

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance en Automatismes et instrumentation

Thème

Systeme Intelligent pour la poursuite du point maximum de la puissance dans un panneau photovoltaïque

Présenté et soutenu publiquement par :

SEBA AIMENE

BENCHAI MUSTAPHA

Devant le jury composé de :

Mm. Chouiteq Mama	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Président
Mm. LEZREG Malika	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Encadreur
Mr.	MCA	Univ. Oran-2, IMSI	Examineur

Juin 2025

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail. Nous tenons à témoigner notre gratitude et reconnaissance à notre encadreur « LAZREG MALIKA » pour nous avoir accompagné tout le long de ce mémoire, pour la confiance qu'il nous a transmis et d'avoir mis à notre disposition tout son savoir faire et ses qualités intellectuelles, professionnelles et humaines. Nos vifs remerciements vont aux membres du jury de nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail et d'avoir contribué à son aboutissement. Un grand merci à nos familles et à tous nos amis (es) qui nous ont soutenu, aidé et encouragé tout le long de notre parcours.

Dédicaces

Grâce à mon
Dieu Je dédie ce
travail à :

Mes chers parents que j'aime plus que tout le monde,
pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse et leur
présence dans les moments les plus difficiles « Dieu les
protège ».

Mon frère Moulay
ZAKARIA

Et

Hadj

Toute ma famille ; chacun par son nom

Mes chers enseignants

Tous ceux qui aiment le bonheur pour tout le monde.

MUSTAPHA

Avant tout, je remercie dieu le tout puissant de
m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser
Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées. Je
dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les
Protège pour leurs soutien moral et financier, pour
Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont
endurés.

Et mes chers amis et en particulier Youcef
mohamed et brahim adel A tous ce que j'aime
A tous les professeurs de l'université d'Oran 2 et
spécialement mon Encadreur Mm :LAZREG malika

Et

Mr Bouhafs Mohamed

A tous mes collègues d'études en maintenance automatisme et
instrumentation

AIMENE

Symbole	Signification
PV	Photovoltaïque
MPP	Point de puissance maximale
$MPPT$	Maximum power point tracking
h	Constante de Plank
V_{oc}	Tension de circuit
I_{cc}	Courant de court circuit
AC	Courant alternatif
P_m	Puissance maximale
V_m	Tension maximal
FF	Facteur de forme
η	Rendement
G	Irradiation
I_L	Courant d'obscurité
R_s	Résistance interne de la cellule
R_p	Résistance shunt
I_{cell}	Courant de sortie de la cellule P
V_{cell}	Tension de sortie de la cellule PV
k	Constante de Boltzman
n	Facteur d'idéalité de la diode
N_s	Nombre de cellules en série
N_p	Nombre de cellules en parallèle
$\Phi G \varepsilon$	Gain de l'erreur du flux
G_{std}	Condition standard d'irradiation
N_{ss}	Nombre de panneaux en série
N_{pp}	Nombre de panneaux en parallèle
K_I	Coefficient de température du courant de court circuit
K_V	Coefficient de température de la tension à circuit ouvert
D	Rapport cyclique
$P\&O$	Perturbation et Observation
V_{PV}	Tension de sortie du GPV
P_{PV}	Puissance de sortie du GPV
I_o	Courant de saturation de la diode
V_t	Tension thermique

T	Température instantannée
T_{std}	Température condition standard du module P

Liste des figure

- Figure 1** centrale photovoltaïque algerie hassi r'mel - Page 16
- Figure 2** Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque - Page 18
- Figure 3** Composition d'un module photovoltaïque - Page 20
- Figure 4** schéma de absorption de lumière - Page 21
- Figure 5** schéma de production d'électricité - Page 21
- Figure 6** des modules monocristallins - Page 23
- Figure 7** Modules polycristallins - Page 23
- Figure 8** Modules à couches minces - Page 24
- Figure 9** Modules bifaciaux - Page 24
- Figure 1.1** Système photovoltaïque connecté au réseau - Page 25
- Figure 1.2** Système photovoltaïque autonome - Page 25
- Figure 1.3** Systèmes photovoltaïques autonomes à l'URAER - Page 26
- Figure 1.4** Système photovoltaïque hybride - Page 27
- Figure 2.1** Groupement de panneaux solaires photovoltaïques - Page 30
- Figure 2.2** les différentes zones de la caractéristique I(V) - Page 31
- Figure 2.3** Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire PV - Page 32
- Figure 2.4** Circuit équivalent d'une cellule - Page 33
- Figure 2.5** Groupement de N_s cellules - Page 34
- Figure 2.6** Structure matricielle d'un générateur photovoltaïque - Page 35
- Figure 2.7** Simulation de cinq panneaux PV en série - Page 39
- Figure 2.8** Simulation de cinq panneaux PV en parallèle - Page 41
- Figure 2.9** Simulation d'un groupement mixte de panneaux PV - Page 42
- Figure 2.10** Courbes I-V et P-V pour différentes températures - Page 44
- Figure 2.11** Courbes I-V et P-V pour différents éclaircements - Page 45
- Figure 2.12** Modèle Simulink d'un générateur PV relié directement à une charge - Page 46
- Figure 3.1** Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT - Page 50
- Figure 3.2** Schéma représentatif du principe de la méthode à contre réaction de tension - Page 51
- Figure 3.3** Organigramme de l'algorithme de P&O - Page 53
- Figure 3.4** Modèle Simulink d'un générateur PV relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT avec l'algorithme P&O - Page 56
- Figure 3.5** Puissance générée par un générateur PV relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT avec l'algorithme P&O pour différentes valeurs G - Page 57

Figure 3.6 tension, courant, Puissance générée par un générateur PV relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT avec l'algorithme P&O pour différentes valeurs de l'éclairement - Page 57

Figure 3.7 Configuration globale du contrôleur à logique floue sous Matlab/Simulink - Page 59

Figure 3.8 Schéma synoptique général d'un contrôleur flou - Page 60

Figure 3.9 Fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou - Page 62

Figure 3.10 Surface caractéristique du régulateur floue - Page 63

Figure 3.11 Modèle Simulink d'un générateur PV relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT à logique floue FLC - Page 64

Figure 4.1 Représentation schématique d'un neurone biologique - Page 68

Figure 4.2 Schéma bloc d'un neurone artificiel - Page 69

Figure 4.3 Schéma bloc d'une couche de S neurones artificiels - Page 69

Figure 4.4 Schéma bloc d'un réseau de neurones artificiels à k couches - Page 70

Figure 4.5 Étapes d'apprentissage d'un réseau de neurones artificiels - Page 71

Figure 4.6 Structure d'un contrôleur neuro floue à deux entrées - Page 73

Figure 4.7 Schéma bloc du contrôleur MPPT neuro flou - Page 73

Figure 4.8 Modèle Simulink d'un générateur PV relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT Neuro Floue - Page 77

Figure 4.9 Modèle Simulink de la MPPT Neuro Floue - Page 77

Figure 4.10 résultat de puissance en simulation avec neuro flow - Page 78

Figure 4.11 résultat de tension et le courant en simulation avec neuro flow - Page 79

Tables

Table 1	Caractéristiques du module KC200GT	39
Table 2	Résultats de simulation pour un groupement série-parallèle	44
Table 3	Résultats de simulation pour un groupement	45
Table 4	Puissance produite par un générateur photovoltaïque	47
Table 5	Tableau des règles de décision floue (inférence)	62
Table 6	Valeurs des poids σ_i associés aux entrées de la quatrième couche du contrôleur MPPT neuro-flou	74

Sommaire

Introduction Générale	13
------------------------------------	-----------

Chapitre I: Généralités sur les énergies renouvelable

1.1 Introduction :	14
1.2 l'énergie	14
1.2.1 L'importance de l'énergie	14
1.2.2 L'énergie solaire	15
1.3 Système photovoltaïque	16
1.3.1 Historique du photovoltaïque	16
1.3.2 Le principe de Système photovoltaïque	17
Composants d'un Système Photovoltaïque	18
1.4 module photovoltaïque	19
1.4.1 Composition d'un module photovoltaïque :	19
1.4.2 Fonctionnement d'un module photovoltaïque :	20
1.4.3 Types de modules photovoltaïques :	21
1.4.4 Avantages des systèmes photovoltaïques :	23
1.4.5 Inconvénients des systèmes photovoltaïques :	23
1.5 Types de Systèmes Photovoltaïques	24

Chapitre II : Modélisation d'un générateur photovoltaïque

2.1. Introduction	29
2.1.1 L'énergie solaire photovoltaïque	29

2.2. Le générateur photovoltaïque	29
2.3. Spécification et comportement électrique du générateur photovoltaïque:	31
2.3.1 Analyse topologique des régimes opérationnels (Fig. 2.2) :	31
2.3.2 Implications systémiques : Cette tripartite des régimes opérationnels met en évidence de nombreuses caractéristiques essentielles :	31
2.4. Paramètres caractéristiques de la cellule photovoltaïque:	32
2.4.1. Tension en circuit ouvert (V_{oc}) :	32
2.4.2 Courant de court-circuit (I_{sc}) :	32
2.4.3. Puissance maximale (P_{max}) :	33
2.4.4. Facteur de forme (FF) :	33
2.4.5 Rendement de conversion (η) :	33
2.4.6 Tableau récapitulatif des paramètres clés:	33
2.5. Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque:	34
2.6. Modélisation mathématique d'un panneau photovoltaïque à N_s cellules en série:	36
2.7 Modélisation théorique d'un générateur photovoltaïque:	37
2.7.1 Architecture électrique fondamentale:	37
2.7.2 Relations électriques fondamentales:	37
2.8. Association des panneaux photovoltaïques:	38
2.8.1. Association en série:	38
2.8.1.1 Implications de la configuration série:	39
2.8.2. Configuration en parallèle:	41
2.8.3 Association mixte des panneaux solaires photovoltaïques:	41
2.9. Influence de l'éclairement et de la température sur le comportement d'un générateur PV:	42
2.9.1. Influence de la température :	43
2.9.2 Impact de l'éclairement:	44
2.10. Simulation d'un générateur photovoltaïque connecté directement à une charge:	46

Chapitre III : Recherche du point maximum de puissance

2.11 Conclusion:	47
3.1. Introduction:	50
3.2 Aperçu général des différentes méthodes MPPT:	51
3.2.1 Méthode à contre-réaction de tension:	51
3.2.2 Méthode à contre-réaction de puissance:	52
3.3. Fonctionnement de la méthode MPPT par l'algorithme Perturb and Observe (P&O) :	53
3.4. Commande MPPT basée sur la logique floue:	58
3.4.1. Conception du contrôleur flou:	58
3.4.1.1. Interface de fuzzification :	60
3.4.1.2. Banque de connaissance :	60
3.4.1.3. Logique de décision (ou moteur d'inférence) :	60
3.4.1.4. Interface de défuzzification :	61
3.4.2. Simulation de la méthode MPPT avec logique flou:	63
Conclusion:	64

Chapitre IV : Commande MPPT Neuro Floue d'un générateur photovoltaïque

4.1 Introduction	67
4.2. Généralités sur les réseaux de neurones	Error! Bookmark not defined.
4.2.1 Inspiration Biologique	68
4.2.2. Modèle mathématique d'un neurone artificiel :	69
4.2.3. Architecture d'un réseau de neurones artificiels :	69
4.2.4 Apprentissage des réseaux de neurons	71
4.3. Commande MPPT Neuro-Floue	72
4.3.1. Principe de la commande MPPT Neuro-Floue	72
4.3.2 Entraînement du contrôleur MPPT Neuro-Flou	75
4.4. Simulation de la méthode MPPT par l'algorithme P&O	76
Conclusion générale	81

Bibliographie	82
----------------------------	-----------

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Depuis la raréfaction croissante du pétrole, du gaz naturel, du charbon et de l'uranium, des ressources fossiles, et les perturbations environnementales de leur exploitation (tout particulièrement en ce qui concerne la pollution atmosphérique) la recherche des énergies propres et durables s'est imposée nécessaire. Dans un tel contexte, et essentiellement dans notre pays l'énergie solaire est une solution audacieuse comme énergie renouvelable répondant aux normes écologiques.

L'exploitation de l'énergie solaire par l'intermédiaire des systèmes photovoltaïques a observé une croissance énorme ces dernières décennies. Néanmoins, cela dépend en grande partie d'un certain nombre de facteurs extérieurs comme l'ensoleillement et la température ; la production électrique d'un générateur photovoltaïque cela exige l'optimisation de son fonctionnement.

Parmi les techniques connues nous pouvons citer :

-La technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui permet de récupérer instantanément la puissance la plus élevée possible qu'un module photovoltaïque est en mesure de fournir.

En vue de cette finalité, divers algorithmes de commande ont été définis ; la qualité de la commande du système.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons tenu à modéliser et simuler trois différents types de commandes MPPT applicables à un générateur photovoltaïque ; afin d'évaluer l'efficacité de ces méthodes, une série de simulations seront effectuées avec différentes conditions d'éclairement et de charges.

- La commande par l'algorithme conventionnel Perturber et Observer (P&O)
- La commande par un contrôleur flou
- La commande par un contrôleur neuro-flou 'ANFIS'

Ce travail est structuré en quatre chapitres :

-Le chapitre I présente les généralités sur les énergies renouvelables, avec un focus sur l'énergie solaire photovoltaïque.

-Le chapitre II est consacré à la modélisation électrique d'un générateur photovoltaïque et à l'étude de l'impact des paramètres externes sur ses performances.

-Le chapitre III détaille les méthodes MPPT classiques et floues, avec des comparaisons basées sur des simulations.

- Enfin, le chapitre IV introduit et analyse la commande neuro-floue, en la comparant aux méthodes précédentes sur le plan de la performance et de la stabilité.

La conclusion se fera par une synthèse générale des résultats obtenus et par des perspectives d'amélioration et de recherches futures.

1.1 Introduction

Ce premier chapitre présente un aperçu général de l'énergie et de son importance, avec un focus particulier sur l'énergie solaire. Il décrit ensuite le système photovoltaïque, en abordant son historique, son principe de fonctionnement ainsi que ses composants essentiels. Par la suite, nous explorons en détail le module photovoltaïque, ses types, son fonctionnement, ainsi que ses avantages et inconvénients. Enfin, une classification des différents types de systèmes photovoltaïques est proposée, selon leur mode de fonctionnement et leur intégration au réseau.

1.2 l'énergie

L'énergie, c'est ce qui fait que les choses bougent, chauffent, s'allument ou fonctionnent. En gros, c'est la capacité à faire un travail, comme soulever un objet, faire rouler une voiture ou éclairer une maison. L'énergie existe sous plein de formes différentes :

- **Énergie cinétique** : L'énergie du mouvement, comme une voiture qui roule ou le vent qui souffle.
- **Énergie potentielle** : L'énergie "stockée", par exemple, un ballon en haut d'une colline ou l'eau derrière un barrage.
- **Énergie thermique** : La chaleur, comme dans une casserole d'eau chaude.
- **Énergie électrique** : Ce qui fait marcher nos téléphones, ordinateurs ou lampes.
- **Énergie chimique** : L'énergie dans les aliments qu'on mange ou dans l'essence d'une voiture.
- **Énergie nucléaire** : L'énergie qui vient des atomes, comme dans les centrales nucléaires.

L'énergie peut se transformer d'une forme à une autre. Par exemple, dans une centrale hydroélectrique, l'énergie potentielle de l'eau devient énergie cinétique en tombant, puis énergie électrique grâce à une turbine. On mesure l'énergie en joules (J) dans les sciences, mais pour l'électricité, on utilise souvent les watt-heures (Wh) ou kilowatt-heures (kWh), comme sur une facture d'électricité [6] .

L'énergie est partout : dans la nature (le soleil qui chauffe la Terre, les vagues de la mer), dans nos maisons (la lumière, le frigo), et dans les usines (les machines). Sans énergie, rien ne marche !

1.2.1 L'importance de l'énergie

L'énergie, c'est la base de tout ce qu'on fait aujourd'hui, et elle joue un rôle énorme dans nos vies et dans le monde [6] . Voici pourquoi elle compte autant, avec plus de détails :

1. Elle fait tourner la société :

L'énergie, c'est ce qui permet d'avoir de l'électricité pour éclairer nos maisons, charger nos téléphones ou faire marcher les hôpitaux. Les usines ont besoin d'énergie pour fabriquer des vêtements, des voitures ou de la nourriture. Les transports aussi : les trains, les avions, les voitures roulent grâce à l'énergie (électricité, essence, etc.). Sans énergie, tout s'arrête, et notre vie quotidienne serait impossible. Par exemple, imagine un monde sans électricité : pas d'Internet, pas de télé, pas de frigo !

2. Elle aide au développement des pays :

Dans les pays en développement, avoir accès à l'énergie change tout. Avec l'électricité, les enfants peuvent étudier le soir, les hôpitaux peuvent utiliser des machines pour soigner, et les entreprises peuvent se développer. L'énergie aide à réduire la pauvreté et à améliorer la qualité de vie. Selon l'ONU, environ 700 millions de personnes n'ont toujours pas accès à l'électricité en 2023, surtout en Afrique et en Asie. Donner de l'énergie à tout le monde, c'est un grand objectif mondial.

3. Elle pose des défis pour l'environnement :

Aujourd'hui, beaucoup d'énergie vient du pétrole, du gaz ou du charbon. Ces énergies fossiles sont pratiques, mais elles polluent énormément. Elles produisent du CO₂, qui cause le réchauffement climatique, et d'autres polluants qui abîment l'air et la santé. Par exemple, les scientifiques disent qu'il faut réduire les émissions de CO₂ de moitié d'ici 2030 pour limiter le réchauffement à 1,5 °C. C'est pour ça qu'on se tourne vers des énergies propres, comme le soleil, le vent ou l'eau, qui ne polluent presque pas. Mais il faut les développer vite !

4. Elle pousse à inventer des solutions :

Comme la population mondiale augmente (on est plus de 8 milliards maintenant), et que tout le monde veut plus d'énergie, il faut trouver des moyens de la produire et de l'utiliser mieux. Les ingénieurs inventent des technologies pour économiser l'énergie (comme des ampoules LED), stocker l'électricité (avec des batteries) ou la distribuer intelligemment (avec des réseaux électriques modernes). Par exemple, les voitures électriques consomment moins d'énergie polluante que les voitures à essence. Ces inventions sont super importantes pour l'avenir.

5. Elle concerne tout le monde :

L'énergie, ce n'est pas juste une affaire de scientifiques ou de gouvernements. Chaque personne peut faire une différence, en éteignant les lumières inutiles, en utilisant des transports en commun ou en soutenant les énergies renouvelables. En plus, les métiers liés à l'énergie (ingénieurs, techniciens, chercheurs) sont en plein boom, donc c'est un domaine qui crée des jobs et des opportunités.

1.2.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'une des principales sources d'énergie renouvelables utilisées à travers le monde. Elle est issue du rayonnement émis par le soleil, qui parvient à la surface terrestre sous forme de lumière et de chaleur. Chaque année, la Terre reçoit environ 10 000 fois plus d'énergie solaire que la consommation énergétique mondiale annuelle, ce qui fait de cette ressource une option extrêmement prometteuse pour répondre aux défis énergétiques et climatiques de demain [1].

L'énergie solaire présente plusieurs avantages majeurs :

- Abondante et gratuite : le soleil brille sur toute la planète, avec un potentiel élevé même dans les zones désertiques.
- Propre : elle ne génère aucune émission de gaz à effet de serre lors de sa conversion en électricité.

Chapitre I: Généralités sur les énergies renouvelables

- Disponible localement : elle permet une production décentralisée et réduit la dépendance aux énergies importées.
- Adaptable : elle peut alimenter aussi bien des maisons individuelles que des grandes centrales électriques.

En Algérie, l'ensoleillement est exceptionnel, avec des valeurs dépassant 2 000 à 3 900 kWh/m²/an dans le sud du pays, ce qui en fait l'un des territoires les plus prometteurs pour l'exploitation solaire à grande échelle [2]. Ce potentiel a été reconnu dans le cadre du Programme national de développement des énergies renouvelables, qui vise à atteindre 22 000 MW de capacité installée en 2030, dont une grande partie en solaire photovoltaïque. Cependant, pour valoriser efficacement cette énergie, il est crucial d'optimiser les systèmes de conversion, en particulier les installations photovoltaïques, afin d'en extraire le maximum d'énergie quelles que soient les variations d'ensoleillement. C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail de recherche.



Figure 1 centrale photovoltaïque algérie hassi r'mel

1.3 Système photovoltaïque

1.3.1 Historique du photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque, qui permet de convertir la lumière du soleil en électricité, repose sur un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque. Ce principe fondamental a été découvert dès le XIX^e siècle, et son exploitation a connu une évolution progressive à travers plusieurs étapes clés.

C'est en 1839 que le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel met en évidence pour la première fois l'effet photovoltaïque. Lors d'une expérience avec des électrodes dans une solution conductrice, il

remarque que la lumière peut produire un courant électrique. Cette découverte marque le point de départ de la conversion de la lumière en électricité [3].

Quelques décennies plus tard, en 1873, Willoughby Smith découvre que le sélénium possède une propriété de photoconductivité, c'est-à-dire qu'il devient conducteur lorsqu'il est exposé à la lumière. Cette propriété est exploitée en 1883 par Charles Fritts, qui construit la première cellule solaire à base de sélénium recouvert d'une fine couche d'or. Le rendement de cette cellule reste très faible (moins de 1 %), mais cette invention est considérée comme l'ancêtre des cellules photovoltaïques modernes [4].

