REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : **E**lectrotechnique

Spécialité : **E**nergie **R**enouvelable en **E**lectrotechnique

Optimisation d'un Système Photovoltaïque adapté par une Commande MPPT Floue Type-2

Présentées par :

Mme MAHAMMEDI Amina

Mme SAHRAOUI Dounia

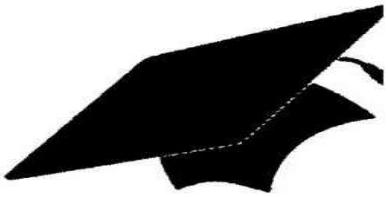
Proposés et Dirigés par :

Dr. AMOKRANE Zouhir

Dr. MORSLI Abed el Kder

Promotion 2022-2023


بسم الله الرحمن الرحيم

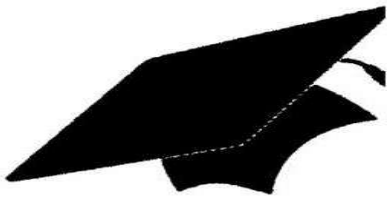


Remerciements

Je remercie Allah, le tout puissant, pour m'avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de mon chemin, durant toutes mes années d'études,

J'adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants de l'université de MEDEA, notamment à mon promoteur Dr AMOKRANE. Z et Dr MORSLI. A qu'ils ont assurés la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire.

Je tiens notamment, à adresser l'expression de ma sincère reconnaissance aux membres du jury d'examen, pour l'intérêt qu'ils ont protes a ce travail.



Dédicaces

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

Mes chers Parents.

Mes Frères.

Ma Famille et tous mes Proches.

Et à tous qui me connait et compte sur moi…

Tous mes Amis (es)

Amina

Dédicaces

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

Mes chers Parents.

Mes Frères.

Ma Famille et tous mes Proches.

Et à tous qui me connait et compte sur moi…

Tous mes Amis (es)

Dounia

ملخص

تعتمد طاقة خرج المولد الكهروضوئي على عدد من المعلمات بما في ذلك شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلية وما إلى ذلك.

نظرًا للخصائص الكهربائية غير الخطية للغاية للخلايا الكهروضوئية وارتباطاتها، سنقوم بإنشاء تقنية MPPTالضبابية من النوع 2 لتحسين أداء الأنظمة الكهروضوئية من خلال تحليل ومحاكاة وتقييم نظام الطاقة الكهروضوئية الشامل تحت التشغيل المتغير.

المنطق الضبابي من النوع 2 هو شكل من أشكال المنطق الذي يتعامل مع المنطق التقريبي وليس الثابت والدقيق، لذا فإن التحكم لا يتطلب معرفة دقيقة بالنموذج الرياضي للنظام. بينما تمنحه بساطته ميزة في تتبع MPP في الظروف الجوية المتغيرة بسرعة.

للقيام بذلك، نقوم بتطوير نماذج رياضية لمكونات النظام الكهروضوئي (GPV، محول DC/ DC، حمولة). سنقوم بتنفيذ أمر MPPTهذا في واجهة إلكترونية للتحكم في المحول الثابت الذي يربط الحمل والمولد الكهروضوئي وذلك لتوفير أقصى طاقة للحمل بشكل دائم.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة، المولدات الكهروضوئية، التحكم بواسطة المنطق الضبابي من النوع 2، محول ثابت، خوارزمية MPPT.

Résumé

La puissance de sortie d’un générateur photovoltaïque dépend de certains nombres de paramètres parmi lesquels l’intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc.

En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules photovoltaïque et de leurs associations, nous établirons une technique MPPT flou type-2 afin d’améliorer le rendement des systèmes photovoltaïque en analysant, simulant, et évaluant le système global d'alimentation photovoltaïque sous des conditions de fonctionnement variables.

La Logique Floue Type-2 est une forme de logique qui traite un raisonnement approximatif plutôt que fixe et exact, donc la commande ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système, tandis que sa simplicité lui donne un avantage dans le suivi de son Point de Puissance Maximale (MPP) dans des conditions atmosphériques à variation rapide.

Pour ce faire, nous développons les modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur DC/DC, charge). Nous allons implémenter cette commande MPPT dans une interface électronique pour piloter le convertisseur statique reliant la charge et le générateur photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge.

Mots clés : Energies renouvelables, Générateur photovoltaïque, Commande par logique floue type 2, convertisseur statique, algorithme MPPT.

Abstract

The output power of a photovoltaic generator depends on a number of parameters including the intensity of solar radiation, cell temperature, etc.

Due to the highly nonlinear electrical characteristics of photovoltaic cells and their associations, we will establish a type 2 fuzzy MPPT technique to improve the performance of PV systems by analyzing, simulating, and evaluating the overall PV power system under variable operation.

Type 2 fuzzy logic is a form of logic that deals with approximate rather than fixed and exact reasoning so control does not require exact knowledge of the mathematical model of the system. While its simplicity gives it an edge in tracking its MPP in rapidly changing atmospheric conditions

To do this, we develop mathematical models of the components of the PV system (GPV, DC/ DC converter, load). We are going to implement this MPPT command in an electronic interface to control the static converter connecting the load and the photovoltaic generator so as to permanently supply the maximum power to the load.

Keywords: Renewable energies, Photovoltaic generator, Control by fuzzy logic type 2, Static converter, MPPT algorithm.

SOMMAIRE

➢ REMERCIEMENTS

➢ DEDICACES

➢RESUME

➢ LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

➢ LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

➢ INTRODUCTION GENERALE…… 1

Chapitre I: Generalite sur les systeme photovoltaique

1. Introduction ……....4

2. l'énergie solaires ……..……..……...4

2.1 Définition ……...6

2.2 Potentiel solaire dans le monde……6

2.3 Potentiel solaire en Algérie……...7

3. Cellule photovoltaïque…….....8

3.1 Définition……...8

3.2 Caractéristique électriques d'une cellule photovoltaïque…….9

3.3 Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque……..10

3.4 L'effet photovoltaïque……....12

3.5 Les type de cellule solaire……..13

3.6 Association des cellules PV……15

4. Module photovoltaïque ……...17

4.1 Association de module photovoltaïque……..18

4.2 Assemblage des modules PV……..20

4.3 Protection des modules photovoltaïque……21

5. Modélisation d'un générateur photovoltaïque……..22

6. Les types des systèmes photovoltaïques……..23

7. Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque……24

8. Conclusion……25

Chapitre II: Modelisation d'un convertisseur DC-DC et la commande MPPT

1. Introduction……..27
2. Connexion directe source-charge……27
3. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge……..29
4. Partie électronique de puissance……..29
4.1 Convertisseurs DC/DC……29
4.2 Modes de fonctionnement du convertisseur statique……...…31
4.3 Le hacheur survolteur (Boost)……31
5. Partie de commande……..37
5.1 Poursuite du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque……...37
5.2 Types des régulateurs flous……38
5.3 Logique floue type-2……39
5.4 Théorie des ensembles et les fonctions d'appartenance de flous type-2…….39
5.5 Systèmes flous de type-2……..42
5.6 La commande MPPT basée sur le principe de la logique floue type-2……...45
6. Conclusion……..48

Chapitre III: Simulation d'une système photovoltaique

1. Introduction……...50
2. Simulation du système photovoltaïque……....50
2.1 Simulation d'un GPV……..52
2.2 Simulation du convertisseur Boost……53
2.3 Simulation du MPPT Flou type 2……55
3. Les résultats……...58
3.1 Simulation sous des conditions STC……58
3.2 Simulation sous des conditions atmosphériques variables……60
3.3 Comparaison entre FLC2 et FLC1……..64

4. Discutions……..67

5. Conclusion…….67

➢ **CONCLUSION GENERALE**……**68**

➢ **BIBIOGRAHIE**

➢ **ANNEXE**

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1 Potentiel solaire en Algérie ...…….…….....8

Chapitre II :

Tableau II.1 Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC…….....31

Tableau II.2 Comparaison Des Techniques MPPT……..38

Tableau II.3 Exemple d'une table des règles à cinq classes pour une commande logique floue……..…47

Chapitre III :

Tableau III.1 Base de règles du contrôleur flou……...57

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 Ajouts annuels de capacité de production d'énergie renouvelable, par technologie, de 2016 à 2021.....5

Figure I.2 Carte de l'irradiation solaire moyenne du monde Tirée de The Word Bank ……...7

Figure I.3 Effet photovoltaïque à l'échelle de la cellule…….9

Figure I.4 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque……..……..9

Figure I.5 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) à T=25°C d'une cellule photovoltaïque……..11

Figure I.6 Influence de la température sur les caractéristique I(V) et P(V) à E=1000 W/m2 d'une cellule photovoltaïque……11

Figure I.7 Principe de l'effet photovoltaïque…...…….……13

Figure I.8 Cellule monocristalline……..…..13

Figure I.9 Cellule poly cristalline……...…..14

Figure I.10 Cellules amorphes……..14

Figure I.11 les technologies de la cellule photovoltaïque……14

Figure I.12 les rendements de différentes technologies de cellules photovoltaïques mesurées en laboratoire depuis 1976 a 2023 d'après les données du NREL……...…15

Figure I.13 Association en série……...16

Figure I.14 Association en parallèle…….16

Figure I.15 Composants d'un GPV……..…17

Figure I.16 Influence de l'association des cellules en série sur la caractéristique d'un module photovoltaïque……..…18

Figure I.17 Influence de l'association des cellules en parallèle sur la caractéristique d'un module photovoltaïque……19

Figure I.18 Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules photovoltaïques (PV) en parallèle ou série……...……20

Figure I.19 Configuration de câblage des modules PV……20

Figure I.20 Diodes by-pass……...21

Figure I.21 Exemple d'association sécurité de deux modules photovoltaïques en parallèle avec leurs diodes de protection……22

Figure I.22 Schéma électrique équivalent d'un générateur PV……23

Figure I.23 les types des systèmes photovoltaïque……...…24

Chapitre II :

Figure II.1 : Connexion directe source-charge…….27

Figure II. 2 : Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion….28

Figure II. 3 : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge……..…29

Figure II.4 : Symbole d'un hacheur DC/DC……30

Figure II.5 : Structure d'un convertisseur boost……...…32

Figure II.6 : Allure des variables dynamiques IL……..…32

Figure II.7 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur……...33

Figure II.8 : Circuit équivalent du convertisseur boost classique lorsque l'interrupteur est fermé……..…...34

Figure II.9 : Circuit équivalent du convertisseur boost classique lorsque l'interrupteur est ouvert…… ..34

Figure II.10 : Schéma de MPPT avec le contrôle direct……..37

Figure II.11 : (a). Représentation schématique d'un ensemble flou Gaussien de type-2.(b). Les appartenances secondaires sont représentées dans, où on remarque qu'ils sont gaussiennes……...39

Figure II.12 Fonction d'appartenance d'un ensemble flou type-2……...…41

Figure II.13 Structure de base d'un système flou de type-2…….……42

Figure II.14 : Diagramme d'esquisse d'un contrôleur flou type-2……...45

Figure II.15 Les fonctions d'apparence de type-2 (a) erreur E, (b) changement d'erreur CE, (c) le rapport cyclique dD……..……..46

Chapitre III :

Figure III.1 Schéma bloc sous Simulink du système global……51

Figure III.2 Schéma bloc sous Simulink du PV Array…….52

Figure III.3 Les caractéristiques électriques du PV sous les conditions atmosphériques variable (G=1000 800 600 200) W/m2 et T=25^{o}C……..52

Figure III.4 Les caractéristiques électriques du PV sous les conditions atmosphériques variable G=1000 W/m2 et T= (75 45 25 0) ^{o}C……....53

Figure III.5 Schéma bloc sous Simulink du convertisseur Boost…….53

Figure III.6 Les courants d'entrée et de sortie hacheur élévateur en fonction le temps(s)…..54

Figure III.7 Les tensions d'entrée et de sortie hacheur élévateur en fonction le temps(s)…...54

Figure III.8 Schéma block sous Simulink de la commande MPPT flou type 2 ……..55

Figure III.9 Fonctions d'appartenance E, CE et ΔD……....56

Figure III.10 Surface 3D de sortie de contrôleur logique floue type 2……57

Figure III.11 Les caractéristiques électriques I= f (V) et P = f (V) du module PV avec MPPT……..58

Figure III.12 Evolution du courant, la tension et la puissance du GPV et FLC2 en fonction de temps (s)…….59

Figure III.13 l'efficacité de FLC2 en fonction de temps (s)……..59

Figure III.14 le rapport cyclique de la commande……..…60

Figure III.15 Profil d'ensoleillement injecté dans le GPV…….……60

Figure III.16 Evolution du courant, la tension et la puissance du GPV et FLC2 en fonction de temps (s)……..61

Figure III.17 Profil de température injecté dans le GPV…….……62

Figure III.18 Evolution du courant, la tension et la puissance du GPV et FLC2 en fonction de temps (s)…….…….62

Figure III.19 Evolution de l'efficacité de FLC2 en fonction de temps (s)…….….63

Figure III.20 Evolution du courant, la tension et la puissance du GPV et FLC2 en fonction de temps (s)…….....63

Figure III.21 Schéma de principe d'un régulateur flou 1…….64

Figure III.22 Fonctions d'appartenance Vn, Pn et ΔD……64.65

Figure III.23 les règles de sortie de contrôleur logique floue type 1……..65

Figure III.24 Surface 3D de sortie de contrôleur logique floue type 1……66

Figure III.25 Evolution la puissance du GPV, FLC2 et FLC1 en fonction de temps (s)…….66

Figure III.26 Zoom……..67

Liste des symboles et des abréviations

CC	Courant continue
D	La diode
E	Eclairement (W/m2)
Ipv	Courant délivré par une cellule photovoltaïque (A)
Iopt	Courant optimum (A).
Imp	Courant de point de Puissance maximale (A)
IL	Courant traverse l'inductance de hacheur (A)
Is	Courant de sortie de hacheur (A)
Icc	Courant de court-circuit (A)
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
Np	Le nombre de modules en parallèle
Ns	Le nombre de modules en série
GPV	Générateur Photovoltaïque.
PV	Photovoltaïque
P&O	Méthode de Perturbation et observation
RS	Résistance série de la cellule (Ω)
Rp	Résistance parallèle de la cellule (Ω)
T	Température (25 °C ou 298°K)
Ve	Tension d'entrée de hacheur (V)
Vmp	Tension de point de puissance maximale (V)
Vpv	Tension aux bornes de la cellule photovoltaïque (V)
Vopt	Tension optimale (V).
Vs	Tension de sortie de hacheur
Vco	La tension du circuit ouvert (V)
D	Rapport cyclique

Introduction générale

Introduction générale

En raison de la croissance rapide de la population, la consommation mondiale d'énergie a augmenté. Cette croissance aura un impact énorme sur la demande énergétique. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), les énergies renouvelables (éolienne, hydraulique, géothermique, solaire, biomasse…) se développent de plus en plus. Elles ont le double avantage d'utiliser des flux inépuisables d'énergie naturelle (soleil, vent) et de ne pas, ou peu, nuire à l'environnement. Avec l'apparition de nouvelles technologies d'exploitation des énergies renouvelables, le monde peut passer à la transition énergétique [3].

L'énergie renouvelable fait référence à l'énergie du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou même de la biomasse. Contrairement aux combustibles fossiles, les énergies renouvelables sont une source d'énergie aux ressources illimitées. L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus utilisées. Il s'agit de la conversion directe du rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de convertir les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu peut donc être utilisée directement. En raison des cellules photovoltaïques et de leurs propriétés électriques hautement non linéaires associées, l'efficacité des systèmes photovoltaïques peut être augmentée par des solutions utilisant la technologie de suivi du point de puissance maximale (dite en anglais technologie MPPT) [1].

MPPT comme son nom l'indique, traque le point de puissance maximale (PPM) dans le temps et permet de la sorte de tirer le maximum de puissance disponible dans le panneau PV. Dans la littérature, deux méthodes MPPT sont citées ; qui sont les méthodes classiques et intelligentes. Les méthodes classiques sont des méthodes basées sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance obtenue directement de la caractéristique du panneau PV. Les méthodes intelligentes les plus citées dans la littérature sont les réseaux de neurones et les contrôleurs à la logique floue. Les réseaux de neurones sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Ils infèrent des propriétés émergentes permettant de solutionner les problèmes jadis qualifiés de complexes [2].

La logique floue est une logique qui substitue à la logique binaire une logique fondée sur des variables pouvant prendre, outre les valeurs (vrai 1) ou (faux 0), les valeurs

intermédiaires «Vrai» ou « faux » avec une certaine probabilité (un certain degré d'appartenance). Il existe deux types de logique floue type 1 et 2. L'ensemble flou type 2 peut mieux modéliser les incertitudes grâce à son grade qui est un intervalle contrairement au système flou type 1 qui est un nombre absolu. Mendel a également montré que le système flou type 2 est un modèle scientifiquement correct pour modéliser les incertitudes linguistiques. L'utilisation de système floue type 2 pour représenter les entrées et les sorties dans la commande floue entraînera une réduction de la base de règles par rapport à l'utilisation de système floue type 1[1].

L'objectif de ce travail est de concevoir un contrôleur flou de type 02 basé sur la méthode de poursuite du PPM à chaque instant de variation des conditions météorologiques (l'irradiance et la température). Le système de conversion d'énergie PV étudié est un système PV autonome sans stockage électrochimique (batterie).

Le contenu de notre travail est structuré en trois chapitres détaillés comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la présentation brièvement des systèmes de conversion d'énergie PV.

Le second chapitre est consacré aux notions de convertisseurs dc-dc, et ensuite des détails sur la logique floue type 02.

Le troisième chapitre est consacré aux différentes simulations telles que tester sous les conditions STC, tester sous les conditions de variation de l'irradiation en fixant la température à 25°C et tester sous les conditions de variation de la température en fixant l'irradiation à 1000W/m² et tester sous les conditions de variation de l'irradiation et de température en même temps.

Une fois que les résultats sont discutés dans le chapitre 03, le travail est clôturé par une conclusion générale et perspective.

Chapitre I :

Généralité sur les Systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont devenues, en 1973, sujet d'actualité lors du premier choc pétrolier. Bénéficiant de technologies plus performantes qu'autre fois, leur extension se heurte toutefois aussi bien à des piètres rendements qu'a des couts d'exploitation trop élevés et des intérêts industriels bien installés. Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelable sont issues de phénomène naturels réguliers ou constants principalement le soleil (rayonnement).

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont l'une des sources d'énergie intéressante, non seulement renouvelable, mais aussi inépuisable et non polluante. Ces caractéristiques uniques on fait de la production de l'électricité d'origine photovoltaïque.

Les systèmes PV sont constitués de modules photovoltaïques qui sont des dispositifs à semi-conducteurs qui convertissent le rayonnement solaire incident en énergie électrique. L'énergie photovoltaïque dépend fortement de l'irradiation solaire et de la température. En fonction des différents niveaux d'irradiation et de température, leur taux de production varie.

Les modules solaires photovoltaïques sont constitués de cellules photosensibles reliées entre elles. Chaque cellule convertit les rayons provenant du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les modules photovoltaïques ont une caractéristique électrique spécifique qui est donnée par le fabricant sous forme de courbes. Ces dernières représentent généralement l'évolution du courant et de la puissance par rapport à la tension du module. La caractéristique électrique de ce dernier est de nature non linéaire et possède un point particulier appelé Point de Puissance Maximale (en anglais "Maximum Power Point" MPP). Ce point est le point de fonctionnement optimal pour lequel le module opère à sa puissance maximale [1].

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous allons brièvement décrire les cellules solaires et le principe de la conversion photovoltaïque. La modélisation du module photovoltaïque ainsi que les différentes caractéristiques de celle-ci seront détaillées.

I.2 L'énergie solaire

On résume brièvement les avantages et les inconvénients de l'énergie propre.

L'énergie éolienne, l'énergie solaire et d'autres sources renouvelables, même si elles nécessitent un effort d'investissement initial, présentent des avantages évidents et indéniables :

- Représentent une source d'énergie illimitée et inépuisable, car elle se renouvelle en très brefs cycles comparés à ceux des combustibles d'origine fossile ;
- Elles permettent de réduire l'impact environnemental, grâce à la production l'énergie propre (l'intérêt pour cet aspect est également démontré par l'intérêt croissant porté sur les véhicules électriques) ;
- Garantissent une stabilité de la fourniture en énergie, en couvrant les pics de besoins énergétiques et en réduisant la dépendance à l'égard des fournisseurs d'énergie étrangers ;
- Contribuent à contenir les coûts de l'énergie en stabilisant les prix d'achat de l'énergie et en favorisant ainsi le développement économique, avec des retombées positives sur l'emploi et l'industrie. Au cours de la dernière décennie environ, les capacités mondiales installées de l'énergie PV, des éoliennes et d'autres EnR ont augmenté. La Figure 1 montre l'évolution des capacités mondiales installées en PV, éoliennes et autres EnR de 2016 à 2021 [2].

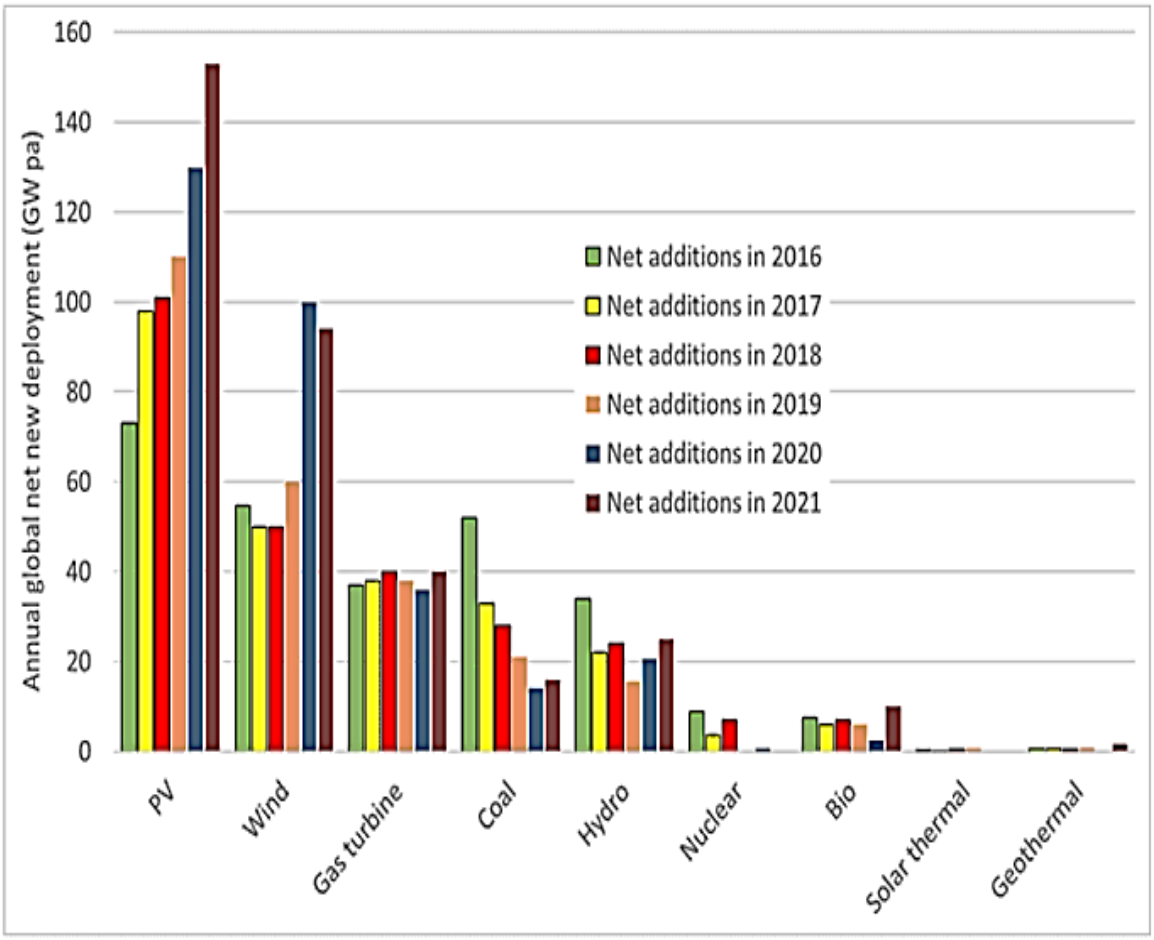


Figure I.1 Ajouts annuels de capacité de production d'énergie renouvelable, par technologie, de 2016 à 2021, d'après PV magazine international.

I.2.1 Définition

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carre repartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet a l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [3]. Il existe différents types d'énergies solaires [4] :

a. L'énergie passive :

Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, l'éclairage naturel et la climatisation des locaux.

b. L'énergie solaire thermique :

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique (chaleur).

c. L'énergie thermodynamique :

Cette énergie est l'une des modes de valorisation du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température qui va produire de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée.

d. L'énergie photovoltaïque :

Énergie solaire photovoltaïque Désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron. La technique photovoltaïque malgré sa complexité est aussi en très forte croissance.

Dans notre travail, nous nous intéressons particulièrement à l'énergie solaire photovoltaïque.

I.2.2 Potentiel solaire dans le monde :

Le potentiel de production de l'électricité à partir des convertisseurs à effet photovoltaïque dépend essentiellement de la région où ces derniers sont installés. Plus précisément, le potentiel de production dépend de l'irradiation solaire moyenne comme le montre la figure I.2.

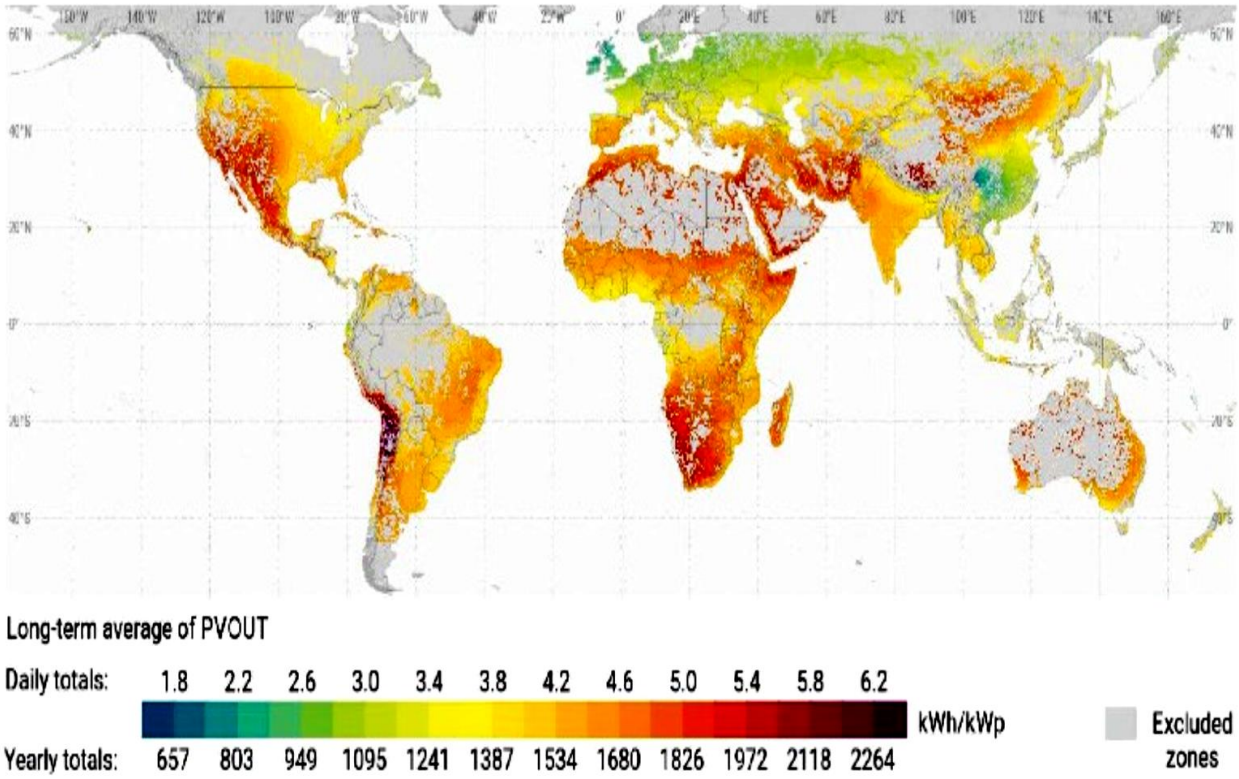


Figure I.2 Carte de l'irradiation solaire moyenne du monde
Tirée de The Word Bank (2021)

Les chiffres de la carte présentés dans la figure I.2 montrent que l'énergie solaire fournit un grand potentiel de production. Cependant, le meilleur rendement de conversion de la plupart des cellules solaires disponibles dans le commerce est de l'ordre de 10 à 20 %. Bien que les récentes percées dans la technologie des cellules solaires montrent une amélioration significative, le fait que l'efficacité maximale des cellules solaires se situe toujours dans la gamme des moins de 20 % montre qu'il y a une énorme marge d'amélioration [16].

I.2.3 Potentiel solaire en Algérie :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m2 est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m2/an au nord et 2263kwh/m2/an au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [5].

Productible CSP : estimé à 169 440 TWh/an,
Productible PV : estimé à 14 TWh/an.

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m²/an)	1700	1900	2650

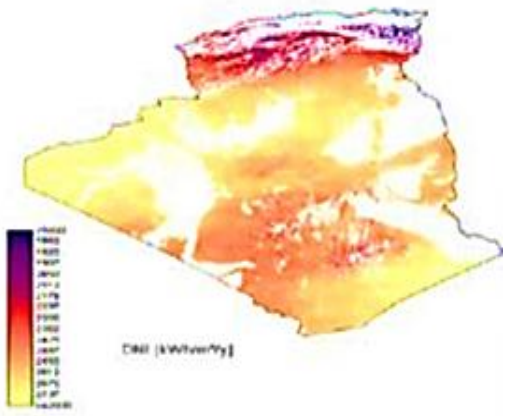


Tableau I.1 Potentiel solaire en Algérie [17].

Cette énergie est une source d'énergie non polluante qui répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture. La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030 [5].

I.3 Cellule photovoltaïque

I.3.1 Définition :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère une tension électrique ; cet effet est appelé photovoltaïque. Ces cellules utilisent les semi-conducteurs (une jonction P-N au silicium le plus souvent) pour obtenir directement de l'électricité en courant continu à partir des rayons solaires. La tension générée peut varier entre 0,3 V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et de son vieillissement [6]. La Figure I.3 illustre la structure d'une cellule photovoltaïque.

