remarque que La courbe de tension d'entrée du GPV suit le changement d'ensoleillement.

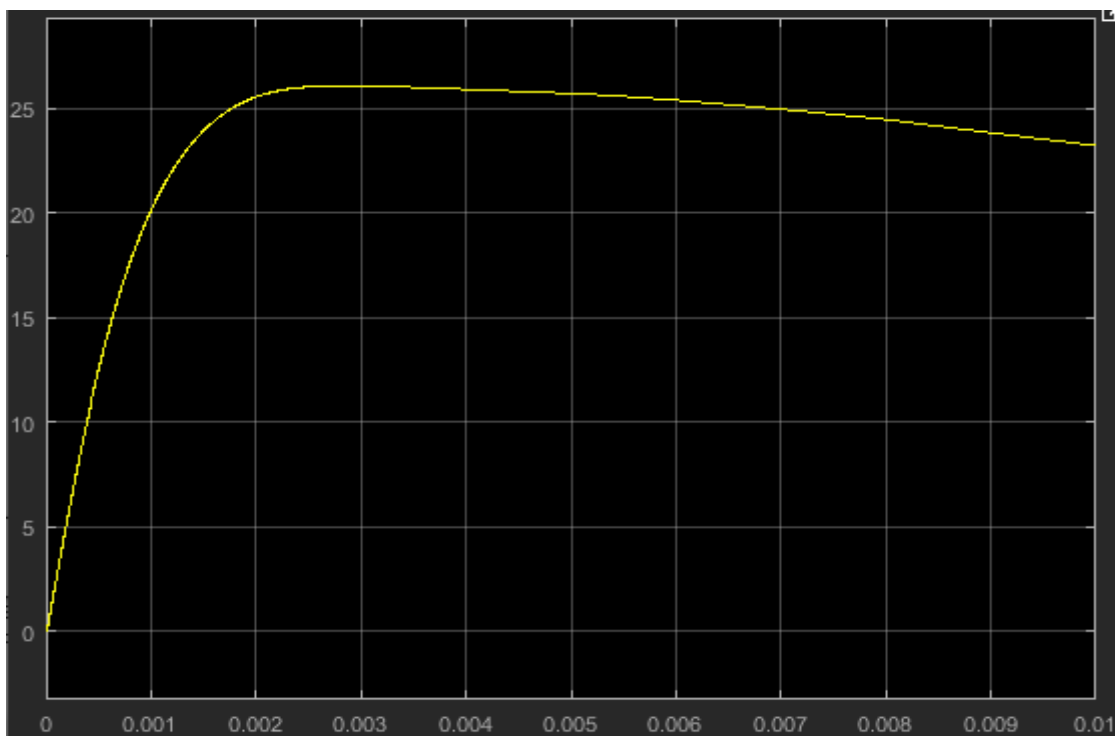


Figure 4.15 : la tension de sortie pour un changement de l'éclairement de 1000W/m² à 800W/m² pour la MPPT logique floue.