La véritable révolution intervient en 1954 aux Bell Laboratories (États-Unis), lorsque Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson développent la première cellule photovoltaïque en silicium capable de générer suffisamment d'électricité pour alimenter un petit appareil. Le rendement atteint alors environ 6 %, ce qui représente une avancée significative par rapport aux tentatives précédentes [5].

En 1958, les cellules solaires trouvent leur première application concrète dans le domaine spatial, avec le satellite américain Vanguard I, qui utilise des panneaux photovoltaïques pour alimenter son équipement. Ce succès marque le début de l'utilisation du photovoltaïque dans l'aérospatiale.

Au cours des années 1970 et 1980, le contexte du choc pétrolier et la prise de conscience écologique favorisent le développement de l'énergie solaire pour des usages civils, notamment dans les zones rurales ou isolées. Des programmes de recherche voient le jour dans plusieurs pays.

À partir des années 2000, la technologie photovoltaïque connaît une forte croissance industrielle. La baisse des coûts de production, liée aux innovations et à la fabrication de masse (notamment en Asie), rend l'énergie solaire de plus en plus compétitive. Aujourd'hui, les cellules en silicium monocristallin atteignent des rendements de 20 à 25 %, et de nouvelles technologies comme les cellules bifaciales ou à couches minces sont en constante évolution.

Ainsi, le photovoltaïque est passé d'un phénomène physique observé en laboratoire à une solution énergétique majeure à l'échelle mondiale.

1.3.2 Le principe de Système photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques offrent une solution de production d'électricité propre, silencieuse et fiable, en exploitant l'énergie solaire. Ces systèmes reposent sur le principe de la conversion directe de l'énergie lumineuse en électricité, ce qui les rend particulièrement adaptés dans les régions bénéficiant d'un bon ensoleillement.

Les cellules photovoltaïques constituent l'unité de base de ces systèmes. Elles sont responsables de la conversion de l'énergie lumineuse (généralement celle du soleil) en courant continu (DC), par un phénomène appelé effet photovoltaïque. En raison de la source de lumière utilisée, ces dispositifs sont souvent appelés cellules solaires.

Composants d'un Système Photovoltaïque

Un système photovoltaïque complet comprend plusieurs éléments qui assurent la conversion, le stockage et la gestion de l'énergie solaire. Les principaux composants sont les suivants :

- **Panneaux solaires** : Ce sont des ensembles de cellules photovoltaïques connectées entre elles. Elles collectent l'énergie lumineuse et génèrent un courant continu. La disposition des cellules sur les panneaux permet d'optimiser la surface de collecte.
- **Batteries** : Les batteries sont des dispositifs de stockage de l'énergie produite par les panneaux. Elles permettent de stocker l'électricité excédentaire pour une utilisation ultérieure, notamment pendant la nuit ou lors de journées nuageuses. Les batteries sont particulièrement importantes dans les systèmes autonomes qui ne sont pas connectés au réseau électrique.
- **Régulateurs/Contrôleurs** : Ces dispositifs sont chargés de réguler le flux d'énergie entre les panneaux solaires, les batteries et la charge. Ils assurent la protection des batteries contre la surcharge et la décharge excessive, ce qui prolongerait leur durée de vie.
- **Onduleurs** : Dans un système connecté au réseau, les onduleurs jouent un rôle clé en convertissant le courant continu (DC) généré par les panneaux solaires en courant alternatif (AC), qui est utilisé par les appareils électroménagers ou injecté dans le réseau électrique.
- **Charge** : La charge représente les appareils qui consomment l'énergie produite par les panneaux solaires. Cela peut inclure des éclairages, des appareils ménagers, ou même des installations industrielles selon la capacité du système.

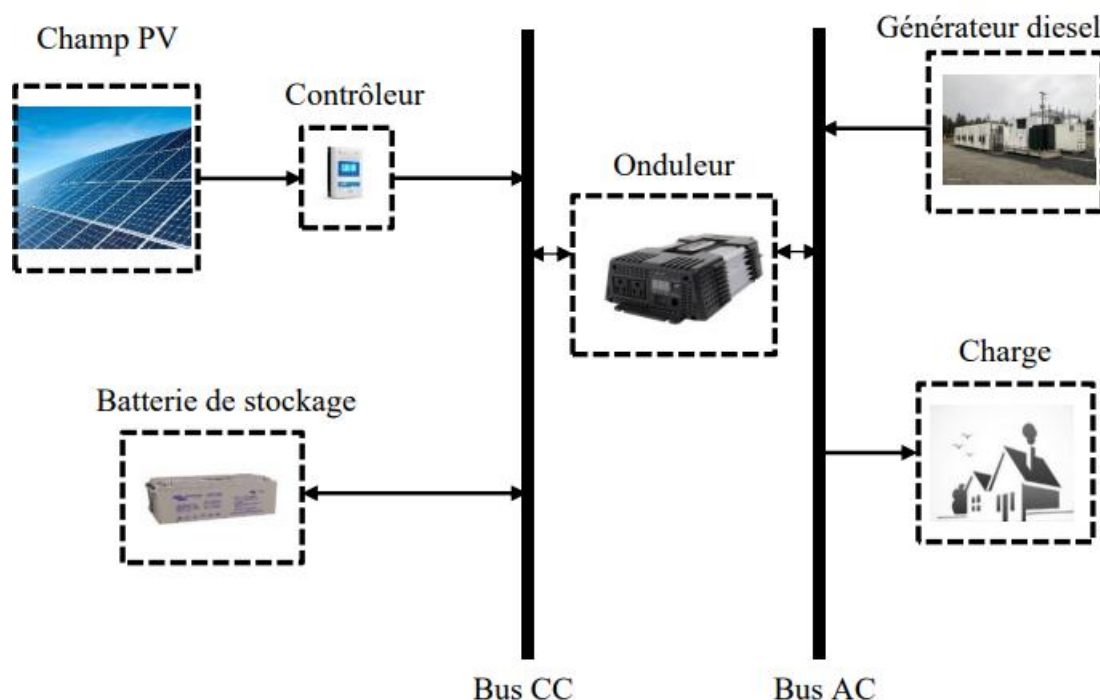


Figure 2 Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque

1.4 Module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est un assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques (ou cellules solaires) connectées ensemble, conçu pour capter la lumière du soleil et la transformer en électricité via l'effet photovoltaïque. Il constitue la première étape dans la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique utilisable.

1.4.1 Composition d'un module photovoltaïque :

1. Cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques sont généralement fabriquées en silicium. Le silicium est un matériau semi-conducteur qui, lorsqu'il est exposé à la lumière du soleil, génère un courant électrique par le phénomène [7] de l'effet photovoltaïque.

2. Verre :

- Un module photovoltaïque est protégé par une couche de **verre** transparent sur le devant, qui permet à la lumière de pénétrer tout en protégeant les cellules des conditions environnementales (pluie, neige, vent).

3. Film de protection :

- Une ou plusieurs couches de film plastique (souvent du Tedlar ou du PET) sont utilisées pour protéger les cellules et garantir leur durabilité en conditions extérieures.

4. Cadre en aluminium :

- Le **cadre** des modules photovoltaïques est généralement en **aluminium**, un matériau léger et résistant qui protège les cellules contre les impacts et facilite l'installation.

5. Plaque arrière :

- La **plaque arrière** est une couche de protection supplémentaire, souvent en plastique ou en métal, qui protège les cellules photovoltaïques des dommages et des facteurs environnementaux.

6. Boîte de jonction :

- La **boîte de jonction** contient les fils électriques connectant les cellules photovoltaïques. Elle est aussi équipée de diodes pour empêcher l'effet de "reverse current" et optimiser l'efficacité.

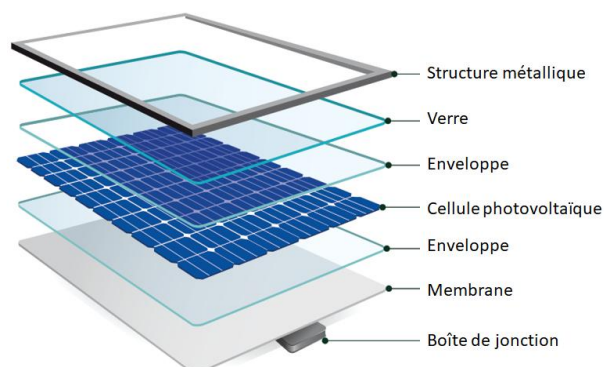


Figure 3 Composition d'un module photovoltaïque

1.4.2 Fonctionnement d'un module photovoltaïque :

1. Absorption de la lumière :

- Les cellules photovoltaïques absorbent la lumière du soleil et génèrent des électrons grâce à l'effet photovoltaïque, qui est le phénomène physique qui se produit lorsque la lumière frappe un matériau semi-conducteur (silicium), créant un courant électrique.

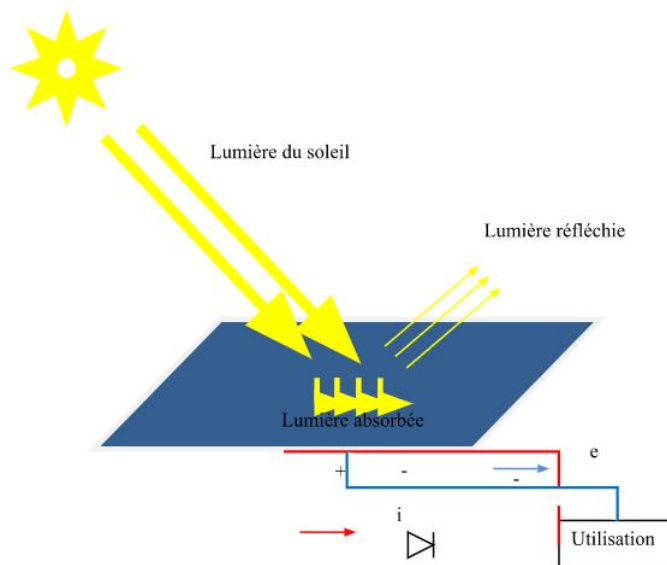


Figure 4 schéma d'absorption de lumière

2. Génération de courant continu (CC) :

- Une fois que la lumière est absorbée, un courant continu (CC) est généré, qui circule à travers le circuit de la cellule photovoltaïque. Ce courant est ensuite capté et dirigé vers l'onduleur pour être converti en courant alternatif (CA) utilisable.

3. Production d'électricité :

- Le module photovoltaïque génère ainsi de l'électricité, mais cette dernière reste sous forme de courant continu (CC), ce qui nécessite une conversion via un **onduleur** pour être utilisée dans

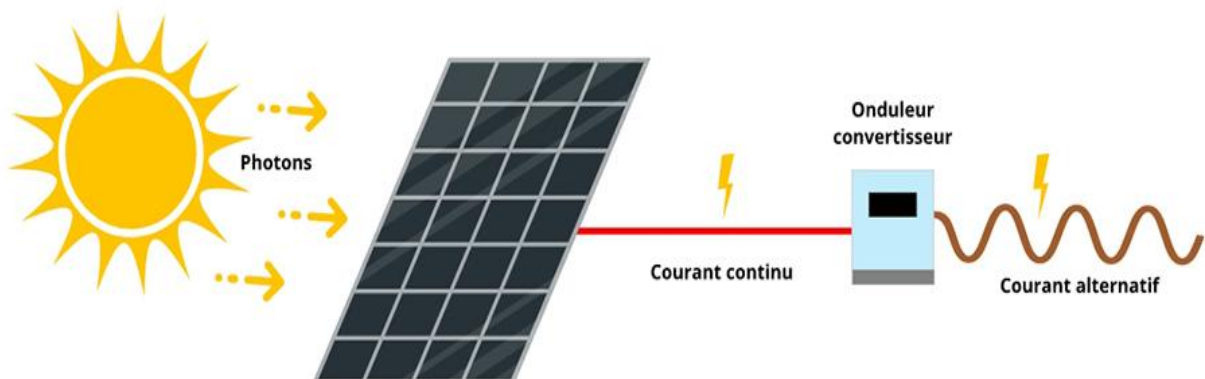


Figure 5 schéma de production d'électricité

1.4.3 Types de modules photovoltaïques :

1. Modules monocristallins :

Ces modules sont fabriqués à partir d'un seul cristal de silicium, ce qui les rend plus efficaces, mais aussi plus coûteux. Ils sont généralement plus compacts et ont un rendement énergétique plus élevé (environ 18-22%)[8] comparé aux autres types de modules.



Figure 6 des modules monocristallins

2. Modules polycristallins :

Les modules polycristallins sont fabriqués à partir de silicium fondu, ce qui les rend moins coûteux à produire. Cependant, leur rendement est légèrement inférieur (environ 15-18%) par rapport aux modules monocristallins. [8] Ils sont souvent plus larges pour une même capacité.



Figure 7 Modules polycristallins

3. Modules à couches minces :

Ce type de module est fabriqué en déposant des couches fines de matériaux semi-conducteurs (comme le cadmium telluride ou le silicium amorphe) sur des substrats tels que le verre, le métal ou le plastique. Bien qu'ils soient plus flexibles et moins chers à produire, leur efficacité est souvent inférieure (environ 10-12%).[8]



Figure 8 Modules à couches minces

4. Modules bifaciaux :

- Les modules bifaciaux peuvent capter la lumière à la fois sur la face avant et la face arrière du module. Cela permet d'augmenter la production d'énergie, surtout lorsque le module est installé sur des surfaces réfléchissantes.



Figure 9 Modules bifaciaux

1.4.4 Avantages des systèmes photovoltaïques

1. Énergie renouvelable :

- Les panneaux photovoltaïques utilisent l'énergie du soleil, une source inépuisable et renouvelable, ce qui permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de lutter contre les changements climatiques.

2. Réduction des coûts énergétiques :

- Une fois installés, les panneaux photovoltaïques peuvent réduire considérablement les factures d'électricité, car ils génèrent de l'énergie gratuitement après leur installation.

3. Faible impact environnemental :

- Comparé à d'autres sources d'énergie, les panneaux solaires génèrent peu ou pas de pollution durant leur fonctionnement. Leur empreinte carbone est faible, surtout lorsqu'on prend en compte leur cycle de vie complet.

4. Entretien minimal :

- Les systèmes photovoltaïques nécessitent peu d'entretien, généralement un nettoyage occasionnel pour enlever la poussière et les débris. Cela les rend idéaux pour des installations à long terme.

5. Autonomie énergétique :

- Les panneaux photovoltaïques permettent de produire de l'énergie localement, réduisant la dépendance aux réseaux électriques et offrant ainsi une certaine autonomie, particulièrement dans les zones isolées.

6. Durabilité :

- Les panneaux solaires ont une longue durée de vie, généralement entre 25 et 30 ans, et certains fabricants offrent des garanties à long terme.

1.4.5 Inconvénients des systèmes photovoltaïques :

1. Coût initial élevé :

- Le coût d'installation des panneaux photovoltaïques peut être élevé, bien que les prix aient baissé ces dernières années. Ce coût inclut les panneaux, l'onduleur, les batteries de stockage (si nécessaire) et l'installation.

2. Dépendance au climat :

- L'efficacité des panneaux photovoltaïques dépend des conditions météorologiques. Leur rendement est réduit lors des journées nuageuses ou par temps pluvieux, et ils ne produisent pas d'énergie la nuit.

3. Espace nécessaire :

- Pour une production d'énergie significative, un certain espace est requis pour installer un nombre suffisant de panneaux photovoltaïques, ce qui peut poser un problème dans des zones urbaines ou des espaces restreints.

4. Impact visuel :

- Les panneaux solaires peuvent être perçus comme inesthétiques, surtout lorsqu'ils sont installés sur des bâtiments résidentiels ou dans des environnements naturels.

5. Stockage de l'énergie :

- Bien que des systèmes de stockage d'énergie (comme les batteries) existent, leur coût est élevé et l'efficacité de stockage peut ne pas être optimale pour des périodes prolongées sans soleil.

6. Production intermittente :

- La production d'énergie est intermittente, ce qui signifie qu'il est nécessaire d'avoir un système de gestion de l'énergie ou un raccordement au réseau pour compenser l'absence de production d'énergie durant les périodes sans soleil.

1.5 Types de Systèmes Photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques (PV) se déclinent en plusieurs types, chacun ayant des caractéristiques spécifiques en fonction de son application et de son raccordement au réseau électrique [9] . Voici les trois principaux types de systèmes photovoltaïques :

1.5.1. Système Photovoltaïque Connecté au Réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau sont conçus pour fonctionner en parallèle avec le réseau électrique national. Ces systèmes permettent de **générer de l'électricité** à partir de l'énergie solaire et de l'injecter dans le réseau lorsqu'il y a un excédent de production. [9] Ils sont particulièrement utilisés dans les zones où le réseau est fiable et accessible.

Fonctionnement :

- Les panneaux solaires captent l'énergie solaire et la convertissent en courant continu (**DC**).
- L'onduleur convertit ce courant continu en courant alternatif (**AC**) compatible avec le réseau électrique.
- L'excédent d'énergie est envoyé dans le réseau, et les utilisateurs peuvent bénéficier de crédits d'électricité pour l'énergie injectée.

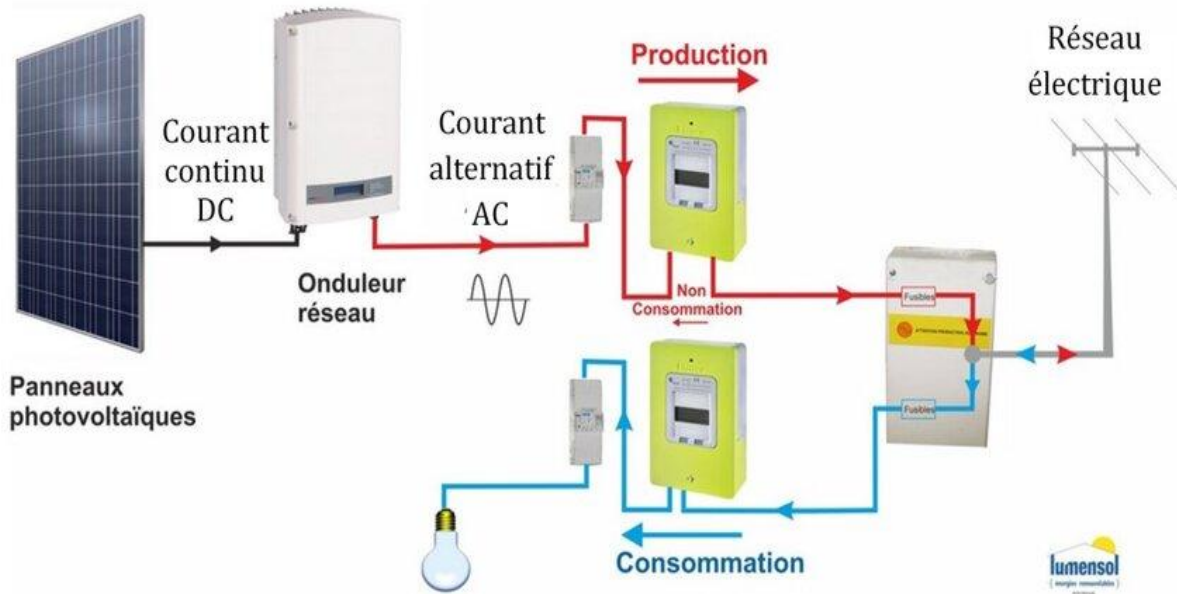


Figure 10 Système photovoltaïque connecté au réseau

1.5.2. Système Photovoltaïque Autonome

Les **systèmes photovoltaïques autonomes** sont utilisés dans des zones isolées où il n'y a pas d'accès au réseau électrique. Ce type de système est souvent installé dans des **maisons isolées**, des **stations de surveillance**, des **centres de santé**, ou même des **écoles rurales**. Le système génère et **stocke l'électricité** pour une utilisation locale. [9]

Fonctionnement :

- Les panneaux photovoltaïques génèrent de l'énergie en courant continu.
- L'**onduleur** transforme le courant continu en courant alternatif, si nécessaire.
- L'énergie excédentaire est stockée dans des **batteries** pour une utilisation lors de périodes sans soleil (la nuit ou les jours nuageux).
- Les **batteries** permettent de garantir une **autonomie énergétique** même en l'absence de production solaire.

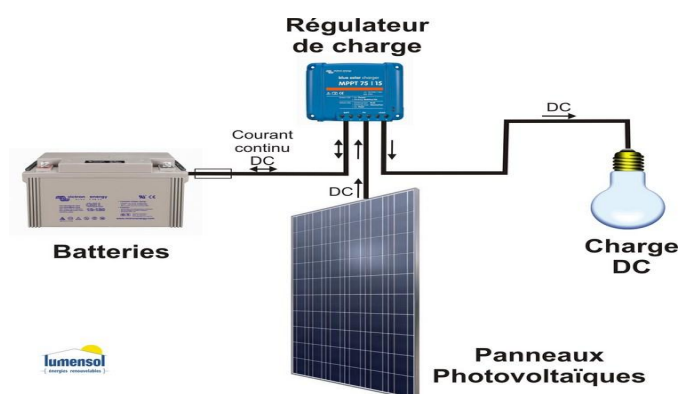


Figure 11 Système photovoltaïque autonome

Chapitre I: Généralités sur les énergies renouvelables

Exemple : Mini centrale photovoltaïque autonome de 2 kWc installée à l'URAER, Ghardaïa

La mini centrale photovoltaïque de 2 kWc installée à l'URAER de Ghardaïa est en fonctionnement depuis 2007. Elle alimente plusieurs appareils, comme un micro-ordinateur, un système d'acquisition de données, un réfrigérateur et neuf ventilateurs. Les données d'irradiation et de température sont régulièrement analysées pour évaluer la puissance produite chaque jour.