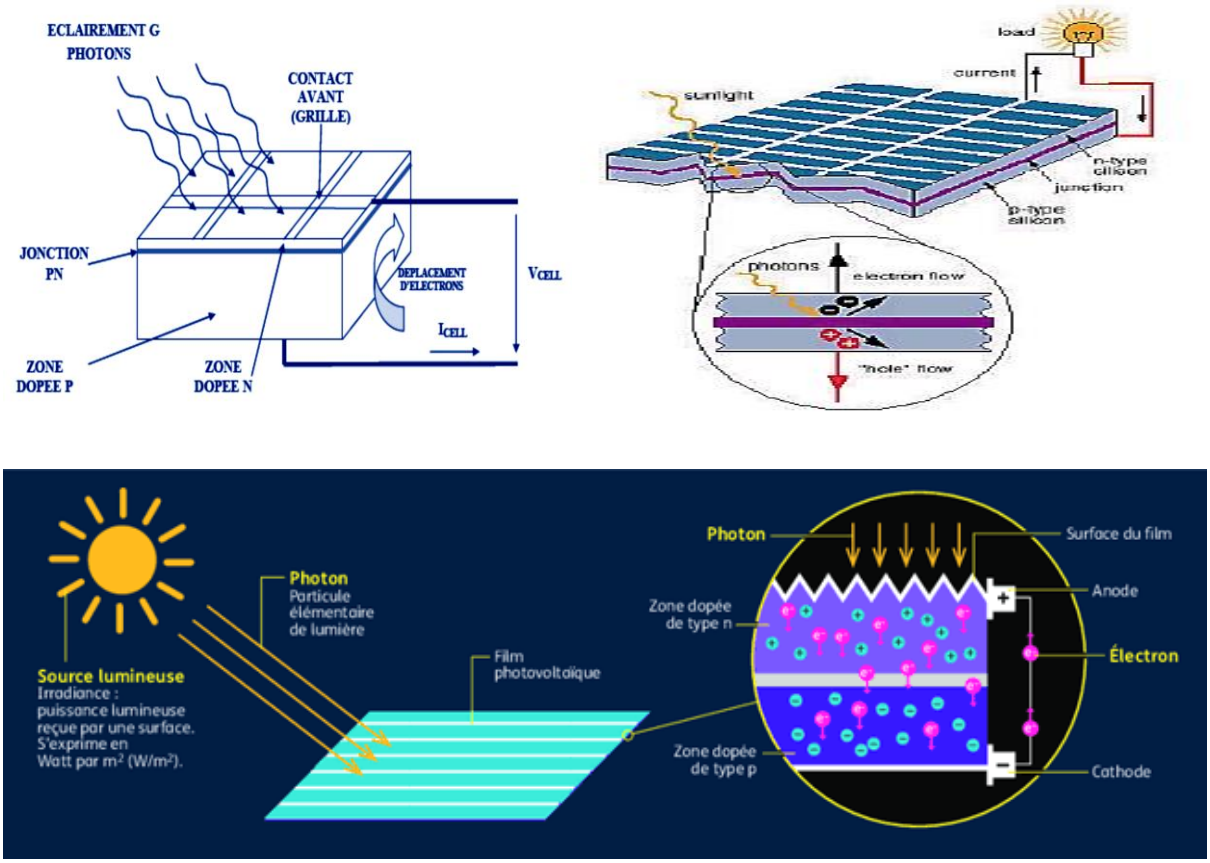


Figure I.3 Effet photovoltaïque à l'échelle de la cellule [6] [7].

I.3.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Chaque cellule ou module photovoltaïque a ses propres caractéristiques de fonctionnement et est représentée par les courbes caractéristiques non linéaires I(V) et P(V). Elles présentent plusieurs paramètres importants [6].

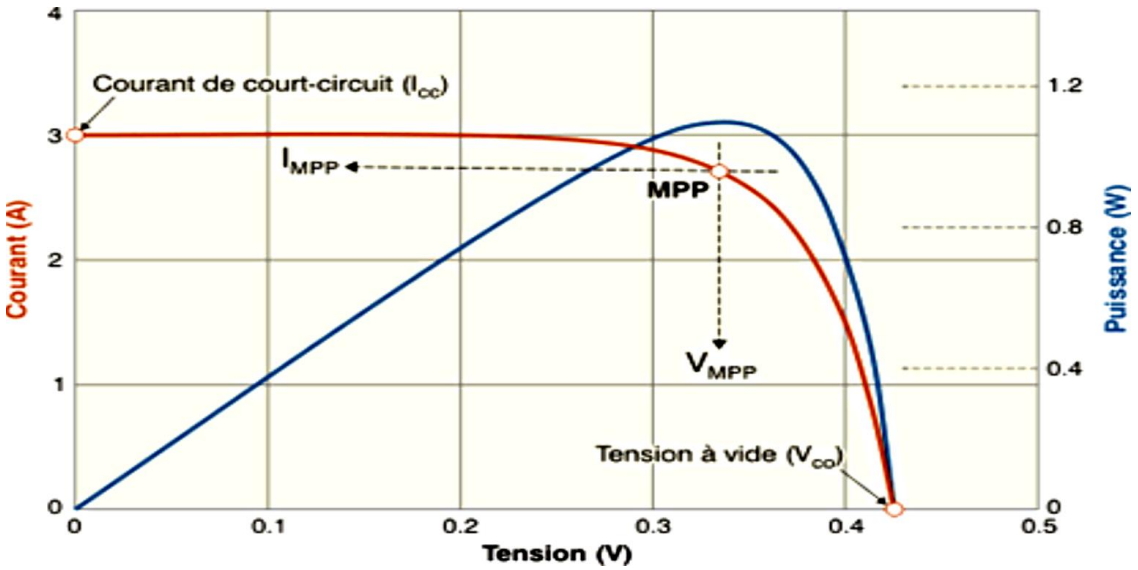


Figure I.4 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [6].

Le courant de court-circuit Icc :

Il correspond au courant maximal généré par la cellule. Il est produit dans des conditions de court-circuit (Vc=0). Icc est directement proportionnel à l'éclairement à la température ambiante. Il varie également en fonction de la surface de la cellule. On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule.

La tension à vide Voc :

Elle correspond à la tension maximale générée par la cellule. Elle est produite dans des conditions de circuit-ouvert (Ic=0). La tension en circuit-ouvert d'une cellule photovoltaïque varie de manière logarithmique avec l'éclairement et baisse avec l'augmentation de la température [6]. On obtient sa valeur en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.

Point de puissance maximale (PPM) :

La partie intéressante de la caractéristique I(V), pour l'utilisateur, c'est celle qui génère de l'énergie. Donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert (ou la tension à vide), ni au point de court-circuit, qui ne génèrent aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension P=V.I [6]. Le point de puissance maximale est le point de fonctionnement M (VPPM, IPPM) pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale [8].

I.3.3 Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'éclairement et la température sont les deux principaux paramètres qui vont modifier les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, et en particulier la puissance fournie par la cellule photovoltaïque. Pour mieux comprendre le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, on trace ses caractéristiques I(V) et P(V) pour plusieurs valeurs d'ensoleillement et de températures [6].

a. Influence de l'éclairement E (W/m2)

Au cours d'une journée, le niveau d'éclairement d'une cellule va varier entre E=0 W/m2 et E=1000 W/m2. Il est donc important de connaître l'évolution des caractéristiques courant-tension en fonction du niveau d'éclairement.

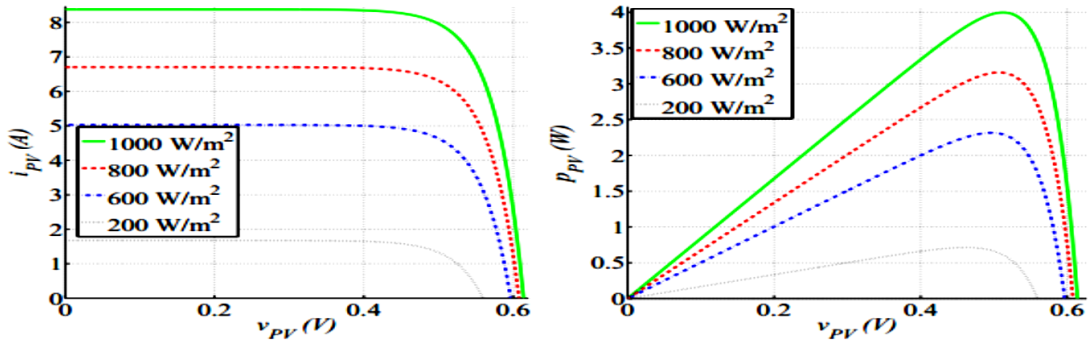


Figure I.5 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) à T=25°C d'une cellule photovoltaïque [6].

D'après la Figure I.5, les caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque varient avec l'éclairement solaire (irradiance). On a remarqué que quand l'éclairement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croit. La valeur de courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'éclairement. Quant à la tension, elle est peu sensible aux variations des niveaux d'éclairement. Les courbes I(V) se décalent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus importante. La puissance optimale de la cellule photovoltaïque est pratiquement proportionnelle à l'ensoleillement. Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension [6].

b. Influence de la température

La température est aussi un paramètre important dans le comportement des cellules photovoltaïque parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont sensibles à la température.

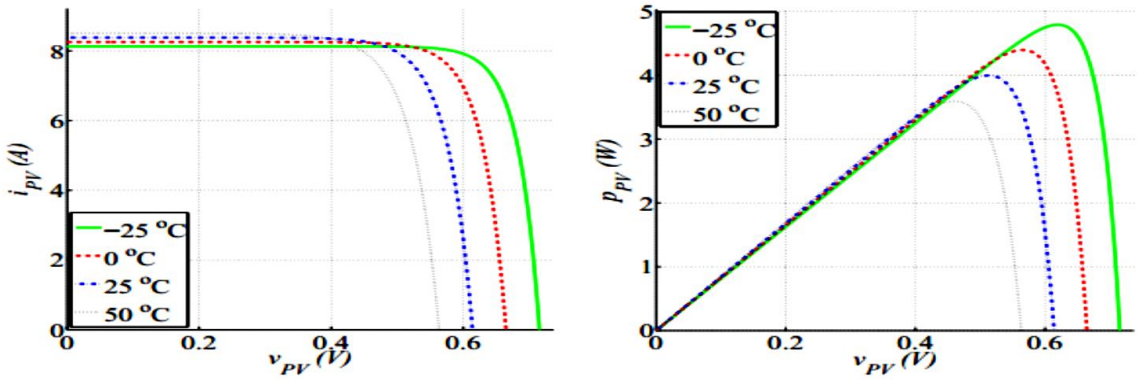


Figure I.6 Influence de la température sur les caractéristique I(V) et P(V) à E=1000 W/m2 d'une cellule photovoltaïque [6].

D'après la Figure I.6 les caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque varient aussi avec la température. On observe que la température de la cellule photovoltaïque induit un effet notable sur la tension de celle-ci. Cependant, l'effet de la température sur le courant de la cellule photovoltaïque est négligeable. Lorsque la température de la cellule augmente, la tension à vide et la puissance de la cellule diminuent [6].

I.3.4 L'effet photovoltaïque

L'effet PV utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Ce matériau comporte deux parties, l'une présente un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée.

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel [9].

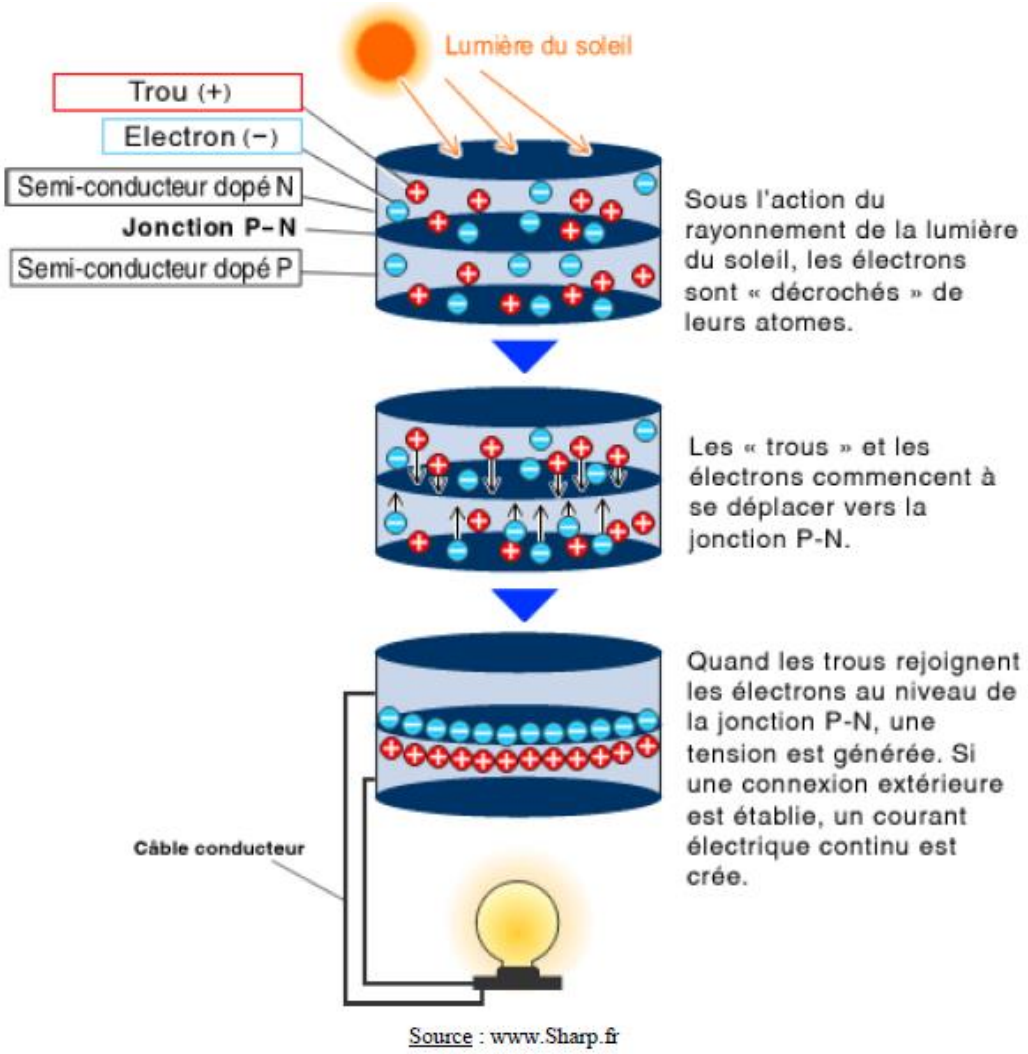


Figure I.7 Principe de l'effet photovoltaïque [10].

I.3.5 les type des cellules solaires

La plupart des cellules solaires disponibles sur le marché mondial, sont à base de silicium, soit du type mono, poly cristallin ou amorphe [9].

- **Les cellules monocristallines** :

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le cout le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée, ont une durée de vie de 25 à 30 ans.

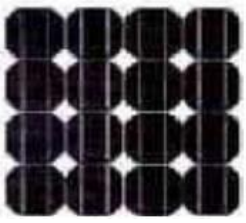


Figure I.8 Cellule monocristalline.

- **Les cellules poly cristallines :**

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible.

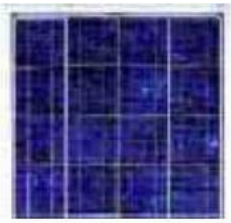


Figure I.9 Cellule poly cristalline.

- **Les cellules amorphes :**

Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres, ont une durée de vie plus courte, d'environ 15 ans.



Figure I.10 Cellules amorphes.

La famille des hybrides présentée sur l'illustration ci-dessous rassemble les cellules mettant en présence des technologies de natures différentes pour atteindre des rendements optimises.

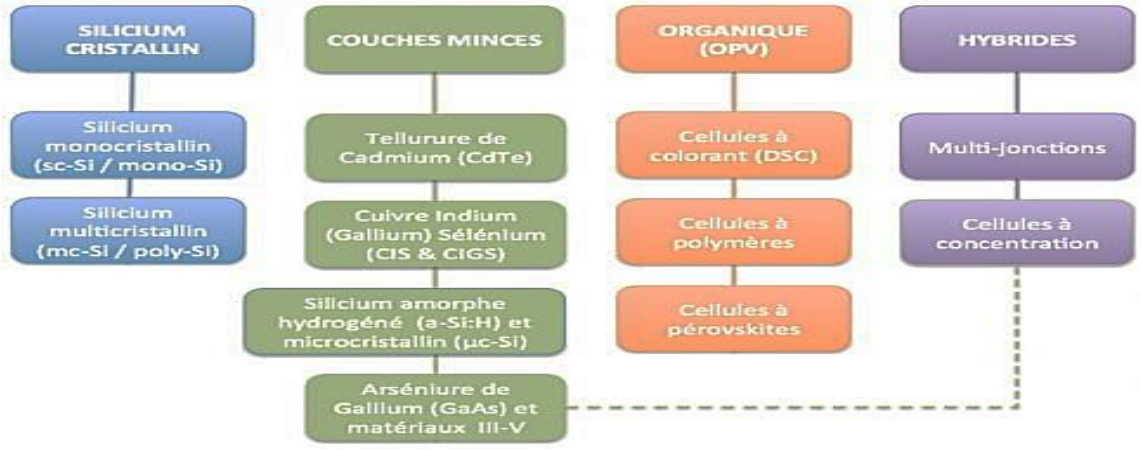


Figure I.11 Les technologies de la cellule photovoltaïque.

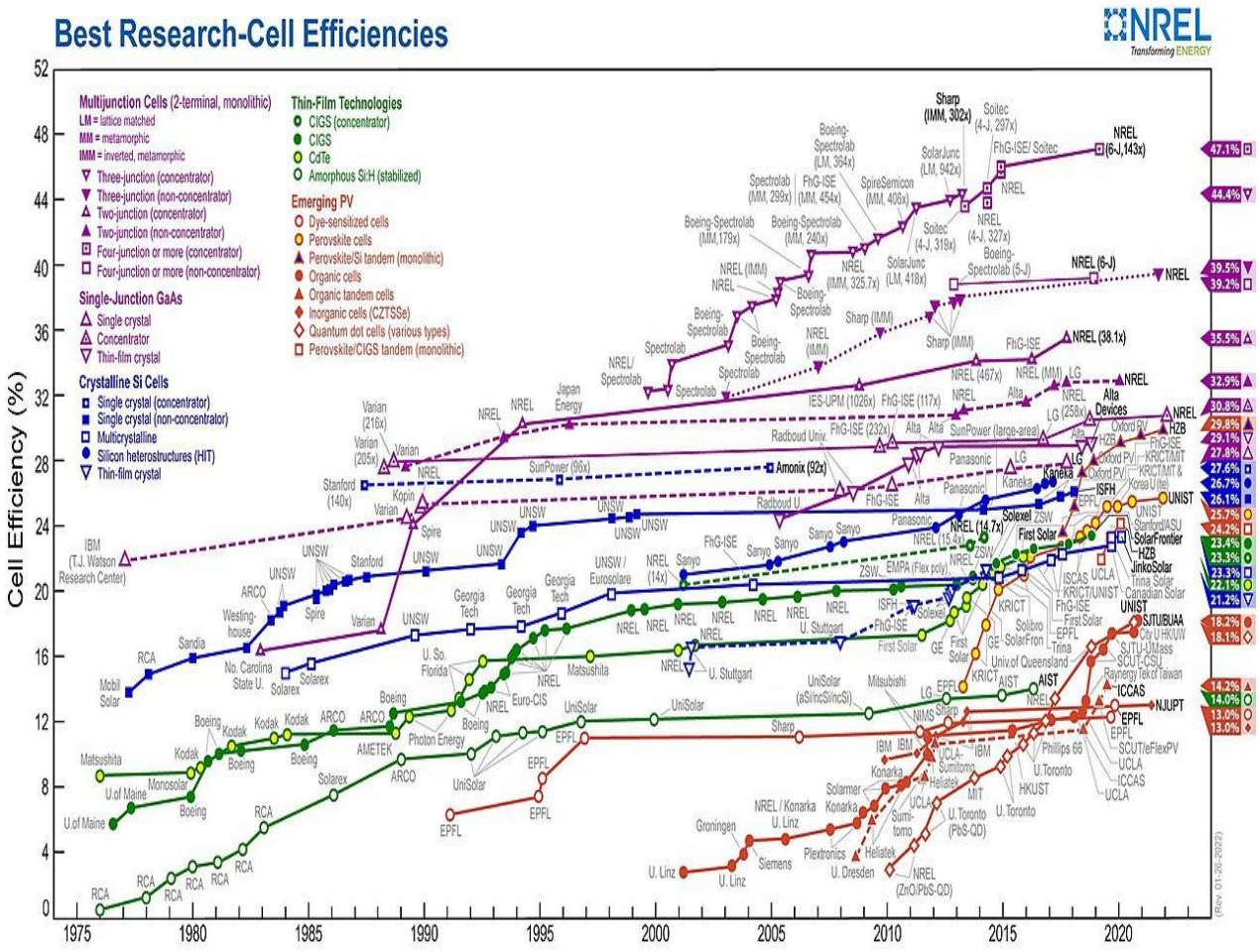


Figure I.12 les rendements de différentes technologies de cellules photovoltaïques mesurées en laboratoire depuis 1976 a 2023 d'après les données du NREL.

I.3.6 Association des cellules PV

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, etc...) peuvent en dommages les cellules de façon Permanente. [12]

a. Association en série :

Une association de (Ns) cellule en série figure permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (Ns) cellules [12].

$$Vsco=Ns\times Vco \quad \text{(I.1)}$$

$$Icc=Ic \quad \text{(I.2)}$$

Vsco : la somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

Ic : courant de court-circuit de Ns cellules en série

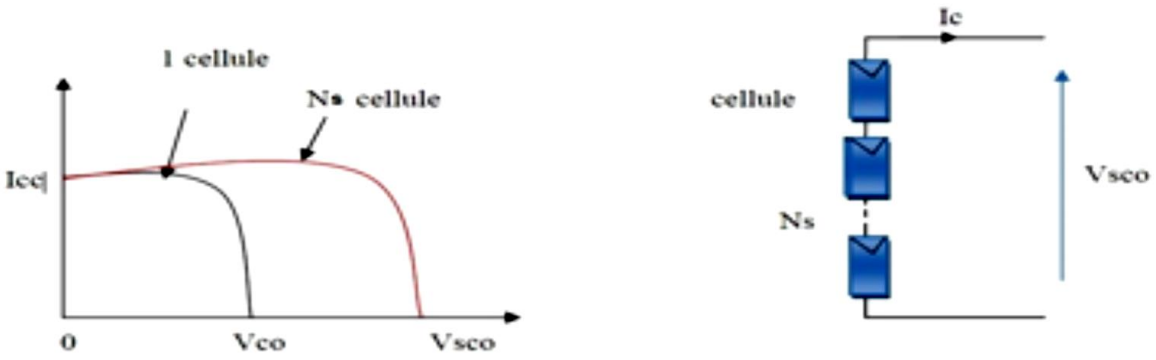


Figure I.13 Association en série [12].

b. Association en parallèle :

Une association parallèle de (NP) cellule figure(I.8) est possible et permet d'accroitre 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. [12]

$$Ipcc=Np\times Icc \quad \text{(I.3)}$$

$$Vpco=Vco \quad \text{(I.4)}$$

Ipco: La somme des courants de cout circuit de (*Np*) cellule en parallèle,

Vpco: Tension du circuit ouvert de (*Np*) cellules en parallèle.

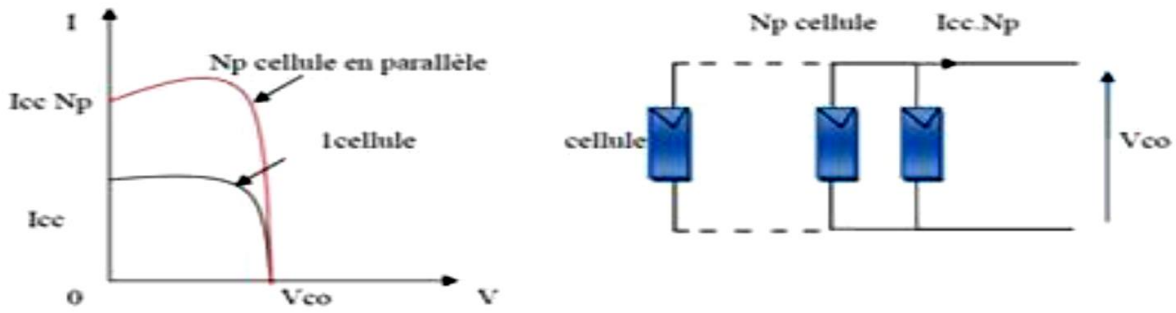


Figure I.14 Association en parallèle [12].

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de Ns modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque. [12]

I.4 Module photovoltaïque

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale produite par une cellule est très faible pour les applications électriques. Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un module ou générateur photovoltaïque (GPV) aux caractéristiques souhaitées [6].

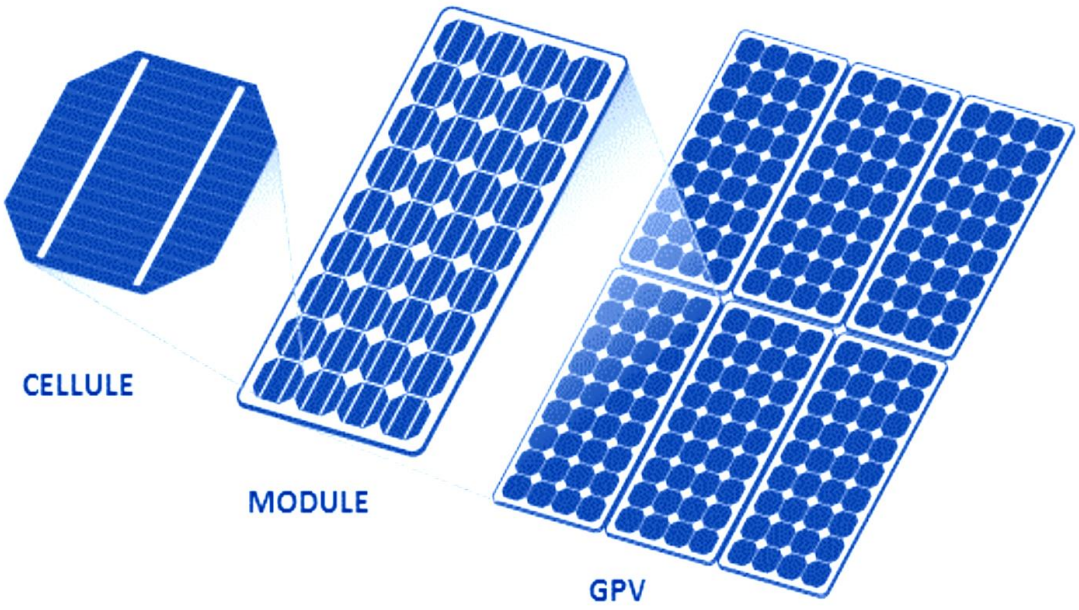


Figure I.15 Composants d'un GPV.

I.4.1 Association de module photovoltaïque

a. Association en série :

Dans une association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules. Les équations (I.5) et (I.6) résument les caractéristiques électriques d'une association en série de ns cellules :

$$V_{CO,n_S} = V_{CO}.n_S \qquad (I.5)$$

$$I_{CC,n_S} = I_{CC} \qquad (I.6)$$

Où *Icc* est le courant court-circuit et *Vco* la tension de circuit ouvert [6].

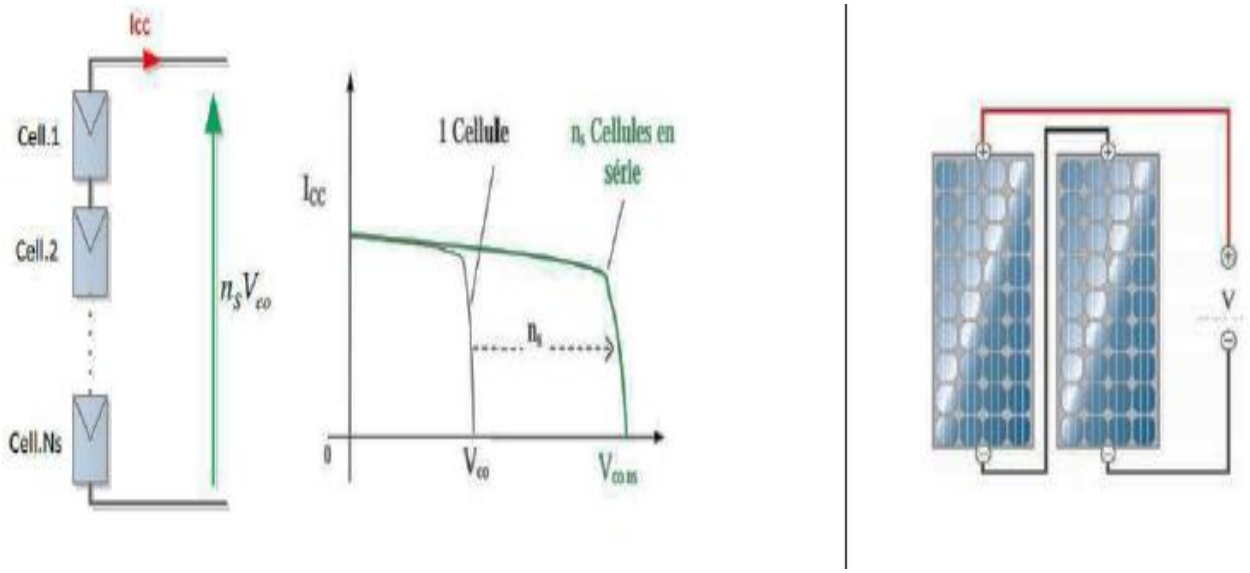


Figure I.16 Influence de l'association des cellules en série sur la caractéristique d'un module photovoltaïque [6].

b. Association en parallèle :

Dans une association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules. Les équations (I.7) et (I.8) résument les caractéristiques électriques d'une association en parallèle de cellules :

$$I_{CC,n_P} = I_{CC}.n_P \qquad (I.7)$$

$$V_{CO,n_P} = V_{CO} \qquad (I.8)$$

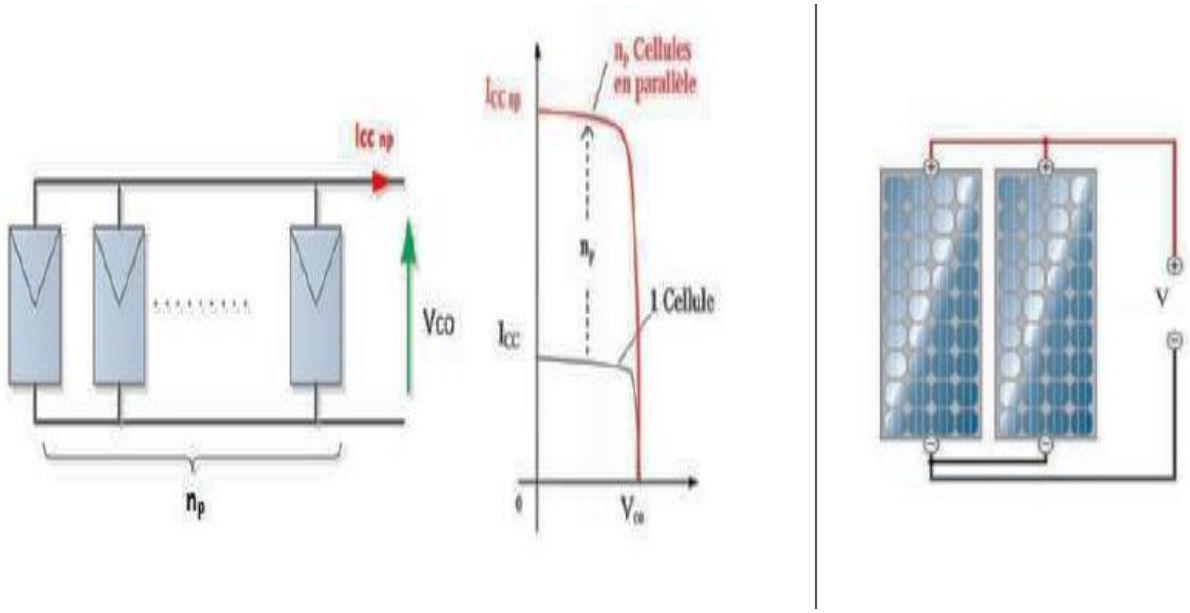


Figure I.17 Influence de l'association des cellules en parallèle sur la caractéristique d'un module photovoltaïque [6].

c. Association en mixte (série-parallèle) :

Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des x (cellules x cellules). La caractéristique d'un générateur constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule et que l'ensoleillement et la température soient uniformes [4]. La Figure 1.12 présente la caractéristique d'un module et d'un générateur composé de modules en parallèle et de modules en série. Comme pour la cellule élémentaire, les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque dépendent de la température et de l'ensoleillement. Les équations (I.9) et (I.10) résument les caractéristiques électriques d'une association n_S x n_P (cellules x cellules) [6] :

$$I_{CC} = \sum_{n_P} I_{CCi} \qquad (I.9)$$

$$V_{CO} = \sum_{n_S} V_{COi} \qquad (I.10)$$

Les modules commercialisés sont généralement composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications produisant une tension de 12V.