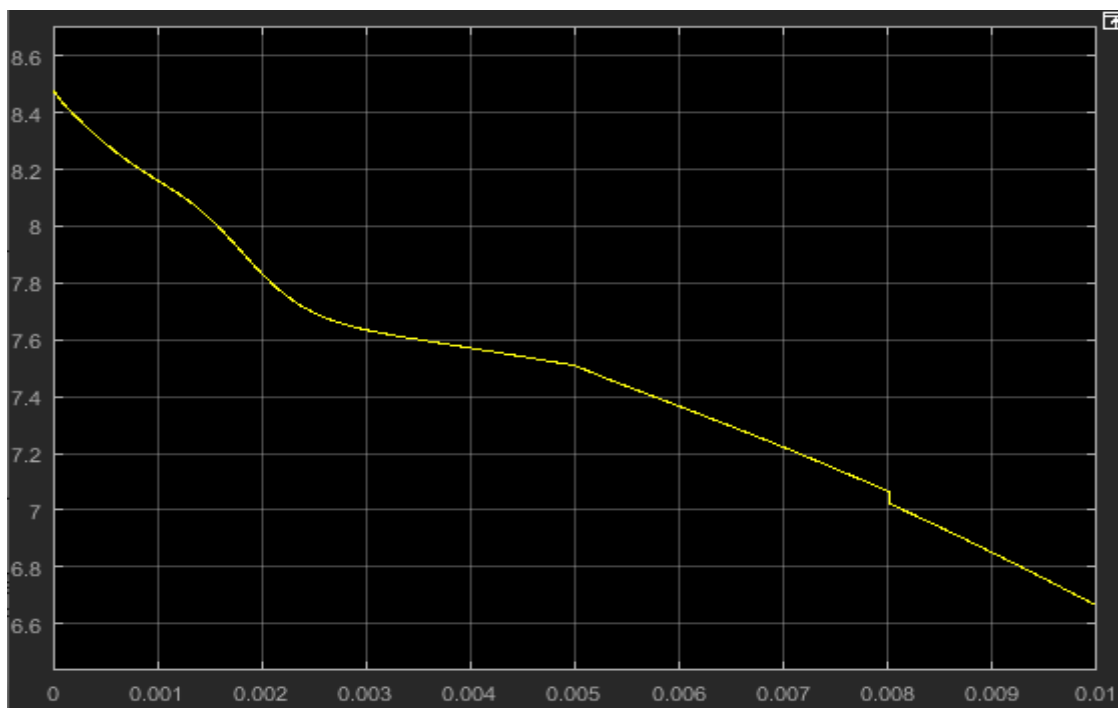


Figure 4.16 : le courant de sortie pour un changement de l'éclairement de 1000W/m² à 800W/m² pour la MPPT logique floue.

Pour la commande MPPT floue on remarque l'effet de la diminution rapide de la puissance du GPV causée par une diminution de l'éclairement Dans les mêmes conditions **1000W/m² à 800W/m² et température fixe 25C°** comme le montre la figure suivante :

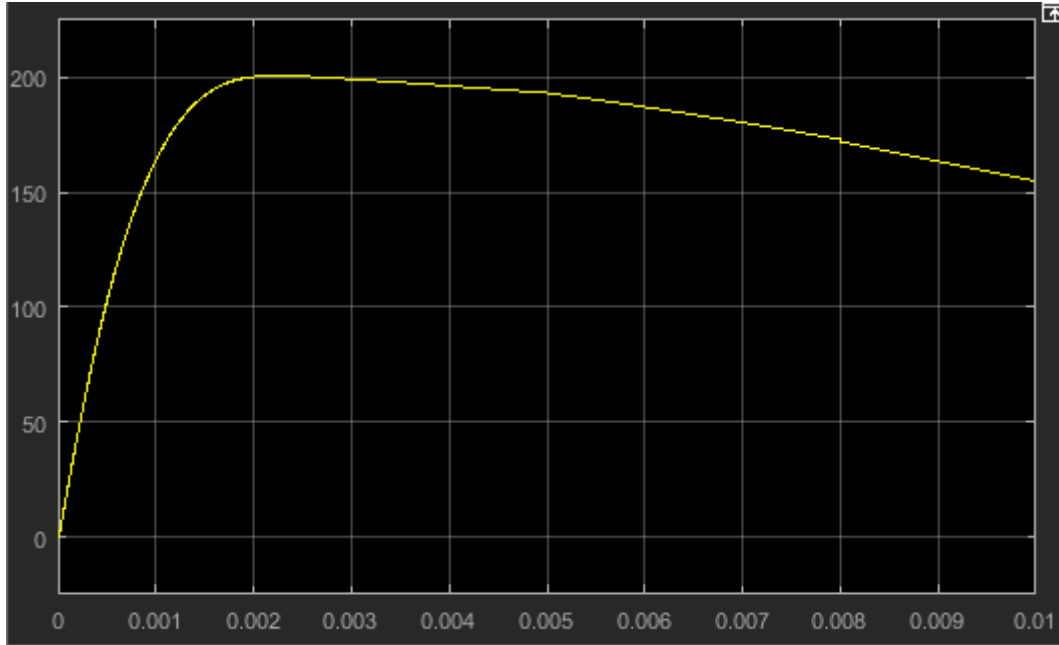


Figure 4.17 : la puissance de sortie du système pour un changement de l'éclairement de 1000W/m² à 800W/m² pour la MPPT logique floue.