Le système est constitué de 20 modules photovoltaïques de 100 Wc. La gestion du système se fait à l'aide de deux régulateurs ISOFOTON 12/24V 30 A. Il est également équipé d'un onduleur monophasé ISOFOTON de 2,5 kW. Le stockage de l'énergie est assuré par 8 batteries de 6V et 239 Ah.

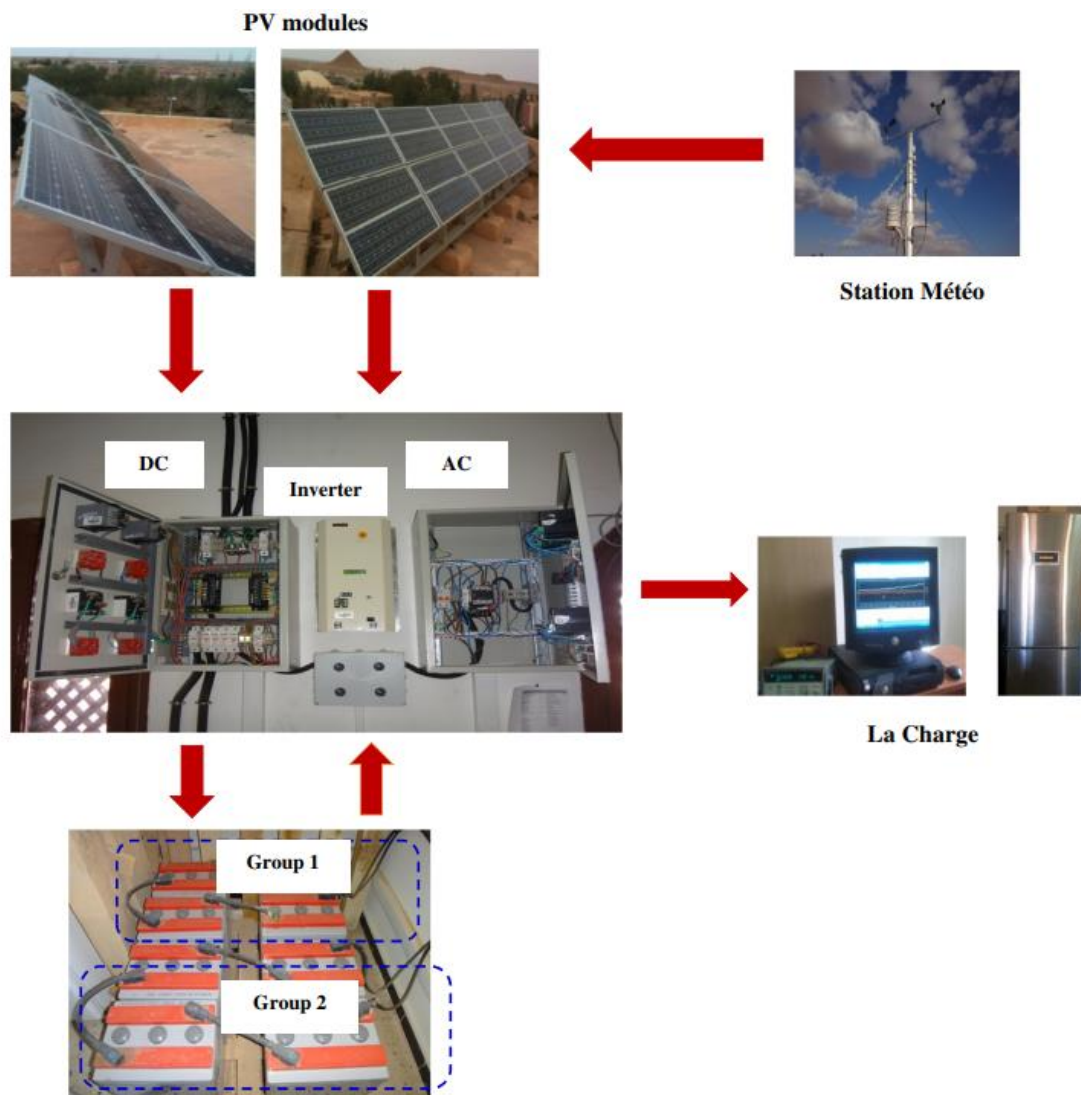


Figure 12 Systèmes photovoltaïques autonomes

1.5.3. Système Photovoltaïque Hybride

Les systèmes photovoltaïques hybrides combinent l'énergie solaire avec d'autres sources d'énergie, comme l'énergie éolienne, ou un générateur diesel. Ce type de système est conçu pour améliorer l'autonomie dans des conditions où l'énergie solaire seule ne peut suffire. [9]

Fonctionnement :

- En plus des panneaux photovoltaïques, le système utilise un autre type de source d'énergie (éolienne, générateur, etc.).
- L'énergie solaire est utilisée en priorité, et les autres sources d'énergie sont activées en cas de faible production solaire.
- Comme pour les systèmes autonomes, des **batteries** peuvent être utilisées pour stocker l'énergie excédentaire.

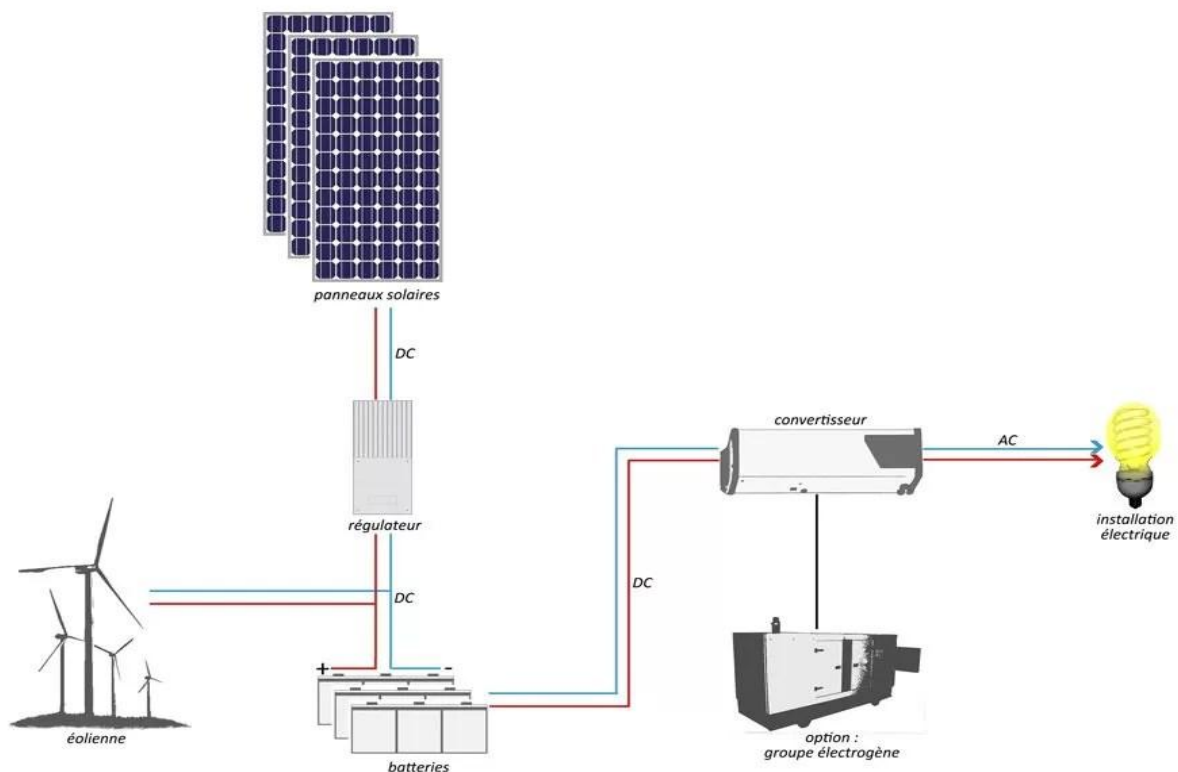


Figure 13 Système photovoltaïque hybride

CHAPITRE II:

MODELISATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

2.1. Introduction

Les cellules solaires, montées en configurations série parallèle puis encapsulées sous le verre, sont l'élément d'un module photovoltaïque. Un générateur photovoltaïque, lui, est composé de l'interconnexion de plusieurs modules qui se complètent et donnent cette puissance de courant continue suffisamment élevée pour alimenter les systèmes électriques en.. Pour maximiser les sorties de la tension et le courant, les modules unités sont tels à être organisés en réseaux série-parallèle. Ces groupes, montés sur des structures en acier et orientés à un angle optimisé d'après la situation géographique, forment ce que l'on appelle un *champ de modules* [10].

Cette conception permet aussi de bénéficier de panneaux solaires aux caractéristiques électriques adaptées, à un niveau d'énergie suffisant, aux besoins internes, des panneaux solaires robustes et fiables, garantissant des performances stables dans le temps. Dans ce chapitre, nous retracerons la modélisation électrique de la cellule photovoltaïque avant de traiter par simulation l'influence des paramètres extérieurs – température, éclairage solaire – sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. Nous verrons aussi leur effet sur l'efficacité du système.

2.1.1 L'énergie solaire photovoltaïque

L'électricité est une des formes d'énergie les plus versatiles et qui s'adapte au mieux à chaque nécessité, son utilisation est si étendue, qu'aujourd'hui on pourrait difficilement concevoir une société techniquement avancée qui n'en fasse pas usage. Des milliers d'appareils sont dessinés pour fonctionner grâce à l'énergie électrique, soit sous forme de courant continu de faible tension, soit à partir d'un courant alternatif de tension plus élevée. Il est très intéressant de produire de l'électricité avec une source d'énergie sûre et pas polluante, comme l'énergie solaire.

Il existe deux méthodes pour pouvoir convertir l'énergie solaire en électricité: [11]

- Systèmes de conversion thermodynamique.
- Système directs, fondés sur les interactions physiques entre les photons de la radiation

2.2. Le générateur photovoltaïque

Dans une configuration standard d'ensoleillement (1000 W/m^2 , 25°C , AM1.5) une cellule photovoltaïque en silicium de 150 cm^2 de surface est capable de fournir sa puissance maximale d'environ $2,3 \text{ W}$ en situant la tension à $0,5 \text{ V}$. Cette puissance, assez importante à l'échelle d'une cellule, n'est en aucune façon assez importante en terme de puissance instantanée pour satisfaire les besoins des applications domestiques ou rangées dans industriel.

Pour contourner cette limitation, les générateurs photovoltaïques sont composés à partir d'une configuration série- parallèle de plusieurs modules identiques, eux-mêmes composés de cellules

Chapitre II : Modélisation d'un générateur photovoltaïque

interconnectées. Cette installation à mettre en œuvre permet de modifier les propriétés électriques du système par rapport à ce que demande l'installation :

- **En série** (groupement de $N_s N_s$ panneaux) : Les tensions s'additionnent, tandis que le courant reste constant.
- **En parallèle** (groupement de $N_p N_p$ panneaux) : Les courants s'additionnent, tandis que la tension demeure inchangée.

Cette approche de connexion, permet ensuite d'avoir, générateur photo-voltaïque avec la tension et courant désirés, mais aussi assurer un travail électrique idéal. En outre, pour un fonctionnement optimal, il est nécessaire que toutes les cellules d'un même panneau présentent les mêmes caractéristiques afin d'éviter des déséquilibres de performances.

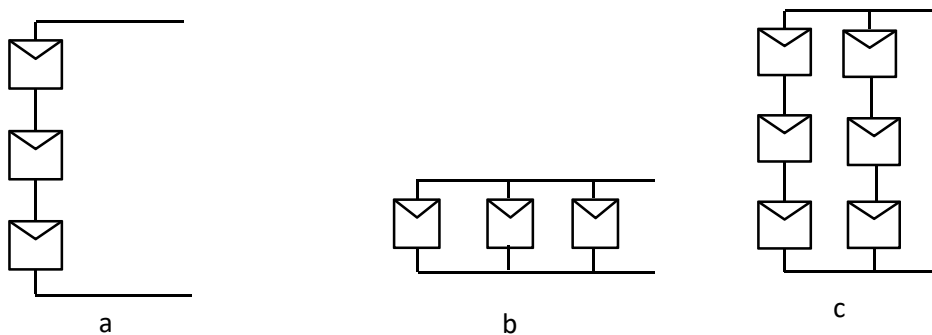


Figure 2.1. Groupement de panneaux solaires photovoltaïques

a) Série b) Parallèle c) Série/Parallèle

(a) **Configuration série** : Les panneaux sont connectés en chaîne, conduisant à une tension totale égale à la somme des tensions individuelles, tandis que le courant reste constant.

(b) **Configuration parallèle** : Les panneaux sont interconnectés en dérivation, produisant un courant total équivalent à la somme des courants individuels, avec maintien de la tension nominale.

(c) **Configuration mixte série-parallèle** : Cette architecture hybride combine les avantages des deux précédentes, permettant d'ajuster simultanément la tension et le courant du système selon les spécifications requises.

Cette représentation schématique met en évidence les principes fondamentaux d'interconnexion utilisés dans la conception des centrales photovoltaïques, où le choix de la configuration dépend des caractéristiques du système de conversion d'énergie et des contraintes d'installation.

2.3. Spécification et comportement électrique du générateur photovoltaïque

La caractéristique courant-tension (I-V) d'un générateur photovoltaïque, mesurée à des conditions locorégionales spécifiques d'éclairement (G) et de température (T) est une empreinte électro-énergétique fondamentale. Cette courbe propre, sans qu'elle n'indique de point de fonctionnement quelconque, établit néanmoins une relation bijective courant-tension. Celui-ci résulte plus de la mise en situation dynamique entre la caractéristique du générateur et l'impédance complexe de la charge connectée selon le principe d'adaptation d'impédance.

2.3.1 Analyse topologique des régimes opérationnels (Fig. 2.2) :

- **Domaine de source de courant quasi-idéale (Zone 1) :**
 - Caractérisé par : $\partial I / \partial V \approx 0 \forall V \in [0, V_1]$
 - Courant de court-circuit (I_{sk}) invariant
 - Modélisation équivalente : source de courant parfaite
 - Dominance des phénomènes de génération photovoltaïque
- **Région de puissance maximale (Zone 2) :**
 - Point d'inflexion critique de la caractéristique I-V
 - Déterminé par : $dP/dV = 0 \Rightarrow V_{mpp} \cdot I_{mpp} = P_{max}$
 - Satisfait la condition : $\partial^2 P / \partial V^2 < 0$ (maximum local)
 - Zone optimale pour l'extraction énergétique
- **Domaine de source de tension (Zone 3) :**
 - Comportement asymptotique : $V \rightarrow V_{ok}$ quand $I \rightarrow 0$
 - Caractérisé par : $\partial V / \partial I \rightarrow -\infty$
 - Régime dominé par les phénomènes de recombinaison
 - Modélisable par une source de tension en série avec une résistance différentielle négative

2.3.2 Implications systémiques

Cette tripartite des régimes opérationnels met en évidence de nombreuses caractéristiques essentielles :

- La Zone 1 a une conductance différentielle nulle ($dI/dV \approx 0$)
- La Zone 2 a une conductance différentielle négative critique
- La Zone 3 a une résistance différentielle infinité ($dV/dI \rightarrow \infty$)

Le passage d'une de ces régimes à un autre suit une loi exponentielle contrôlée par l'équation de la diode idéale mais corrigée pour les résistances série et parallèle. Cette étude multidimensionnelle servira à concevoir des algorithmes MPPT très sophistiqués qui tirent parti des caractéristiques

différentielles correspondant à chaque zone pour optimiser la extraction dans des conditions d'irradiance et de température d'ailleurs.

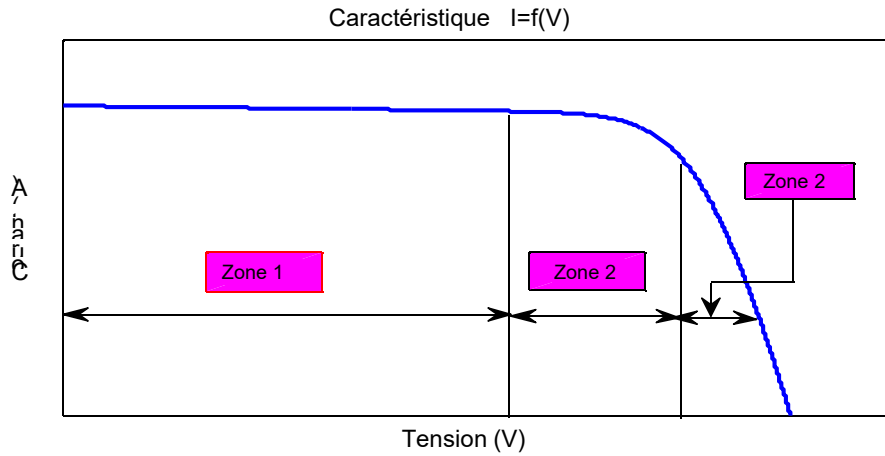


Figure 2.2 : les différentes zones de la caractéristique I(V).

2.4. Paramètres caractéristiques de la cellule photovoltaïque:

La cellule photovoltaïque est décrite par divers paramètres essentiels qui influencent ses performances énergétiques, comme montré dans la figure 2.3. These main electrical quantities give a possibility to evaluate and improve behavior of the device under different conditions of operation..

2.4.1. Tension en circuit ouvert (Voc) :

La tension en circuit ouvert représente la différence de potentiel maximale aux bornes de la cellule lorsque le circuit est ouvert ($I = 0$). Cette grandeur, exprimée en volts (V), est donnée par:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad 2.0$$

où :

- nn : facteur d'idéalité de la diode
- kk : constante de Boltzmann
- TT : température absolue (K)
- qq : charge de l'électron
- I_{ph} : courant photogénéré
- I_0 : courant de saturation

2.4.2 Courant de court-circuit (Isc) :

Le courant de court-circuit correspond au flux électronique maximal lorsque les bornes sont court-circuitées ($V = 0$). Directement proportionnel à l'ensoleillement, il s'exprime par :

$$I_{sc} \approx I_{ph} \quad 2.1$$

Chapitre II : Modélisation d'un générateur photovoltaïque

2.4.3. Puissance maximale (P_{max}) :

La puissance maximale extractible correspond au point optimal sur la caractéristique I-V, défini par :

$$P_{\max} = V_{mp} \times I_{mp} \quad 2.2$$

où V_{mp} et I_{mp} représentent respectivement la tension et le courant au point de puissance maximale (MPP).

2.4.4. Facteur de forme (FF) :

Ce paramètre sans dimension, compris entre 0 et 1, quantifie la qualité de la cellule :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad 2.3$$

Un facteur proche de 1 indique une caractéristique I-V quasi-rectangulaire, signe d'excellentes performances.

2.4.5 Rendement de conversion (η) :

Le rendement énergétique, critère ultime de performance, se calcule par :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{G \times S} \times 100\% \quad 2.4$$

avec :

- GG : irradiance incidente (W/m²)
- SS : surface active de la cellule (m²)

2.4.6 Tableau récapitulatif des paramètres clés

Paramètre	Symbole	Expression	Unité	Importance
Tension circuit ouvert	V _{oc}	$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right)$	V	Potentiel électrique maximal
Courant court-circuit	I _{sc}	$I_{sc} \approx I_{ph}$	A	Courant photogénéré maximal
Puissance maximale	$P_{\max}$	$P_{\max} = V_{mp} \times I_{mp}$	W	Performance énergétique

Chapitre II : Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Paramètre	Symbole	Expression	Unité	Importance
Facteur de forme	FF	$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}}$	-	Qualité de la caractéristique I-V
Rendement	η	$\eta = \frac{P_{\max}}{G \times S} \times 100\%$	%	Efficacité de conversion

Cette définition paramétrique complète permet de créer un modèle précis d'analyse des performances, de comparaison des technologies photovoltaïques pour l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie solaire. L'excellente connaissance de ces paramètres est indispensable pour le dimensionnement et le fonctionnement correct des installations photovoltaïques.