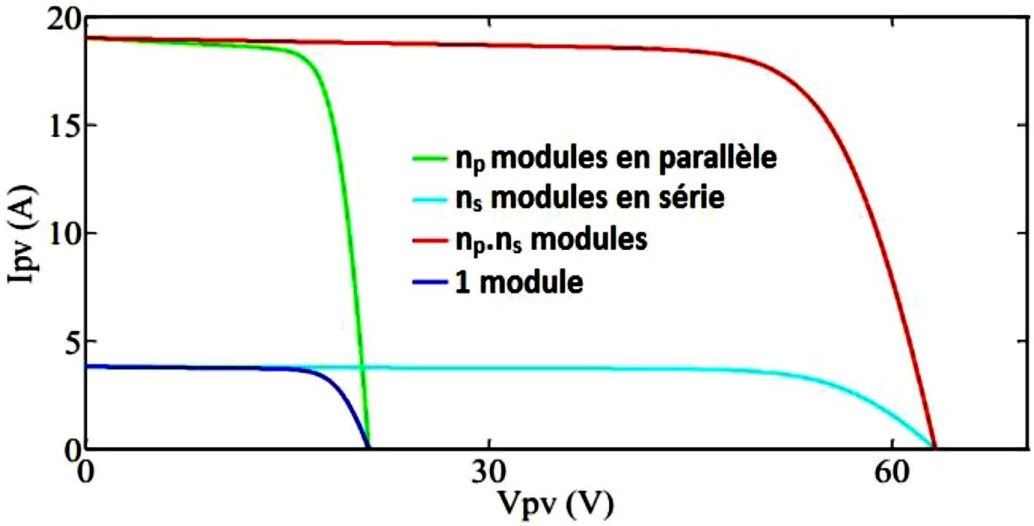


Figure I.18 Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules photovoltaïques (PV) en parallèle ou série [13].

I.4.2 Assemblage des modules PV :

L'assemblage des modules PV est une étape primordiale dans la conception de système PV car elle est conditionnée par un ensemble de critères à satisfaire comme la puissance, la tension ainsi que le courant désirés. Elle dépend aussi de l'environnement dans lequel fonctionne ce système avec ses contraintes. A cet effet, plusieurs configurations ont été mise au point suivant les stratégies adoptées telles que : le câblage série-parallèle (SP), total cross tied (TCT), bridge linked (BL) et Honey comb (HC).

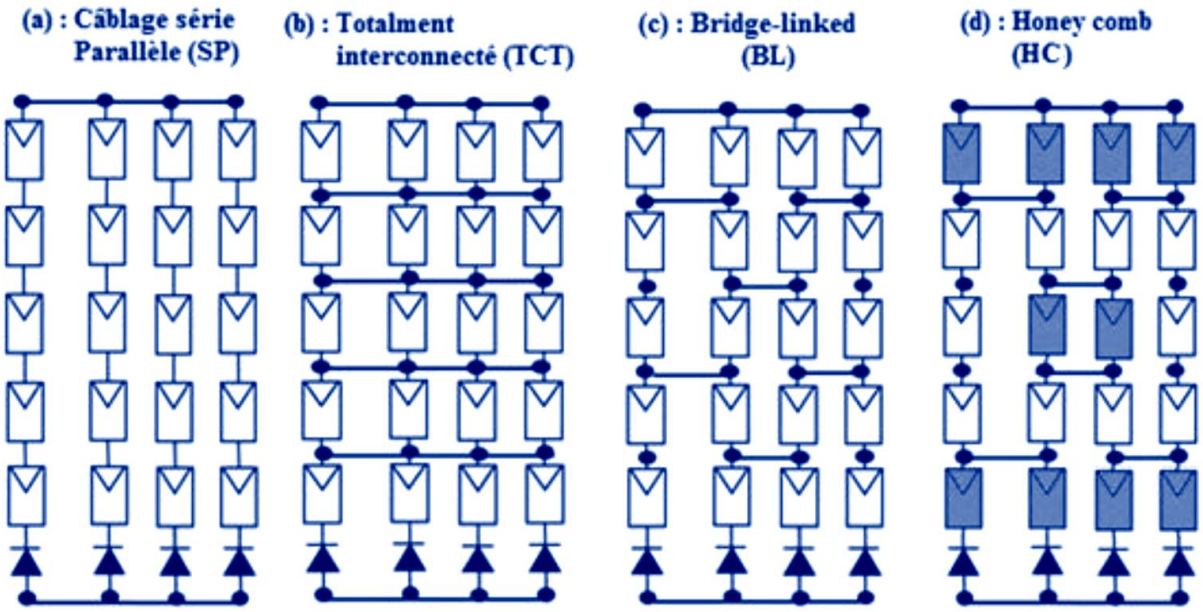


Figure I.19 Configuration de câblage des modules PV [14].

La Figure I.19 montre quelques types de ces configurations. La configuration TCT est obtenue à partir de la configuration SP et ce en connectant tous les nœuds de chaque ligne (Figure I.19(a)). Dans la configuration TCT (la figure I.19(b)), les tensions de tous les nœuds sont égales ainsi que la somme des courants dans les différentes jonctions sont égales. Selon la Figure I.19(c), la configuration BL est basée sur la connexion de chaque quatre modules PV sous forme d'un pont redresseur (bridge rectifier) dans lequel deux modules sont connectés en série, puis en parallèle. La configuration HC est une amélioration de la configuration du BL. D'après la Figure I.13(d), la configuration HC est inspirée de la forme hexagonale des cellules de la ruche d'abeille. Les modules PV en bleu sont en parallèle et les autres blocs désignent les modules PV qui sont seuls [14].

I.4.3 Protection des modules photovoltaïque :

Pour garantir la durée de vie d'une installation photovoltaïque, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules afin d'éviter des pannes liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèle. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés.

En effet, comme les cellules sont connectées en série, elles doivent toutes transporter le même courant. Quand il y a une cellule "masquée", l'intensité diminue, la tension aux bornes de cette cellule augmente, d'où l'apparition d'une surcharge qui peut entraîner leur destruction. Une telle cellule est appelée « Hot-spots ». Pour éviter ce problème, on utilise des diodes «by-pass». Ils peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. Les modules aujourd'hui commercialisés comprennent généralement des diodes de protection situées en parallèle des différentes cellules en série (« strings ») qui les composent [6].

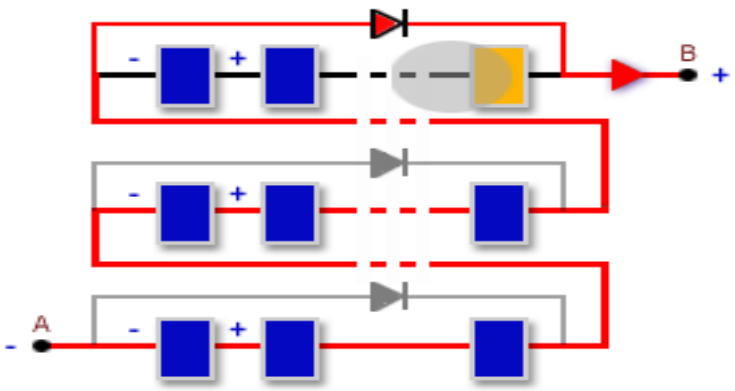


Figure I.20 Diodes by-pass [6].

La diode anti-retour est mise en série avec chaque branche d'un générateur photovoltaïque. Elle empêche un courant négatif dans les cellules photovoltaïques. 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 .

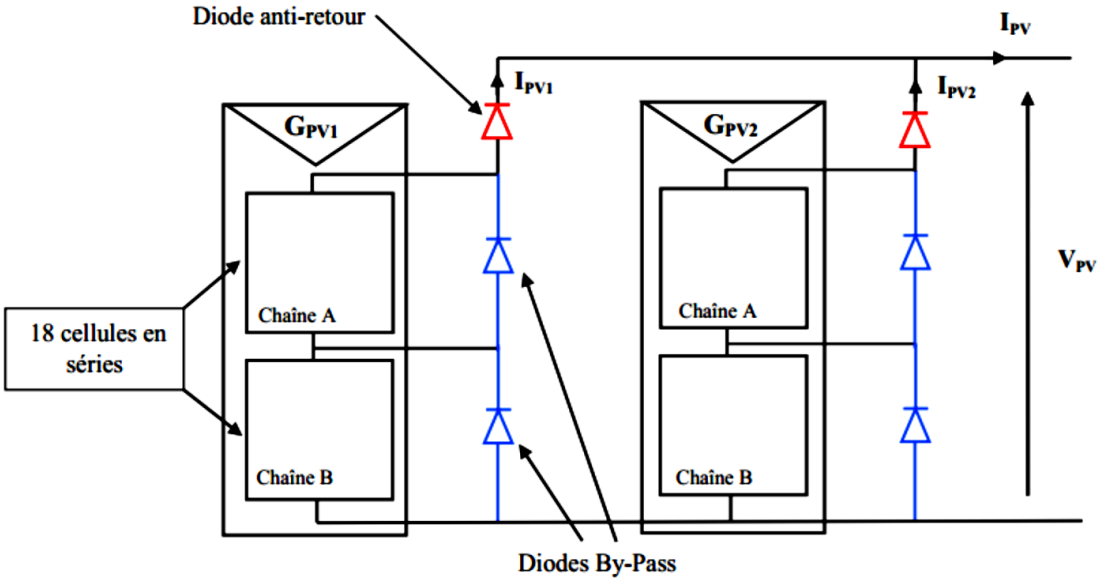


Figure I.21 Exemple d'association sécurité de deux modules photovoltaïques en parallèle avec leurs diodes de protection [13].

I.5 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Le générateur est un ensemble des modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité du courant à la sortie du générateur. Ces derniers sont interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel [15].

L'expression du courant total d'un GPV peut s'exprimer par [15] :

$$\boldsymbol{I_{GPV}} = N_p \left[I_{ph} - I_S \left(e^{\left(\frac{V_{GPV}}{N_S} + R_S \frac{I_{GPV}}{N_p}\right)} \right) - \frac{\frac{V_{GPV}}{N_S} + R_S \frac{I_{GPV}}{N_p}}{R_{sh}} \right] \qquad (I.11)$$

Et le schéma de modèle d'un GPV donné par la figue (I.22) :

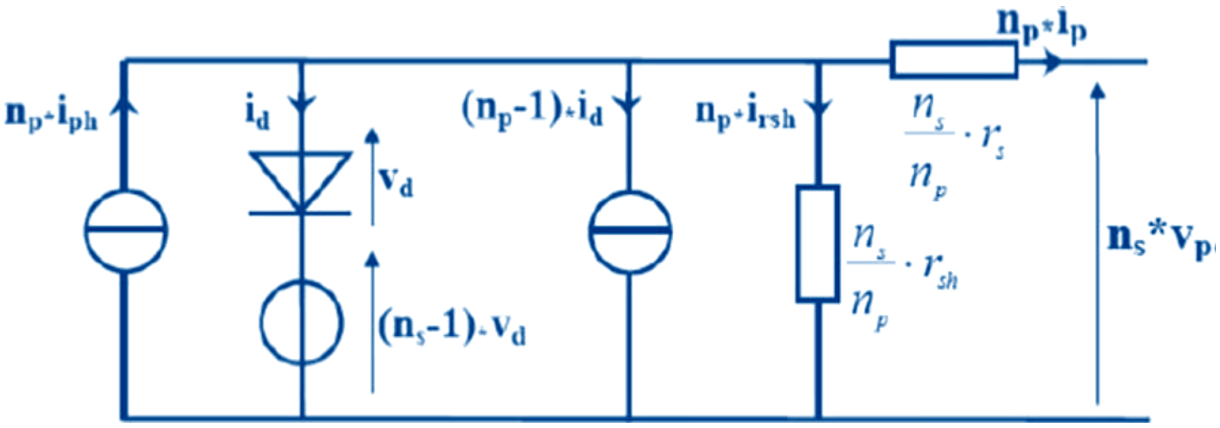


Figure I.22 Schéma électrique équivalent d'un générateur PV [15].

I.6 Les type des systèmes photovoltaïques

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue trois types d'installations :

- non autonomes ou « grid connected » i.e. rattachées au réseau de distribution électrique. Dans Les systèmes reliés aux réseaux, les consommateurs standards de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur).

Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau public et les demandes de puissance qui existent la capacité de production du générateur sont attachées sur le réseau.

- Autonomes ou « stand-alone », qui sont le propose de cette étude, ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système est-elle est assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments. [7]

- hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont

souvent utilisés dans les régions isolées. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif [4].

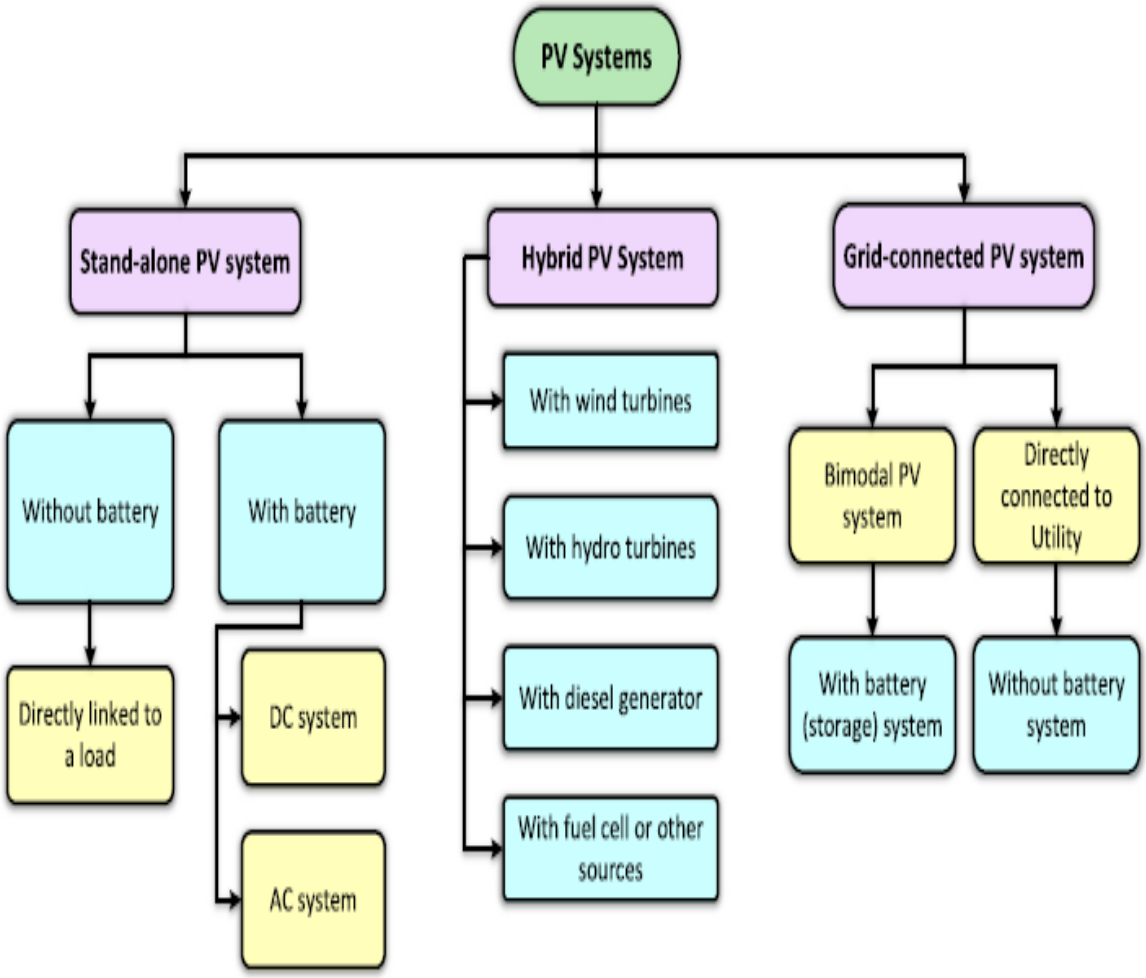


Figure I.23 les types des systèmes photovoltaïque [7].

I.7 Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque

a. Les avantages :

- Un GPV est une source renouvelable qui prend sa matière primaire du soleil et ses rayonnements.
- Il a une grande fiabilité, avec un nombre limités des pièces auxiliaire mobiles.
- Un taux de pollution nulle, sachant que les panneaux solaire transforment l'énergie solaire en énergie électrique sans aucune pollution.
- Il ne nécessite pas un grand entretien, ce qui nous donne un coût relativement faible.
- Son caractère modulaire permet un montage simple et flexible.

b. Les inconvénients :

- Un GP est une source renouvelable qui dépend des conditions climatiques météorologiques.
- Un GP est souvent complémenté par un dispositif de stockage, donc une augmentation du coût.
- Pour une utilisation autonome, ces systèmes nécessite par fois un champ des panneaux énorme présente une grande taille d'installation [7].

I.8 Conclusion

Le contenu de ce chapitre a été consacré aux notions de base du développement de l'énergie solaire. On a mis en évidence le principe de fonctionnement de cette technologie, présenter ces composants et nous avons aussi cité les avantages et inconvénients de ce système.

Nous nous sommes intéressé et détaillé le système de conversion photovoltaïque autonome car cette méthode permet d'exploiter l'énergie du soleil à divers fins, nous avons aussi essayé de détailler et d'identifier les majors parties constituantes ce type d'installation tout en expliquant vaguement son processus de production.

Nous allons à présent entamer dans le chapitre suivant, la modélisation des éléments principaux figurants dans une installation photovoltaïque [4].

Chapitre II :
Le Convertisseur DC-DC
Et la commande MPPT
Logique Floue type-2

II.1 Introduction :

Dans un souci de protection du matériel mais aussi d'optimisation de l'apport énergétique, la connexion directe d'un générateur photovoltaïque et la charge n'est pas envisageable, présentant plusieurs inconvénients et n'offre aucun type de limitation ou de réglage de la tension. Généralement on parle d'un écart important entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge.

L'introduction d'une interface s'impose en assurant à travers une action de contrôle, pour que la puissance fournie par le générateur soit plus proche de *P*max Disponible. Cet étage d'adaptation utilisé est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC) commandé afin d'effectuer soit survolteur ou dévolteur en fonction de la charge à alimenter.

Dans ce chapitre nous allons présenter le convertisseur DC/DC (boost) et l'algorithme de la commande MPPT la technique que nous avons choisie [23].

II.2 Connexion directe source-charge

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un générateur photovoltaïque et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et le très faible degré de fiabilité, dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. La figure (II.1) montre ce cas de connexion.

L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la charge et le transfert de puissance maximale disponible aux bornes du générateur photovoltaïque vers la charge n'est pas non plus garanti [31].

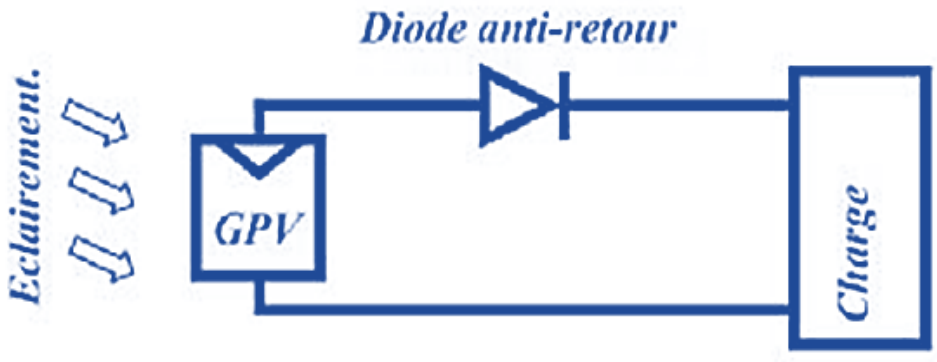


Figure II.1 : Connexion directe source-charge.

Trois types de charges typiques existent : une charge purement résistive, une charge de type source de tension et une charge de type source de courant. Sur la figure (II.2), nous avons représenté les caractéristiques I(V) et P(V) d'un GPV ainsi que les caractéristiques I(V) des trois types de charges. Tout d'abord, nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale Pmax pour un courant optimal Iopt et une tension optimale Vopt, point nommé PPM. Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques I(V) du générateur et celles des trois types de charges :

1) point A pour une charge résistive,

2) point B pour une charge de type source de tension,

3) point C pour une charge en source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement Pa' et Pc', comme l'illustre la figure (II.2) puissance maximale disponible Pmax aux bornes du générateur PV implique des pertes de production énergétiques importantes.

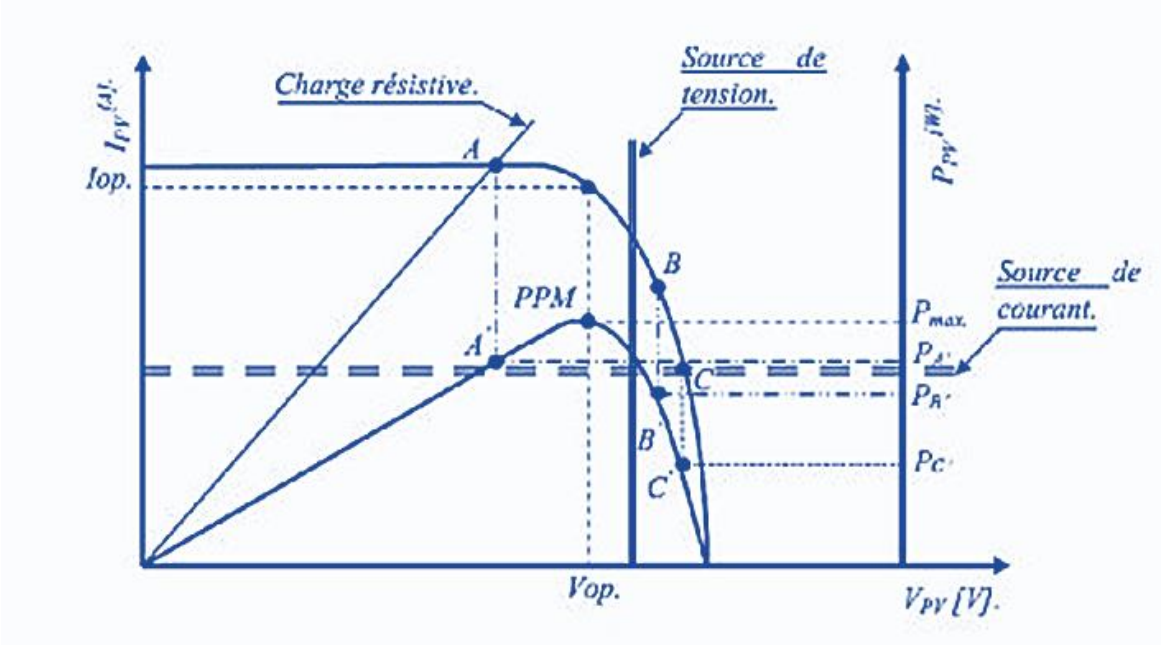


Figure II.2 Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion.

Nous pouvons trouver donc et celle réellement transférée à la charge en mode de connexion directe.

II.3 Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge dans la figure (II.3). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible [13].

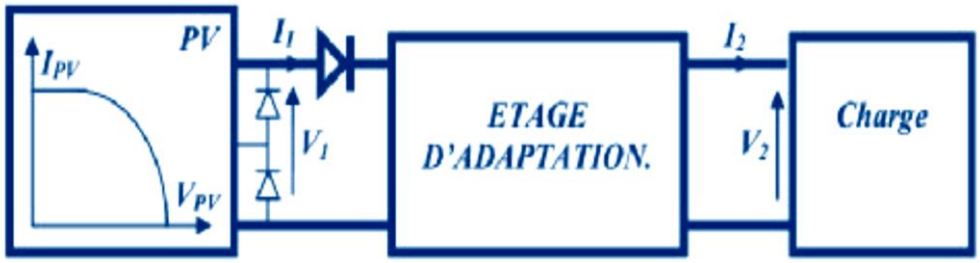


Figure II.3 Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale notée : Pmax (Vopt × Iopt) où Vopt et Iopt représentent respectivement les tensions et les courants optimaux du générateur photovoltaïque, pour une courbe I-V donnée. Le rôle du convertisseur DC-DC est de faire fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quelques soient l'éclairement et la température pour délivrer cette puissance à l'utilisation.

- Il y a deux parties dans l'étage d'adaptation partie de puissance (convertisseur dc/dc) et partie de commande (MPPT).

II.4 Partie électronique de puissance

II.4.1 Convertisseurs DC/DC :

Le dispositif utilisé comme étage d'adaptation dans notre recherche est un convertisseur de puissance DC/DC, qui connecte une source de tension continue à une charge. Il est considéré comme un transformateur d'une grandeur électrique continue. Les performances du convertisseur DC/DC lui permettent de réguler la tension de sortie DC sous les variations de charge et de ligne et de réduire les harmoniques de la tension de sortie DC en dessous des niveaux tolérables. Dans ce chapitre, nous allons présenter seulement le

convertisseur élévateur qui est le convertisseur de notre système à étudier. Il existe plusieurs types de convertisseurs hacheurs [20] (Tableau II.1).

Les régulateurs de commutation appelés convertisseurs DC/DC utilisent des interrupteurs électroniques, à base de semi-conducteurs tels que : le thyristor, transistor de puissance ou l'IGBT…etc., parce qu'ils engendrent une faible perte de puissance lors de basculement d'un état à un autre. Ces convertisseurs assurent des rendements élevés de conversion d'énergie et ils peuvent fonctionner à des fréquences élevées. Les caractéristiques dynamiques des convertisseurs DC/DC s'améliorent avec l'augmentation des fréquences de fonctionnement.

Les fréquences de fonctionnement élevées permettent donc de parvenir à une réponse dynamique plus rapide aux changements rapides dans le courant de charge ou de la tension d'entrée.

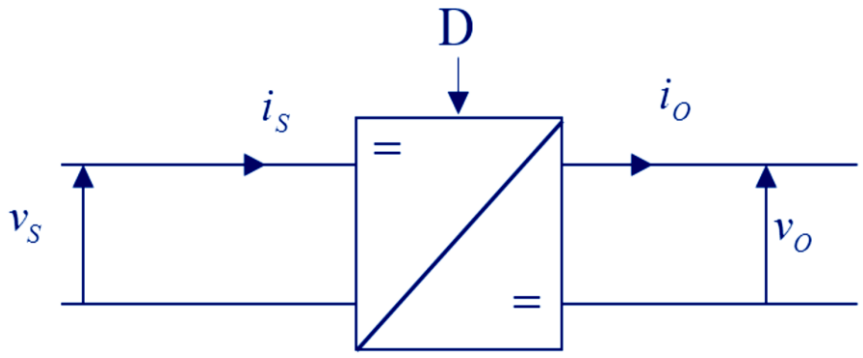


Figure II.4 Symbole d'un hacheur DC/DC.

D : Rapport cyclique.

La Figure II.4 montre le convertisseur DC/DC qui lie la source de tension continue à la charge. Il est considéré comme un transformateur de grandeurs électriques continues .Les performances du convertisseur DC/DC lui permettent de réguler la tension de sortie DC malgré les variations de charge et de ligne et de réduire les harmoniques de la tension de sortie DC au-dessous du niveau toléré [24].

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Le tableau suivant donne une idée sur la complexité de chaque type de convertisseur :

Type	Function	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Non	Faible
Fly back	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/ Elévateur	4	4	Oui	Très Forte

Tableau II.1 Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC.

II.4.2 Modes de fonctionnement du convertisseur statique

Le convertisseur peut fonctionner suivant deux modes de fonctionnements dépendant de sa capacité de stockage d'énergie, de la période de commutation et de la charge. Ces deux modes sont [17] :

a. Modes de conduction continue (MCC)

Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement. Le courant dans l'inductance ne s'annule pas sur une période de commutation.

b. Modes de conduction discontinue (MCD)

Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée totalement. Le courant dans l'inductance s'annule avant la fin d'une de commutation.

II.4.3 Le hacheur survolteur (Boost)

***a.* Définition**

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension.

b. Fonctionnement et Modélisation d'un convertisseur boost

Le convertisseur généralement utilisé dans les systèmes PVs est le convertisseur élévateur de tension (Boost), connu aussi sous le nom de « convertisseur survolteur », Son rôle typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure, son schéma de principe d'un Boost en fonctionnement est représenté par la Figure II.5 [20].

La structure classique du convertisseur boost est schématisée dans la figure (II.5). Cette structure est composée principalement d'une inductance *L*, d'un interrupteur de puissance *K* (souvent de type Metal Oxide Semi-conducteur Field Effect Transistor (*Mosfet*)) et d'une diode d. L'interrupteur est commandé par un signal via d'une modulation de largeur d'impulsion (*MLI* ou *PWM* en anglais). Cette dernière consiste à comparer le rapport cyclique *D* avec une onde de porteuse de fréquence fixe f_c (fréquence de commutation) [25].

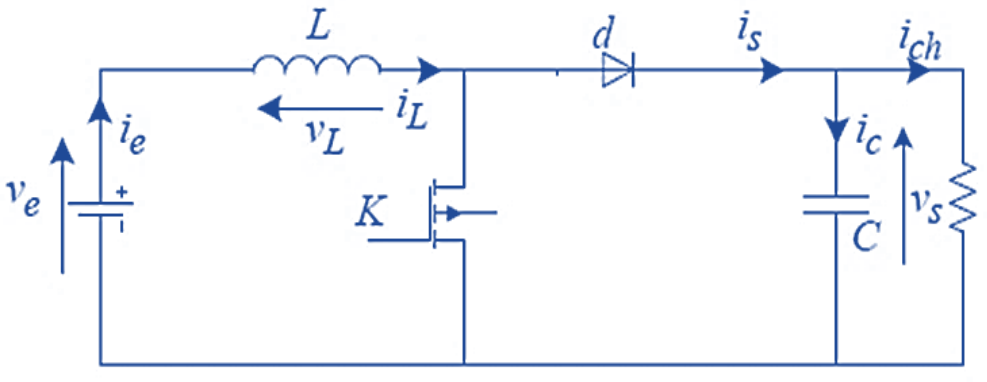


Figure II.5 Structure d'un convertisseur boost.