4.6.3 Cas de la température variable et l'éclairement fixe 1000w/m2

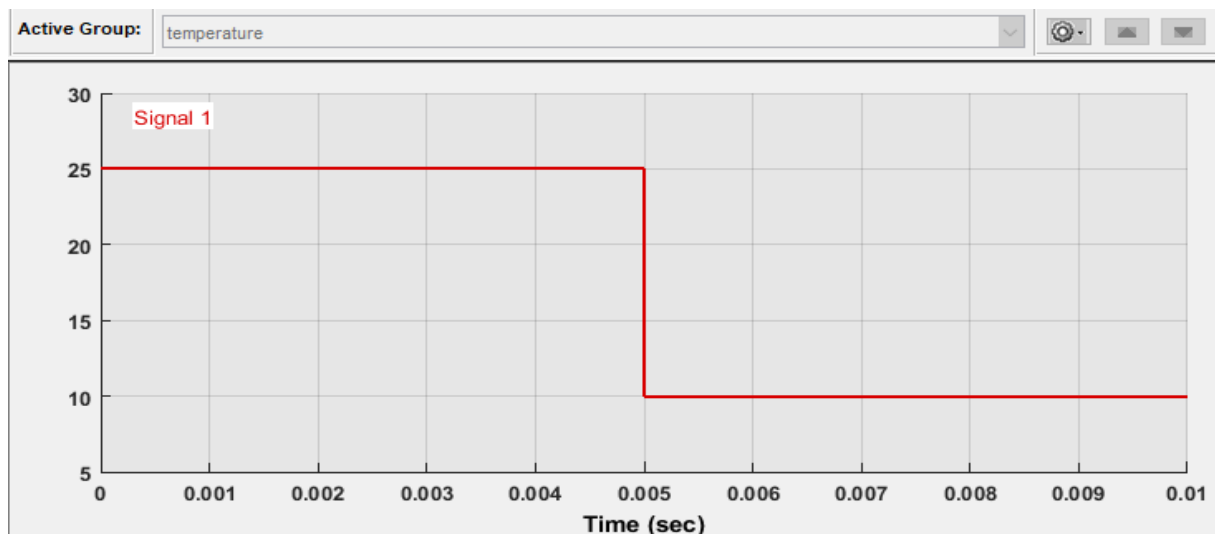


Figure 4.18 : Changement de température de 25° C à 10° C pour la MPPT logique floue

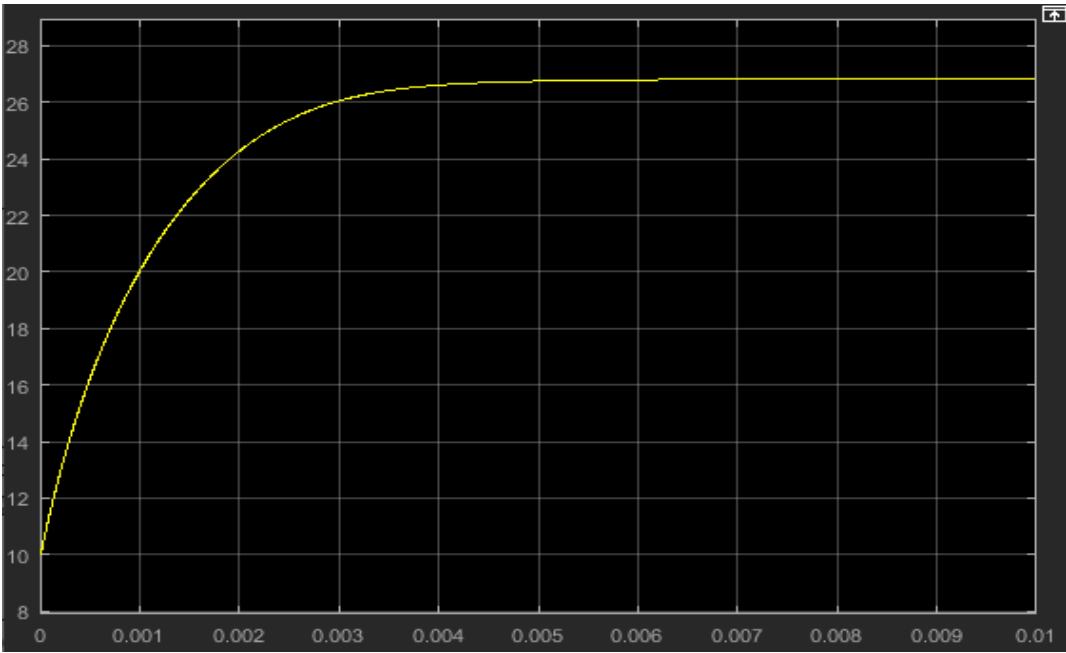


Figure 4.19 : la tension de sortie pour un changement de température de 25° C à 10° C pour la MPPT logique floue