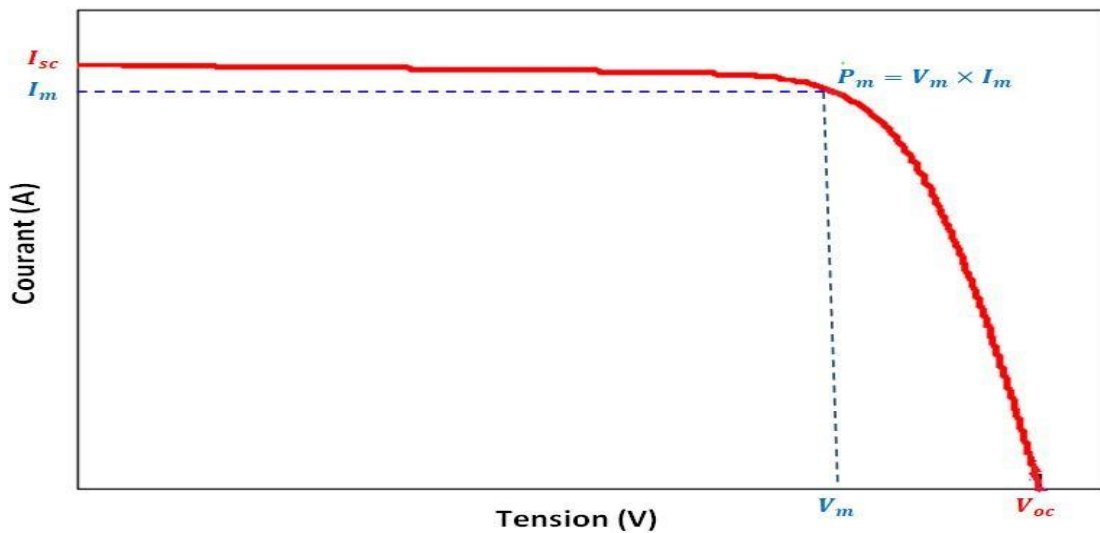


Figure 2.3 : Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire PV

2.5. Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque

La figure 2.4, le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode, est celui d'une diode, une source courant, une résistance série et une résistance parallèle [12 à 16]. Il est la fonction du d'irradiation solaire incident et de la température de la cellule; Le courant d'obscurité de la diode (I_L). La jonction p-n de cellule PV est représentée par la diode. La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule, on peut la lier principalement à la résistance du semi-conducteur utilisé, à la résistance des contacts des grilles collectrices, à la résistivité de celles-ci. Une résistance shunt (R_p) liée à un courant de fuite à la jonction. Ce modèle n'est pas global, beaucoup d'auteurs [17], ont introduit des modèles plus complexes qui décrivent d'une manière plus précise le phénomène

Chapitre II : Modélisation d'un générateur photovoltaïque

photovoltaïque. Parmi deux autres modèles on lui trouve:

Le modèle à deux diodes: Cette diode supplémentaire pouvant représenter dans le schéma équivalent les réactions chimiques de recombinaison des électrons

Le schéma à trois diodes : la troisième diode avec l'intégration dans le schéma équivalent des effets non considérés dans les autres modèles (pseudo-courant de fuite des diodes). Le modèle une diode est un bon compromis entre simplicité et précision. Les équations mathématiques qui ont été développées pour les modèles de la cellule photovoltaïque doivent en effet s'appuyer sur la caractéristique courant tension. Le courant produit par la cellule photovoltaïque est donné par la première loi de Kirchhoff :

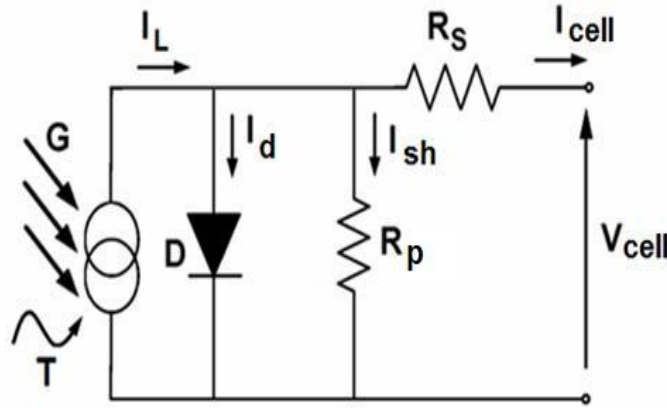


Figure 2.4 : Circuit équivalent d'une cellule

Où:

$$\begin{aligned} I_{cell} &= I_L - I_d - I_{sh} \\ I_d &= I_0(e^{V_d/V_t} - 1) \\ I_{sh} &= V_d/R_p \end{aligned} \quad 2.5$$

$$V_d = V_{cell} + R_s I_{cell} \quad 2.6$$

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad 2.7$$

I_{cell} et V_{cell} sont le courant de sortie et la tension de sortie de la cellule PV respectivement, V_t est la tension thermique, I_0 est le courant de saturation de polarisation inverse de la diode, q est la charge élémentaire (1.6×10^{-19} C), k est la constante de Boltzman (1.38×10^{-23} J/°K), T est la température de la cellule (°K), et n est le facteur d'idéalité de la diode.

Ainsi les caractéristiques I - V de la cellule PV sont données par :

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad 2.8$$

2.6. Modélisation mathématique d'un panneau photovoltaïque à N cellules en série

Le panneau solaire photovoltaïque est par nature un ensemble de cellules photovoltaïques combinées de manière à mener à la puissance électrique utilisable une fois soumis à la lumière. Parce qu'une cellule photovoltaïque simple ne produit pas suffisant voltage : entre 0,5 et 1,5 V en fonction des technologies. Il faut quasiment toujours plusieurs cellules en série pour achieving une tension vigilante [18]

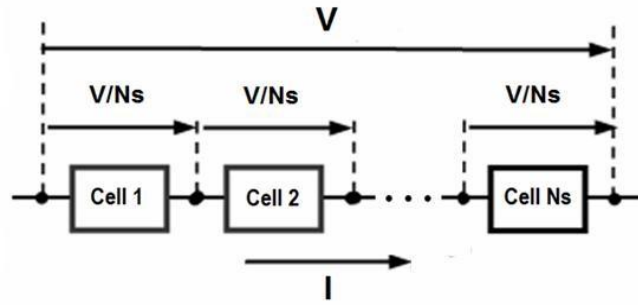


Figure 2.5 : Groupement de Ns cellules

Un panneau photovoltaïque est composé de Ns cellules solaires en série, il a le même courant de sortie et l'équation de la tension de sortie est donnée par

Tension totale du module :

$$V = N_s \cdot V_{\text{cell}} \quad 2.9$$

L'équation de la caractéristique I - V est alors :

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V + N_s R_s I}{n V_s N_s}} - 1 \right) - \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_p} \quad 2.10$$

A partir de l'équation 2.11, pour $V=0$, l'expression du courant de court circuit I_{sc} du panneau photovoltaïque est ainsi obtenue :

$$I_{sc} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{R_s I_{sc}}{n V_s}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{sc}}{R_p} \quad 2.11$$

Pour une cellule solaire idéale ($R_s \rightarrow 0, R_p$)

$$I_L = I_{sc} \quad 2.12$$

Caractéristique courant-tension :

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + N_s R_s I}{n N_s V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_p} \quad 2.13$$

Courant de court-circuit ($V = 0$) :

$$I_{sc} = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{R_s I_{sc}}{n V_t} \right) - 1 \right) - \frac{R_s I_{sc}}{R_p} \quad 2.14$$

Alors l'équation 2.14 devient:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + N_s R_s I}{n N_s V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_p} \quad 2.15$$

La valeur instantanée du courant de court circuit peut être trouvée en utilisant l'équation suivante

$$I_{sc} = (I_{sc, stc} + \alpha(T - T_{stc})) \cdot \frac{G}{G_{stc}} \quad 2.16$$

Où $I_{sc, stc}$ est le courant de court-circuit dans les conditions standard du module photovoltaïque qui est fourni par le fabricant de ce module photovoltaïque, G et G_{stc} sont respectivement l'instantané et la condition standard d'irradiation solaire du module photovoltaïque, T et T_{stc} sont respectivement les températures instantanée et la condition standard du module photovoltaïque et α le coefficient de température du court-circuit d'une cellule photovoltaïque. Puisque G_{stc} 1000 W/m² et l'effet de la variation de la température sur la valeur I_{sc} est négligeable (moins de 1%), nous pouvons écrire

$$I_{sc} = \frac{G}{1000} I_{sc, stc} \quad 2.17$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{N_s R_p}}{e^{\frac{V_{oc}}{n V_t N_s}} - 1} \quad 2.18$$

Où V_{oc} est la tension de circuit ouvert du module photovoltaïque

2.7 Modélisation théorique d'un générateur photovoltaïque:

2.7.1 Architecture électrique fondamentale:

Un générateur photovoltaïque constitue un assemblage intelligent de modules interconnectés selon une topologie série-parallèle. Cette configuration permet d'atteindre les caractéristiques électriques requises pour des applications de puissance tout en optimisant le rendement énergétique.

2.7.2 Relations électriques fondamentales:

Les paramètres globaux du générateur s'expriment par :

$$\begin{aligned} V_A &= N_{ss} \times V \\ I_A &= N_{pp} \times I \\ P_A &= V_A \times I_A = N_{ss} \times N_{pp} \times P \end{aligned} \quad 2.19$$

où :

- N_{ss} : Nombre de modules en série
- N_{pp} : Nombre de branches parallèles
- $P = V \times I$: Puissance unitaire d'un module

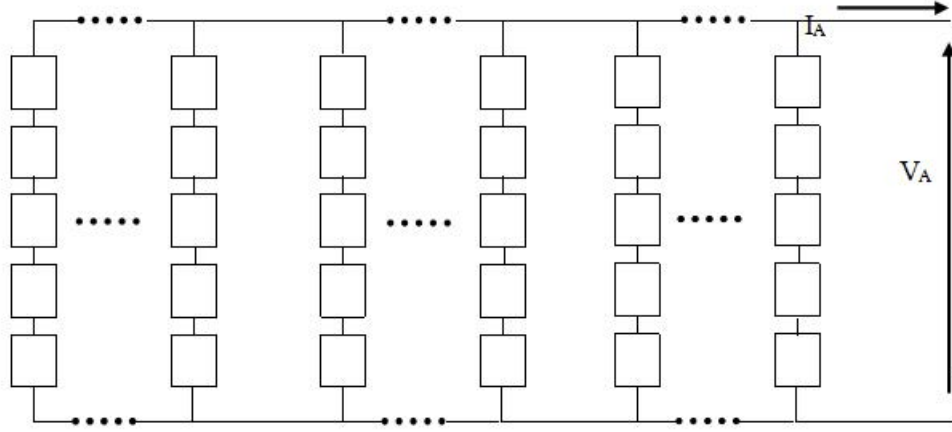


Figure 2.6 : Structure matricielle d'un générateur photovoltaïque composée de plusieurs groupes de colonnes de modules solaires.

Où N_{ss} et N_{pp} est le nombre respectivement de panneaux PV en série et simultanément parallèle du générateur photovoltaïque. Un programme Matlab a été fait pour traiter les équations (2.14) et (2.18) dans l'ordre pour tracer les courbes I-V et P-V du générateur photovoltaïque sous éclairage uniformément rationnel. Le facteur d'idéalité n de la diode a été choisi comme unité. La solution de l'équation (2.14) est obtenue pour une grille de courant I , en utilisant la méthode de bisection pour résoudre l'équation non linéaire $f(V)=0$ dans l'intervalle $[0, V_{oc}]$ où $f(V)$ est le suivant :

$$f(V) = I - I_{sc} + I_0 \left(e^{\frac{V + N_s R_s I}{n V_s N_s}} - 1 \right) + \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_p} \quad 2.20$$

2.8. Association des panneaux photovoltaïques:

2.8.1. Association en série:

L'interconnexion de panneaux photovoltaïques en série constitue une stratégie fondamentale pour atteindre des tensions nominales adaptées aux exigences des systèmes électriques. Dans cette configuration, le courant circulant dans la branche demeure constant, tandis que la tension globale s'élève proportionnellement au nombre de modules associés.

Chapitre II : Modélisation d'un générateur photovoltaïque

La Figure 2.7 illustre les caractéristiques $I-V$ simulées d'un générateur photovoltaïque composé de cinq panneaux Suntech STP080 12/86 monocristallins ($N_{ss} = 5$), testés dans des conditions standard d'essai (STC : 1000 W/m², 25°C). Les paramètres électriques clés de ces modules, présentés dans le **Tableau 1**, permettent une analyse précise de leurs performances.

Table 1 Caractéristiques du module KC200GT

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Tension en circuit ouvert	V_{oc}	32.9	V
Tension au point de puissance maximale	V_m	26.3	V
Courant de court-circuit	I_{sc}	8.21	A
Courant au point de puissance maximale	I_m	7.61	A
Puissance maximale	P_m	200	W
Coefficient de température de I_{sc}	K_I	+0.005318	%/K
Coefficient de température de V_{oc}	K_V	-0.123	%/K
Résistance série à STC	R_s	0.01037	Ω
Résistance shunt à STC	R_p	4.52783	Ω

2.8.1.1 Implications de la configuration série

2.8.1.1.1 Relation tension-courant :

$$V_{\text{total}} = N_{ss} \times V_{\text{module}}, \quad I_{\text{total}} = I_{\text{module}} \quad 2.21$$

$N_{ss} = 5$:

$$V_{\text{total}} = 5 \times 17.5 \text{ V} = 87.5 \text{ V}, \quad I_{\text{total}} = 4.57 \text{ A}$$

2.8.1.12 : Sensibilité thermique :

- Une augmentation de température réduit V_{oc} de **-0.34 %/K**, impactant le rendement aux hautes températures.
- Le courant I_{sc} varie faiblement (), préservant la stabilité en conditions variables.

2.8.1.1.2 Optimisation des pertes :

- La résistance série $R_s = 0.01037 \Omega$ induit des pertes ohmiques marginales.
- La résistance shunt $R_p = 4.52783 \Omega$ limite les courants de fuite, améliorant l'efficacité.

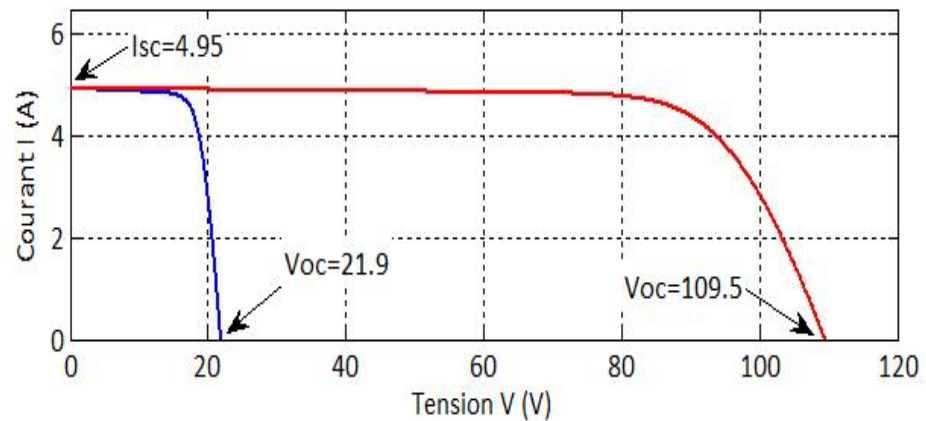


Figure 2.7 : Simulation de cinq panneaux PV en série

Les résultats de simulation confirment les principes fondamentaux des associations en série :

- Addition des tensions :

$$V_{\text{total}} = N_{ss} \times V_{oc} = 5 \times 21.9 \text{ V} = 109.5 \text{ V}$$

- Conservation du courant :

$$I_{\text{total}} \approx I_{sc} = 4.95 \text{ A} \quad (\text{Écart négligeable dû à } R_s \text{ et } R_p)$$

La configuration série préserve ainsi **l'intégrité du courant** tout en **amplifiant la tension** de manière linéaire, validant théoriquement et expérimentalement le comportement attendu d'un générateur photovoltaïque en topologie série.

2.8.2. Configuration en parallèle:

L'association parallèle de modules photovoltaïques permet d'amplifier le courant de sortie du générateur tout en conservant une tension constante. Cette configuration, illustrée par la **Figure 2.8**, révèle une caractéristique $I-V$ résultant de la superposition des courants individuels des panneaux interconnectés.

$$[I_{sc}]_{\text{générateur}} = N_{pp} \times [I_{sc}]_{\text{panneau}}$$

$$[V_{oc}]_{\text{générateur}} = [V_{oc}]_{\text{panneau}}$$

2.22

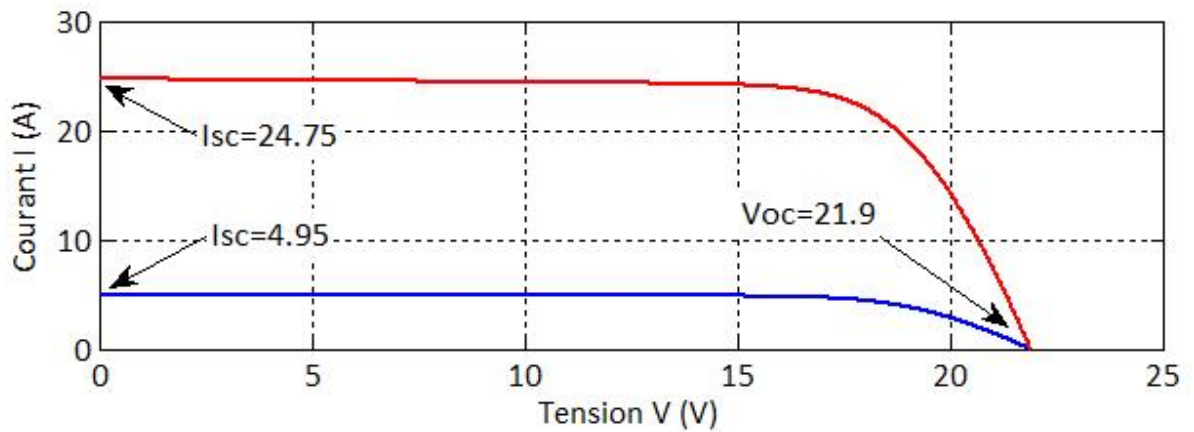


Figure 2.8 : Simulation de cinq panneaux PV en parallèle

De la même manière, cette simulation illustre bien l'équation 2.21, les courants s'ajoutent et la tension reste la même, d'où $I_s = 4.95 \times 10 = 49.5 \text{ A}$ et $V_{oc} = 21.9 \text{ V}$.

2.8.3 Association mixte des panneaux solaires photovoltaïques

Dans le domaine d'étude et conception des systèmes photovoltaïques, la production d'une puissance électrique à un niveau spécifique sous une tension de niveau adéquate implique l'assemblage des modules photovoltaïques d'une manière optimale. Ces modules sont donc disposés en un générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'une association mixte, la fixation de connexions en série et en parallèle. Cette méthode peut correctif la tension et le courant d'alimentation pour satisfaire les besoins des applications en question.

La série des modules ajoute à la tension totale du système, chaque module fournissant sa tension de référence, et la série en parallèle augmente le courant cumulé des modules, chaque courant individuel étant additionné. D'après ces particules, une configuration hybride, comprenant (N_{ss}) éléments en série et (N_{pp}) filiales en parallèle, est légèrement privilégiée, de la sorte, d

Chapitre II : Modélisation d'un générateur photovoltaïque

‘ optimiser le rendu électrique du générateur tout d’entretenir les contraintes techniques et opérationnelles.

Mais le dépassement de quantité de photovoltaïques puissants générateurs se trouvait rapidement remis en cause par des raisons pratiques, le poids des modules, leur espace occupé et les difficultés de manipulation lors de l’installation. Afin d’échapper à ces contraintes, les modules photovoltaïques sont en général remontés à l’horizontale en sous-ensembles, interconnectés entre eux par un câblage propre à l’avant leur intégration dans le reste du système photovoltaïque, tel que onduleurs, régulateurs de charge ou dispositifs de stockage d’énergie [20]. Ce pré-assemblage permet une meilleure gestion des installations de grande envergure et optimise la fiabilité du système.

La figure 2.9 illustre une simulation d’un groupement mixte de modules photovoltaïques, où ($N_{ss} = 4$) modules sont connectés en série dans chaque branche, et ($N_{pp} = 3$) branches sont connectées en parallèle. Cette configuration permet d’atteindre un équilibre entre la tension et le courant, tout en optimisant la puissance globale du générateur. Une telle modélisation est essentielle pour évaluer les performances électriques du système sous différentes conditions d’ensoleillement et de charge, offrant ainsi une base solide pour la conception et l’optimisation des installations photovoltaïques.

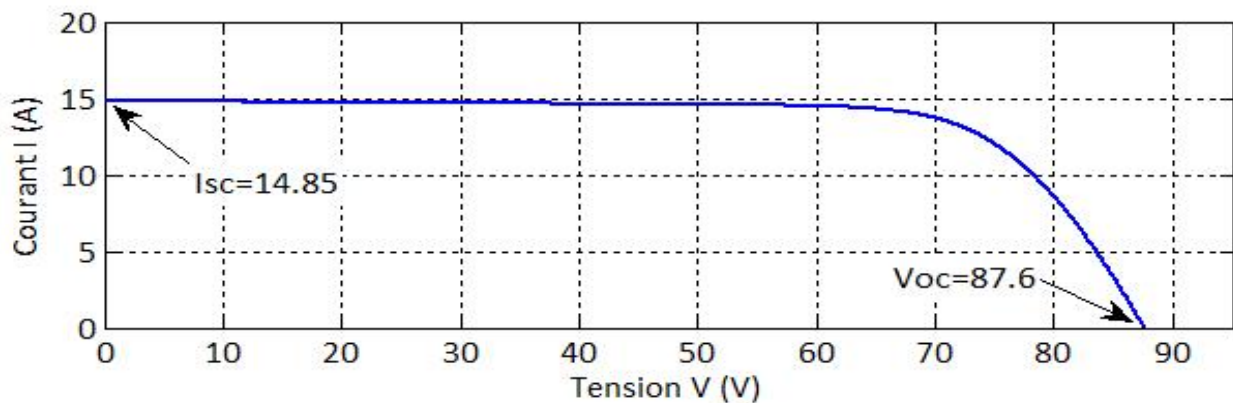


Figure 2.9 : Simulation d’un groupement mixte de panneaux PV, $N_{ss} = 4$ et $N_{pp} = 3$

Les équations sont aussi valables pour ce cas de groupement et sont vérifiées par la simulation : $V_{OC} = 21.9 \times 4 = 87.6V$ et $I_{SC} = 4.95 \times 3 = 14.85A$ ∞

2.9. Influence de l’éclairement et de la température sur le comportement d’un générateur PV

L’éclairement et la température ont un impact direct et non négligeable sur les courbes $I-V$ et $P-V$ d’un panneau solaire photovoltaïque. Au fait une petite partie de l’éclairement qui atteint le

module est convertie en électricité, le reste de l'énergie incidente se convertit en chaleur. Pour montrer ces influences, nous allons simuler les caractéristique $I-V$ et $P-V$ d'un groupement cinq colonnes de dix panneaux en série par colonne ($\phi_{N_{SS}}=10$ et $\phi_{N_{PP}}=5$), sous différentes conditions climatiques de températures et d'ensoleillements.