Selon l'allure du courant de l'inductance i_L la figure (II.6), on distingue deux modes de fonctionnement du convertisseur boost :

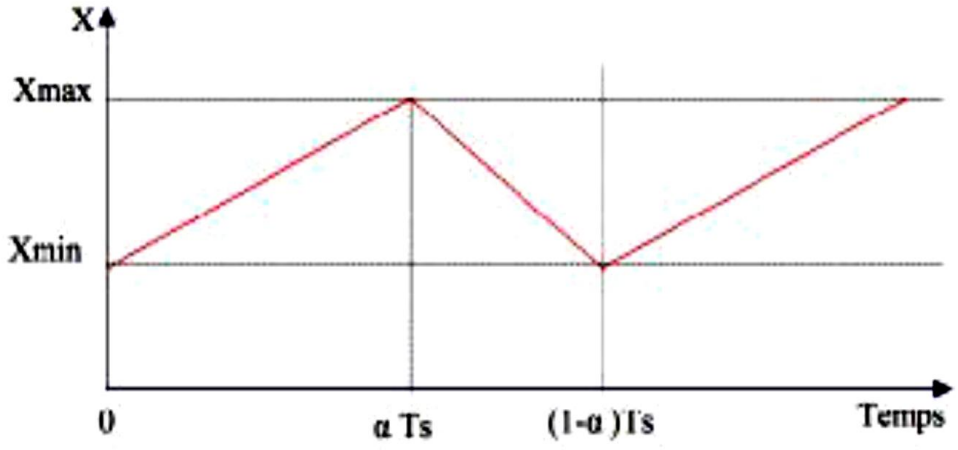


Figure II.6 Allure des variables dynamiques IL.

- Mode de conduction discontinue (MCD) : le courant de l'inductance s'annule périodiquement durant l'intervalle [*DT*, *T*], avec$T = {}^{1}/_{f_c}$.
- Mode de conduction continue (MCC) : le courant de l'inductance ne s'annule jamais durant toute la période de commutation T.

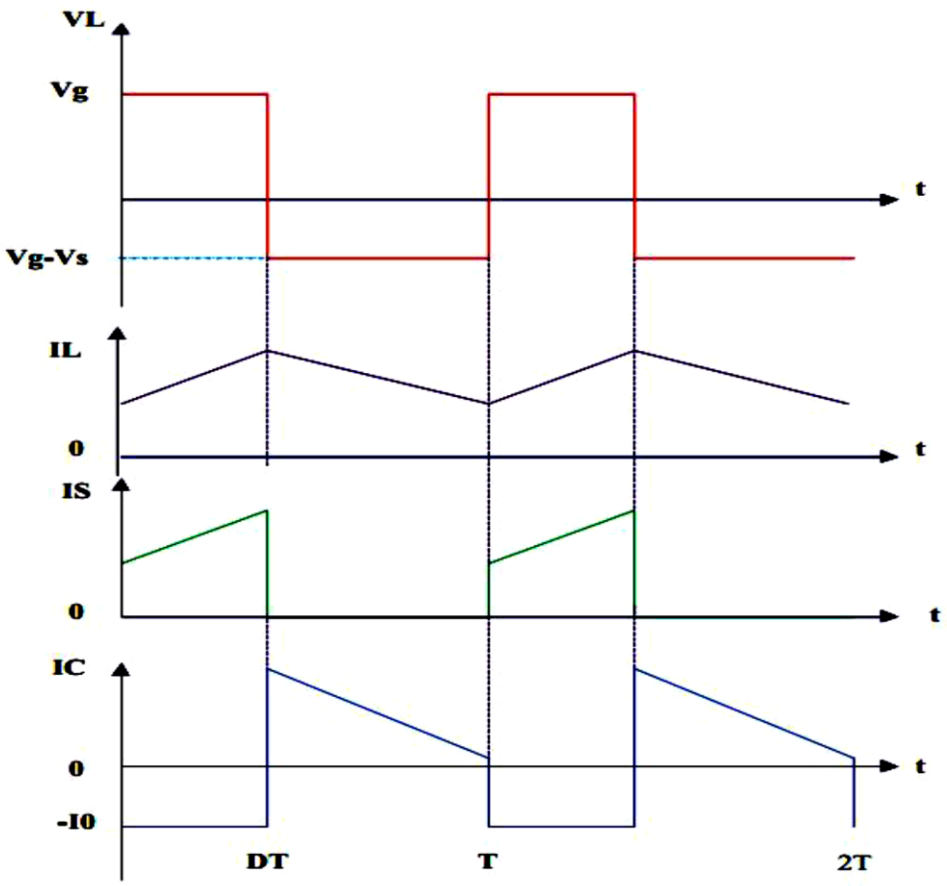


Figure II.7 Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur.

Le mode de conduction continu est caractérisé par une ondulation du courant plus faible par rapport à celle obtenue dans le cas de fonctionnement avec le mode de conduction discontinue. Pour cela, nous avons adopté le mode de conduction continu pour notre travail.

Dans le mode de conduction continue, et selon l'état de l'interrupteur de puissance *K*, il y a deux phases de fonctionnement durant chaque période de commutation :

La phase I, [0, *DT*] : lorsque l'interrupteur *K* est fermé (*K*=1) et la diode *d* est bloquée. Durant cette phase, le courant traversant l'inductance *L* augmente linéairement et par conséquent l'énergie stockée dans la bobine augmente par l'augmentation du courant la traversant.

Le condensateur C fournit l'énergie à la charge R durant cette phase. Le circuit équivalent à cette phase de fonctionnement est montré dans la figure (II.8) [26] [25].

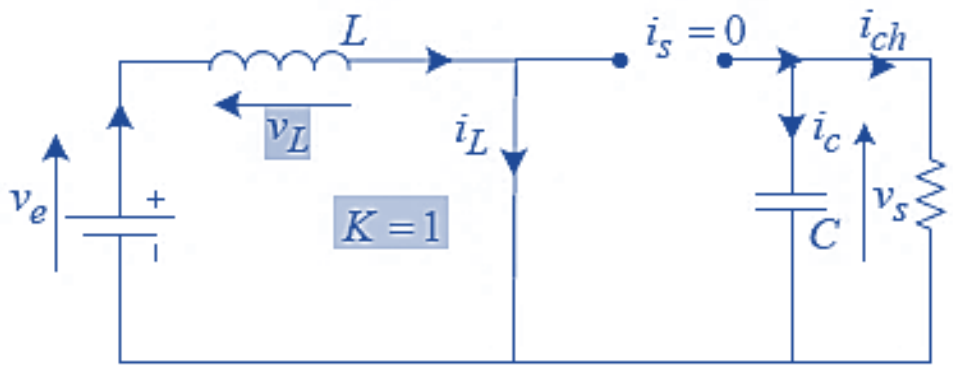


Figure II.8 Circuit équivalent du convertisseur boost classique lorsque l'interrupteur est fermé.

A partir de la figure (II.4), le système d'équations gouverne la dynamique du convertisseur dans cette phase est donné comme suit :

$$\begin{cases} L\dfrac{di_L}{dt} = v_e \\ C\dfrac{dv_s}{dt} = 0 - \dfrac{v_s}{R} \end{cases} \quad t \in [0, DT] \qquad \text{(II. 1)}$$

La phase II, [*DT*, *T*] : lorsque l'interrupteur *K* est ouvert (*K*=0) et la diode *d* est passante. Durant cette phase, l'énergie emmagasinée dans l'inductance est transférée au condensateur *C* et à la charge *R* via la diode *d*. Le circuit équivalent à cette phase de fonctionnement est illustré dans la figure (II.9) [23].

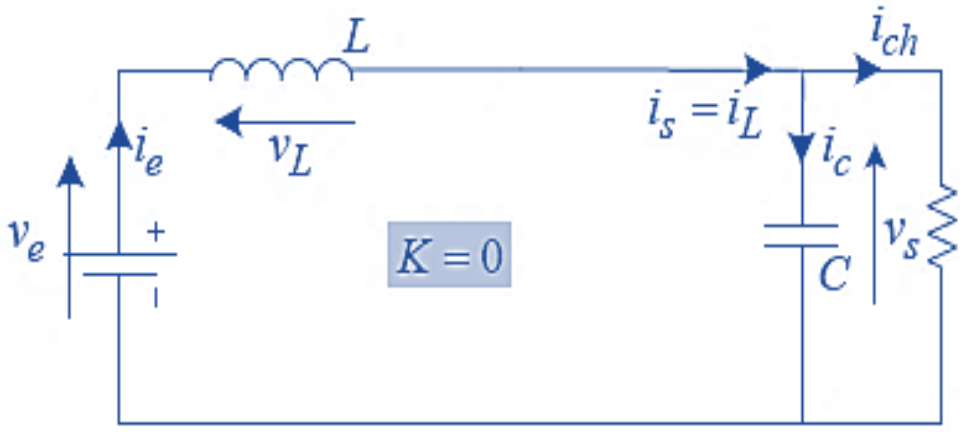


Figure II.9 : Circuit équivalent du convertisseur boost classique lorsque l'interrupteur est ouvert.

A partir de la figure (II.5) la dynamique du convertisseur boost classique dans cette phase peut être traduite par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} L\dfrac{di_L}{dt} = v_e - v_s \\ C\dfrac{dv_s}{dt} = i_s - \dfrac{v_s}{R} \end{cases} \quad t \in [DT, T] \qquad (II.2)$$

Les deux systèmes de (II.1) et (II.2) peuvent être regroupés dans un seul système d'équation qui exprime la dynamique du convertisseur dans les deux phases de fonctionnement précédentes comme suit :

$$\begin{cases} L\dfrac{di_L}{dt} = v_e - (1-u)v_s \\ C\dfrac{dv_s}{dt} = ui_s - \dfrac{v_s}{R} \end{cases} \quad t \in [0, T], u \in \{0,1\} \qquad (II.3)$$

Ou *u* représente l'état de l'interrupteur de puissance *K*, *u*=1 signifie que l'interrupteur est fermé et *u*=0 signifie que l'interrupteur est ouvert.

Si on applique la valeur moyenne (sur période de commutation) sur (II.3) on obtient l'équation suivante :

$$\begin{cases} L\dfrac{\overline{di_L}}{dt} = \bar{v}_e - (1-\bar{u})\bar{v}_s \\ C\dfrac{\overline{dv_s}}{dt} = \bar{u}i_s - \dfrac{\bar{v}_s}{R} \end{cases} \quad t \in [0, T], u \in \{0,1\} \qquad (II.4)$$

Si on néglige la fluctuation de la tension aux bornes du condensateur *C*, (II.4) peut être simplifiée à la forme suivante :

$$\begin{cases} 0 = v_e - (1-D)v_s \\ 0 = i_s D - \dfrac{v_s}{R} \end{cases} \quad t \in [0, T], \ \ D \in [0,1] \qquad (II.5)$$

Où, le rapport cyclique *D* représente la valeur moyenne de l'état de l'interrupteur *u*.

La fonction de transfert du convertisseur boost classique est déduite à partir de (II.5) comme suit :

$$v_s = \frac{v_e}{1-D} \qquad (II.6)$$

Ainsi, l'expression du courant de sortie du convertisseur i_s peut être déduite de (II.5) comme suit :

$$i_s = \frac{v_e}{D(1-D)R} \quad (II.7)$$

D'après (II.6), On constate que la tension de sortie du convertisseur dépend uniquement de la tension d'entrée et du rapport cyclique *D*. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le convertisseur est toujours élévateur de tension [27] [25].

Si on néglige les pertes dans le convertisseur (i.e.$v_s i_s = v_e i_L$), le courant d'entré i_L peut être déduit à partir de (II.6) comme suit :

$$i_L = \frac{i_s}{1-D} \quad (II.8)$$

c. Dimensionnement des composants du convertisseur (L et C)

Pour le dimensionnement des différents composants du circuit du convertisseur afin de diminuer les ondulations des courants et des tensions sans faire un surdimensionnement ce qui accroîtrait le poids et le prix des circuits, un calcul de ces composants en fonction des ondulations voulues est nécessaire. Cette remarque est très importante pour le dimensionnement de l'inductance L afin de respecter le courant admissible par l'interrupteur où dans le cas pratique les ondulations du courant I_L est plus importantes par rapport aux autres ondulations.

- En appliquant la relation $V_L = L\frac{dI_L}{dt}$ est on obtient :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \approx \frac{Vg}{L} \quad (II.9)$$

A partir de la relation (II.9), la valeur crête à crête du courant IL est :

$$I_{Lcc} = 2\Delta I_L \approx \frac{Vg}{L}\alpha Ts \quad (II.10)$$

La valeur de l'inductance L à choisir pour certaine ondulation ΔI_L est :

$$L \approx \frac{Vg}{2\Delta I_L}\alpha Ts \quad (II.11)$$

- Pour le calcul de la capacité C du condensateur on a :

$$\frac{dVo}{dt} = \frac{Ic}{C} \approx \frac{Io}{C} \quad (II.12)$$

La valeur d'ondulation crête à crête de tension de sortie est :

$$Vccc = 2\Delta Vc \approx \frac{Io}{C}\alpha Ts \quad \text{(II.13)}$$

La valeur de la capacité C est données par :

$$C = \frac{Io}{2\Delta Vc}\alpha Ts \quad \text{(II.14)}$$

II.5 Partie de commande

Cette partie présente une méthode de contrôle moderne, la logique floue. La logique floue diffère de la logique classique en ce qu'elle permet une définition partielle ou "floue" des règles de contrôle. La puissance de la logique floue vient de sa capacité à décrire un phénomène ou un processus spécifique avec des mots, puis à utiliser un petit nombre de règles pour représenter ce phénomène. La connaissance des systèmes flous est contenue dans des règles et des ensembles flous, qui contiennent des descriptions générales des propriétés du phénomène en question [20].

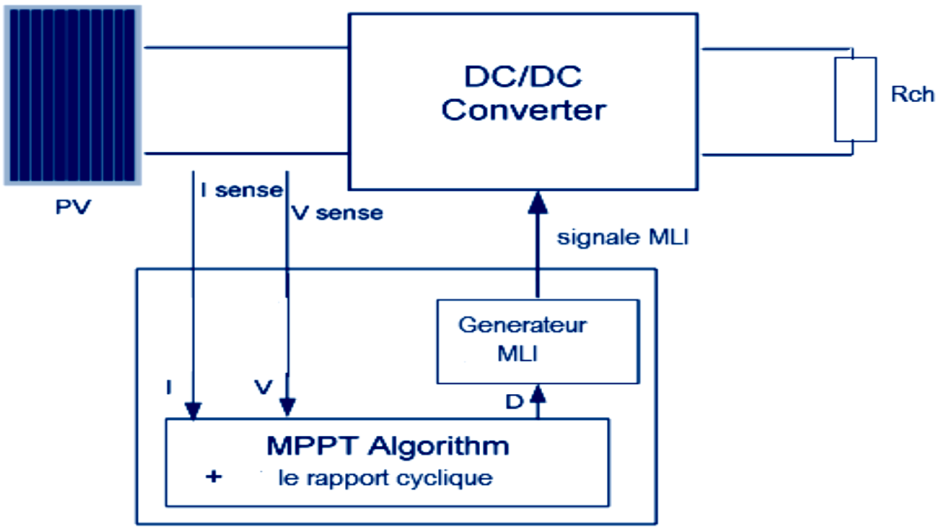


Figure II.10 Schéma de MPPT avec le contrôle direct.

II.5.1 Poursuite du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïque. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 dates de publication de la première loi de commande de ce type, adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différent entre eux par leur complexité, nombre

de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [28], à titre d'exemple :

-la commande MPPT classique : P&O (Perturber et Observer), Inc (Incrément de la Conductance), FCC (la mesure d'une fraction de courant court-circuit), FCO (la mesure d'une fraction de tension de circuit ouvert)….

-les techniques intelligentes basés sur : La logique floue (LF), réseaux de neurones….

Algorithmes MPPT	P&O	INC	FCO	FCC	LF
Type de Capteurs utilisés	1Tension 1 courant	1tension 1courant	1tension	1courant	1 courant
Identification des paramètres du panneau PV	Non nécessaire	Non nécessaire	Oui nécessaire	Oui nécessaire	Oui nécessaire
Complexité	Basse	Moyenne	Très Basse	Très Basse	Haute
Nombre d'itérations	45	48	35	41	27
Vitesse de convergence	Moyenne	Moyenne	Rapide	Rapide	Très rapide
Précision	95%	98%	94%	94%	99%

Tableau II.2 Comparaison Des Techniques MPPT [32].

II.5.2 Types des régulateurs flous :

- Type 1 : régulateur flou de type Mamdani : Dans ce type, les conclusions sont symboliques ou linguistiques et le calcul de la sortie nécessite l'utilisation d'une méthode de défuzzification.

- Type 2 : régulateur flou de type Sugeno : Ici, il n'y a pas de défuzzification. En effet la conclusion de chaque règle est égale à une constante ou à une forme polynomiale plus générale. La sortie finale est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle floue.

- Type 3 : régulateur flou de type Tsukamoto : Dans ce cas, les sorties sont des fonctions mono-toniques des variables d'entrées. La sortie totale est une moyenne pondérée des degrés de confiances de chaque règle floue et des valeurs des fonctions des variables de sortie [28].

II.5.3 Logique floue type-2 :

La notion des ensembles flous de type-2 a été proposée par Lotfi Zadeh comme extension u concept des ensembles flous ordinaires dits ensembles flous de type-1 (EFT-1). Un ensemble flou type-2 est caractérisé par une fonction d'appartenance, c.-à-d. la valeur d'appartenance de chaque élément de l'ensemble est un nombre flou dans [0,1]. Les ensembles flous type-2 est utilisés dans les situations où l'incertitude se présente (par exemple l'incertitude sur la forme des fonctions d'appartenance).

Donc, les ensembles flous type-1 peuvent être considérés comme une approximation du premier ordre de l'incertitude, alors que les ensembles flous type-2 seront considérés comme approximation du deuxième ordre. Dans ce chapitre nous allons présenter les principes de base et le fondement théorique de la logique floue type-2[29].

II.5.4 Théorie des ensembles et les fonctions d'appartenance de flous type-2 :

On se basera sur les définitions des ensembles flous type-1, afin de définir les ensembles flous type-2 où le degré d'appartenance de chaque élément de ces ensembles est un ensemble flou type-1. Dans ce qui vient on va présenter des définitions des ensembles flous type-2 et quelques importants concepts associés [28] [29].

a. Les définitions

♦ Un ensemble flou type-2, noté $\widetilde{A}$ dans un univers de discourt X est caractérisé par une fonction d'appartenance floue, notée $\mu_{\tilde{A}}(x)$, telle que :

$$\tilde{A} = \{((x,u), \mu_{\tilde{A}}(x,u) / \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1] \qquad avec\ 0 < \mu_{\tilde{A}}(x,u) < 1 \qquad (II.15)$$

♦ A chaque valeur de x, notée $x = x'$, le plan bidimensionnel dont les axes sont u et $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ est appelé tranche verticale (vertical slice) $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ de comme il est illustré sur la figure II.11 suivante :

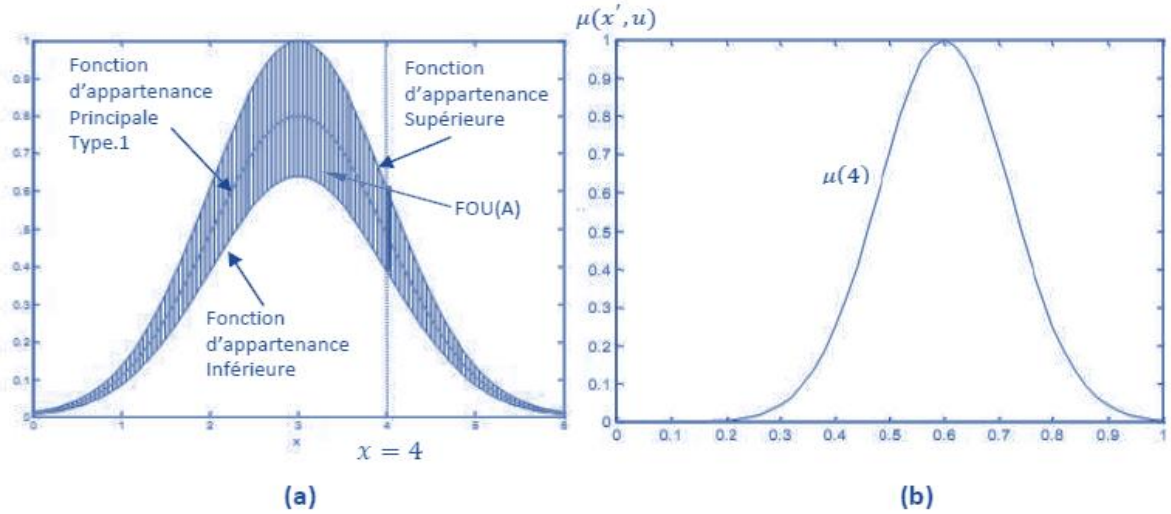


Figure II.11 : (a). Représentation schématique d'un ensemble flou Gaussien de type-2. (b). Les appartenances secondaires sont représentées dans, où on remarque qu'ils sont gaussiennes.

Donc pour $\forall x' \in X \; et \; \forall u \in J_{x'} \subseteq [0,1]$, on a :

$$\mu_{\tilde{A}}(x = x', u) \simeq \mu_{\tilde{A}}(x') = \int_{u \in J_{x'}} f_{x'}(u)/u \qquad J_{x'} \subseteq [0,1] \qquad (II.16)$$

Où $0 \leq f_{x'}(u) \leq 1$

♦ Le domaine de la fonction d'appartenance secondaire est appelé *appartenance primaire* de x noté J_x tel que $J_x \subseteq [0,1] \; \forall x \in X$.

♦ Les fonctions d'appartenance supérieure et inférieure de $\tilde{A}$ sont deux fonctions d'appartenance type-1 qui représentent les frontières du FOU (figure II.11(a)).La fonction $FOU(\tilde{A})$, et est notée $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$, $\forall x \in X$, et la fonction d'appartenance inférieure correspond à la borne inférieure de $FOU(\tilde{A})$ et est notée $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$, $\forall x \in X$:

$$\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \overline{FOU(\tilde{A})} \qquad \forall x \in X \qquad (II.17)$$

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \underline{FOU(\tilde{A})} \qquad \forall x \in X \qquad (II.18)$$

♦ L'incertitude dans la fonction d'appartenance de l'ensemble flou type-2, $\tilde{A}$ consiste en une région bornée appelée l'empreinte d'incertitude (Footprint Of Uncertainty (FOU). C'est l'union de toutes les fonctions d'appartenance primaires (la surface sombre dans figure II.9(a)):

$$FOU(\tilde{A}) = \cup_{x \in X} J_x \qquad (II.19)$$

♦ L'amplitude de la fonction d'appartenance secondaire est appelée le degré d'appartenance secondaire. Dans (II.9), $f_x(u)$ est le degré d'appartenance secondaire figure II.11(b).

b. Représentation des ensembles flous type-2 :

Les ensembles flous type-2 les plus utilisés sont de forme intervalle, Gaussienne, et triangulaire. Le nom du type est pris de la forme du degré d'appartenance primaire. Notons qu'il n'est pas nécessaire que la fonction d'appartenance principale soit de la même forme de type d'ensemble utilisé. L'ensemble type-1 réduit d'un ensemble flou type-2 est le centroïde de l'ensemble flou type-2 du FLS ; par conséquent, chaque élément de l'ensemble de type réduit est un centroïde d'un certain ensemble encastré type-1.

Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble flou type-1 gaussien dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle [1,0]. La figure II.12 schématise une fonction d'appartenance floue type-2 avec une zone d'incertitude [30].

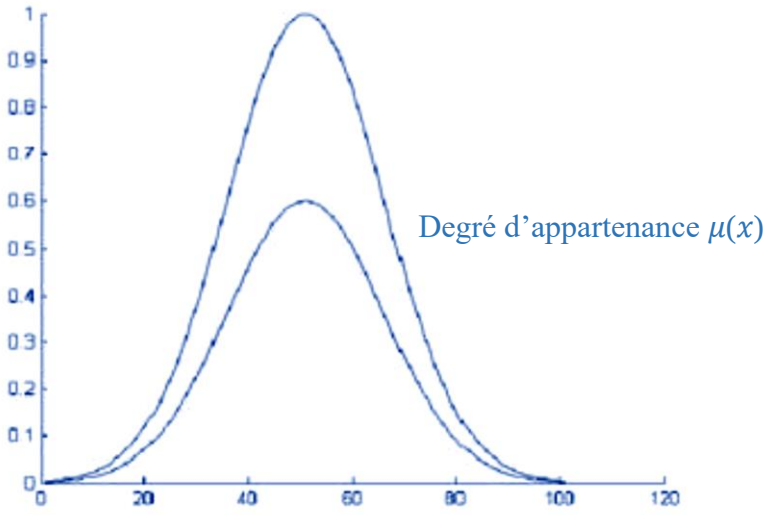


Figure II.12 Fonction d'appartenance d'un ensemble flou type-2.

II.5.5 Systèmes flous de type-2 :

a. Structure d'un système flou de type-2 :

La figure II.13 montre la structure de base d'un système flou de type-2. Elle est très similaire à la structure d'un système flou de type-1 [29].

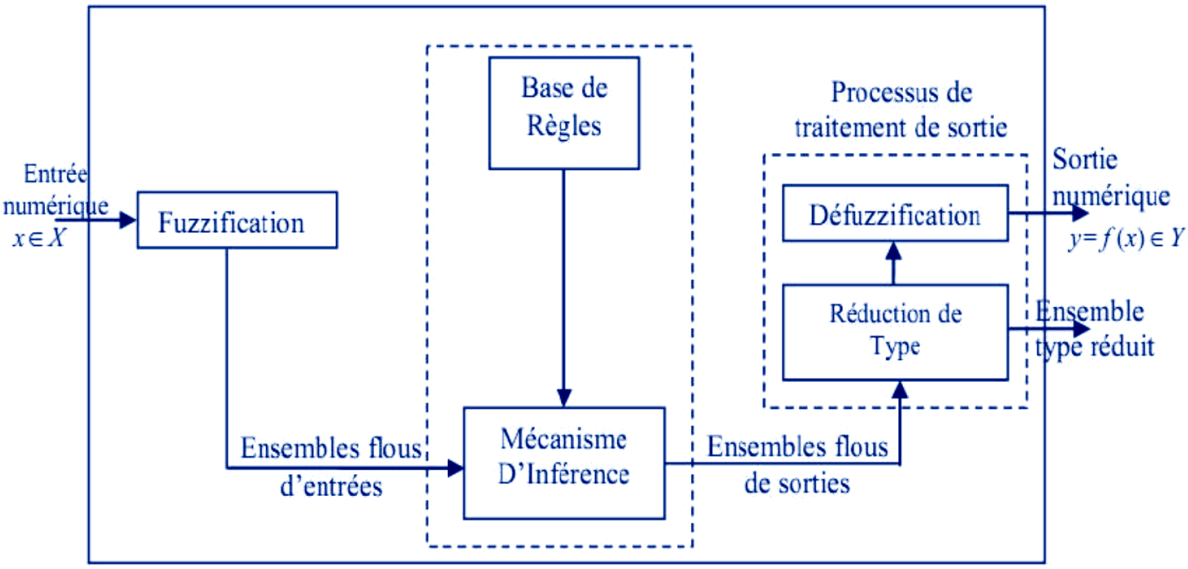


Figure II.13 Structure de base d'un système flou de type-2.

Pour un système FLS de type-1, le block traitement de sortie se réduit seulement à la défuzzification. Quand une entrée est appliquée à un FLS de type-1, le mécanisme d'inférence calcul un ensemble flou de sortie type-1 correspondant à chaque règle. La défuzzification calcul alors une sortie réelle à partir de ces ensembles flous délivrés par chaque règle. Pour un système flou type-2, chaque ensemble de sortie d'une règle est de type2.

Dans ce contexte, on trouve des versions généralisées des méthodes de défuzzification qui peuvent nous fournir un ensemble de type-1 à partir des ensembles de sorties de type-2. On appelle cette opération «Réduction de type » au lieu de défuzzification, et on appelle l'ensemble résultant de type-1 « Ensemble réduit ». Le défuzzificateur dans un système flou type-2 peut alors défuzzifier l'ensemble réduit pour obtenir une sortie ordinaire non floue pour le système flou type-2 [29].

b. Fuzzification :

Le fuzzifier mappe des entrées croquantes dans des ensembles flous de type 2 qui activent l'inférence moteur.

c. Base de Règle :

Il régit dans T2FLS reste le même que dans T1FLS, mais les antécédents et Les conséquences sont représentées par des ensembles flous de l'intervalle de type 2.

d. Mécanisme d'inférence :

Le bloc d'inférence affecte les entrées floues aux sorties floues en utilisant les règles dans la règle Base et les opérateurs tels que l'union et l'intersection. Dans les ensembles flous de type 2, les opérateurs Join (U) Et Meet (⊓), Qui sont de nouveaux concepts dans la théorie de la logique floue, sont utilisés au lieu de l'union et opérateurs d'intersection. Ces deux nouveaux opérateurs sont utilisés dans les fonctions d'adhésion secondaire.

e. Le module de traitement de la sortie :

Le module de traitement de la sortie se compose de deux blocs, le réducteur de type et l'interface de défuzzification. Les méthodes de réduction de type donnent un EFT-1 à partir de l'EFT-2 obtenu à la sortie du mécanisme d'inférence. L'ensemble résultant obtenu par la réduction de type sera par la suite défuzzifié pour obtenir une sortie numérique (déterministe).

f. Réduction de type :

Dans un système flou type-1, où les ensembles de sortie sont des ensembles flous type-1, nous effectuons la défuzzification dans le but d'obtenir une valeur numérique (ensemble type-0) représentant la combinaison des ensembles de sortie.

Dans le cas du type-2, les ensembles de sortie sont des ensembles de type-2 ; donc nous devons utiliser des versions étendues des méthodes de déffuzification de type-1 appelées la réducteur de type [38]. Cette opération va transformer l'ensemble flou type-2 résultant en un ensemble flou type-1 appelé ensemble type réduit, qui sera défuzzifié par la suite. Cet ensemble type réduit résultant prend en considération plus d'information au sujet des incertitudes des règles que la valeur défuzzifiée (un nombre).

Parmi les méthodes de réduction de type utilisées on cite :

- ♦ La réduction de type par le centre de gravité.
- ♦ La réduction de type par la hauteur.
- ♦ La réduction de type par le centre des ensembles.

Il existe deux méthodes communes pour Opération de réduction de type dans l'intervalle T2FLS : l'une est l'itération de Karnik-Mendel L'algorithme, et l'autre est la méthode des limites d'incertitude de Wu-Mendel. Ces deux méthodes sont En fonction du calcul du centroïde.

g. Défuzzification :

A la fin de l'étape de la réduction de type, on obtient un EFT-1, type réduit, et puisque les entrées du système à commander sont des valeurs précises, alors il est nécessaire de transformer l'ensemble type réduit en une valeur numérique bien déterminée [29] [28]. Parmi les méthodes utilisées pour la défuzzification, on cite la défuzzification par le centre de gravité.

La façon la plus naturelle de faire ceci est de trouver le centre de gravité de l'ensemble type réduit. Le calcul du centre de gravité est équivalent à trouver une moyenne pondérée des sorties de tous les ensemble flou type-1 imbriqués dans le système flou type-2, où les poids correspondent aux appartenances dans l'ensemble type réduit.

Si l'ensemble type réduit Y, pour une entrée x, est discrétisé en n points, l'expression de son centre de gravité est :

$$C_Y = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i \mu_Y(y_i)}{\sum_{i=1}^{n} \mu_Y(y_i)} \qquad (II.20)$$

$\mu_Y(y_i)$: C'est le degré de la fonction d'apparences

y_i: C'est la sortie de système.

n : le nombre de règle dans le système flou type-2.

Où C_Y est la sortie floue et y_i est le centre de la fonction d'appartenance de sortie de l'inférence max-min composition. C_Y est une fonction d'augmentation monotone avec Respect de C_Y.

Le point le plus proche de gauche C_{YL} et le plus à droite Le point C_{YR}.