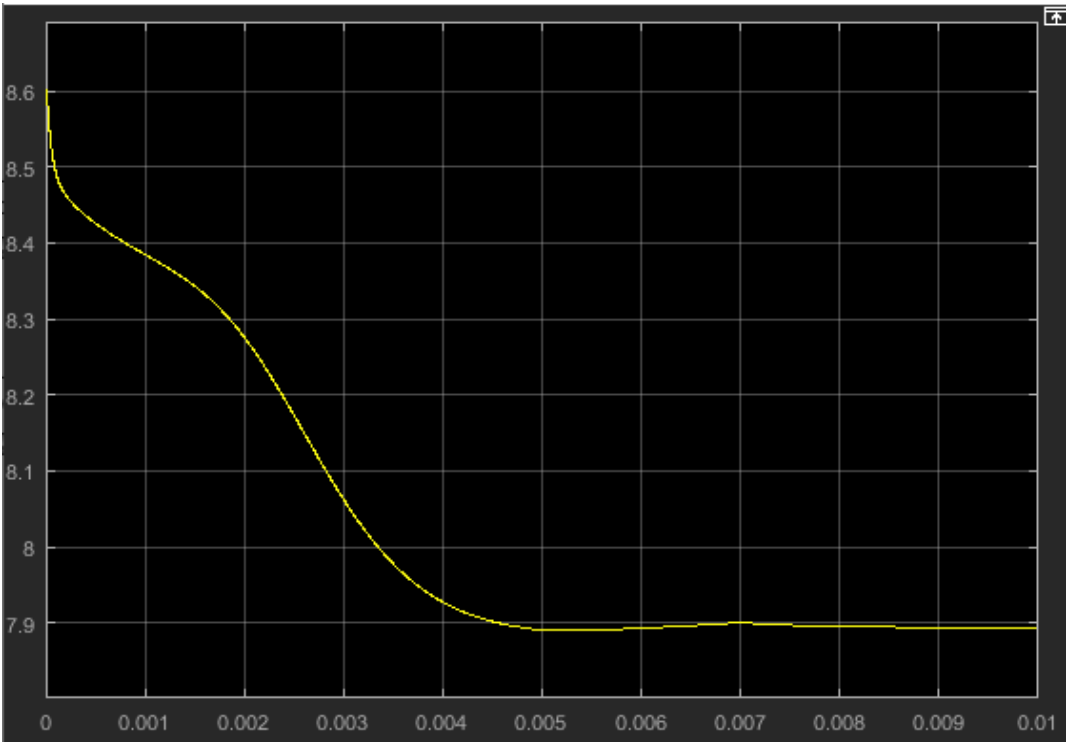


Figure 4.20 : le courant de sortie pour un changement de température de 25° C à 10° C pour la MPPT logique floue