2.9.1. Influence de la température

La température affecte principalement la tension produite par le panneau. Une élévation de la température des cellules photovoltaïques, souvent exacerbée par l'absorption de l'énergie solaire non convertie, entraîne une diminution de la tension en circuit ouvert (V_{oc}) et, dans une moindre mesure, du courant de court-circuit (I_{sc}). Cette réduction est due à l'augmentation de l'agitation thermique des porteurs de charge dans le matériau semi-conducteur, ce qui réduit la bande interdite et affecte les propriétés électriques des cellules. Par conséquent, la puissance maximale (P_{max}) du panneau diminue à mesure que la température augmente, un phénomène critique dans les environnements à forte insolation.

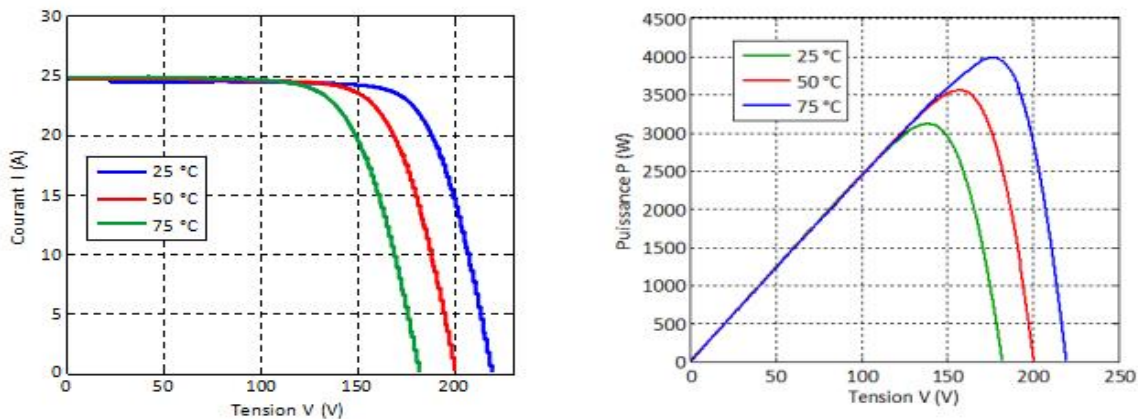


Figure 2.10 : Courbes $I-V$ et $P-V$ pour différentes températures

Les résultats de la simulation, présentés dans la figure 2.10 et le tableau 2.2, indiquent que l'augmentation de la température de 25 °C à 75 °C (soit une élévation de 200 %) affecte significativement les performances d'un groupement série-parallèle (5 CE 10) sous une irradiation constante de 1000 W/m². Cette hausse thermique influence de manière marquée les valeurs des tensions et des courants. Plus précisément, la tension à vide V_{oc} diminue de 17 % dans des conditions standards et de 1 % dans des conditions modifiées. De même, la tension maximale V_m décroît de 6,3 % dans un environnement standard et de 21 % dans un environnement modifié.

Par ailleurs, le courant de court-circuit I_{sc} augmente de 1 % par rapport à sa valeur initiale, tandis que le courant maximal I_m croît de 1,3 %. En conséquence, la puissance générée subit une réduction de 22,3 %.

Chapitre II : Modélisation d'un générateur photovoltaïque

On peut donc inférer que la température représente un paramètre déterminant dans l'optimisation du rendement des générateurs photovoltaïques, avec une probabilité élevée que des variations thermiques importantes amplifient cet effet dans des conditions réelles.

Table 1: Résultats de simulation pour un groupement série-parallèle (5 $\otimes$ 10) à $G = 1000$ W/m² avec différentes températures

T (°C)	P_m (W)	V_m (V)	I_m (A)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)
25	3999	219	24.70	175	28.85
50	3551.1	200.38	24.82	156.19	27.74
75	3106.19	181.77	24.94	137.79	22.54

Table 2 Résultats de simulation pour un groupement série-parallèle

2.9.2 Impact de l'éclairement:

L'éclairement, mesuré en W/m², représente l'intensité de l'énergie solaire incidente sur la surface des panneaux. Seule une fraction de cette énergie est convertie en électricité, conformément au rendement du module photovoltaïque (généralement de l'ordre de 15 à 22 % pour les technologies conventionnelles). Le reste de l'énergie solaire est soit réfléchi, soit absorbé sous forme de chaleur, ce qui peut influencer la température du panneau et, par conséquent, ses performances. Une augmentation de l'éclairement entraîne généralement une augmentation proportionnelle du courant de court-circuit (I_{sc}) du panneau, car celui-ci est directement lié à la densité de photons absorbés par les cellules photovoltaïques. En revanche, la tension en circuit ouvert (V_{oc}) reste relativement stable, bien qu'elle puisse légèrement varier en fonction des propriétés des matériaux semi-conducteurs.

Chapitre II : Modélisation d'un générateur photovoltaïque

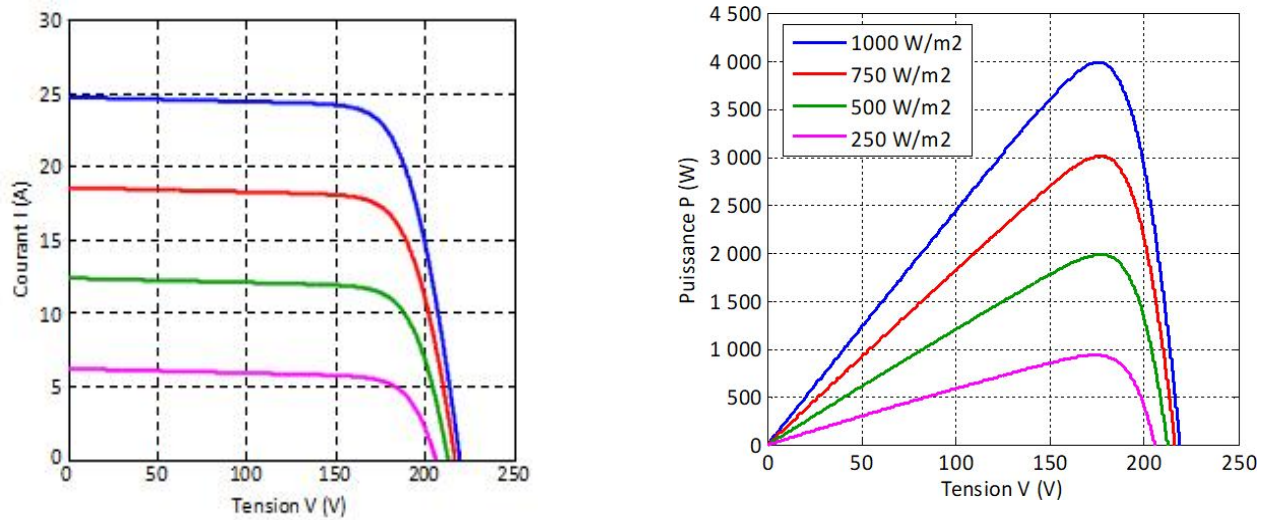


Figure 2.11 : Courbes I-V et P-V pour différents éclaircissements avec $T=25^{\circ}\text{C}$

En s'appuyant sur les résultats de simulation présentés dans la figure 2.11 et le tableau 2.3, une diminution de l'irradiation de 1000 W/m^2 à 250 W/m^2 (soit une réduction de 75 %) exerce une influence marquée sur les tensions mesurées. Cette variation impacte significativement les valeurs des courants. Plus précisément, la tension à vide V_{oc} décroît de 6,2 % dans des conditions environnementales standards, tandis que cette même tension V_{oc} sous des conditions modifiées baisse de 1 %. Par ailleurs, le courant de court-circuit I_{sc} diminue de 75 % dans un environnement standard et de 76,4 % dans un environnement modifié. En conséquence, la puissance générée connaît une réduction globale de 76,7 %.

On peut donc inférer que la réduction de l'irradiation, associée à l'apparition d'un ombrage total, conduit à une baisse notable de la production électrique d'un générateur photovoltaïque. Ces observations sont étayées par les données simulées pour un groupement série-parallèle (5 $\times$ 10), réalisées à une température de 25°C , comme illustré dans le tableau suivant.

E (W/m ²)	P_m (W)	V_m (V)	I_m (A)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)
1000	3999	219	24.70	175	28.25
750	3004	216	18.52	176.24	17.05
500	1978	212	12.35	176.32	11.22
250	932	205	6.18	173.24	5.38

Table 3 Résultats de simulation pour un groupement

2.10. Simulation d'un générateur photovoltaïque connecté directement à une charge

Dans cette section, nous étudions le comportement d'un générateur photovoltaïque (PV) lorsqu'il est directement connecté à une charge. Une simulation est réalisée afin d'analyser l'évolution de la puissance produite par le générateur en fonction du courant de charge.

Le schéma de simulation utilisé est présenté dans la figure 2.12, correspondant au modèle Simulink nommé « GEN_PV_I.mdl ». Les résultats obtenus sont illustrés par la figure 2.13, qui représente la puissance générée par le générateur PV pour différentes valeurs de courant de charge.

Il ressort de cette simulation que la puissance produite par le générateur PV atteint son maximum lorsque le courant de charge est égal au courant optimal I_m , correspondant au point de fonctionnement maximal sur la courbe puissance-tension (P-V) du générateur.

Le tableau 2.4 confirme cette observation : la puissance augmente avec le courant de charge jusqu'à atteindre une valeur maximale à I_m . Au-delà de ce point, toute augmentation du courant entraîne une diminution progressive de la puissance générée, qui devient négligeable à l'approche du courant de court-circuit I_{sc} .

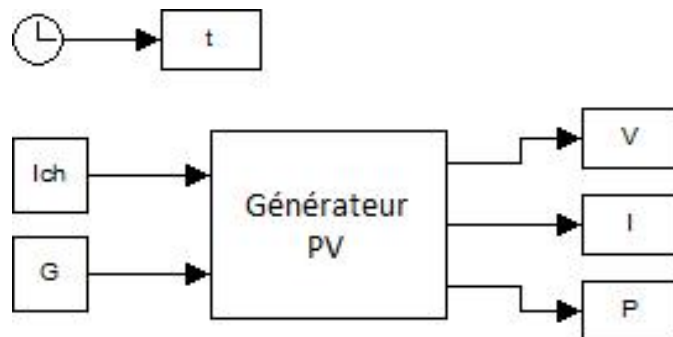
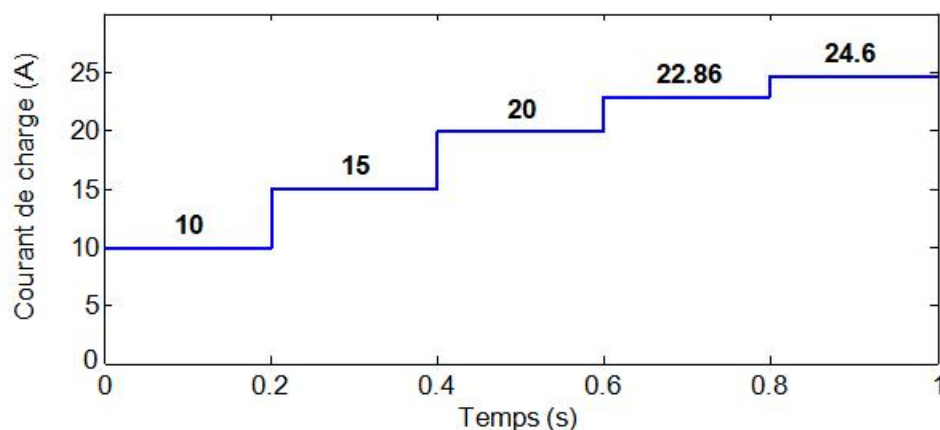
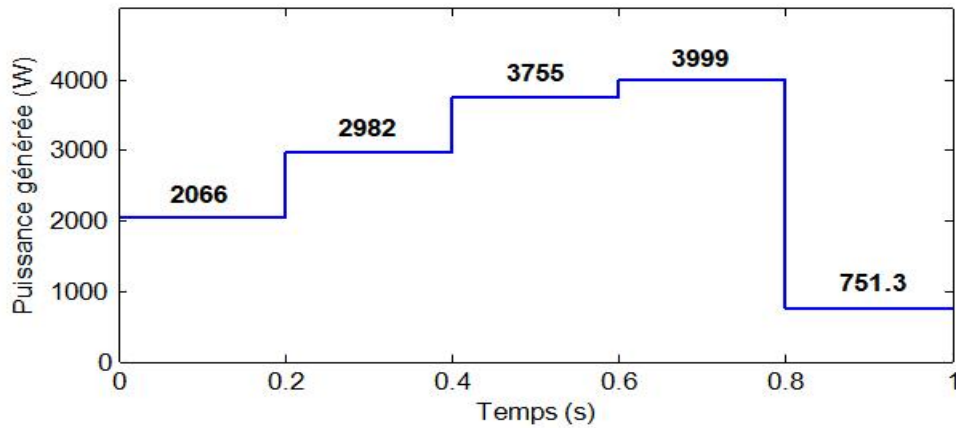


Figure 2.12 : Modèle Simulink d'un générateur PV relié directement à une charge





I (A)	10	15	20	22.86	24.6
P (W)	2066	2982	3755	3999	751.3
P_m (W)	3999	3999	3999	3999	3999
Perte de puissance (%)	48.34 %	25.43 %	6.1 %	0%	81.21 %

Table 4 Puissance produite par un générateur photovoltaïque

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation d'un générateur photovoltaïque structuré sous forme de matrice comportant N_{pp} colonnes de N_{ss} modules photovoltaïques connectés en série. Cette configuration matricielle $N_{pp} \times N_{ss}$ permet de concevoir un générateur adapté aux exigences spécifiques de l'application visée. Les résultats de simulation ont mis en évidence l'influence significative de l'éclairement et de la température sur les performances du générateur photovoltaïque.

Par ailleurs, il a été observé que la puissance maximale ne peut être délivrée que lorsque le générateur fonctionne à un point de fonctionnement optimal, défini par une combinaison précise de tension et de courant. Ce point de fonctionnement varie selon les conditions d'ensoleillement, de température et selon la nature de la charge.

Afin de garantir un fonctionnement au point de puissance maximale (MPP), il est indispensable d'intercaler un convertisseur DC – DC entre le générateur et la charge. Ce convertisseur doit être piloté par une stratégie de poursuite du point de puissance maximale (MPPT – *Maximum*

Chapitre II : Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Power Point Tracking), permettant une adaptation dynamique et continue des conditions de fonctionnement.

Le chapitre suivant sera donc consacré à l'étude et à la mise en œuvre d'une commande MPPT appliquée à un générateur photovoltaïque.

CHAPITRE III:

RECHERCHE DU POINT MAXIMUM DE PUISSANCE (MPPT) D'UN GENERATEUR PV

3.1. Introduction

Les simulations que nous avons explorées dans le chapitre précédent ont révélé que, lorsque l'on connecte un générateur photovoltaïque (PV) directement à une charge, la puissance électrique produite varie considérablement en fonction du courant de charge, de l'éclairement et de la température ambiante. Il a été prouvé que la puissance maximale n'est atteinte que lorsque le courant de charge est en phase avec le courant I_{mI_mlm} , qui correspond au point de fonctionnement optimal situé au sommet de la courbe puissance-tension (P-V) du générateur.

Afin de garantir une extraction maximale de puissance quelle que soit la nature de la charge, il est nécessaire d'introduire un système de commande spécifique, communément appelé dans la littérature **Maximum Power Point Tracking (MPPT)**. Ce système permet d'adapter dynamiquement le point de fonctionnement du générateur PV en fonction des conditions environnementales et de charge, à l'aide d'un **convertisseur DC-DC** commandé. Le principe repose sur la variation du rapport cyclique DDD du convertisseur pour ajuster en permanence le fonctionnement du générateur à son point de puissance maximale.

Ce chapitre est consacré à l'étude et à la mise en œuvre de deux approches de commande MPPT :

- l'algorithme **Perturb and Observe (P&O)**, l'un des plus utilisés pour sa simplicité et son efficacité,
- et la méthode **MPPT à base de logique floue**, qui constitue une technique intelligente permettant d'améliorer la rapidité et la stabilité de la poursuite du point de puissance maximale dans des conditions variables.

La figure 3.1 illustre le schéma synoptique d'un système photovoltaïque intégrant une commande MPPT, utilisant comme entrées les grandeurs de tension et de courant en sortie du générateur [21].

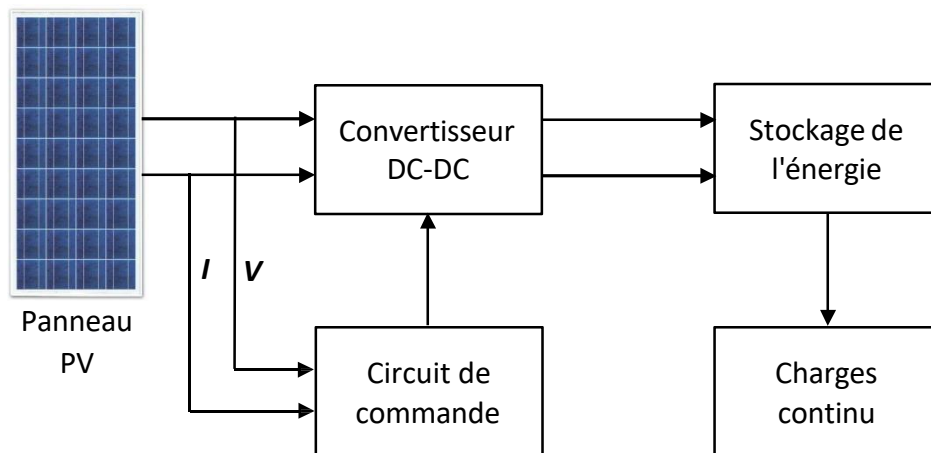


Figure 3.1. Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT

3.2 Aperçu général des différentes méthodes MPPT

Depuis la publication en 1968 de la première loi de commande MPPT [13], de nombreuses méthodes ont été développées et adaptées spécifiquement aux systèmes photovoltaïques (PV). Ces techniques visent toutes à optimiser le fonctionnement du générateur PV en extrayant en permanence la puissance maximale, malgré les variations d'ensoleillement, de température et de charge.

Les méthodes MPPT peuvent être classées en plusieurs catégories, parmi lesquelles on distingue principalement :

- **Les méthodes à contre-réaction de tension**, qui utilisent la tension comme paramètre principal pour ajuster le point de fonctionnement ;
- **Les méthodes à contre-réaction de puissance**, qui se basent sur la mesure de la puissance produite pour déterminer la direction de poursuite du point optimal ;
- **Les techniques intelligentes**, faisant appel à des approches avancées comme la logique floue, les réseaux de neurones artificiels ou encore les algorithmes génétiques, offrant souvent de meilleures performances en termes de rapidité et de robustesse dans des environnements dynamiques.

Ces différentes approches seront étudiées ou comparées dans les sections suivantes, en mettant particulièrement l'accent sur les méthodes P&O et la commande par logique floue.

3.2.1 Méthode à contre-réaction de tension

Les méthodes à contre-réaction de tension reposent sur la comparaison entre la tension de sortie du panneau photovoltaïque et une tension de référence, qui peut être fixe ou variable. Cette comparaison permet de générer une tension d'erreur e_{ee} , utilisée pour ajuster le rapport cyclique DDD du convertisseur DC-DC, de manière à rapprocher le fonctionnement du générateur de son point de puissance maximale.

Le schéma de principe de ce type de commande est illustré à la figure 3.2 [22]. Ces méthodes sont simples à mettre en œuvre, mais leur précision dépend fortement de la justesse du choix de la tension de référence, qui doit être proche de la tension correspondant au point de puissance maximale dans différentes conditions d'ensoleillement et de température.

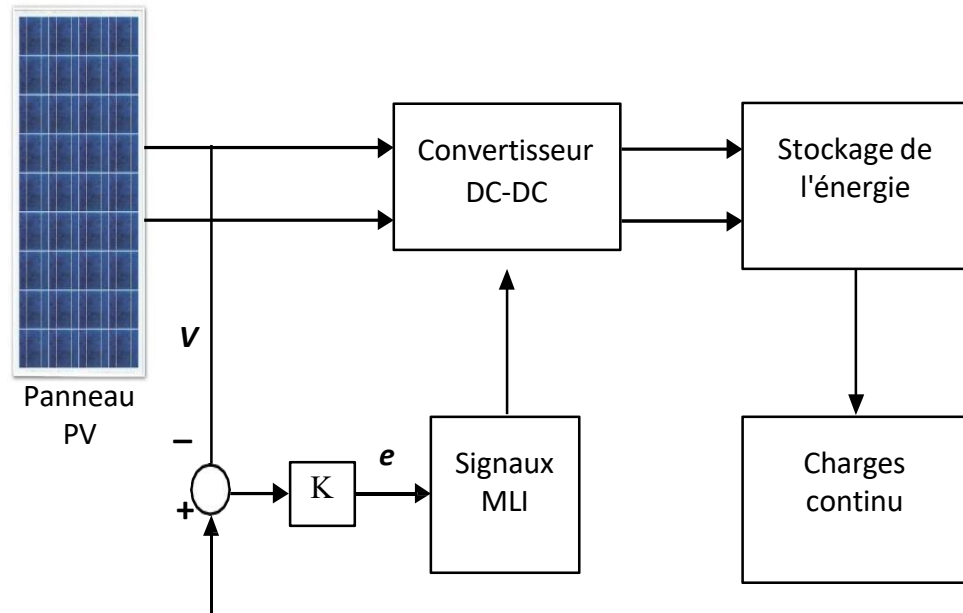


Figure 3.2. Schéma représentatif du principe de la méthode à contre réaction de

Figure 3.2. Schéma représentatif du principe de la méthode à contre réaction de tension

3.2.2 Méthode à contre-réaction de puissance:

Le principe de cette méthode repose sur la mesure des deux grandeurs électriques fondamentales en sortie du panneau photovoltaïque : le courant I_{pv} et la tension V_{pv} . La puissance instantanée générée par le générateur PV est alors calculée par le produit de ces deux grandeurs, selon la relation :

$$P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv}$$

3.1

Un algorithme de recherche itératif est ensuite utilisé pour identifier le **point de puissance maximale (PPM)**. Cet algorithme ajuste le point de fonctionnement du générateur en explorant progressivement l'espace de recherche dans une direction donnée.