En se référant à [12], la sortie croustillée defuzzifiée du système flou fuzzy à intervalle de type 2est la moyenne de C_{YL} et C_{YR} Lequel est :

$$C_Y(x) = \frac{C_{YL} + C_{YR}}{2} \qquad (II.21)$$

II.5.6 La commande MPPT basée sur le principe de la logique floue type-2 :

Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être la puissance (Ppv) du GPV et sa tension (Vpv). La sortie est généralement un ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique (D) permettant de commander le convertisseur statique(CS) pour fonctionner le plus souvent possible au PPM. La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de l'algorithme utilisé dans la commande de la logique floue type2 [29].



Figure II.14 : Diagramme d'esquisse d'un contrôleur flou type-2.

Comme nous avons vu dans le type-1 de FLC, Un T1FLCs est incapable de gérer directement les incertitudes des règles, car ils utilisent les ensembles flous de type1 qui sont certains. Pour cette raison nous sommes allés de faire un autre effort pour améliorer le résultat, On sait que l'ensemble flou de type 2 nous permet de modéliser et de minimiser les effets de Incertitudes dans la base de règles FLC.

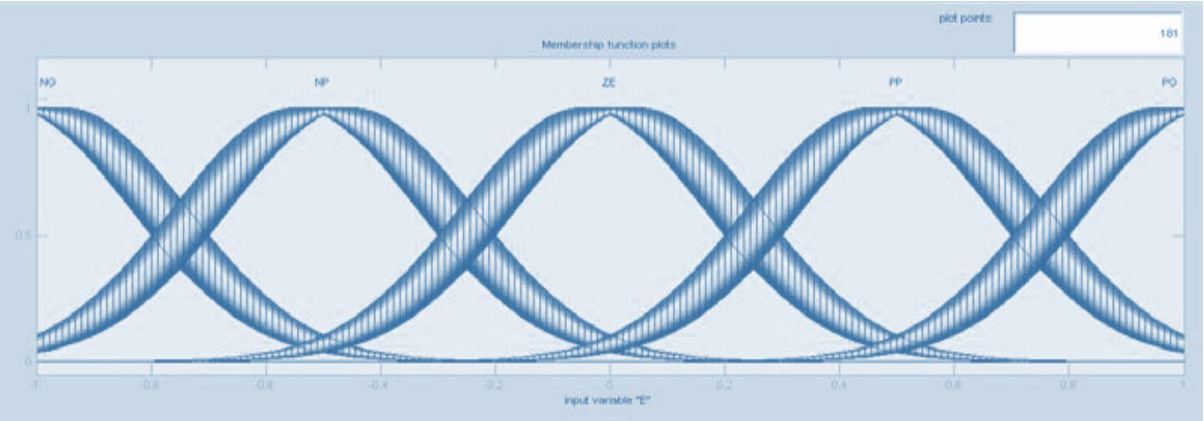
Commande logique flou type-2 comprend donc cinq étapes communément nommées dans la littérature : type 1 fuzzification, La base de règles floues, Les règles d'inférence, type1 defuzzification et Réduction de type.

Les entrées au contrôleur de logique floue sont E, CE. Le changement de la contribution de D (le rapport cyclique du convertisseur Boost) est la sortie. Par adhésion gaussienne des fonctions d'apparences sont décrites les variables de logique floue.

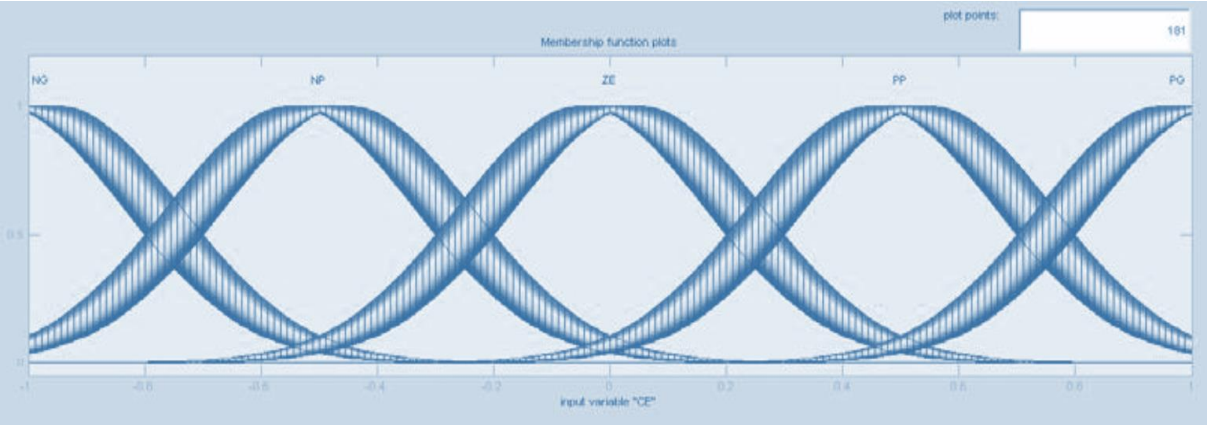
L'inférence floue est effectuée en utilisant la méthode de Mamdani, et la sortie (le cycle de fonctionnement dD) est calculée en utilisant le bloc Defuzzifier. Le centre de gravité est utilisé pour calculer la sortie de ce FLC qui est le cycle de service, qui utilise la base de règles du tableau I. La sortie (dD) est donnée au convertisseur DC-DC. Ainsi ses variables

seront qualifiés Négatif Grand (NG), Négatif Petit (NP), Erreur nul ou bien zéro (EZ), Positif Petit (PP) et Positif Grant (PG) [29].

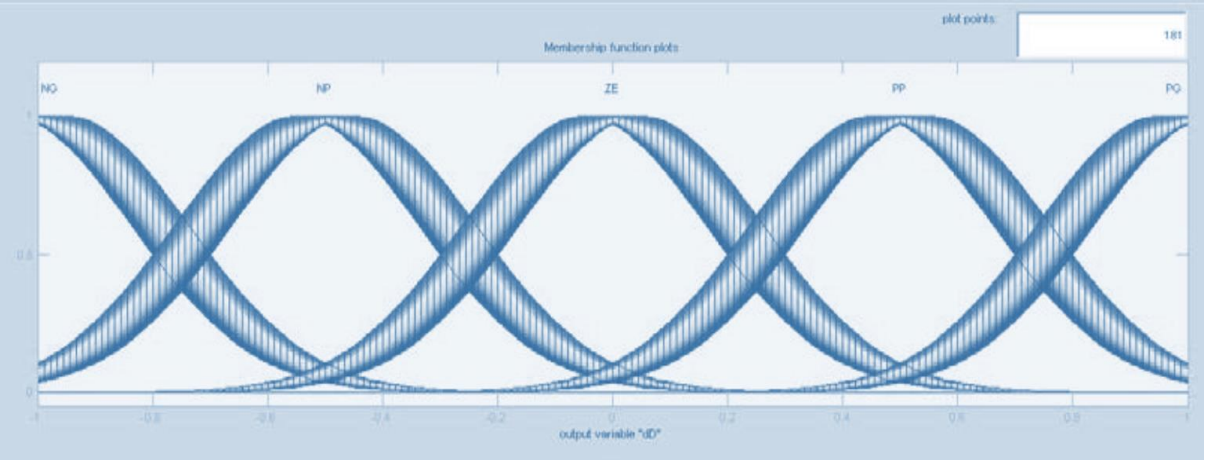
Figure II.15 montre la fonction d'appartenance antérieure et conséquente.



a. (E)



b. (CE)



c. dD

Figure II.15 Les fonctions d'appartenance de type-2 (a) erreur E, (b) changement d'erreur CE, (c) le rapport cyclique dD.

CE / E	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	ZE	ZE	NG	NG	NG
NP	ZE	ZE	NP	NP	NP
ZE	NP	ZE	ZE	ZE	PP
PP	PP	PP	PP	ZE	ZE
PG	PG	PG	PG	ZE	ZE

Tableau II.3 Exemple d'une table des règles à cinq classes pour une commande logique floue.

La table de règles du T2FLC reste la même que le T1FLC. La seule différence étant que les ensembles flous associés aux prémisses et aux conclusions seront de type 2 ; alors :

$$Si\ E\ est\ \widetilde{E_E^l}\ et\ CE\ est\ \widetilde{E_{CE}^l}\ alors\ dD\ est\ Y_i$$

Avec $\widetilde{E_E^l}$, $\widetilde{E_{CE}^l}$ respectivement l'ensemble flou de type 2 de l'erreur **e** et **de**

Et Y_i = [$\underline{y_i}$, $\overline{y_i}$] est l'ensemble flou de la conclusion de type 2.

En appliquant la formule **(II.21)** pour calculer le centre de gravité au type réduit, la sortie sera donnée par :

$$dD_0 = \frac{dD_{0l} - dD_{0r}}{2} \qquad (II.22)$$

Sont deux points de gauche et de droite caractérisant l'ensemble réduit [10] [9].

II.5 Conclusion :

L'ascenseur du convertisseur électrique dépend de la valeur de la tension et courant entrant dans le panneau solaire et travaille pour augmenter sa valeur sans changer la nature de cet effort, car son travail avec le panneau solaire est basé sur la commande classique MPPT. Qui est une matière qui régule la tension et le courant en termes de maintien du point maximum de force et de contrôle sur le point maximum, c'est la base dans le transformateur pour que les forces résultantes restent constantes à un point maximum et constant mais soient suivies des incertitudes qui en résultent.

La logique floue type 2 est une technique d'intelligence artificielle qui permet de modéliser les connaissances d'un expert humain qui a la maîtrise totale du système à contrôler. Le régulateur flou type 2 à de très bonnes performances dynamiques par rapport au régulateur traditionnel, de plus, il est puissant par rapport à la variante modulaire du modèle. Ceci est dû au fait que la structure floue du contrôleur ne repose pas sur une connaissance préalable du modèle de synthèse qui décrit la véritable dynamique du système à contrôler. Le principal inconvénient de cette technique est le manque de directives précises pour la conception d'un régulateur flou type 2.

Où, dans ce chapitre, nous avons étudié la structure de base de l'organisateur de logique floue type 2 qui dépend de la commande MPPT, qui passe par plusieurs étapes à partir de l'étape de fuzzification, dans laquelle les variables numériques non floues sont transformées de l'entrée au flou variables de langage basées sur un sous-ensemble appelé fonction d'appartenance. Enfin étape de défuzzification, C’est une étape pour convertir le sous-ensemble flou de sortie en une valeur non ambiguë qui permet de contrôler le processus jusqu'à ce que nous obtenions la commande MPPT, qui est organisée par logique floue type 2, que nous utilisons pour améliorer la puissance de sortie en termes d'incertitudes et de temps de réponse.

Enfin, comme l'étude théorique ne suffit pas pour se familiariser avec le travail de cette matière, nous avons donc utilisé la modélisation typique du convertisseur DC-DC et de la commande MPPT, à condition qu'une simulation soit effectuée par le programme MATLAB/SIMULINK de ce modèle dans le dernier chapitre.

Chapitre III :

Simulation d'une Système photovoltaïque

III.1 Introduction

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. Vu que des changements dans la conception peuvent facilement être faits à l'étape de la simulation, il est possible d'expérimenter avec un large ensemble de variations des conditions de fonctionnement afin d'aboutir à une solution optimale. Matlab/Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux. Simulink offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un certain système [21].

Concernant ce travail, l'objectif est d'améliorer le rendement énergétique du système photovoltaïque et d'élaborer un algorithme d'optimisation MPPT-flou pour poursuivre la puissance maximale que peut débiter le générateur photovoltaïque quelques soient les conditions météorologiques (éclairement et température). Ce dernier est conçu principalement autour d'un convertisseur DC/DC du type Boost, qui relie le module photovoltaïque à la charge [22].

III.2 Simulation du système photovoltaïque

Dans cette section, on présente les différentes simulations d'un système photovoltaïque contrôlé par une commande MPPT floue. Le système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur statique continu-continu survolteur, la commande MPPT par le contrôleur floue et enfin un charge continu.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous l'environnement MATLAB/Simulink.

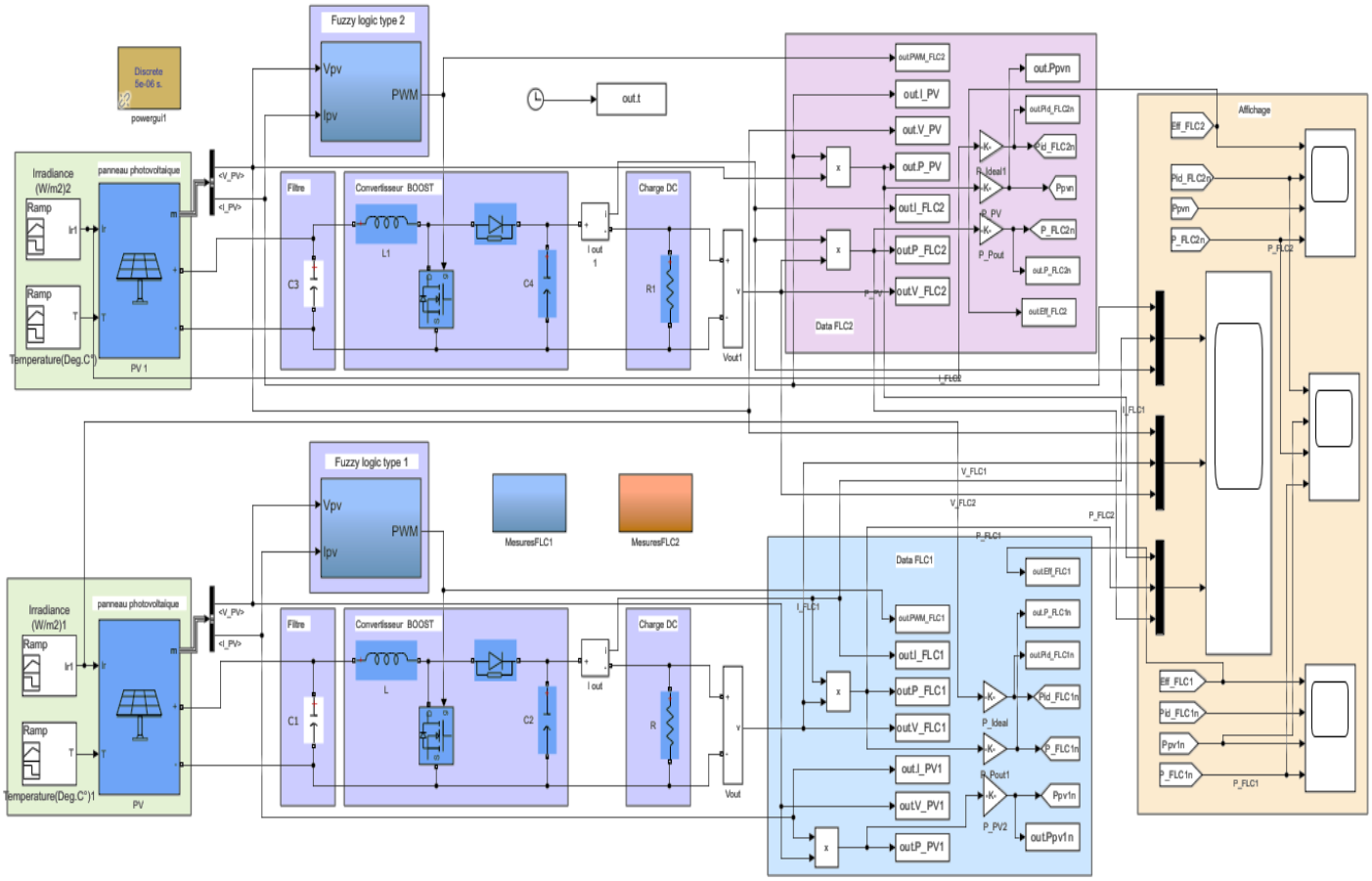


Figure III.1 Schéma bloc sous Simulink du système global.

Bloc 1 : représente le panneau PV du constructeur Kyocera Solar de référence KC200GT. Les entrées du panneau sont le rayonnement et la température. Pour chaque entrée, il y a un profil constant et un profil variable, et à partir du switch, on peut choisir le profil.

Bloc 2 : montre le convertisseur de puissance de type élévateur (Boost) de tension primaire continu et en tension secondaire continu (DC-DC), il a la capacité de fournir une tension plus élevée que celle appliquée à son entrée, il est composé de (Voir Figure III.5) :

- Une bobine **L** : permet de lisser le courant appelé sur la source.
- Un condensateur **C** : permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.
- Une diode **D** : protège l'interrupteur **S** en empêchant le retour du courant.
- Un interrupteur à semi-conducteur contrôlable **S**.

Bloc 3 : représente le contrôleur MPPT qui est configuré selon la structure de la méthode à simuler. Les entrées de la commande sont le courant et la tension du panneau et la sortie représente le rapport cyclique qui génère par la suite le signal de modulation MLI (PWM).

Bloc 4 : montre la charge résistive connectée au convertisseur.

III.2.1 Simulation d'un GPV :

Pour simuler le comportement du GPV, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink en sous Simulink du **block PV Array.**

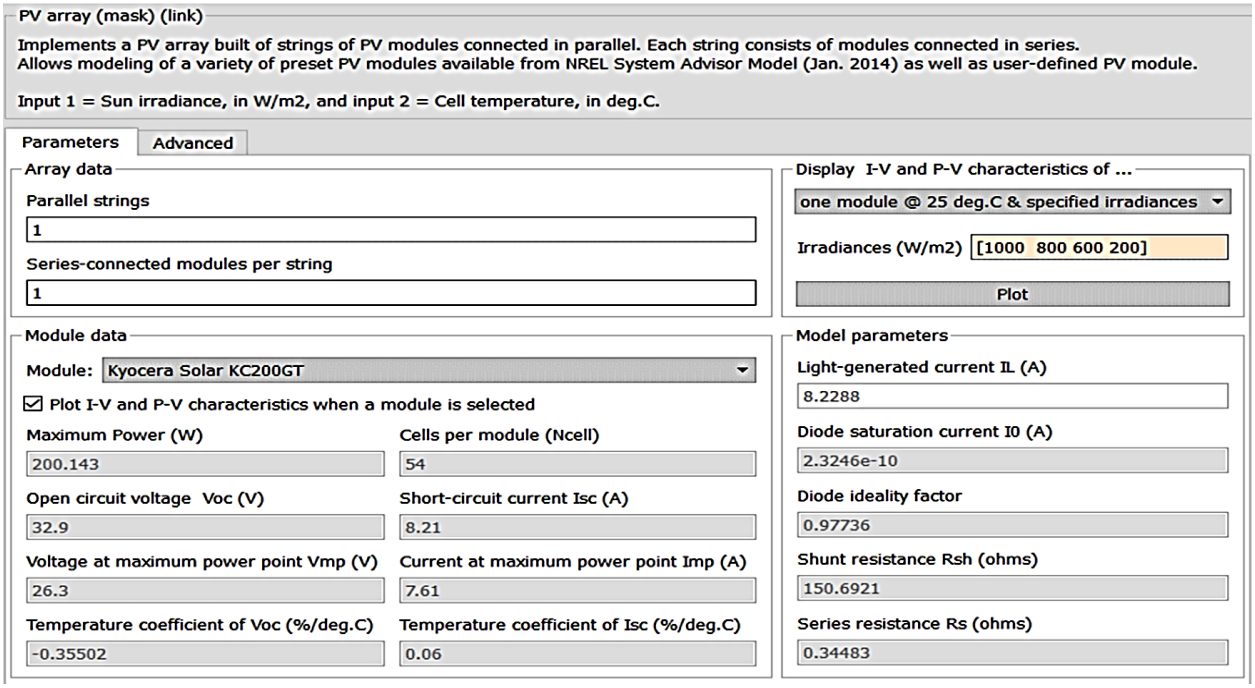


Figure III.2 Schéma bloc sous Simulink du PV Array

La figure III.2 représenter la plaque signalétique de notre panneau photovoltaïque.

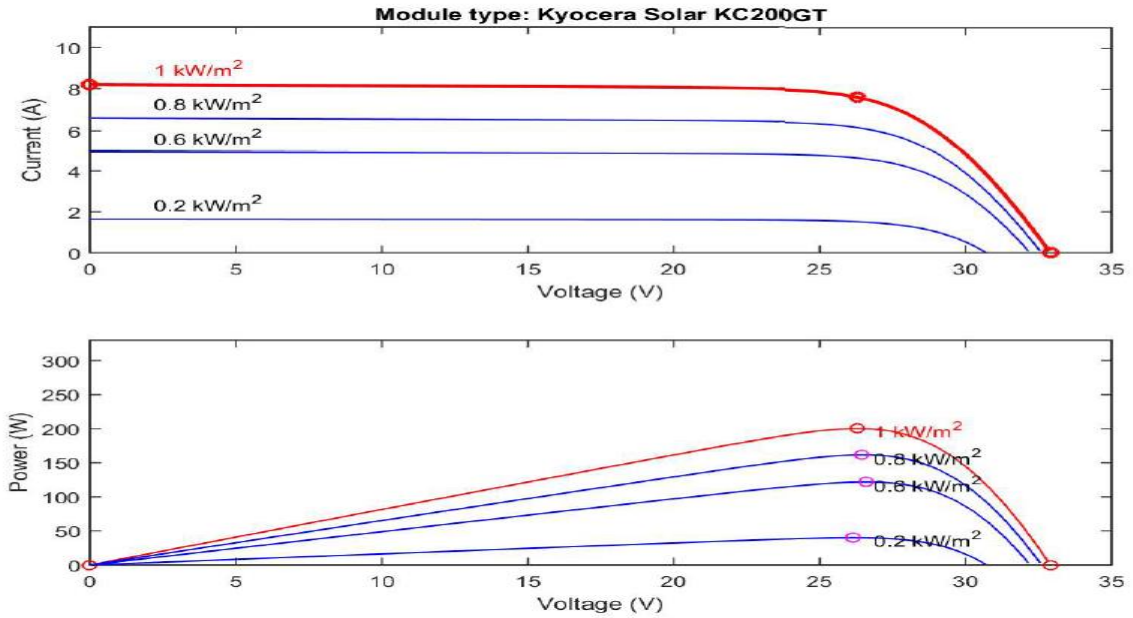


Figure III.3 Les caractéristiques électriques du PV sous les conditions atmosphériques variable (G=1000 800 600 200) W/m² et T=25°C

- On remarque que lorsque les rayonnements solaire G diminue, la puissance et le courant diminue, comme le montre la figure III.3.

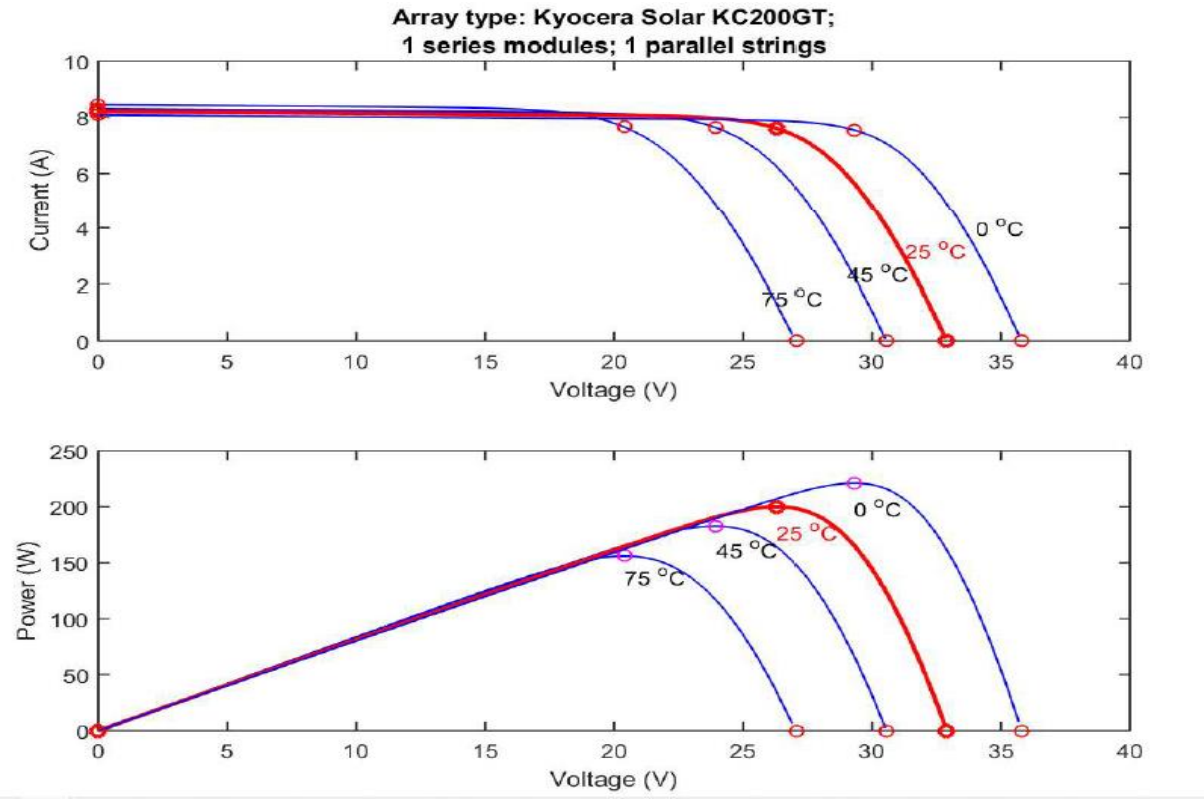


Figure III.4 Les caractéristiques électriques du PV sous les conditions atmosphériques variable G=1000 W/m² et T= (75 45 25 0) °C

- On remarque que lorsque la température augmenter, la tension diminue, lorsqu'il diminue, la tension augmente, comme le montre la figure III.4.

III.2.2 Simulation du convertisseur Boost :

De la même manière et utilisant le modèle mathématique décrit dans le chapitre II, nous avons modélisé le convertisseur DC-DC boost sous l'environnement Matlab/Simulink.

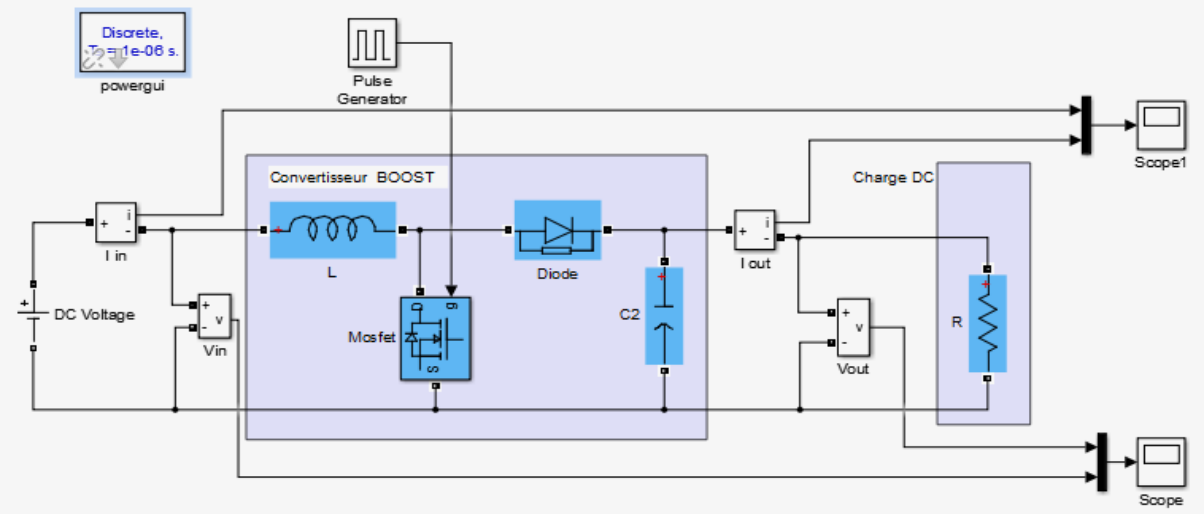


Figure III.5 Schéma bloc sous Simulink du convertisseur Boost

Les résultats de simulation sont donnés suivant les figures 6 et 7 :

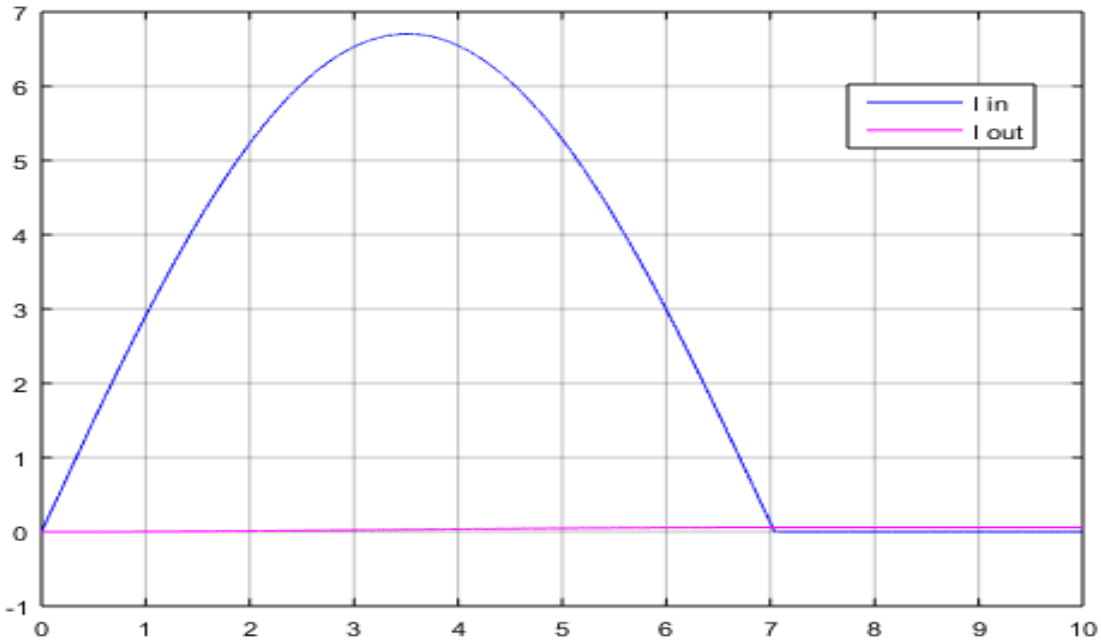


Figure III.6 Les courants d'entrée et de sortie hacheur élévateur en fonction le temps(s).

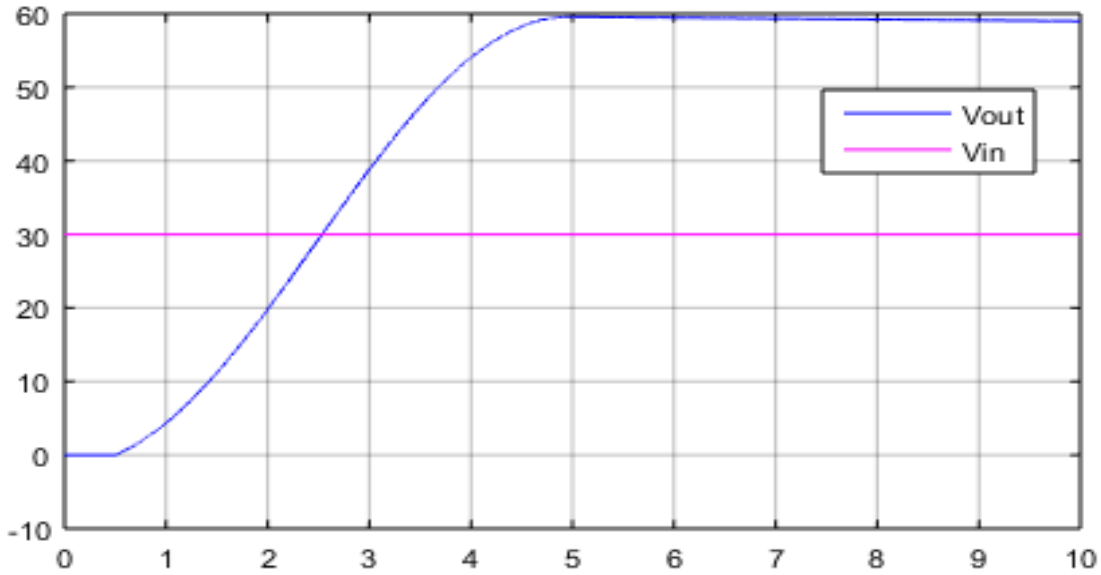


Figure III.7 Les tensions d'entrée et de sortie hacheur élévateur en fonction le temps(s).