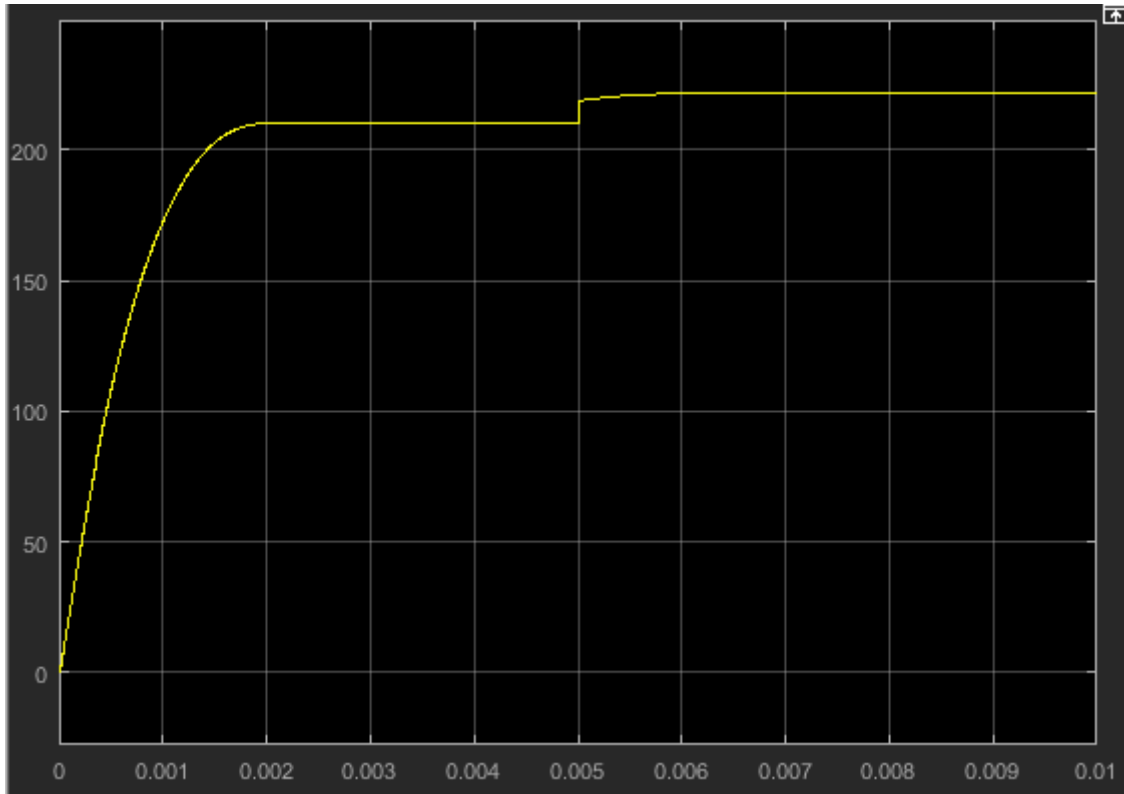


Figure 4.21 : la puissance de sortie pour un changement de température de 25° C à 10° C pour la MPPT logique floue

4.7 Conclusion

Nous avons également mené une étude par simulation de la méthode MPPT commandée par la logique floue. Pour cela, nous avons utilisé une série de mesures pour tester cette méthode dans des conditions climatiques constantes et variables.

La commande MPPT floue peut-être considérée comme une hybridation entre un contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. De plus, ces résultats montrent que le contrôleur floue fonctionne mieux. Ce dernier s'est avéré avoir de meilleures performances, temps de réponse, stabilité et précision.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'analyse d'une modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système PV. Ce système présente une caractéristique de puissance en fonction de tension non linéaire, et cela présente un problème pour l'exploitation de la puissance maximale de l'installation.

Cette étude a pour objectif la recherche de solution optimale pour réaliser une adaptation entre le GPV et la charge. Pour ce faire, nous avons introduit un convertisseur DC/DC de type boost, et un contrôleur numérique « commande MPPT », pour assurer la poursuite de la puissance maximale fournie par le module PV.

Nous avons commencé par introduire des notions théoriques sur les cellules solaires et la construction d'un module photovoltaïque ainsi que ces avantages spécifiques. Nous avons rappelé le principe de deux algorithmes MPPT, « P&O et IC », en analysant aussi le convertisseur DC/DC qui sert à l'adaptation entre le GPV et la charge dans le chapitre deux, et on s'est rendu compte aux notions de la logique floue dans le chapitre trois.

Dans le dernier chapitre, nous avons réalisé nos simulations dans l'environnement Matlab/Simulink, tous d'abord nous avons commencé par la modélisation du panneau PV Kyocera Solar KD210GX-LPU, que l'on a choisi pour notre travail, on a effectué une connexion directe du PS à la charge, et une connexion indirecte contenant un convertisseur DC/DC de type boost entre le GPV et la charge, pour remédier aux fluctuations du PPM dues à la variation de l'irradiations solaire.

Après l'implémentation de l'étage d'adaptation avec la commande MPPT, nous pouvons conclure que :

- ❖ L'utilisation d'un convertisseur de type Boost manipulé avec une commande MPPT donne une grande efficacité.
- ❖ La commande floue s'avère performante lors de changement des conditions climatiques