Tant que la puissance mesurée augmente, la poursuite se poursuit dans le même sens. En revanche, si une diminution de la puissance est détectée, l'algorithme inverse la direction de la recherche. Ce mécanisme permet de converger vers le point de puissance maximale, même en présence de variations des conditions environnementales.

Ce principe de commande constitue la base de la méthode MPPT qui sera mise en œuvre dans la suite de ce travail.

3.3. Fonctionnement de la méthode MPPT par l'algorithme Perturb and Observe (P&O)

La méthode de la technique Perturb and Observe (P&O) s'appuie sur une approche itérative de perturbation légère de la tension de référence

du système par changement du rapport cyclique du convertisseur DC-DC. Cette perturbation peut ressembler à une augmentation ou à une baisse Figure 2.

Au fil de chaque perturbation la puissance produite par le générateur photovoltaïque est mesurée. S'il trouve cela en augmentant, la perturbation continue dans le sens positif. Cependant, si elle baisse, le sens de perturbation est inversé. Cette procédure continue à répéter jusqu'à ce qu'il soit atteint le point de puissance maximale (MPPT).

Cette méthode simple à implémenter et a peu coûteuse en termes de calcul est très utilisée dans les systèmes photovoltaïques bien qu'elle ne soit pas sans inconvénients notamment en conditions dynamiques, oscillatoire autour du point optimum [23].

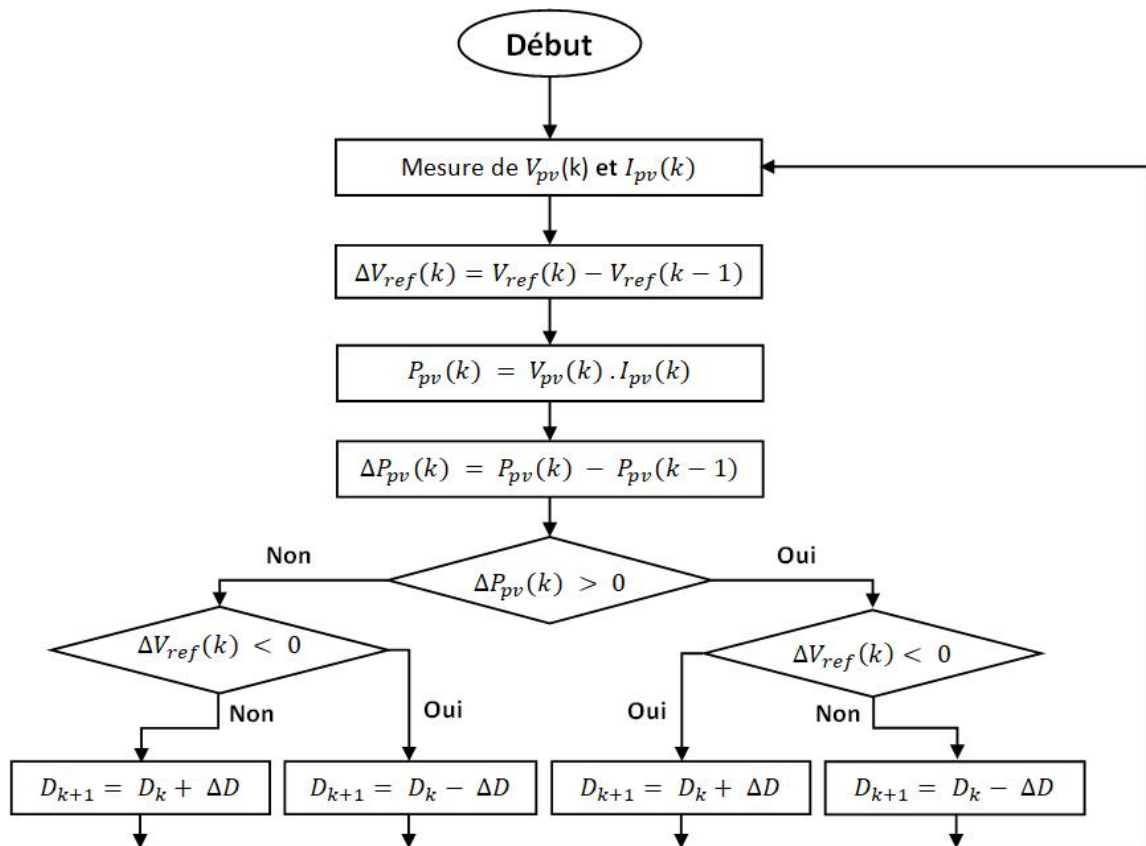


Figure 3.3. Organigramme de l'algorithme de P&O.

```

1  function D = PandO(vPV,iPV)
2
3  persistent Vprev Pprev Dprev
4
5
6  if isempty(Dprev)
7      Dprev=0.7;
8      Vprev=190;
9      Pprev=2000;
10 end
11 deltaD=125e-6;
12 pPV=vPV*iPV;
13
14 if (pPV-Pprev) ~= 0
15     if (pPV-Pprev) > 0
16         if (vPV-Vprev) > 0
17             D=Dprev-deltaD;
18         else
19             D=Dprev+deltaD;
20         end
21     else
22         if (vPV-Vprev) > 0
23             D=Dprev+deltaD;
24         else
25             D=Dprev-deltaD;
26         end
27     end
28 else
29     D=Dprev;
30 end
31
32
33
34 Dprev=D;
35 Vprev=vPV;
36 Pprev=pPV;
37
    
```

Figure 3.4. le code de matlab de MPPT algorithm

La figure 3.3 montre l'organigramme de l'algorithme P&O. Au début V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer la puissance actuelle (k). Cette valeur est comparée avec celle de l'itération précédente ($k - 1$). La différence ΔP permet de déterminer le sens de variation de la puissance, si celle-ci est positive la perturbation de la tension de sortie continuera dans la même direction que celle qui a été prise auparavant. Sinon, la tension est perturbée dans la direction opposée de celle de l'itération précédente. Pour cela un test est effectué sur $\Delta(k) = V_{ref}(k) - V_{ref}(k - 1)$ et la décision est alors prise sur la prochaine valeur du V_{ref} :

Si $\Delta(k) > 0$ cela veut dire qu'on a augmenté V_{ref} durant la dernière itération c'est-à-dire

$$D_k = D_{k-1} - \Delta D. \quad 3.2$$

Si $\Delta(k) < 0$ cela veut dire qu'on a diminué V_{ref} durant la dernière itération c'est-à-dire :

$$D_k = D_{k-1} + \Delta D \quad 3.3$$

Dans cet algorithme la tension V_{pv} du panneau oscille autour de la tension optimale V_{ppm} , ce qui cause une perte de puissance qui dépend du pas de perturbation. Si ce pas est grand le système répond rapidement à des changements brutaux de l'ensoleillement mais on aura une augmentation des pertes d'ondulations, et si le pas de perturbation est faible ces ondulations sont

réduites mais le système répond lentement à des changements brutaux des conditions de fonctionnement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins.

3.4 Annales Appliquées Simulation de MPPT méthode par perturb and observer algorithme (p&o)

Dans cette partie, nous allons étudier un générateur photovoltaïque composé de cinq colonnes, chacune de 10 panneaux câblés en série. Ce générateur est raccordé à une charge par l'intermédiaire du convertisseur DC-DC commandé d'une commande MPPT à l'aide de l'algorithme PNA : Perturb and Observe (P&O).

Dans le cadre de la validation d'efficacité de cette approche, deux simulations distinctes ont été réalisées :

Première simulation :

Etude de la puissance électrique émise par le générateur PV sous différentes valeurs du courant de charge pour des conditions de rayonnement homogènes1

$G=1000\text{W/m}^2$

et de température T

$T=25^\circ\text{C}$.

Deuxième simulation :

Synthèse de la puissance générée en fonction de l'éclairement G , pour une température constante $T=25^\circ\text{C}$ et un courant de charge constant $I_{ch}=10\text{A}$.

Ces simulations démontrent la capacité de la commande MPPT à suivre le point de puissance maximum lorsque le système est soumis à des conditions de variation de la charge ou des conditions environnementales.

Le rapport cyclique du convertisseur DC-DC initial est 0.5 tandis que la variation ΔD de variation Définie dans l'algorithme MPPT de type Perturb and Observe (P&O) a été fixée à 0.01.

La figure 3.4 représente le modèle Simulink nommé « MPPT_IMSI.slx » utilisé dans les deux simulations qui viennent d'être décrites. Cette MPPT P&O block qui fait partie de ce modèle contient un script MATLAB d'un algorithme présenté dans la figure 3.3. Ce bloc utilise les valeurs retournées pour la tension et le courant en sortie du générateur PV pour calculer la puissance instantanée. Cette dernière est alors utilisée à l'entrée de l'algorithme P & O pour calculer le rapport cyclique optimum D_{opt} du convertisseur DC-DC.

Les résultats de simulations sont montrés sur les Figures suivantes :

La figure 3.5 montre la puissance électrique produite par le générateur photovoltaïque pour divers valeurs du courant de transmission. La figure 3.6 affiche la variation de la puissance produite en fonction de l'éclairement à température constante.

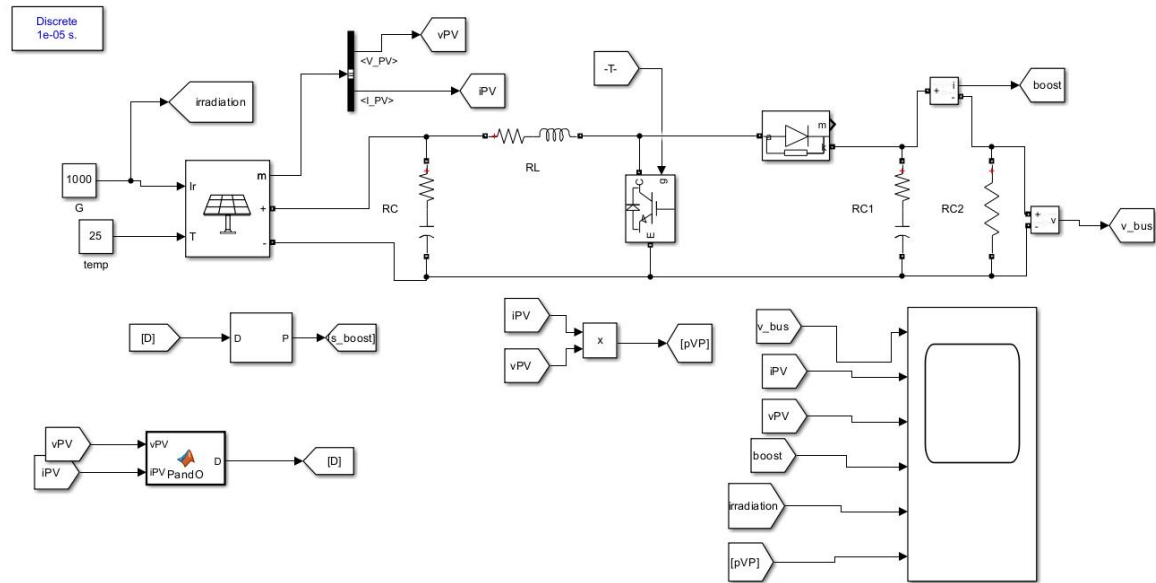


Figure 3.5: Modèle Simulink d'un générateur PV relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT avec l'algorithme P&O

L'analyse de la figure 3.5 nous apprend qu'une variation du courant de charge ne remplit pas de large batterie générant choisir power. En effet la puissance oscille autour de son maximum, ce qui prouve la bonne tenue de l'algorithme Perturb and Observe (P&O) du système à la puissance maximale.

Mais ces fluctuations sont obligatoires pour une époque de fonctionnement de l'algorithme P&O, basé sur une perturbation continue de la tension, qu'il soit en au Point de fonctionnement normal. La valeur peak-to-peak (motte à motte) de ces oscillations est directement liée à l' Δd

Δd incrément du couple cyclique contrôlé. Un plus faible Δd

Δd permet d'atténuer le palpitant de la puissance mais à raison du temps de convergence à partir de la puissance maximale. La valeur retenue ici, $\Delta d=0,01$

$\Delta d=0,01$, est un bon compromis entre stabilité de puissance (atténuation des pulsations) et rapidité d'exploration du point optimal.

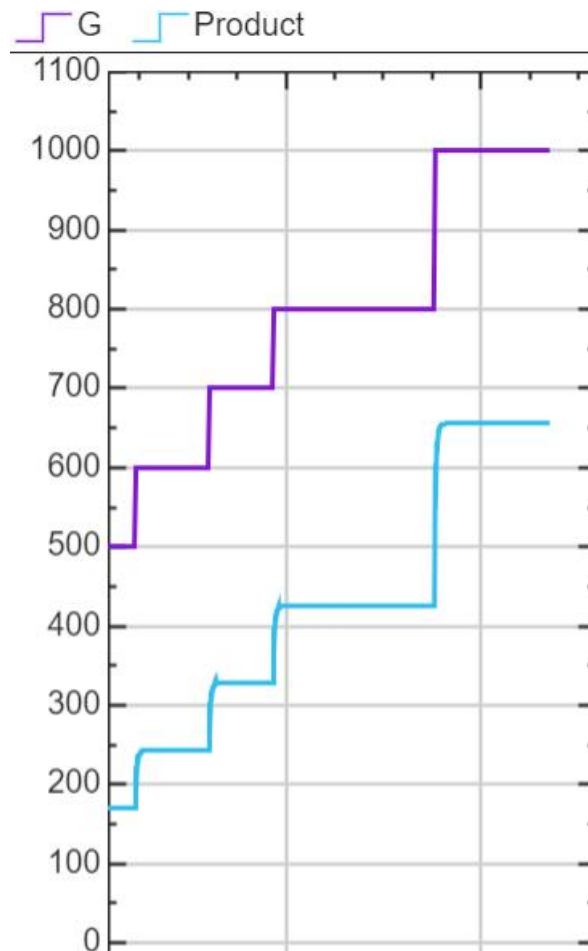
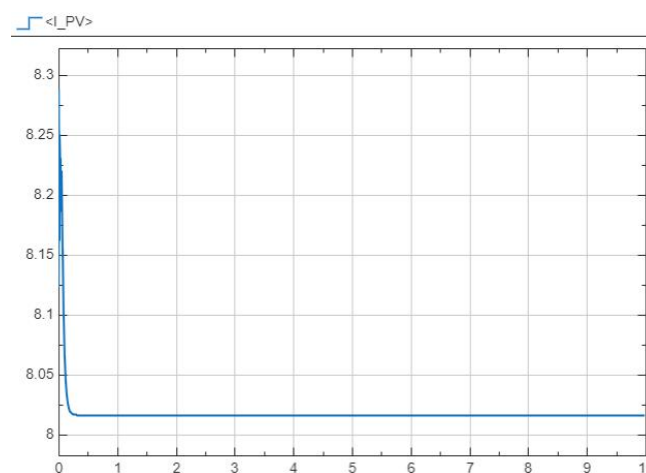


Figure 3.6 : Puissance générée par un générateur PV relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT avec l'algorithme P&O pour différentes valeurs G

La figure 3.5 montre également que la valeur crête à crête de l'ondulation de la puissance diminue en fonction de l'augmentation du courant de charge.

La figure 3.6 montre que le dernier algorithme P & O permet de générer la puissance maximale quel que soit le facteur d'éclairage, les puissances produites correspondent aux puissances maximales simulées dans le chapitre 2 et présentées dans le tableau 2.3.



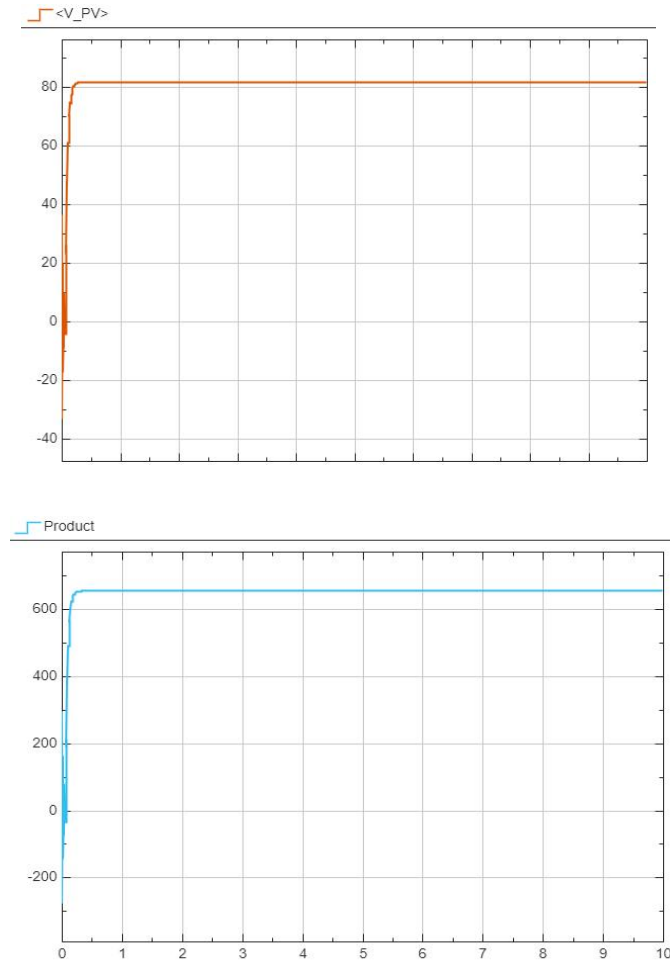


Figure 3.7 : Tension, courant, Puissance générée par un générateur PV relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT avec l'algorithme P&O pour différentes valeurs de l'éclairement

3.4. Commande MPPT basée sur la logique floue

3.4.1. Conception du contrôleur flou

La commande MPPT basé sur la logique floue prend de plus en plus d'importance en particulier grâce aux avancées faites dans le domaine des microcontrôleurs [24,25]. Cette approche a de nombreux avantages indéniables : elle peut être efficace avec des données inexacts, ne nécessite aucun modèle précis et permet de contrôler des systèmes non linéaires de manière extrêmement souple.

La logique floue introduite par L. Zadeh en 1965 comme concept de sous ensembles flous a depuis trouve un vaste domaine d application autant dans le traitement contrôle des systèmes complexes que dans la génie électrique [26]. Cette loi de synthèse permet de définir des lois de commande sur la base de règles linguistiques très simples et directement relayées de l'expertise humaine. Cette aptitude de capitaliser sur s connaissances acquises par l'expérience fait d'elle un

excellent outil de conception de régulateurs robustes et efficaces, surtout dans des environnements imprégnés des incertitudes.

Dans la mise en œuvre du Point de puissance maximale (MPPT), la commande floue utilise à la racine généralement deux variables d'entrée :

- l'**erreur** X , définie comme la pente de la courbe $P(V)$, et
- la **variation de l'erreur** Y , représentant l'évolution de cette pente d'un instant à l'autre.

La **variable de sortie** est la variation du rapport cyclique ΔD , qui pilote le convertisseur DC-DC afin de rapprocher le système du point de puissance maximale (MPP). Le fonctionnement de ce régulateur est illustré par la **figure 2.4**.

L'erreur EEE est donnée par la dérivée de la puissance par rapport à la tension :

Cette grandeur représente la pente de la courbe $P-V$ au point de fonctionnement actuel. Si $E > 0$, cela indique une augmentation de la puissance avec la tension ; à l'inverse, si $E < 0$, la puissance décroît. Lorsqu' EEE est proche de zéro, cela signifie que le système opère aux alentours du point de puissance maximale (MPP).

$$X(k) = \frac{dP}{dV}(k) - 0 = \frac{dP}{dV}(k) \quad 3.4$$

La **variation de l'erreur** est définie comme :

$$Y(k) = E(k) - E(k - 1) \quad 3.5$$

Cette variation permet de suivre l'évolution de la pente et d'ajuster dynamiquement la commande. Lorsque Y tend vers zéro, cela signifie que le système approche d'un état stable. La valeur de sortie ΔD est alors déterminée à l'aide d'une **table de décision**, qui associe des combinaisons de valeurs de X et ΔE à des actions correctives appropriées sur le rapport cyclique. Ce mécanisme permet d'atteindre et de maintenir le générateur photovoltaïque à son rendement optimal, même en présence de perturbations externes ou de conditions environnementales variables.