La figure 6 présente un saut important de courant du fait que la source de tension utilisée dans la simulation peut délivrer un courant sans limite ce qui n'est pas le cas où l'on aurait un générateur photovoltaïque comme source de puissance.

La valeur tension de sortie (figure 7) du convertisseur est plus grande que celle d'entrée et inversement pour les courants.

III.2.3 Simulation du MPPT Flou type 2 :

Des nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant VPV, lorsque dP_{PV} /dV_{PV} est positif ou en diminuant V_{PV}, lorsque dP_{PV} /dV_{PV} est négatif.

Récemment, la commande par logique floue type 2 a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler.

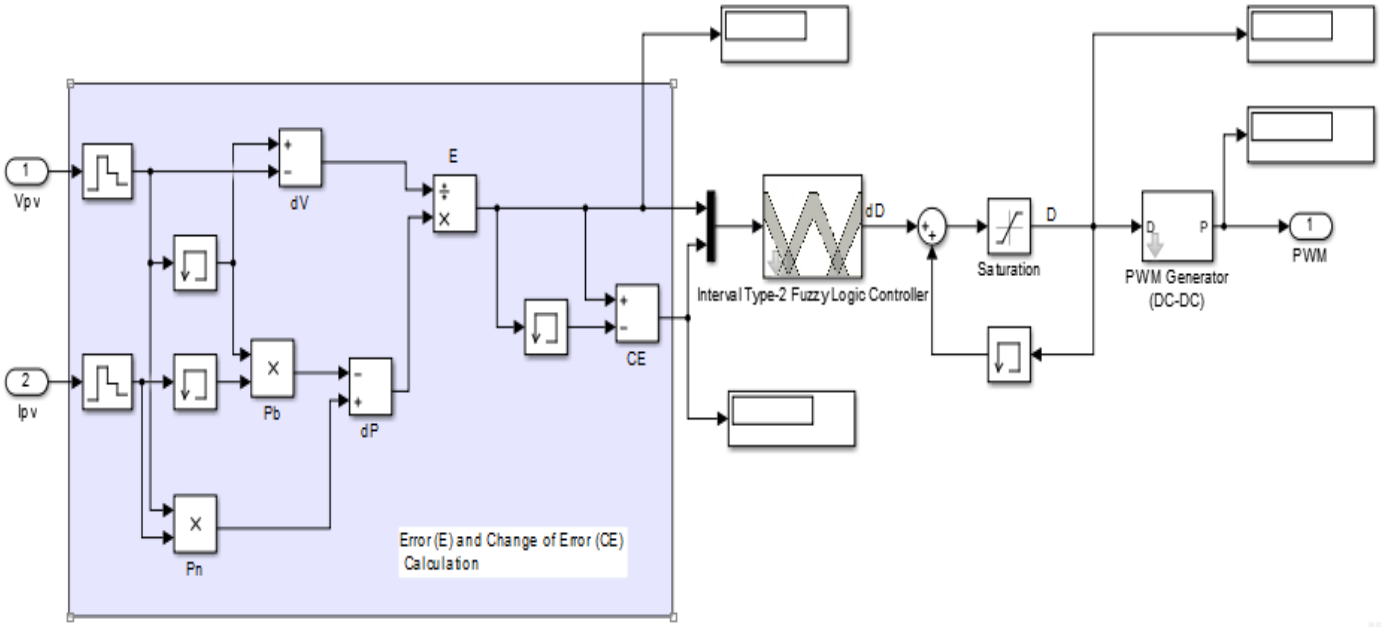


Figure III.8 Schéma block sous Simulink de la commande MPPT flou type 2

La structure interne de ce régulateur ou bien contrôleur flou type 2 est détaillée ci-dessous :

➢ **Variables du MPPT flou**

Le contrôleur possède deux entrées l'erreur *E* et sa variation ΔE et une sortie ΔD qui représente la variation du rapport cyclique du convertisseur DC/DC.

Les deux entrées de contrôleur sont définies par les deux équations suivantes :

$$e(k) = \frac{p(k)-p(k-1)}{v(k)-v(k-1)} \quad \text{(III.1)}$$

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

Avec : P et V sont respectivement la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

Nous utilisons un contrôleur flou de type PI, la sortie du contrôleur ΔD(k) est considérée comme un incrémental du signal de commande D(k) :

$$D(k) = D(k-1) + G_S \times \Delta D(k) \qquad \text{(III.3)}$$

Avec : *Gs* un gain de sortie, prédéfini à l'avance.

➢ **Fonctions d'appartenance**

Chaque variable du contrôleur est définie par cinq (5) fonctions d'appartenance de type triangulaire extrémités des univers de discours (intervalles de variations). Les figures III.9 donnent respectivement les fonctions d'appartenance associées aux variables d'entrée (E et ΔE) sauf ΔD, où on lui a attribué des valeurs puisque c'est un contrôleur flou SUGENO car dans ce dernier, les sorties sont des constantes ou des fonctions linéaires des valeurs d'entrées.

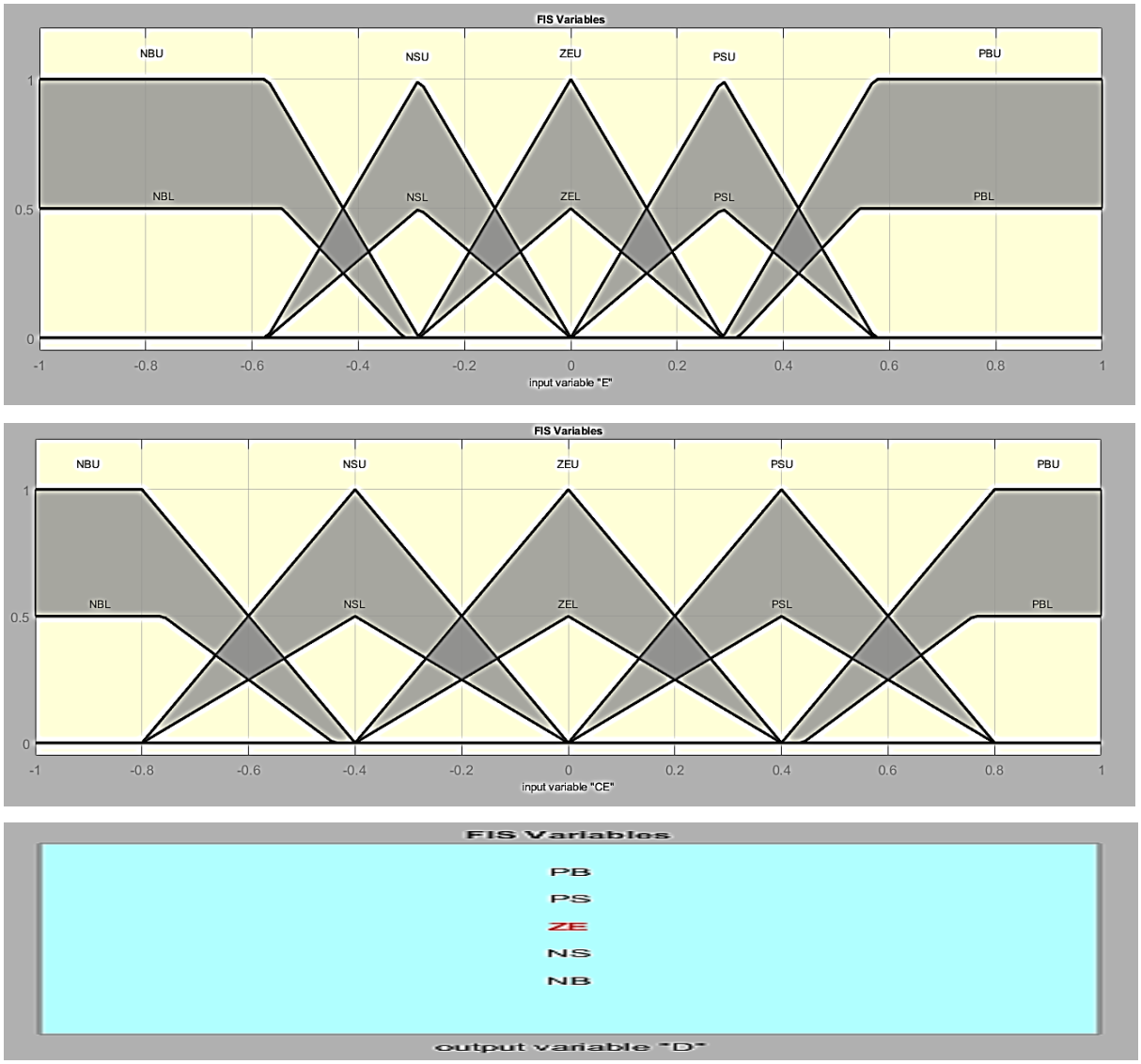


Figure III.9 Fonctions d'appartenance E, CE et ΔD

➢ **Règles floues**

Le tableau III.1 donne l'ensemble des règles du contrôleur flou, nécessaires pour le calcul de la sortie ΔD.

E \ CE	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	ZE	ZE	NG	NG	NG
NP	ZE	ZE	NP	NP	NP
ZE	NP	ZE	ZE	ZE	PP
PP	PP	PP	PP	ZE	ZE
PG	PG	PG	PG	ZE	ZE

Tableau III.1 Base de règles du contrôleur flou type 2

La règle correspondante à la cellule noire du tableau est interprétée comme suit :

*Si **E** est **Positif Grand** ET **ΔE** est **Zéro** Alors **ΔD** est **Positive Grand***

➢ **Réduction de type et défuzzification**

Dans ces deux étapes on utilise la méthode de Karnak Mendel (KM) où ses algorithmes sont des procédures itératives largement utilisées dans la théorie de la logique floue. Ils sont connus pour converger de manière monotone et super-exponentiellement rapide ; cependant, plusieurs (généralement deux à six) itérations sont encore nécessaires avant que la convergence ne se produise.

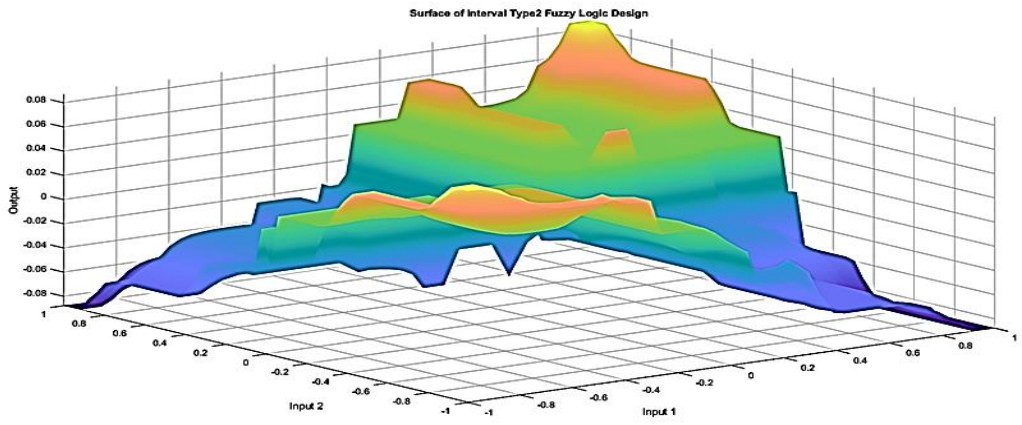
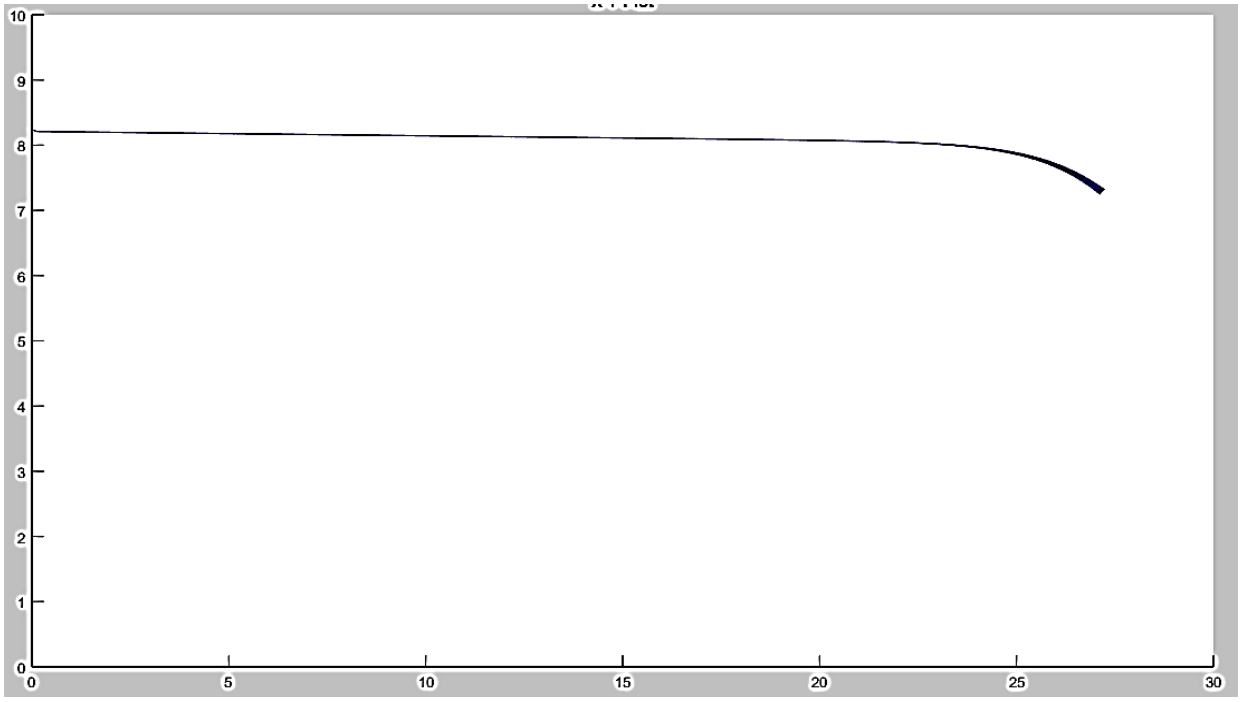


Figure III.10 Surface 3D de sortie de contrôleur logique floue type 2.

III.3 Les résultats

III.3.1 Simulation sous des conditions STC :

Une étude a été faite sous les conditions STC (Standard Test Conditions) c'est- à-dire avec un éclairement fixé à 1000W/m² et la Température à 25°C.



I=f(v)

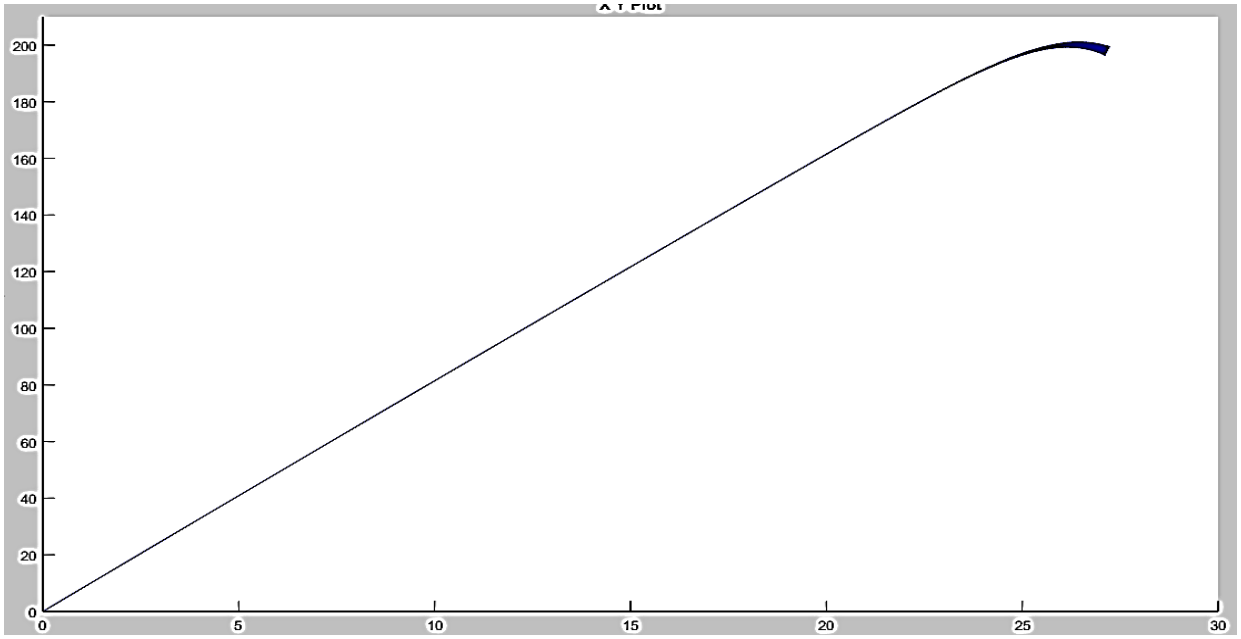


Figure III.11 Les caractéristiques électriques I= f (V) et P = f (V) du module PV avec MPPT.

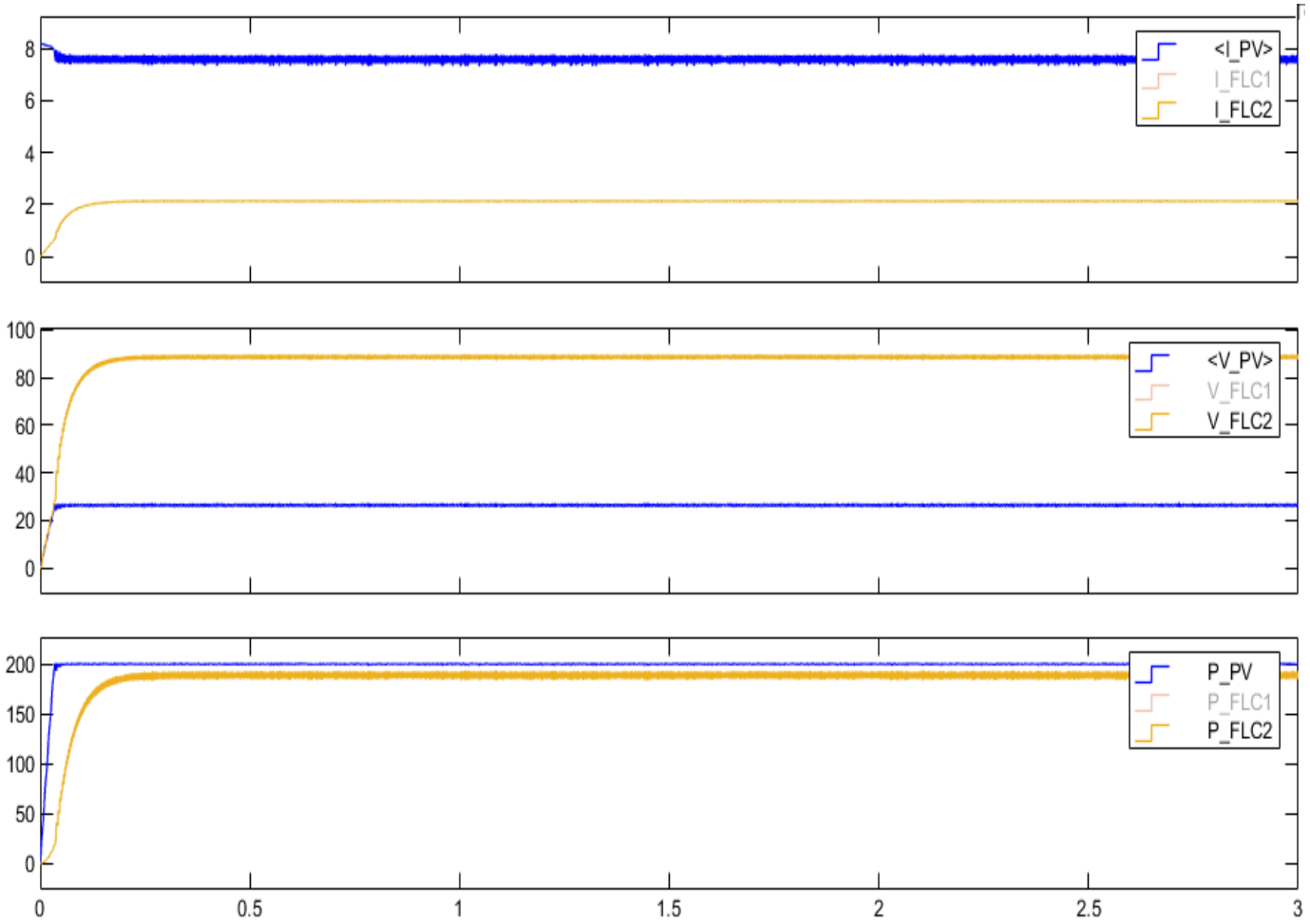


Figure III.12 Evolution du courant, la tension et la puissance du GPV et FLC2 en fonction de temps (s).

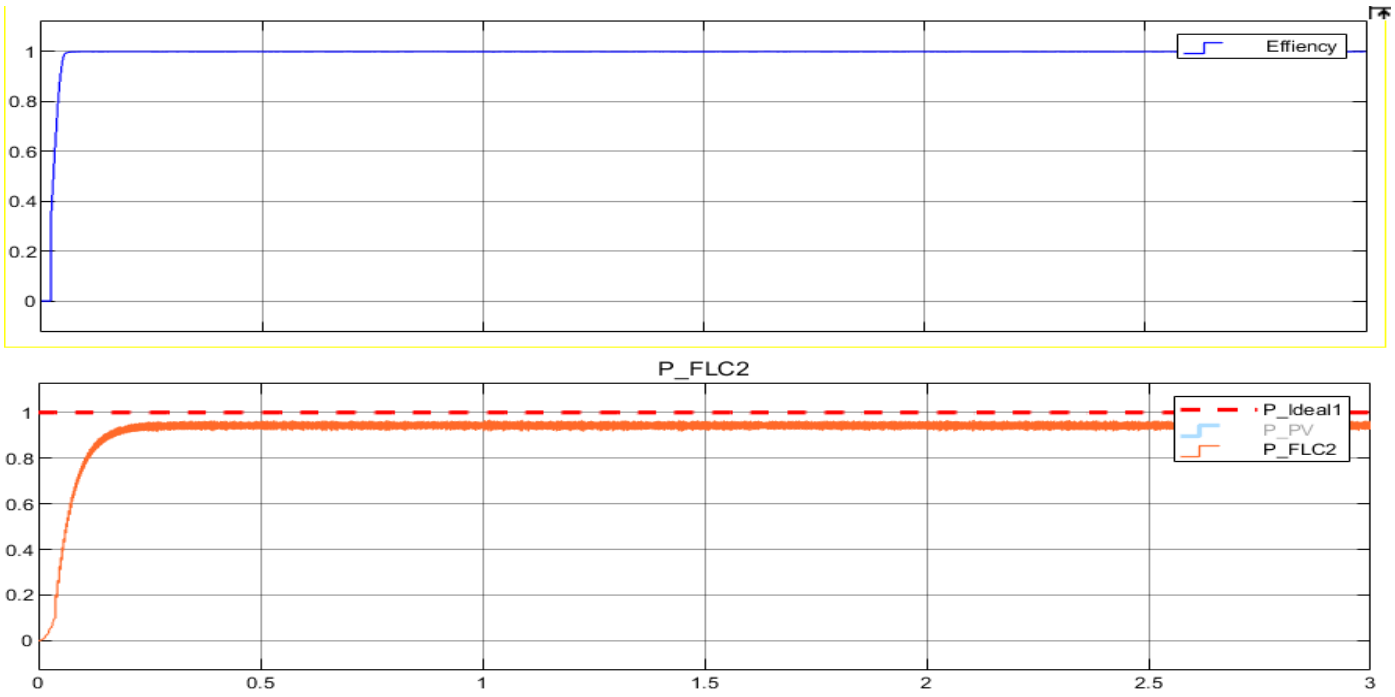


Figure III.13 l'efficacité de FLC2 en fonction de temps (s).

Comme on voit sur la figure 12, la puissance du module atteigne la puissance maximale que peut fournir la source après 60 ms et celle de la charge suit cette variation.

La tension et le courant (figure 12) issus du GPV reste sur le point de fonctionnement optimal grâce à la commande fournie par le contrôleur MPPT flou type 2 qui essaie toujours d'ajuster, à chaque instant, le rapport cyclique pour que le point de fonctionnement du système reste sur le point optimum.

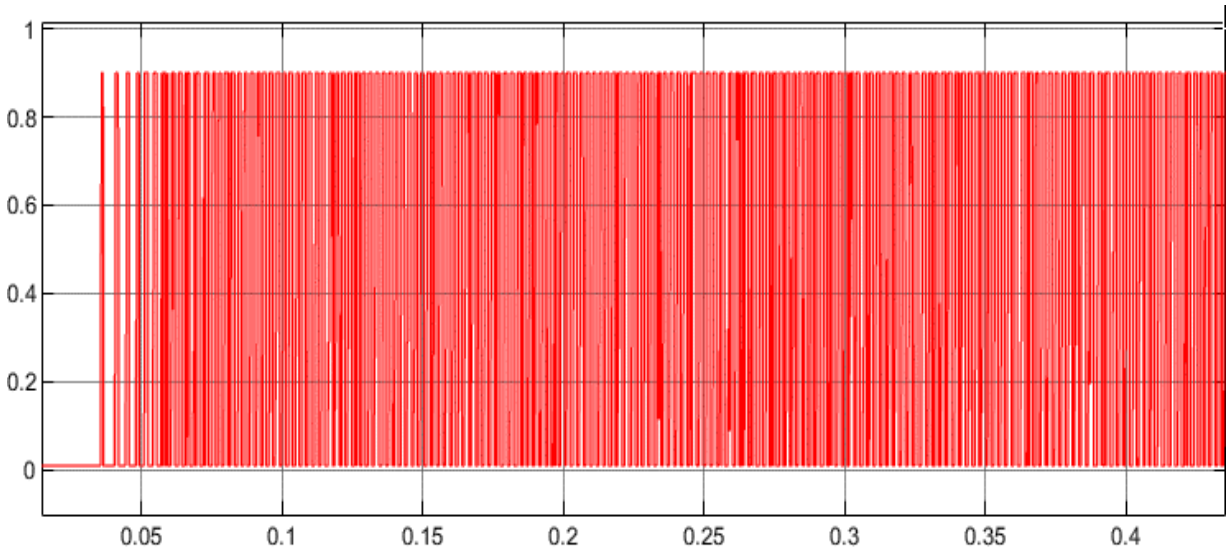


Figure III.14 le rapport cyclique de la commande.

III.3.2 Tests de fonctionnement sous des conditions atmosphériques variables

La première simulation a été réalisée sous des conditions STC. Cependant, dans cette section, des profils variables de l'éclairement et de la température ont été testés.

a. Variation de l'éclairement:

Pour ce test un profil d'ensoleillement variable a été choisi [1000 200 1000] W/m² comme le montre la Figure 15 et sous une température constante de 25°C.

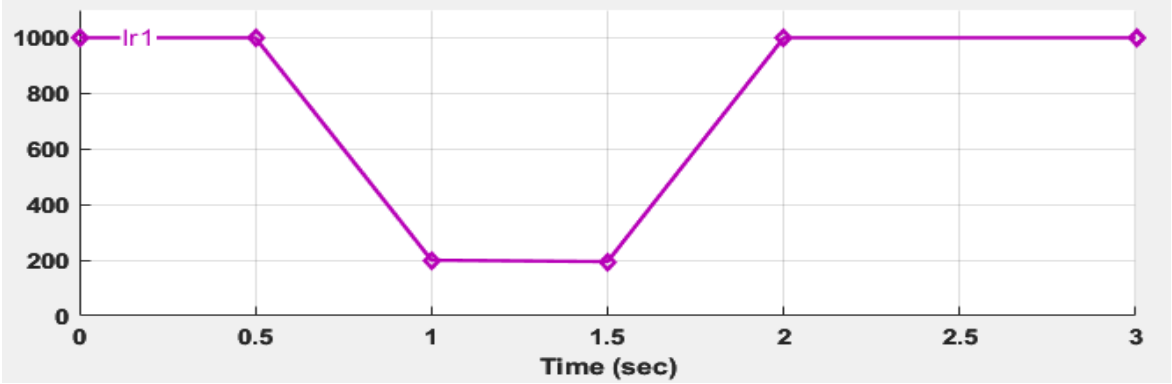


Figure III.15 Profil d'ensoleillement injecté dans le GPV.

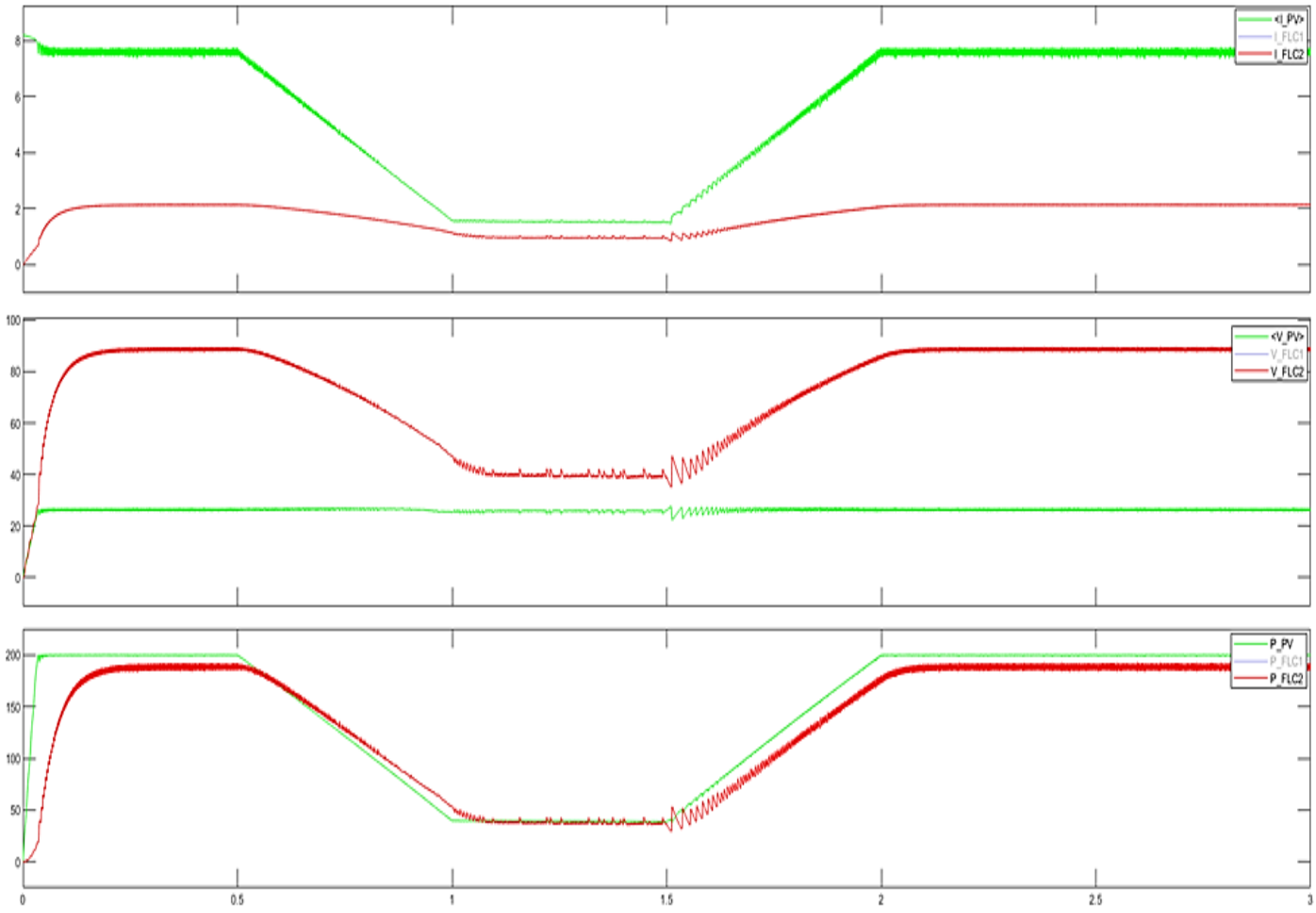


Figure III.16 Evolution du courant, la tension et la puissance du GPV et FLC2 en fonction de temps (s).