- [1] : Durukan, I. K., Bayal, Ö., Kurtuluş, G., Baş, Y., Gültekin, A., Öztürk, M. K., ... & Özbay, E. (2015). Examination of the temperature related structural defects of InGaN/GaN Solar cells. *Superlattices and Microstructures*, 86, 379-389. f.
- [2] : K. Touafek, "Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique", mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2005.
- [3] : <https://www.prime-energy-technics.ch/actualites/histoire-du-photovoltaique>.
- [4] : M. Bouafia, & L. Deblaoui, Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS), Université Kasdi Merbah.Ouargla,2012.
- [5] : Hua, C., Lin, J., & Shen, C. (1998). Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45(1), 99-107.
- [6] : Djarallah, M. (2008). Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique. Université de Batna Thèse de Doctorat en Science.
- [7] : MEFLAH, A. (2011). Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque.
- [8] : O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed, "Analysis and Experimental Validation of various Photovoltaic System Models", 7th International ELECTRIMACS Congress, Aout 2002, Montreal (Canada), pp.1-6.
- [9] : A.A. Ghassami, S.M. Sadeghzadeh, A. Soleimani, "A high performance maximum power point tracker for PV Systems", *Electr. Power Energy Syst.* 53 (2013), pp. 237-243.
- [10] : S. Astier, B. Dakyo, « Les système photovoltaïques autonomes non embarqués pour la production d'énergie électrique », Journées électrotechniques du club EEA, 28-29 Janvier1999, paris (France), pp 1- 19.
- [11] : Y. Jiang, A. Hassan, E. Abdelkarem, "Load Current Based Analog MPPT Controller For PV Solar Systems", 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012, pp.911-914
- [12] : D. Rekioua, E. Matagne, « Optimization of photovoltaic power systems : Modelization, Simulation and Control », Springer, British Library, 2012, ISBN 978-1-4471-2348-4.
- [13] : Ludovic Protin, Stéphan Astier ; « Convertisseurs photovoltaïques », Techniques de l'Ingénieur -D3 360-.
- [14] : M. PETIBON Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion

de l'énergie pour les applications photovoltaïques» Thèse de doctorat de l'université de Toulouse 2009

[15] : B. Equer, Energie Solaire Photovoltaïque, Ellipses, Paris, 1993.

[16] : <http://www.enfener.com/>

[17] : N. Femia, G. Lisi, G. Petrone, And M. Vitelli “Distributed maximum power point tracking of photovoltaic arrays : novel approach and system analysis”. IEEE transaction on industrial electronics, vol. 55, no. 7. 2008.

[18] : Zerguine Bilal, « Modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque », mémoire de magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2010.

[19] : Yassine LASMI. Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. Université Sétif -1 (ALGERIE).

[20] : C. CEDRIC : ‘Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque’, Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, Décembre 2008.

[21] : H. FATIHA et R. AICHA « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » Thèse master académique en Electrotechnique Université kasdi merbah Ouargla 2014

[22] : C. CABAL, « Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique Dédie à la Conversion Photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 2008

[23] : S. A. TADJER, « Etude d'un Système de Compensation d'Harmonique En Utilisant un Générateur Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Mouhamed Bougara-Boumerdes, Algérie, 2008.

[24] : Abbes, H., Abid, H., Loukil, K., Toumi, A., & Abid, M. (2014). Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque. Revue des Energies Renouvelables, 17(3), 435-445.

[25] : Hua, C., Lin, J., & Shen, C. (1998). Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 45(1), 99-107.

[26] : H. Abouobaida, M. Cherkaoui, M. Ouassaid, “Robust Maximum Power Point Tracking for Fast Changing Environmental Conditions”, International Review on Modeling and Simulations, 2011, Vol. 4 n. 1, p. 391-396

[27] : H. Abouobaida, M. Cherkaoui, “Backstepping controller in close cooperation with MPPT algorithm for PV system”, Journal of Electrical Engineering, 2012, Vol 12, - Edition 3

[28] : M. Amarouayache : ‘Contribution à l’optimisation d’une chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque’, Thèse pour l’obtention du diplôme de Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Constantine 1, Mars 2014.

[29] : S. Issaadi : ‘commande d’une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de neurones’, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.

[30] : MESSAI Adnane : ‘Contribution à l’amélioration des performances de la commande MPPT d’un système photovoltaïque en utilisant les techniques de l’intelligence artificielle programmables’, Thèse de doctorat en Electronique, Université de Blida, Novembre 2012.

[31] : <https://fr.wikipedia.org>.

[32] : Seif Eddine NAFFOUTI, « Dimensionnement et commande d’un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque », Mémoire de magister, Spécialité : GENIE ELECTRIQUE, Université de Monastir, 2011/2012.

[33] : Michel Pinard, « Convertisseurs et Electronique de Puissance », Dunod, 2007.

[34] : S. Sumathi • L. Ashok Kumar • P. Surekha, Solar PV and Wind Energy Conversion Systems, Springer International Publishing Switzerland 2015

[35] : Salas V, Olias E, Barrado A, Lazaro A. Review of the maximum power point tracking algorithms for standalone photovoltaic systems. Solar Energy Materials & Solar Cells 2006, 90 :1555–78.

[36] : C.-Y. Won, D.-H. Kim, S.-C. Kim, W.-S. Kim, et H.-S. Kim, « A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller », in, 25th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC '94 Record, Taipei, Taiwan, 1994, p. 396-403 vol.1.