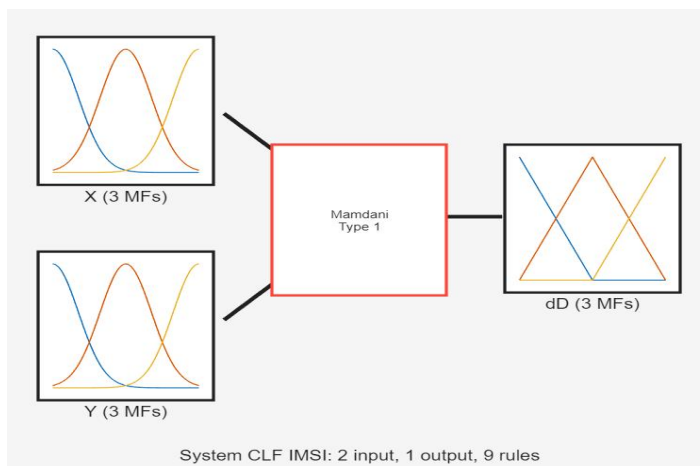
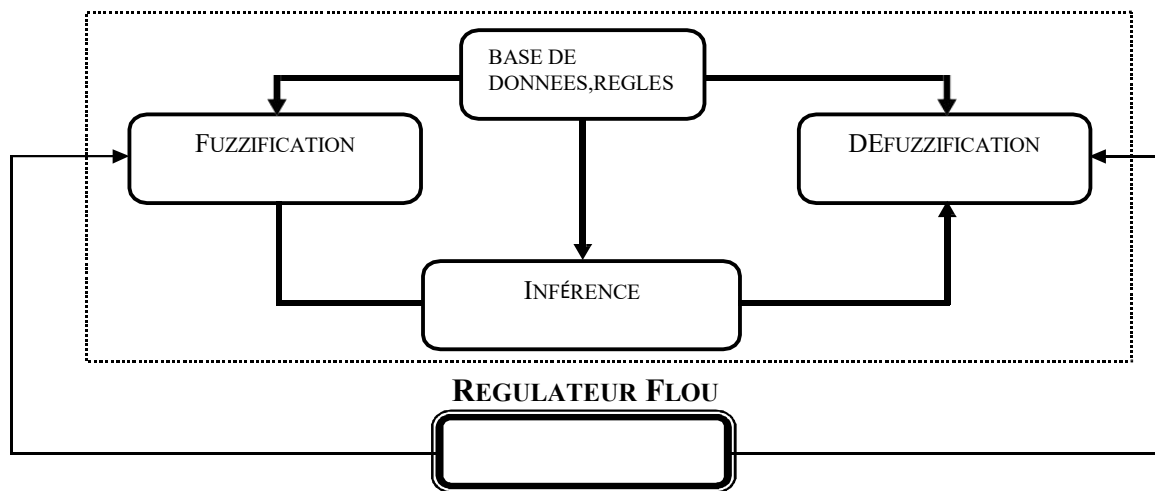


Figure 3.8. Configuration globale du contrôleur à logique floue sous Matlab/Simulink

Cette méthode est basée sur le développement d'une base de règles de décision écrites dans un langage linguistique, sur des ensembles flous pour modéliser l'importance de l'imprécision, son évolution, ainsi que la commande à appliquer, ces règles représentent le comportement souhaité pour le système de commande en fonction des combinaisons possibles des entrées.

En juxtaposant ces règles on peut définir une table de décision, cette dernière étant utilisée pour attribuer à toute situation rencontrée (soit toute paire $((E, \Delta E))$ une commande adaptée, celle-ci se traduisant par une variation ΔD du rapport cyclique. Cette table est au cœur du régulateur flou qui garantit une réponse dynamique et robuste de la chaîne là où elle n'est pas linéaire, ni connue. La structure générale d'un système de commande linguistique flou peut être présentée sous la forme suivante, figure 3.8.

Figure.3.9. Schéma synoptique général d'un contrôleur flou



3.4.1.1. Interface de fuzzification

Elle est chargée de transformer les entrées numériques (par exemple l'erreur E et la variation de l'erreur ΔE) en variables linguistiques floues, en utilisant des fonctions d'appartenance prédéfinies. Cette étape permet de traduire l'information d'entrée dans un langage prêt à être traité par les règles floues.

3.4.1.2. Banque de connaissance

Elle comprend deux éléments principaux :

- **Une base de données**, contenant les descriptions des méthodes floues (fonctions d'appartenance, plages de variation, etc.) ;
- **Une base de règles**, dans laquelle sont enregistrées toutes les règles de contrôle linguistique utilisées par le régulateur pour gérer les situations typiques du système.

3.4.1.3. Logique de décision (ou moteur d'inférence) :

Ce module constitue le cœur du système de commande flou.

Il utilise les règles contenues dans la base de connaissance pour interpréter les entrées floues et en déduire les sorties floues.

Il simule un processus de prise de décision humaine fondé sur des méthodes qualitatives et heuristiques.

3.4.1.4. Interface de défuzzification

Elle a pour rôle de convertir les sorties floues du moteur d'inférence en une sortie précise (valeur numérique).

Ce résultat correspond à l'action de commande réelle, comme par exemple la ΔD du rapport cyclique à appliquer à un convertisseur DC-DC.

Parmi les différentes méthodes de défuzzification, la plus couramment utilisée est celle du **centre de gravité**.

Les règles d'inférence occupent un poste d'honneur dans celui qui détermine le comportement du contrôleur flou. Elles respectent l'expertise et l'intuition humaine dans un ensemble de décisions systématiques. Pour que le régulateur fonctionne bien, le régulateur doit établir des étapes intermédiaires qui permettent de traduire les grandeurs physiques réelles (par exemple, la tension, voire la puissance) en grandeurs floues et de puis retourner.

Ces étapes s'appellent respectivement fuzzification (pour le passage des données réelles aux données linguistiques floues). Et défuzzification (pour le retour des résultats flous aux actions de commande physiques). Ce processus à double sens permet une interaction continue entre le monde réel, le système de décision à base de logique flou, et [27].

Le **contrôleur à logique floue** présenté dans ce document est illustré par la **figure 3.7**. Il comporte **deux variables d'entrée**, à savoir l'erreur E et la variation de l'erreur ΔE , ainsi qu'une **variable de sortie** ΔD , représentant l'ajustement à apporter au rapport cyclique du convertisseur DC-DC.

Ces variables permettent de piloter dynamiquement la position du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque par rapport à son **point de puissance maximale (MPPT)**, comme cela a été expliqué dans les sections précédentes.

Chaque variable, qu'elle soit d'entrée ou de sortie, est décrite à l'aide de **cinq termes linguistiques flous**, définis comme suit :

- **P et p** : petit
- **M et m** : moyen
- **G et g** : GRAND
- **a** : petit sortie
- **b** : moyen sortie
- **c** : grand sortie

La figure 3.9., fournit les fonctions d'appartenance pour la variable initiale ainsi que pour la variable finale du contrôleur. Les univers de discours admissibles sont $[-1,1]$

.Les 25 règles d'inférence sont synthétisées dans le tableau 3.1.

X/Y	P	M	g
P	A	A	b
M	A	B	b
G	B	B	c

Table 5 Tableau des règles de décision floue (inférence)

La conception des règles du contrôleur flou proposé s'appuie sur une synthèse entre expertise technique et expérience pratique. Les règles d'implémentation ont été définies par les objectifs de performance à atteindre et les ont implémentées en premier pour orienter la réflexion vers le point de puissance maximal.

Le contrôleur utilise une **méthode d'inférence de type max-min**, parfaitement convenant aux systèmes de commande floue. Pour la **défuzzification**, c'est la **méthode du centre de gravité** qui a été retenue, celle-ci étant la seule capable de fournir une sortie significative des diverses conclusions floues tirées.

Le développement du contrôleur a été conçu au moyen de l'instruction fuzzy de MATLAB, et les paramètres du système ont sauvegardé dans le fichier CLF_IMSI.fis. La **figure 3.10** montre la **output surface** du contrôleur fuzzy. Cette dernière illustre la dynamique de la sortie réelle sous forme soit de gaussiennes soit sous formes triangulaires floues ceci détermine l'univers de discours. Cette représentation signale l'appréciation visuelle qui permet d'avoir une compréhension de l'action du contrôleur et de la cohérence des règles à tisser[28]

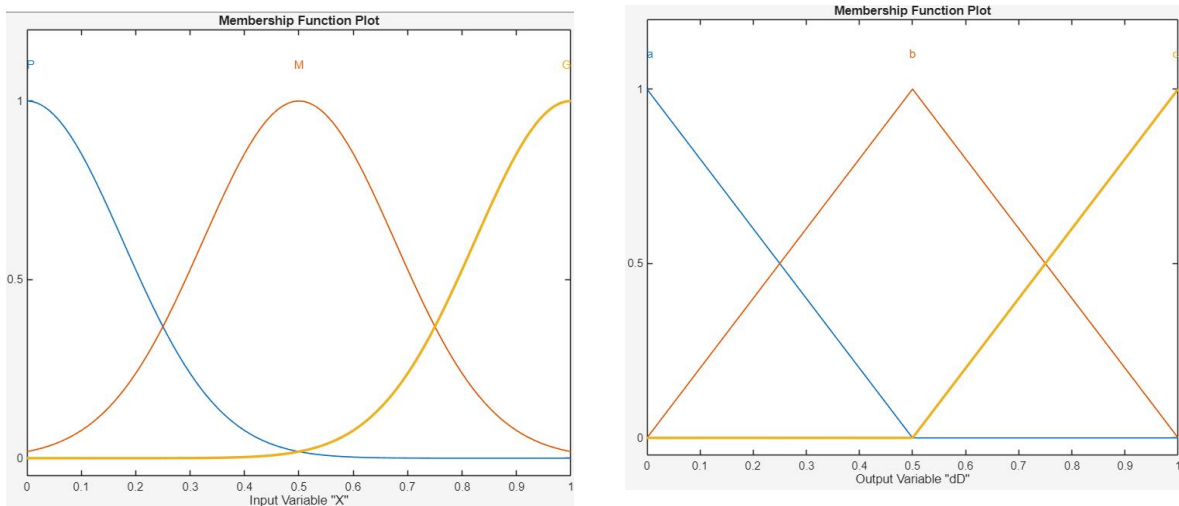


Figure 3.10. Fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou : X Y et ΔD .

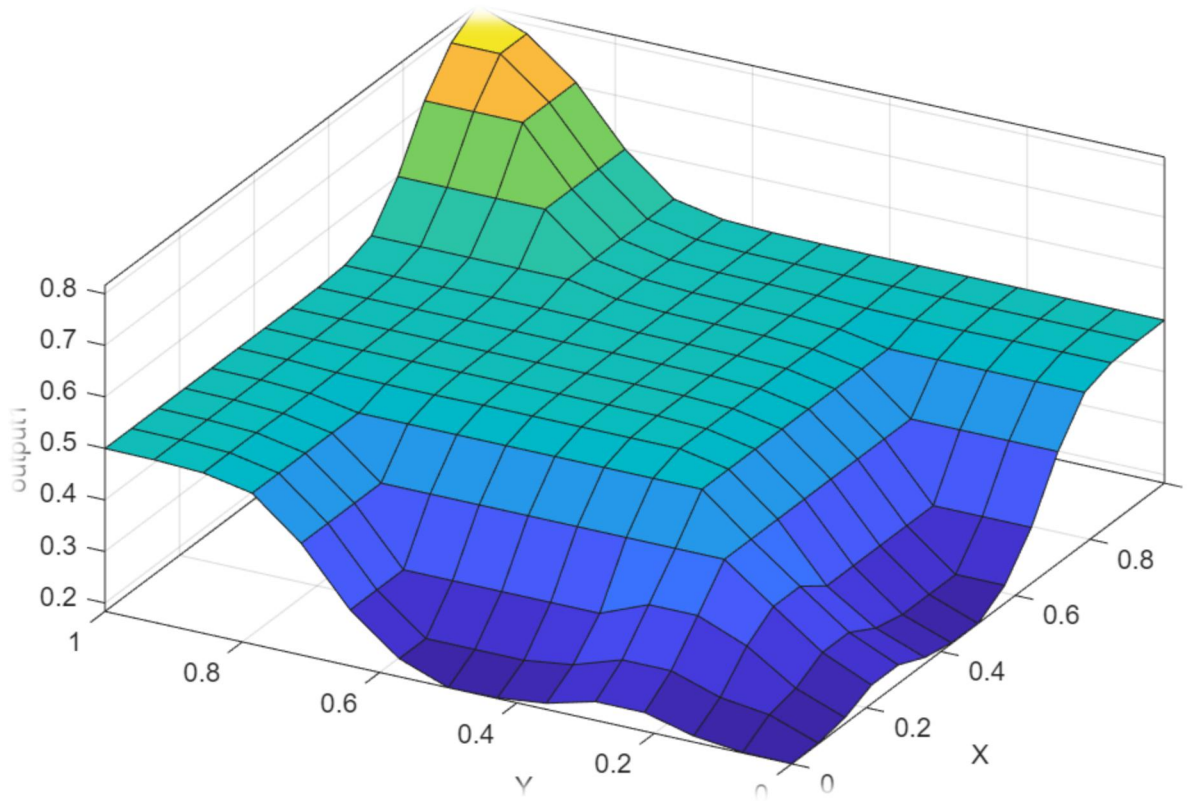


Figure 3.11. Surface caractéristique du régulateur flou

3.4.2. Simulation de la méthode MPPT avec logique flou

Au même titre que précédemment la méthode MPPT avec algorithme P&O La simulation se fera en remplaçant l'algorithme P&O par un contrôleur neuro-flou. Le générateur photovoltaïque comporte cinq colonnes en série de dix panneaux couplés. Afin qu'une comparaison soit possible entre les deux approches MPPT, les mêmes scénarios de simulations sont repris pour cette méthode.

La figure 3.11 rappelle bloc MPPT flou, qui lui est présenté au niveau de la figure 3.12, comprend le contrôleur à logique flou antérieurement conçu. Ce bloc utilise le courant et le voltage en sortie du générateur pour déterminer les deux messages d'entrée du contrôleur en termes d'erreur EE et de dérivée ΔEE de l'erreur. Ces dernières sont ensuite envoyées au contrôleur flou pour calculer la variation du rapport cyclique ΔD .

Un intégrateur dont on a réglé la sortie pour qu'il soit à une valeur 0,8, permet d'émettre la valeur du rapport cyclique D à partir de ΔD . Les gains du contrôleur sont ceux-ci respectivement : $g_X = 0,5$, $g_Y = 0,33$ et $g_{\Delta D}$

Ces paramètres ont été choisis pour assurer un bon compromis entre la stabilité de l'environnement, la rapidité de réaction et la précision de poursuite du point de puissance maximale.[29]

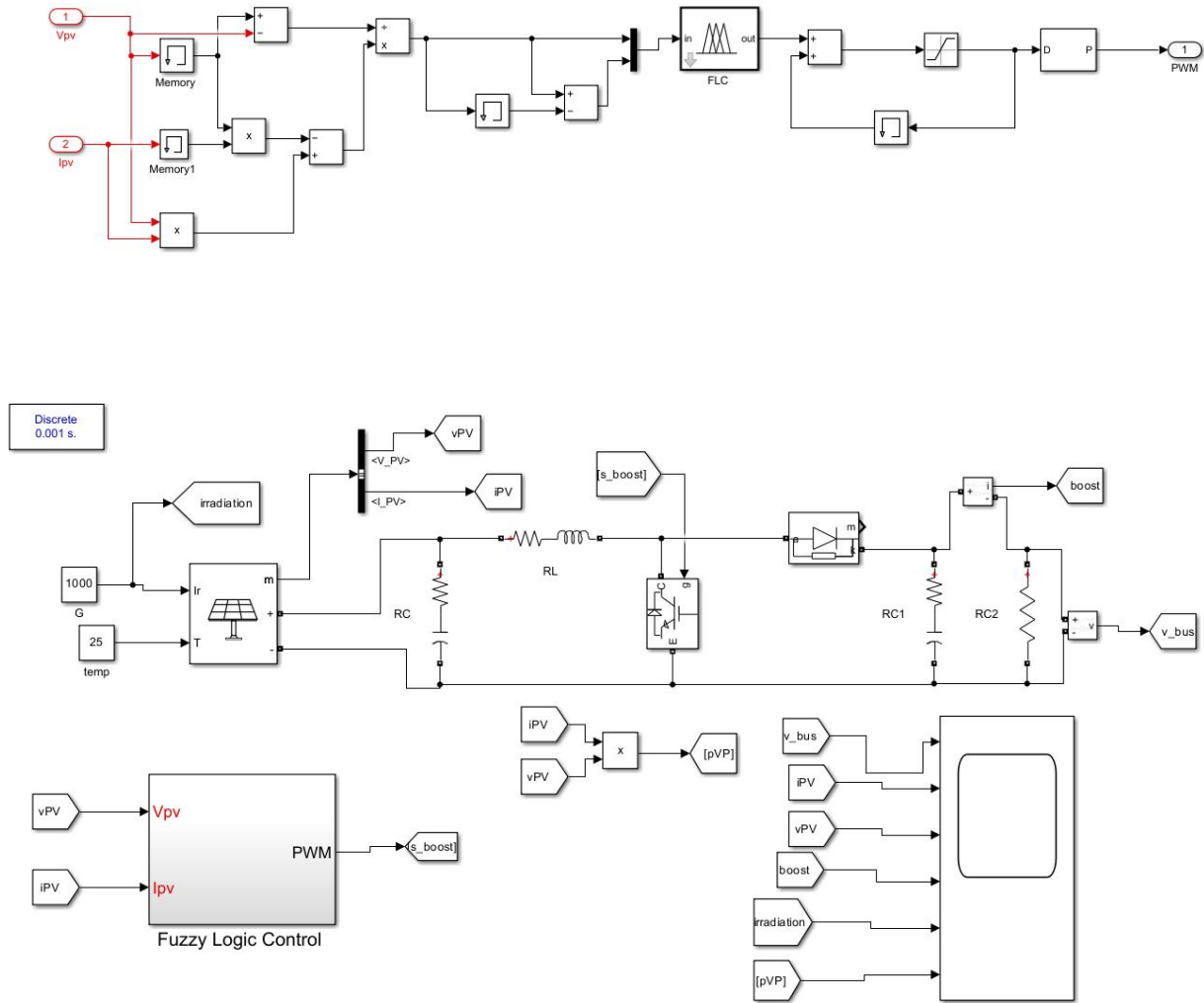


Figure 3.12 : Modèle Simulink d'un générateur PV relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT à logique floue FLC

Conclusion

Dans ce chapitre, cette commande MPPT pour la recherche du point de puissance maximal d'un générateur photovoltaïque a été d'abord introduite. On a défini ensuite la commande et modélisé ensuite la simulation sous deux commandes MPPT, la commande MPPT sous P&O, et la commande MPPT sous logique floue. Dans les deux commandes MPPT, la puissance produite de réception est maximum quelque soit la valeur du courant de charge ou du rayonnement avec l'avantage d'un temps de réponse plus rapide pour l'algorithme P&O. Mais c'est la commande MPPT par ANFIS qui va réaliser la valeur maximale.

CHAPITRE IV: COMMANDE MPPT NEURO FLOUE D'UN GENERATEUR

4.1 Introduction

L'exploitation efficace de l'énergie photovoltaïque dépend fortement de la capacité du système à extraire en permanence la puissance maximale disponible, quelles que soient les conditions météorologiques ou les variations de la charge. C'est l'objectif principal des algorithmes de suivi du point de puissance maximale, appelés MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié deux techniques de commande MPPT : l'algorithme Perturb and Observe (P&O) et la commande à logique floue. Chacune de ces méthodes présente des avantages et des limites.

- L'algorithme P&O est simple à implémenter, mais il peut provoquer des oscillations autour du point de puissance maximale, surtout en conditions variables.
- La commande floue est plus robuste et plus réactive aux changements d'ensoleillement, mais elle nécessite une bonne connaissance du système pour définir les fonctions d'appartenance et les règles d'inférence.

Dans le but d'améliorer la performance du suivi MPPT, notamment en termes de rapidité, de stabilité et d'adaptabilité, ce chapitre introduit une méthode hybride appelée commande MPPT neuro-floue. Cette technique combine les avantages des réseaux de neurones artificiels (capacité d'apprentissage et de généralisation) avec ceux de la logique floue (modélisation de l'incertitude et du raisonnement humain).

Plus précisément, nous allons utiliser une structure appelée ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*), qui permet d'automatiser la génération des règles floues à partir de données d'apprentissage, tout en conservant la capacité à approximer des fonctions non linéaires complexes. Ce système sera appliqué au contrôle d'un convertisseur Boost, utilisé pour relier un générateur photovoltaïque à une charge électrique.

L'objectif est de :

- Maintenir le générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale ;
- Réduire le temps de réponse lors des variations rapides d'éclairement ;
- Minimiser les oscillations en régime permanent.

Dans ce chapitre, nous allons donc présenter les principes des réseaux de neurones, expliquer la structure du contrôleur ANFIS, puis valider les performances de cette commande à travers des simulations sous MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus seront ensuite comparés à ceux des commandes P&O et floue, afin d'évaluer les gains en performance.

4.2. Généralités sur les réseaux de neurones

4.2.1 Inspiration Biologique

Les **réseaux de neurones artificiels** (RNA) tirent leur origine de l'observation du fonctionnement du **cerveau humain**. Ce dernier est un système complexe composé d'environ **10^{11} neurones**, chacun étant connecté à environ **10^4 autres neurones**, formant ainsi un réseau hautement interconnecté.

Structure d'un neurone biologique

Chaque **neurone biologique** est constitué de trois parties principales :

- **Les dendrites** : ce sont des extensions ramifiées qui reçoivent les signaux sous forme d'impulsions électriques provenant d'autres neurones.
- **Le corps cellulaire (ou soma)** : il traite les signaux entrants en les sommant. Si la somme dépasse un certain **seuil**, le neurone s'active et génère un signal de sortie.
- **L'axone** : c'est une longue fibre qui transporte le signal généré par le corps cellulaire vers d'autres neurones.