La figure 16 met en évidence une bonne faculté de poursuite du système piloté par le MPPT flou. On constate aussi que l'ensemble peut être modélisé par un système du premier ordre. Permettent de constater que les tensions et les courants varient inversement mais que leur produit donne toujours la puissance maximale désirée.

En résumé, le contrôleur flou type 2 réagit en fonction de l'éclairement en essayant toujours d'amener le système de captage photovoltaïque sur le meilleur point de fonctionnement (point de puissance maximale).

b. Variation de la temperature

Cette fois-ci nous allons simuler le même système PV précédent, pour un ensoleillement (G=1000w/m²) et sous un profil de température variable avec les valeurs suivantes : [25 50 45 25] Le profil est représenté sur la Figure III.16.

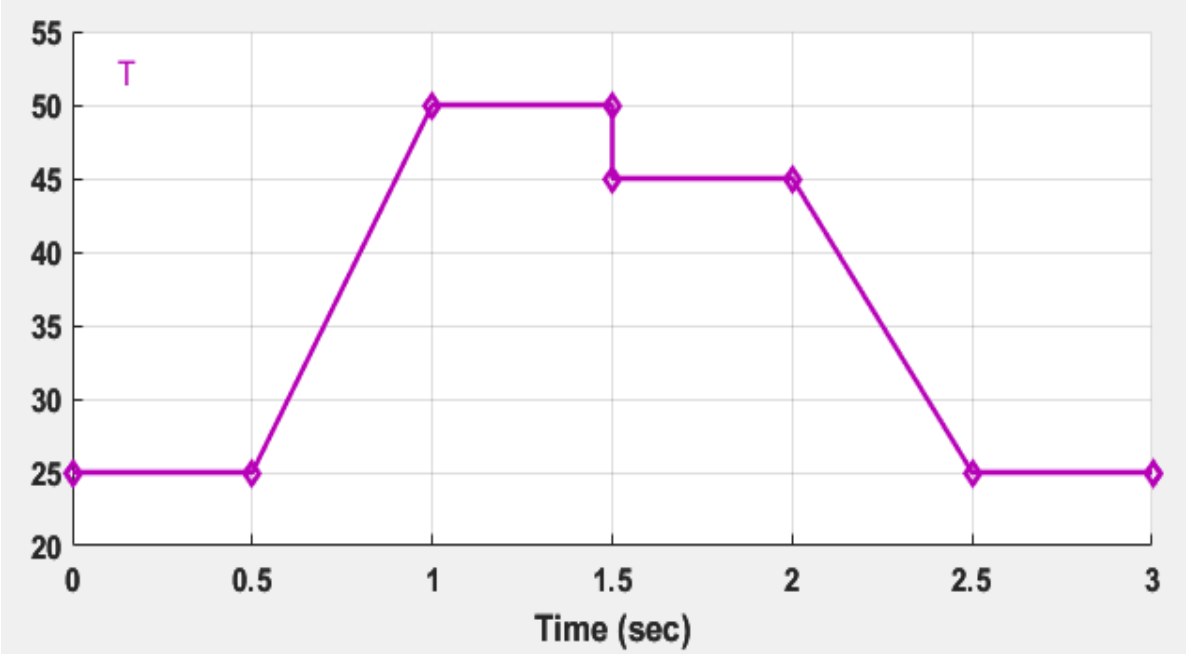


Figure III.17 Profil de température injecté dans le GPV.

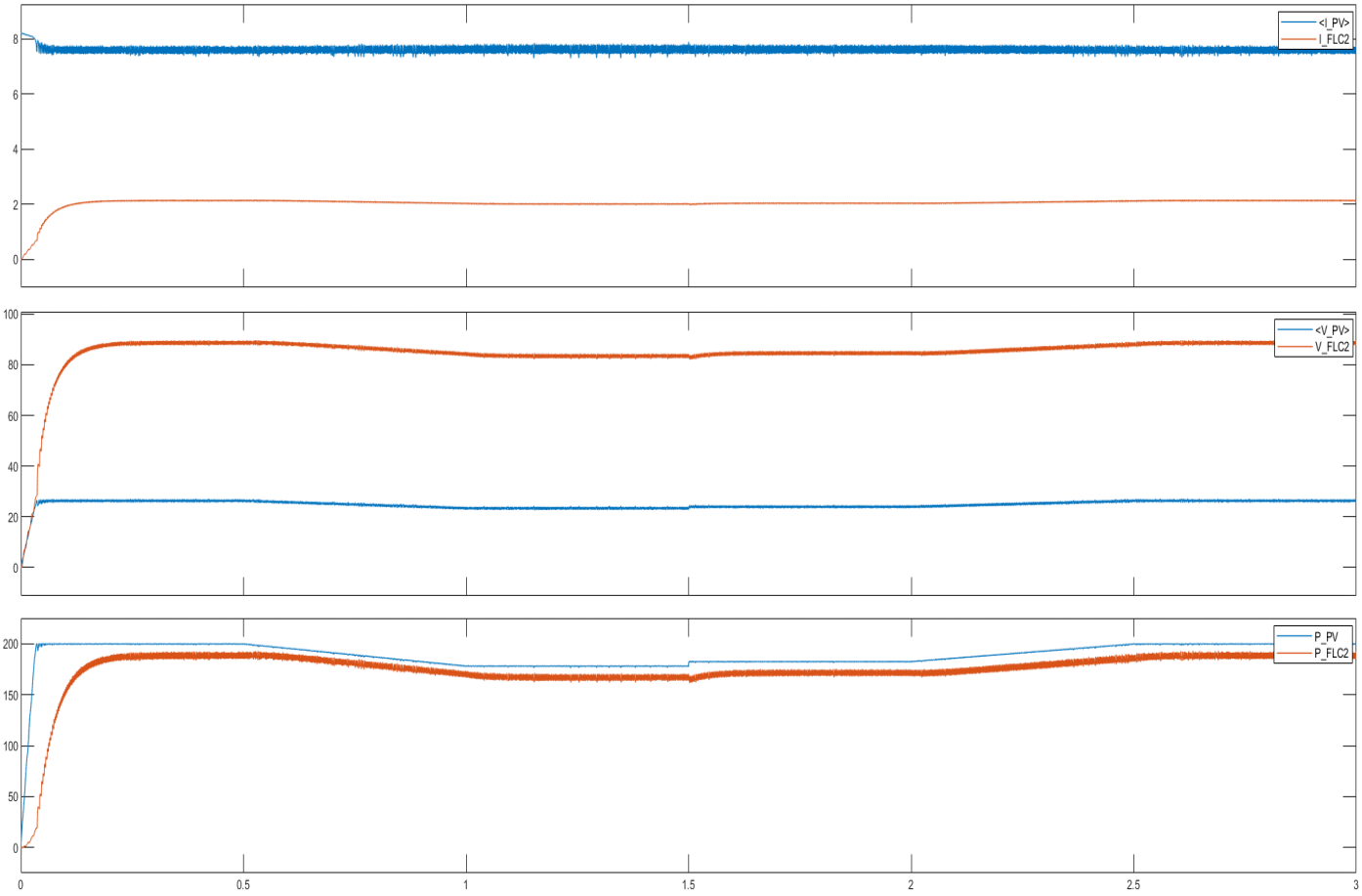


Figure III.18 Evolution du courant, la tension et la puissance du GPV et FLC2 en fonction de temps (s).

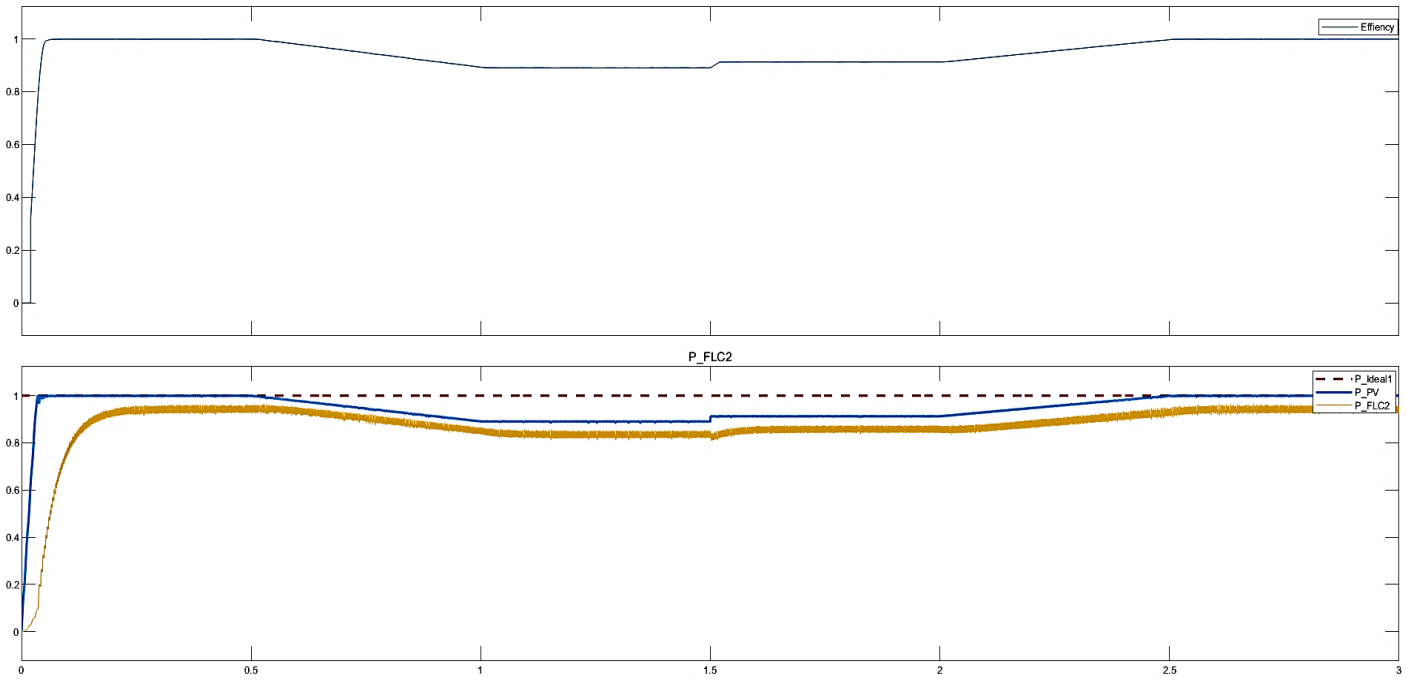


Figure III.19 Evolution de l'efficacité de FLC2 en fonction de temps (s).

c. Variation de l'ensoleillement et la température en même temps

Pour ce test un profil d'ensoleillement variable a été choisi [1000 200 1000] W/m² comme le montre la Figure 14 et sous un profil de température variable avec les valeurs suivantes : [25 50 45 25] Le profil est représenté sur la Figure III.16.

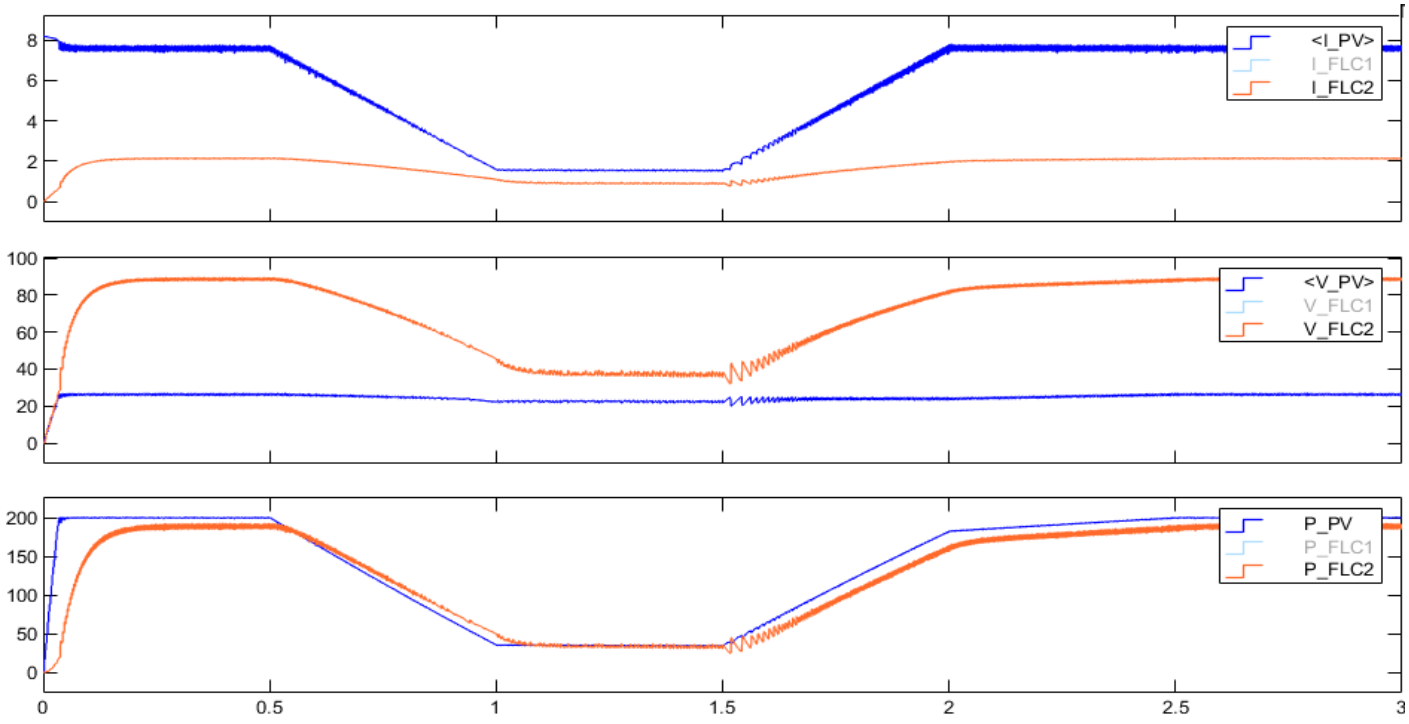


Figure III.20 Evolution du courant, la tension et la puissance du GPV et FLC2 en fonction de temps (s).

III.3.2 Etude comparative entre FLC2 et FLC1

a. La commande MPPT flou type 1 (FLC1) :

La structure interne de ce régulateur ou bien contrôleur flou est représentée dans le diagramme fonctionnel suivant donné par la figure 17 [23]

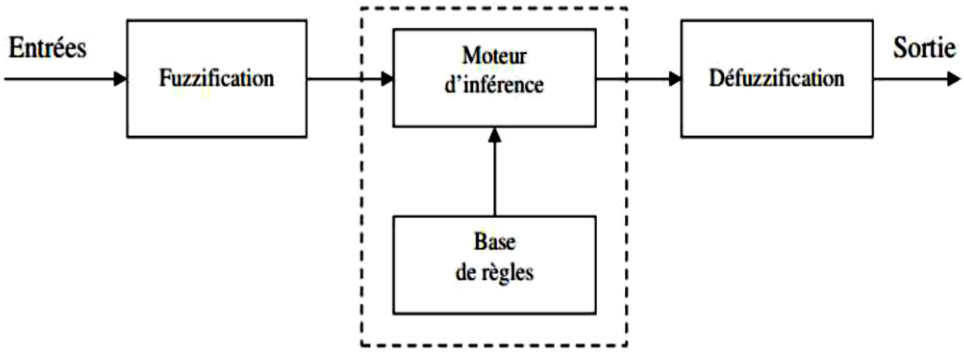
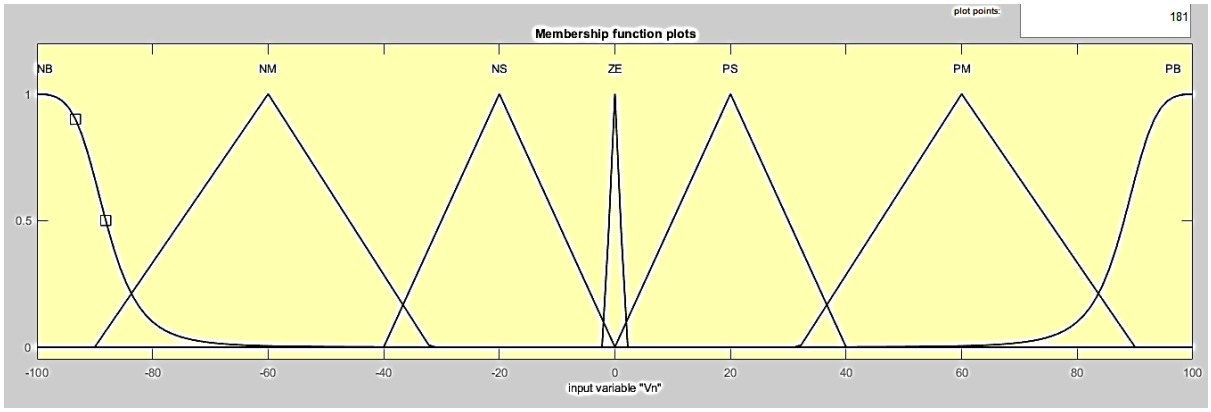
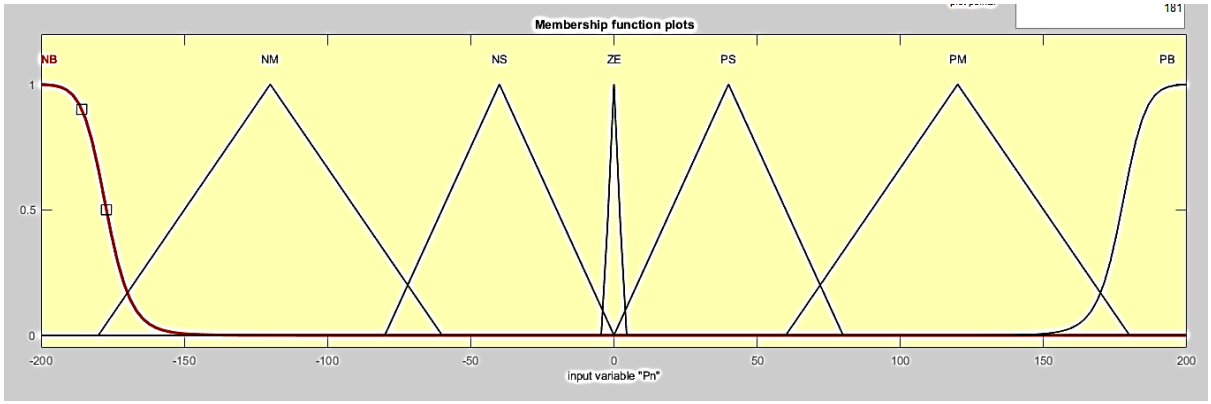


Figure III.21 Schéma de principe d'un régulateur flou 1

- **Fuzzification**

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie sont du type triangulaire et gaussulaire. Leur disposition est symétrique. La figure 18 présente les différentes fonctions d'appartenance.





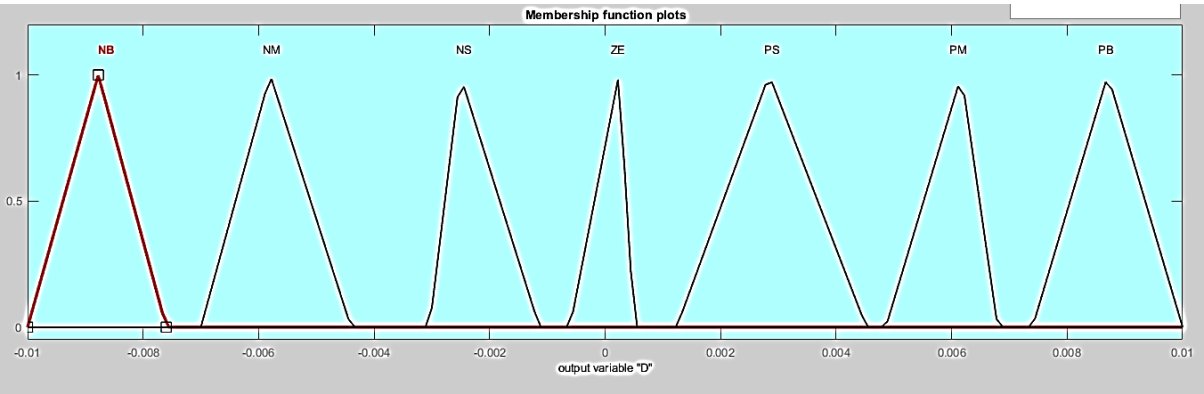


Figure III.22 Fonctions d'appartenance Vn, Pn et ΔD

- **Méthode d'inférence floue**

La valeur de la variable de sortie dD (le rapport cyclique), qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM (point de puissance maximale) est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée. On utilise les mêmes règles avec le type 2 (Tableau 1).

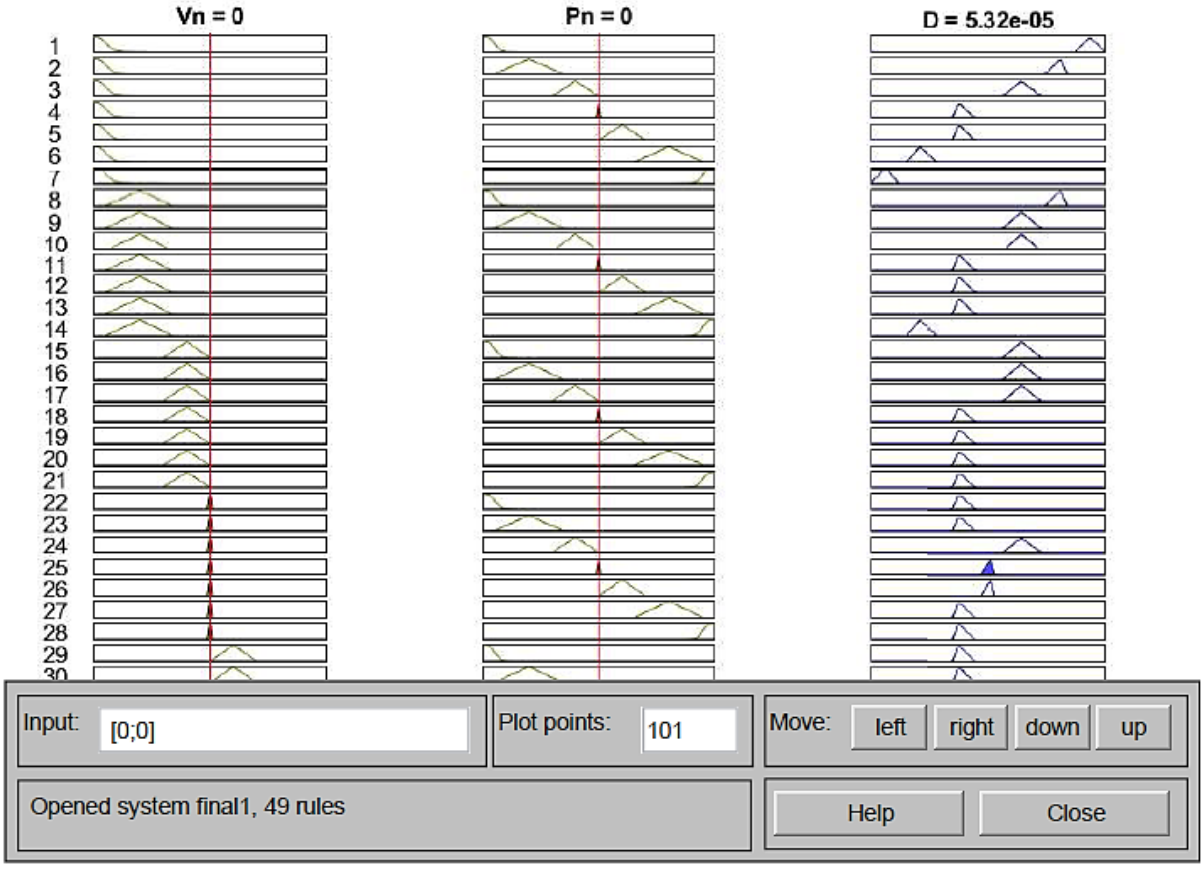


Figure III.23 les règles de sortie de contrôleur logique floue type 1.

➢ **Défuzzification**

Elle consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie dD, afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

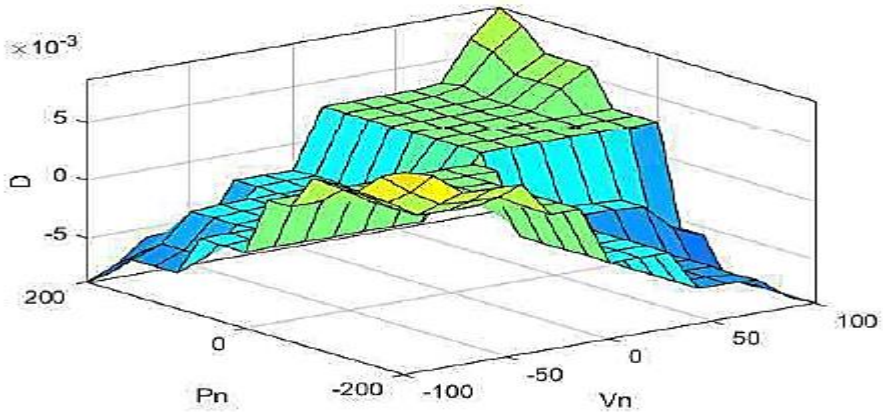


Figure III.24 Surface 3D de sortie de contrôleur logique floue type 1.

b. La comparaison :

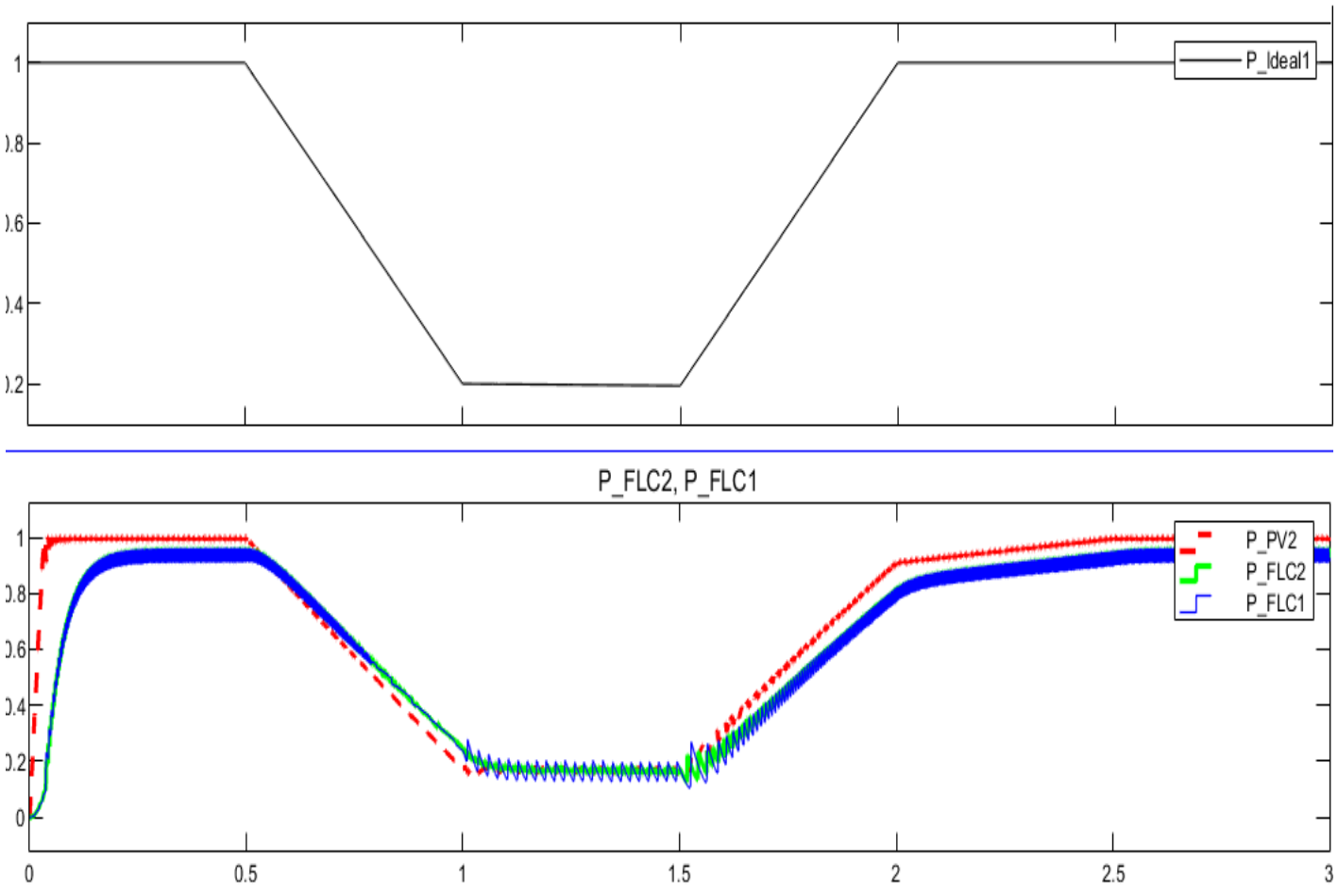


Figure III.25 Evolution la puissance du GPV, FLC2 et FLC1 en fonction de temps (s).

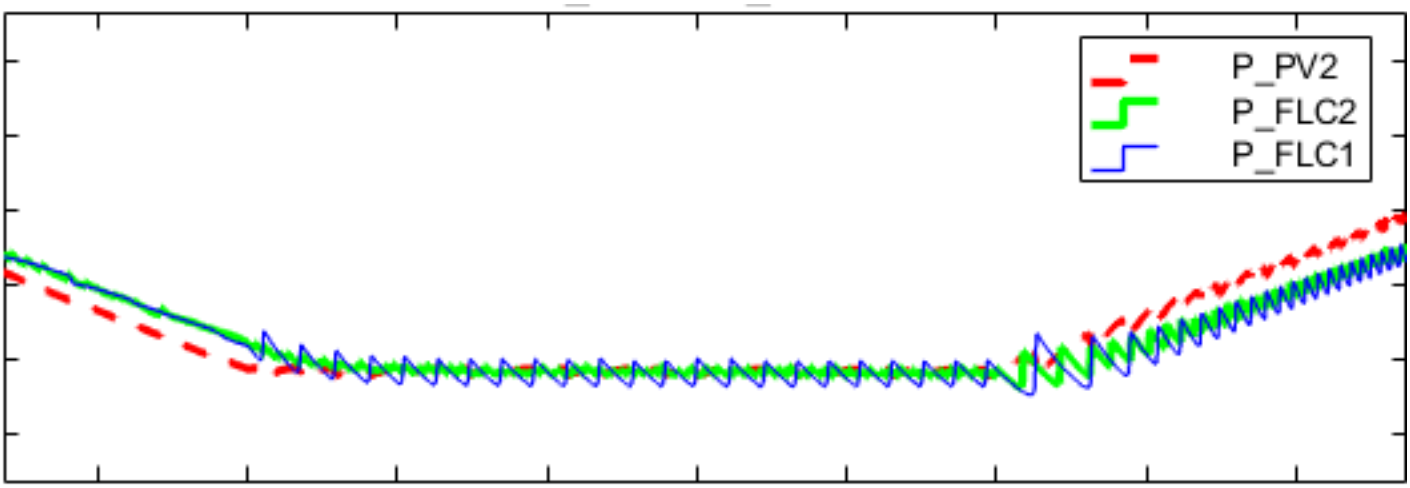


Figure III.26 Zoom

On remarque dans la Figure III.21 et Figure III.22 après Zoom une zone de leur congruence où il y a des distorsions sur la courbe FLC1 par rapport à la courbe FLC2.

Les observations précédentes confirment l'existence d'incertitudes d'intensité variable dans les courbes issues du système solaire lors de l'utilisation de la commande MPPT FLC1 et après l'avoir remplacée par la commande à logique floue 2, on constate une légère amélioration significative sur toutes les courbes résultantes.

III.4 Discutions final

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur flou type 2 conduit à des meilleures performances comme le montre les figures précèdent, avec l'absence des oscillations dans le régime permanant, et un temps de réponse plus rapide, et l'erreur est presque inexistante.

La commande MPPT flou type 2, nous permet a varié le pas du rapport cyclique qui a résolu l'inconvenant majore des autres méthodes MPPT.

III.5 Conclusion

Nous avons effectué dans ce chapitre la simulation du GPV sous SIMULINK. Cela nous a permis de constituer notre bibliothèque de composants correspondant à un système photovoltaïque, intégrant les modèles du GPV, le convertisseur de puissance, les algorithmes MPPT flou type 2 et la charge. Nous avons également effectué une étude par simulation MPPT par logique flou type 2. Pour cela, nous avons utilisé une série de tests pour mettre les en épreuve dans les cas de conditions climatiques constantes et variables. Nous avons pu constater, à travers les résultats obtenus, l'efficacité de la méthode MPPT floue type 2.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'énergie solaire est l'une des énergies d'intérêt pour de nombreux pays à la lumière des changements des conditions climatiques et naturelles à travers le monde. Où tout pays disposant de ses propres équipements peut exploiter cette énergie. Elle est devenue l'une des énergies renouvelables pouvant répondre à la demande mondiale, qui est l'énergie solaire photovoltaïque. C'est une énergie propre, silencieuse et renouvelable car sa source est disponible et gratuite [8].

Le travail présenté porte sur l'analyse et la comparaison de la modélisation et de la simulation du fonctionnement électrique d'un système PV adaptatif au moyen d'une commande Numérique (commande MPPT) qui assure un suivi maximal de la puissance fournie par le générateur GPV.

La conception des systèmes photovoltaïques dépend du rayonnement solaire reçu par les panneaux solaires photovoltaïques et de l'effet de la température sur les panneaux, ainsi que du Principe des cellules photovoltaïques en plus des avantages et inconvénients qui donnent un Caractère général aux limites de l'exploitation de cette énergie.

Après l'étude, nous avons utilisé un convertisseur DC-DC de type Boost qui fournit une tension constante. Ce convertisseur a l'avantage d'augmenter la tension, ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements de conditions météorologiques et d'extraire le maximum de puissance disponible sur la base du contrôleur numérique MPPT. Ce dernier (modèle MPPT) est basé sur un convertisseur DC-DC et un algorithme de recherche de point de puissance maximale et, donc, en profondeur sur les différents algorithmes des technologies de suivi de point de puissance maximale basées sur l'alimentation directe (puissance électrique).

Nous nous appuyons sur l'algorithme logique floue type 2 et choisissons les valeurs de convertisseur élévateur DC-DC (Boost) Après analyse mathématique des différentes configurations, nous sommes arrivés à développer un modèle de recherche pour MPPT dans Simulink, Nous avons étudié la modélisation et la simulation du système PV. Pour ce dernier, nous avons d'abord étudié :

- Modélisation du générateur photovoltaïque par résolution de l'équation caractéristique non linéaire de la cellule photovoltaïque.
- Trouver le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

- Construire et représenter la structure de contrôle MPPT qui repose sur la logique floue type 2 à travers ses trois étapes (Fuzzification-Mécanisme d'inférence floue et base des règles linguistiques-Défuzzification).

La commande MPPT Logique floue type 2 permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et l'oblige à toujours fonctionner au point de puissance maximum, cependant, une étude comparative des résultats de simulation a révélé que la logique floue de commande MPPT conduit pour de meilleures performances (Réduire les perturbations). A partir des résultats de la comparaison de simulation entre la commande MPPT logique floue (type1 et floue type 2) obtenus, on peut dire :

- L'évaluation du générateur est basée sur les conditions de base du panneau solaire (G=1000W/m2 et T = 25°C).
- Les performances de l'alternateur se détériorent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'éclairement et les changements de charge.
- Le générateur donne de meilleures performances lors de l'abaissement de la température et de l'augmentation de l'éclairement.
- Le convertisseur fournit la tension à sa sortie la plus élevée dans des conditions optimales.
- Ces résultats montrent que l'utilisation de la commande MPPT améliore considérablement le rendement des installations photovoltaïques, notamment lors de l'utilisation de l'élément de commande Logique floue MPPT.

Bibliographie

[1] F.OUDIAI, K.LAGHA-MENOUER, A.HADJ ARAB et R.ZIRIMI, « Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque par incrément de la conductance », 2nd International Seminar on Fossil, New and Renewable Energy, 13-14 Novembre 2019, Boumerdes, Algeria.

[2] Vittorio Guida, « Conception et réalisation d'un convertisseur DC/DC à haut rapport de conversion pour électrolyseurs », Thèse de doctorat, Université de Lorraine-France, 2020.

[3] A.BENZIREG et H.SAID OTHMANI, « Optimisation de la consommation de l'énergie électrique photovoltaïque d'un hacheur MPPT commande par la technique neuro-flou », Mémoire de Master, Université Dr Yahia Fares-Medea, 2018.

[4] M.ZIDANE et A.CHEURFA, « Etude et optimisation d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2020.

[5] F.BENADEL, «Etude et simulation d'une commande MPPT pour système PV», Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2016.

[6] CUONG HUNG TRAN, « Améliorations d'une chaine de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement », Thèse de Doctorat, Université De Reims Champagne, Ardenne ,2019.

[7] A.El Hammoumia, S.Chtita, S.Motahhir, A. El Ghzizal, « Solar PV energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of PV systems: A focus on solar trackers and floating solar panels », Energy Reports 8 (2022) 11992–12010.

[8] Q. M. Huynh, « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour un site isolé », Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2012.

[9] M.AZZOUG et A.BENSALEM, « Etude d'un système a énergie solaire », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2019.

[10] A.MORSLI, « Etude d'un système solaire photovoltaïque utilisant des super-condensateurs », Ecole nationale polytechnique, Alger, 2010.

[11] D. LINCOT, « OÙ EN EST LA CONVERSION photovoltaïque de l'énergie solaire ? », CNRS, Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France, 2018.

[12] A.HELILOU et S.MAATALLAH, « Centrale photovoltaïque injectée au réseau », Université Mohamed Khider, Biskra, 2022.

[13] A.BELKAID, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2015.

[14] N.Aouchiche, «Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté, 2020.

[15] A.DRISSI et S.KHERCHOUCHE, « Commande MPPT d'un système photovoltaïque par l'algorithme d'optimisation Meta-heuristique -Artificiel Bee Colony-(ABC)», Mémoire de Master, Université Mohamed Kheider, Biskra, 2022.

[16] B.GAIED CHORTANE, « Amélioration de l'algorithme MPPT pour un système PV par l'intégration des nouvelles techniques basées sur l'intelligence artificielle », Mémoire de Master, École de technologie supérieure université du Québec, 2022.

[17] Ch.BOULAKHRAS, « Projets réalisés dans les cadres du programme national des énergies renouvelables », Filiale du groupe sonelgaz, 2018.

[18] N. Touil et S. Ghenbasi « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Master, Université d'El Oued 2015.

[19] F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de magister, université Ferhat Abbas, Sétif, 2011.

[20] I.RAMDANI et Y.SADOK, « Commande MPPT basée sur le contrôleur flou de type 2 sur un système de conversion d'énergie photovoltaïque autonome », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2022.

[21] HAKOUMI.A et BENAMAR.A, « Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue », Mémoire De Master, Université Ahmed Draia Adrar, 2019.

[22] ANDRIANANTENAINA .T, MOUSSA.S, SOA .R, N. RAZAFINJAKA, ANDRIANIRINA.Ch, « Optimisation du rendement énergétique d'un système photovoltaïque par algorithme MPPT flou »,2014.

[23] J.Li and H. Wang. Maximum power point tracking of photovoltaic generation based on the fuzzy control method. In Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN'09. International Conference on. 2009. IEEE.

[24] N.AOUCHICHE, Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque, thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté, 2020.

[25] H.HAMADI et A.HAFFAF, «Commande et réalisation d'un convertisseur DC-DC (boost) entrelacé a deux bras», Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2021.

[26] A.ZORIG," Commande non linéaires d'une source décentralisée photovoltaïque à base de convertisseur de puissance entrelaces et parallèles ", Thèse de Doctorat, Université Amer Telidji Laghouat, 2017.

[27] J.Redoutey, "Alimentations à découpage", Mémoire de Troisième année, Conception des Systèmes Automatisés, Centrale Marseille.

[28] I.BELHADJER, «Amélioration de performances d'un système pompage photovoltaïque par la logique floue type-2», Mémoire de Master, Université Dr Yahia Fares, Médéa, 2019.

[29] S.FEKROUN et O.OTHMANE, «Poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par un contrôleur flou type 2 T2FLC», Mémoire de Master, Université Dr Yahia Fares, Médéa, 2017.

[30] S.GRAIDIA, «Commande adaptative floue type-2 par mode glissant des système chaotiques », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, Algérie. 2012.

[31] F.BENADEL, «Etude et simulation d'une commande MPPT pour système PV», Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2016.

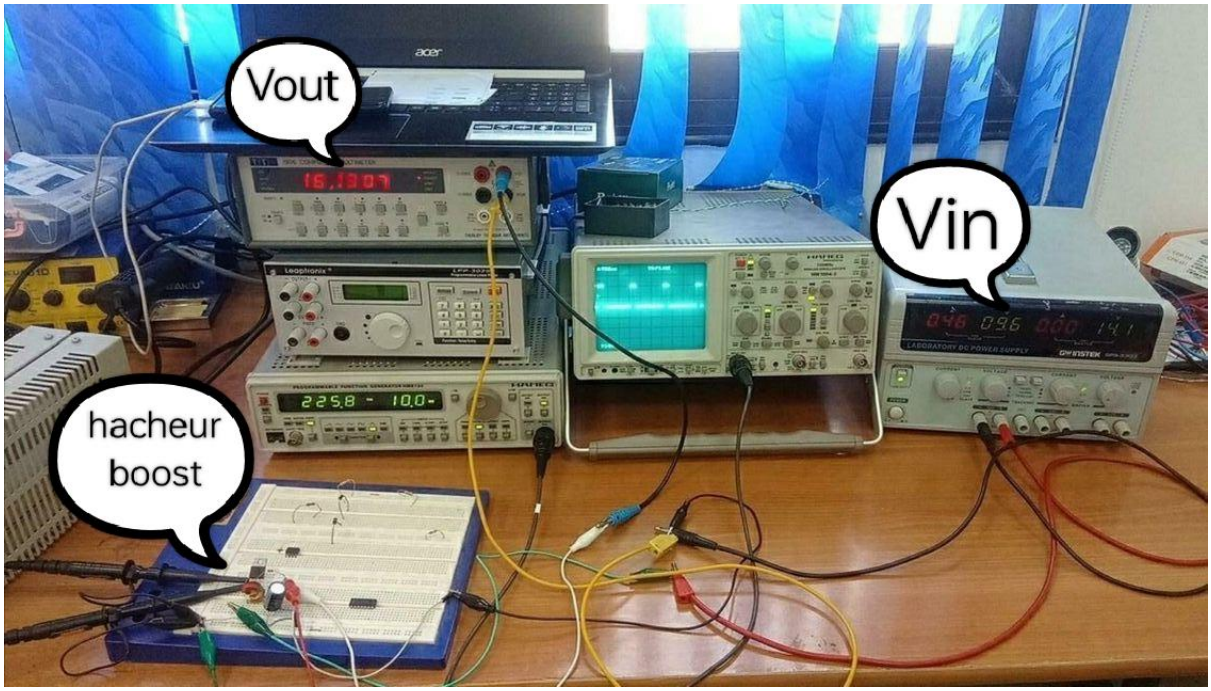
[32] L.BACHIRI et A.MIDA, «Etude d'un système photovoltaïque optimisé par une technique MPPT intelligente (neurone-floue) ANFIS», Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2021

ANNEXE

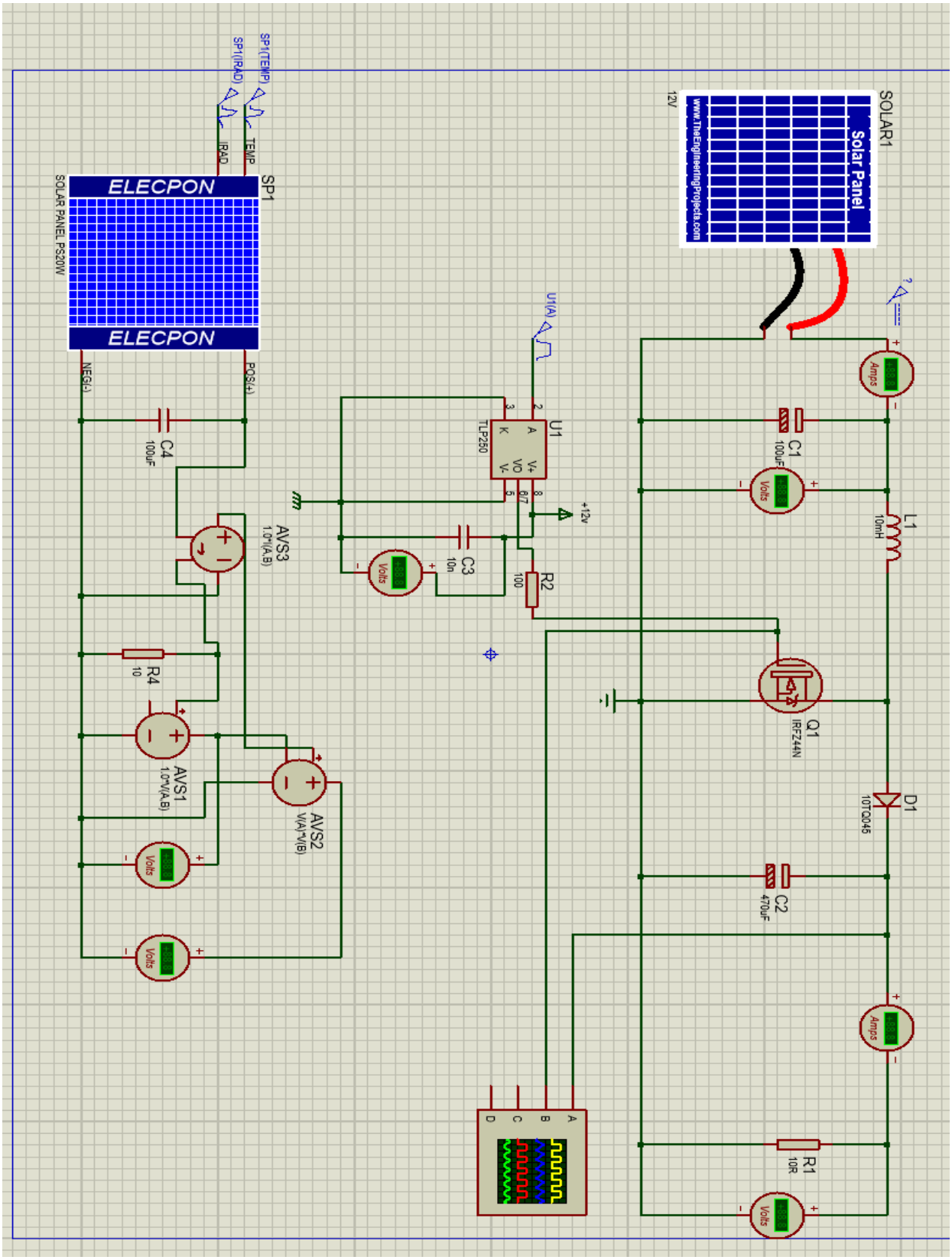
Annexe 1 : Paramètres du convertisseur boost

Les composants	*La valeur*	*Unité*
Capacité input	$C1=8000.10^{-6}$	***F***
Inductance	$L=0.001$	***H***
Capacité output	$C2=2000.10^{-6}$	***F***
Résistance de charge	$R_{charge}=100$	***Ω***
Powergui	$T=5.10^{-6}$	***S***

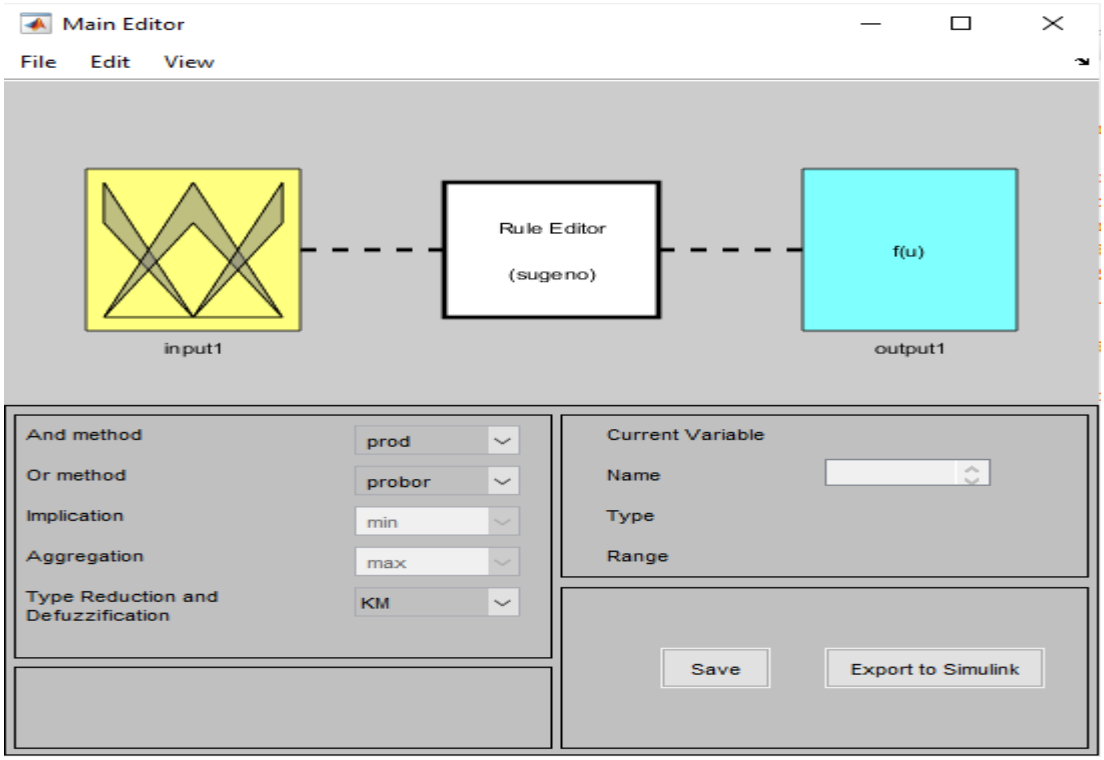
Annexe 2 : implémentation expérimentale du convertisseur boost

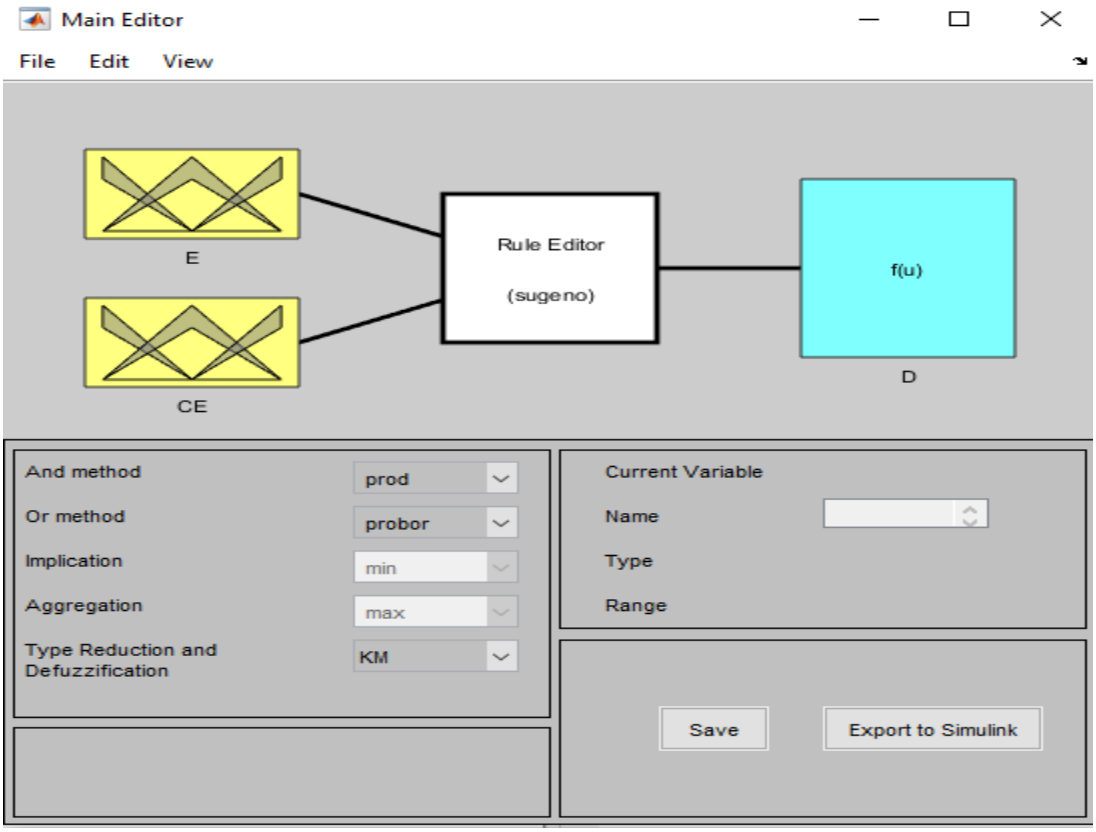


Annexe 3 : simulation d'un système PV sur Prteus



Annexe 4 : Interface du TOOLBOX Fuzzy Type 2 utilisé lors de la simulation





Annexe 5 : Kyocera KC200GT

KYOCERA

KC200GT

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL
PHOTOVOLTAIC MODULE



LISTED

HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic module.
The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 16%.
These cells are encapsulated between a tempered glass cover and a pottant with back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions.
The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation.
Equipped with plug-in connectors.

APPLICATIONS

KC200GT is ideal for grid tie system applications.

- Residential roof top systems
- Large commercial grid tie systems
- Water Pumping systems
- High Voltage stand alone systems
- etc.

QUALIFICATIONS

- **MODULE** : UL1703 certified
- **FACTORY** : ISO9001 and ISO 14001

QUALITY ASSURANCE

Kyocera multicrystal photovoltaic modules have passed the following tests.

- Thermal cycling test
- Thermal shock test
- Thermal / Freezing and high humidity cycling test
- Electrical isolation test
- Hail impact test
- Mechanical, wind and twist loading test
- Salt mist test
- Light and water-exposure test
- Field exposure test

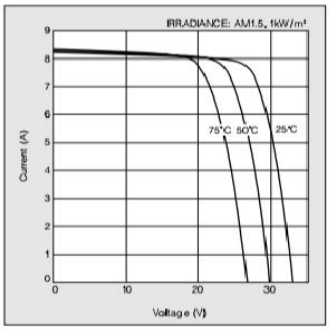
LIMITED WARRANTY

※1 year limited warranty on material and workmanship
※20 years limited warranty on power output: For detail, please refer to "category IV" in Warranty issued by Kyocera

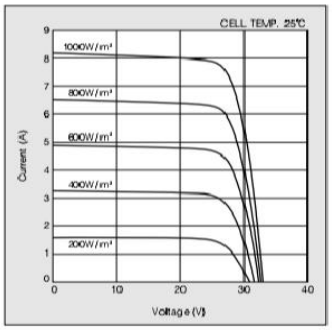
(Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to Warranty issued by Kyocera)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC200GT at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC200GT at various irradiance levels

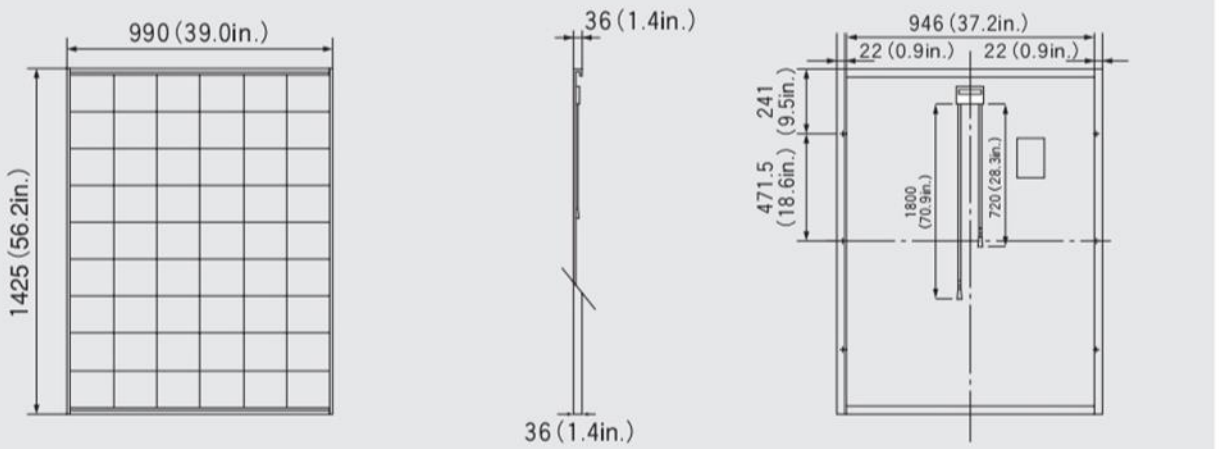


SPECIFICATIONS

KC200GT

Physical Specifications

Unit : mm (in.)



Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (Pmax)	200W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (Vmpp)	26.3V
Maximum Power Current (Impp)	7.61A
Open Circuit Voltage (Voc)	32.9V
Short Circuit Current (Isc)	8.21A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	-1.23×10^{-1} V/℃
Temperature Coefficient of Isc	3.18×10^{-3} A/℃

*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperture 25℃

Electrical Performance at 800W/m², NOCT, AM1.5	
Maximum Power (Pmax)	142W
Maximum Power Voltage (Vmpp)	23.2V
Maximum Power Current (Impp)	6.13A
Open Circuit Voltage (Voc)	29.9V
Short Circuit Current (Isc)	6.62A

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47℃

Cells	
Number per Module	54

Module Characteristics	
Length × Width × Depth	1425mm(56.2in)×990mm(39.0in)×36mm(1.4in)
Weight	18.5kg(40.7lbs.)
Cable	(+)720mm(28.3in),(-)1800mm(70.9in)

Junction Box Characteristics	
Length × Width × Depth	113.6mm(4.5in)×76mm(3.0in)×9mm(0.4in)
IP Code	IP65

Reduction of Efficiency under Low Irradiance	
Reduction	7.8%

Reduction of efficiency from an irrandiance of 1000W/m² to 200W/m² (module temperature 25℃)

Please contact our office for further information

KYOCERA

KYOCERA Corporation

■ KYOCERA Corporation Headquarters
CORPORATE SOLAR ENERGY DIVISION
6 Takeda Tobadono-cho
Fushimi-ku, Kyoto
612-8501, Japan
TEL:(81)75-604-3476 FAX:(81)75-604-3475
http://www.kyocera.com

● KYOCERA Solar, Inc.
7812 East Acoma Drive
Scottsdale, AZ 85260, USA
TEL:(1)480-948-8003 or (800)223-9580 FAX:(1)480-483-6431
http://www.kyocerasolar.com

● KYOCERA Solar do Brasil Ltda.
Av. Guignard 661, Loja A
22790-200, Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Brazil
TEL:(55)21-2437-8525 FAX:(55)21-2437-2338
http://www.kyocerasolar.com.br

● KYOCERA Solar Pty Ltd.
Level 3, 6-10 Talavera Road, North Ryde
N.S.W. 2113, Australia
TEL:(61)2-9870-3948 FAX:(61)2-9888-9588
http://www.kyocerasolar.com.au/

● KYOCERA Fineceramics GmbH
Fritz Muller strasse 107, D-73730 Esslingen, Germany
TEL:(49)711-93934-917 FAX:(49)711-93934-950
http://www.kyocerasolar.de/

● KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.
298 Tiong Bahru Road, #13-03/05
Central Plaza, Singapore 168730
TEL:(65)6271-0500 FAX:(65)6271-0600

● KYOCERA Asia Pacific Ltd.
Room 801-802, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,
Tsimshatsui East, Kowloon, Hong Kong
TEL:(852)2-7237183 FAX:(852)2-7244501

● KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office
10 Fl., No.66, Nanking West Road, Taipei, Taiwan
TEL:(886)2-2555-3609 FAX:(886)2-2559-4131

● KYOCERA(Tianjin) Sales & Trading Corporation
19F, Tower C HeQiao Building 8A GuangHua Rd.,
Chao Yang District, Beijing 100026, China
TEL:(86)10-6583-2270 FAX:(86)10-6583-2250

Kyocera reserves the right to modify these specifications without notice

Annexe 6: Attestation de participation

University of Medea – Faculty of Science

CERTIFICATE

OF PARTICIPATION

THIS IS TO CERTIFY THAT:

MAHAMMEDI Amina

has attended the «**University week of artificial intelligence** »
16-19 April 2023 – University of Medea
and presented the work entitled

« Optimisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT logique floue type 2»

co-devlopers: **AMOKRANE Zouhir, MORSLI Abdelkader, SAHRAOUI Dounia**

AI'2023

عميد كلية
أ.د: حديدي نور الدين

مدير جامعة المدية
الأستاذ: بوسروري جعفر