Le signal est ensuite transmis à d'autres neurones via une **synapse**, qui est le point de contact entre l'**axone d'un neurone émetteur** et les **dendrites d'un neurone récepteur**. La transmission synaptique repose sur des processus **électrochimiques**, où l'intensité et la fréquence de la connexion jouent un rôle crucial dans le traitement de l'information.

Lien avec les réseaux artificiels

L'idée derrière les RNA est de **modéliser ce comportement biologique** à travers des équations mathématiques. Chaque **neurone artificiel** reçoit plusieurs **entrées pondérées**, applique une **fonction d'activation**, puis transmet le résultat en **sortie** vers d'autres neurones.

Ce mécanisme permet aux RNA d'apprendre à reconnaître des **modèles complexes** dans les données, tout comme le cerveau humain apprend à reconnaître des sons, des images ou des signaux sensoriels.

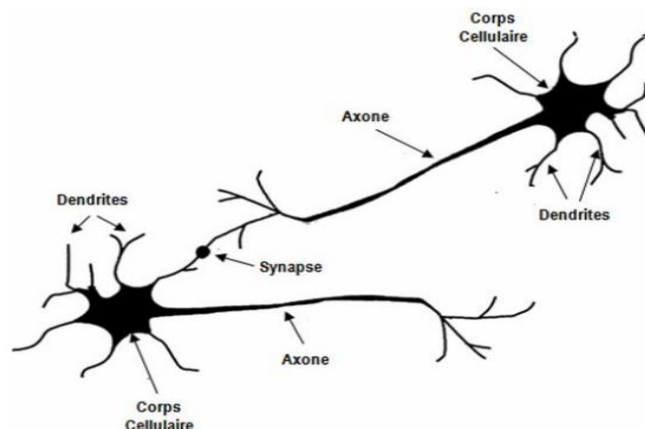


Figure 4.1 Représentation schématique d'un neurone biologique

4.2.2. Modèle mathématique d'un neurone artificiel

La figure 4.2 montre le schéma fonctionnel d'un neurone artificiel :

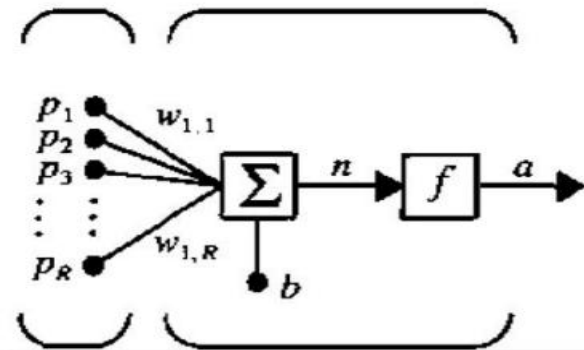


Figure 4.2 Schéma bloc d'un neurone artificiel

Le vecteur d'entrée x est multiplié par le vecteur des poids w , puis le résultat est envoyé à un sommateur qui ajoute un biais b afin d'obtenir la sortie globale n . Cette sortie n est ensuite passée à travers une fonction d'activation f , qui produit la sortie finale du neurone a . Ainsi, la sortie du neurone artificiel s'exprime par la formule suivante :

$$a = f(w \cdot x + b) \text{ où } w = [w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,m}] \text{ et } x = [x_1, x_2, \dots, x_m]$$

La valeur de sortie a dépend du type de fonction d'activation choisie. Les fonctions d'activation couramment utilisées sont les fonctions linéaires, la sigmoïde logarithmique et la sigmoïde tangente hyperbolique.

4.2.3. Architecture d'un réseau de neurones artificiels

4.2.3.1. Couches de Neurones Artificiels

La figure 4.3 illustre un réseau constitué d'une seule couche comportant S neurones.

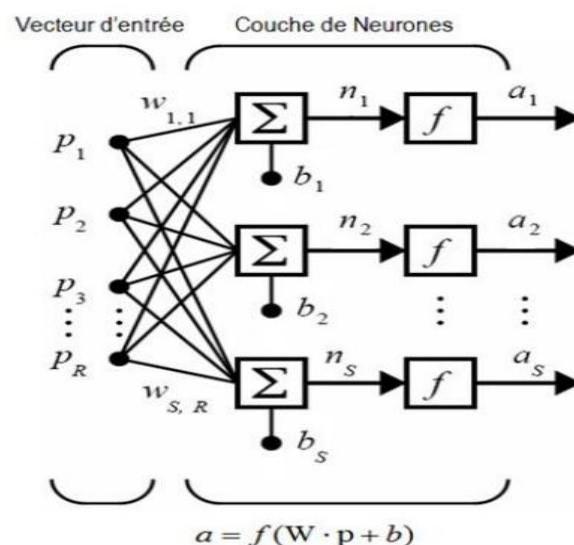


Figure 4.3 Schéma bloc d'une couche de S neurones artificiels

Chaque élément du vecteur d'entrée p est relié à chaque neurone de la couche via un vecteur de poids W . Chaque neurone i possède un biais, une fonction d'activation f et une sortie a_i . En général, le nombre d'entrées R est différent du nombre de neurones S dans la couche.

La matrice des poids W de la couche est définie par :

$$W=[w_{i,j} \quad] \text{ avec } i=1,\dots,S \text{ et } j=1,\dots,R$$

4.2.3.2. Réseau de neurones artificiels à plusieurs couches

Considérons maintenant un réseau de neurones multicouches. Chaque couche possède sa propre matrice de poids W , son vecteur de biais b et sa sortie a . Pour distinguer les variables appartenant aux différentes couches, sont les variables de la première couche. Un réseau de k couches peut se schématiser par la figure 4.4 :

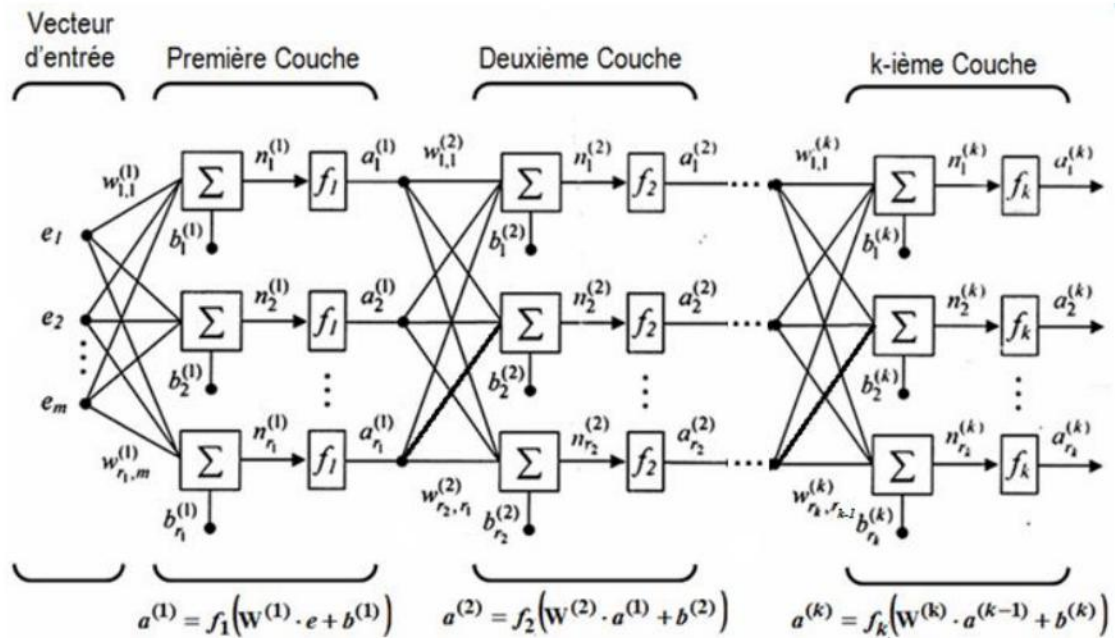


Figure 4.4 Schéma bloc d'un réseau de neurones artificiels à k couches

Remarque :

- Comme indiqué dans le schéma, la première couche du réseau contient n_1 neurones, la deuxième couche contient n_2 neurones, et la k -ième couche contient n_k neurones.
- L'entrée de la première couche est le vecteur d'entrée e du réseau. L'entrée de la deuxième couche est le vecteur de sortie $a(1)$ de la première couche, et de manière générale, l'entrée de la i -ième couche est le vecteur de sortie $a(i-1)$ de la couche précédente.
- La première couche est appelée **couche d'entrée**, car c'est elle qui reçoit les données d'entrée du réseau.

- La dernière couche est appelée **couche de sortie**, car c'est elle qui fournit la sortie finale du réseau.
- Les couches situées entre la couche d'entrée et la couche de sortie sont appelées **couches cachées**.

4.2.4 Apprentissage des réseaux de neurones

Un réseau de neurones peut être entraîné pour apprendre une tâche spécifique en imitant le comportement d'un système donné S . Ce système produit une réponse $R(t)$ en fonction d'une entrée $e(t)$. Apprendre cette tâche consiste à ajuster les paramètres du réseau (poids et biais) de façon à ce que sa sortie soit aussi proche que possible de $R(t)$ pour chaque entrée $e(t)$. Une fois entraîné, le réseau peut ainsi remplacer le système S et exécuter la même tâche.

L'apprentissage revient à résoudre un problème d'optimisation mathématique : il s'agit de minimiser l'erreur quadratique entre la sortie désirée et la sortie réelle du réseau, cette dernière dépendant directement des poids et biais du modèle.

On distingue deux types principaux d'apprentissage :

- Apprentissage en ligne (on-line) : les poids sont ajustés au fur et à mesure que de nouvelles données sont disponibles. Ce mode est moins courant.
- Apprentissage hors ligne (off-line) : le réseau est entraîné à l'avance sur un ensemble fixe d'entrées et de sorties choisies, avant d'être utilisé.

4.2.4.1 La procédure d'apprentissage

L'apprentissage d'un réseau de neurones se déroule généralement dans le cadre d'une tâche spécifique à acquérir ou d'un comportement à reproduire. Ce processus s'étend sur une période prolongée, pendant laquelle le réseau est exposé de manière répétée à un ensemble d'entrées prédéfinies, accompagnées éventuellement des sorties souhaitées.

Ces présentations répétées permettent au réseau d'ajuster progressivement ses paramètres internes (poids et biais) afin de minimiser l'erreur entre la sortie produite et la sortie attendue.

Ce processus d'apprentissage est souvent itératif et repose sur des cycles successifs d'entraînement.

Les principales étapes de ce processus sont illustrées dans la figure 4.5.

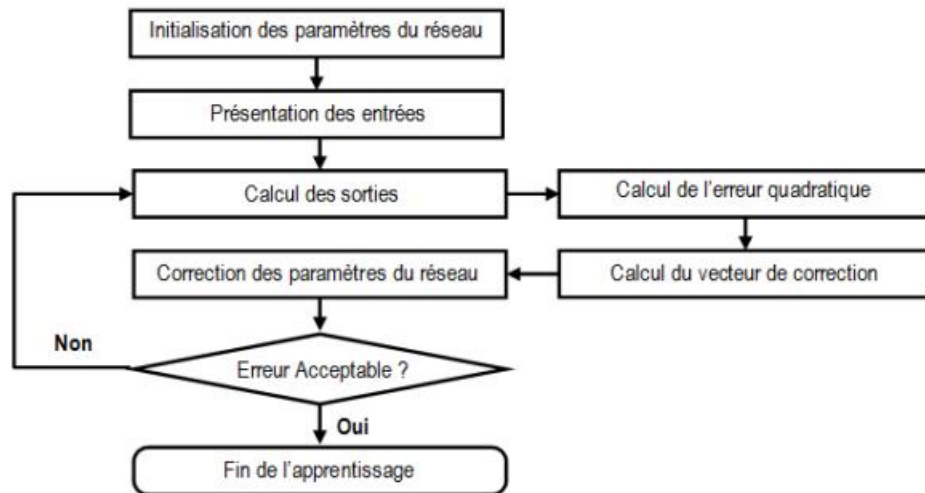


Figure 4.5 Etapes d'apprentissage d'un réseau de neurones artificiels

4.3. Commande MPPT Neuro-Floue

La commande MPPT neuro-floue combine les avantages de la logique floue et des réseaux de neurones artificiels pour déterminer le rapport cyclique optimal de l'interrupteur du convertisseur DC-DC Boost. Ce rapport cyclique permet au générateur photovoltaïque (PV) de fonctionner à son point de puissance maximale (MPPT).

Cette commande s'appuie sur les valeurs mesurées de la tension et du courant en sortie du générateur PV, afin d'ajuster dynamiquement le fonctionnement du convertisseur et maximiser la puissance extraite.

4.3.1. Principe de la commande MPPT Neuro-Floue

La commande MPPT neuro-floue repose sur la combinaison des réseaux de neurones artificiels et de la logique floue pour concevoir un contrôleur intelligent capable de suivre le point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque.

Dans ce type de commande, les connaissances expertes humaines peuvent être exploitées pour définir la structure initiale du réseau de neurones, tandis que les paramètres du modèle sont ajustés à l'aide de méthodes d'apprentissage en ligne (on-line) ou hors ligne (off-line).

L'une des approches les plus courantes pour cette intégration est le système d'inférence neuro-floue adaptatif (ANFIS), proposé dans les références [30–32]. Ce système combine les capacités d'adaptation des réseaux de neurones avec les règles de décision de la logique floue.

La Figure 4.6 illustre la structure ANFIS typique, composée de cinq couches neuronales, chacune ayant une fonction spécifique :

Couche 1 : Chaque nœud applique une fonction d'appartenance floue (souvent triangulaire ou en cloche) à ces entrées

Couche 2 : Elle effectue une opération d'intersection floue,

Couche 3 : Elle normalise les sorties de la couche précédente chaque sortie est divisée par la somme totale des sorties).

Couche 4 : Chaque nœud génère une fonction linéaire dépendant des signaux d'entrée et du résultat normalisé de la couche 3.

Couche 5 : Elle somme toutes les sorties de la couche précédente pour produire la sortie finale du système ANFIS.

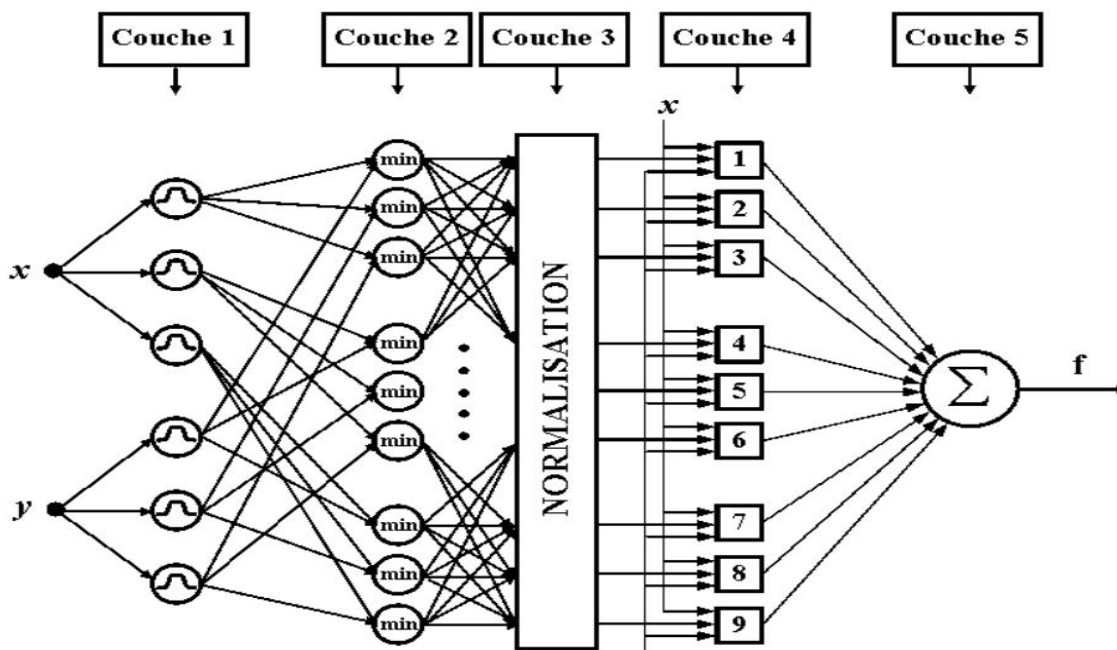


Figure 4.6. Structure d'un contrôleur neuro floue à deux entrées

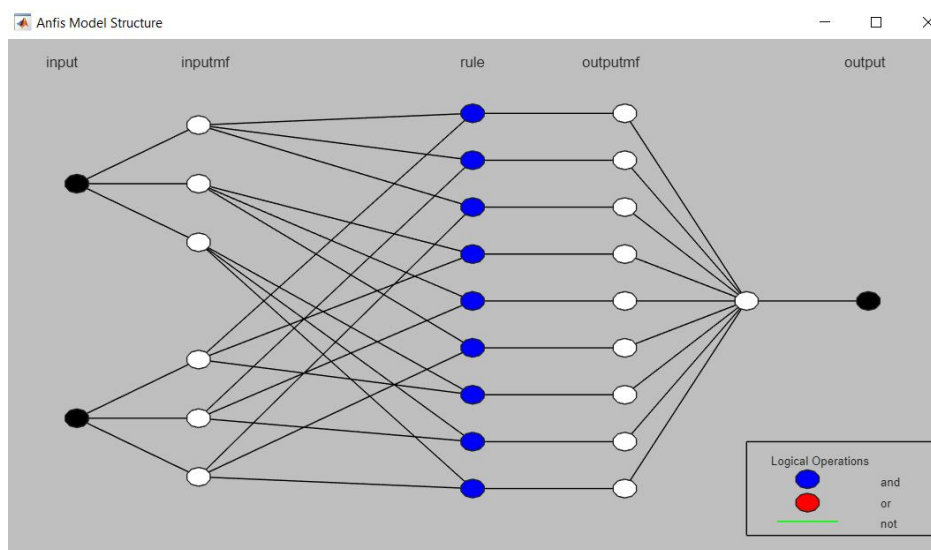


Figure 4.7. Schéma bloc du contrôleur MPPT neuro flou

Le schéma bloc du contrôleur MPPT neuro-flou est illustré par la Figure 4.7.

Dans cette structure, la première couche reçoit deux variables d'entrée définies comme suit :

G : L'irradiance

T : la température

Ces variables sont obtenues à partir des échantillons de courant et de tension mesurés à la sortie du générateur photovoltaïque.

Chacune de ces entrées est ensuite traitée par trois fonctions d'appartenance floues :

- P p : petit valeur
- M m : valeur moyene
- G g : valeur grand

Ces fonctions sont illustrées dans la Figure 4.2.

Ensuite, les étapes suivantes du traitement sont réparties sur les différentes couches du système :

- Couche 2 : Effectue une opération de minimum entre les niveaux d'appartenance associés à chaque règle floue.
- Couche 3 : Réalise une normalisation des valeurs issues de la couche précédente, de manière à satisfaire la relation :

$$V_i = \frac{\{w_i\}}{\{\sum_{k=1}^9 w_k\}} \quad 4.1$$

où w_i représente la sortie de la couche 2 et V_i la sortie normalisée de la couche 3 pour la règle i ($i = 1$ à 9).

- Couche 4 : Produit un vecteur de sortie, dont chaque composante est le produit :

$$V_i \cdot \sigma_i$$

où σ_i est un poids associé à la règle i , défini dans le Tableau 4.1.

- Couche 5 : Effectue la sommation des composantes du vecteur de sortie de la couche 4, ce qui permet de déterminer la variation du rapport cyclique ΔD , utilisée pour ajuster la commande du convertisseur DC-DC Boost.

X	P			M			G		
Y	p	M	g	p	m	g	p	m	g
I	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W σ_i	a	A	b	a	b	b	b	b	c

Table 6 Valeurs des poids σ_i associés aux entrées de la quatrième couche du contrôleur MPPT neuro-flou

4.3.2 Entraînement du contrôleur MPPT Neuro-Flou

L'objectif de cette étape est de concevoir un contrôleur intelligent capable de prédire le rapport cyclique optimal (duty cycle) pour maximiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en fonction des conditions environnementales (éclairage G et température T).

1 Structure des données d'entraînement

Les données utilisées pour l'entraînement du contrôleur neuro-flou sont constituées de :

- G : l'éclairement solaire en W/m^2
- T : la température en $^{\circ}C$
- D : le duty cycle optimal associé

Ces données ont été obtenues à partir de simulations du système PV sous différentes conditions climatiques, en utilisant un algorithme MPPT classique (Perturb & Observe) comme référence.

Éclairement G (W/m^2) Température T ($^{\circ}C$) Duty cycle optimal DDD

200	25	0.35
400	25	0.40
800	25	0.48
1000	45	0.44
...	...	...

2 Outil utilisé : ANFIS

L'entraînement a été réalisé à l'aide de l'outil **ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)** de MATLAB. Celui-ci permet de combiner les avantages des systèmes flous (capacité de modéliser des relations non linéaires complexes) et des réseaux de neurones (capacité d'apprentissage automatique).

3 Étapes de l'entraînement

1. **Chargement des données** dans l'éditeur ANFIS (anfisedit).
2. **Génération du FIS initial** en utilisant une partition floue avec trois fonctions d'appartenance (MFs) par entrée.
3. **Entraînement** du modèle sur 100 époques pour minimiser l'erreur quadratique moyenne (RMSE).
4. **Validation** sur des données tests non utilisées pendant l'apprentissage.

5. Exportation du modèle sous forme de fichier .fis intégré ensuite dans le modèle Simulink.

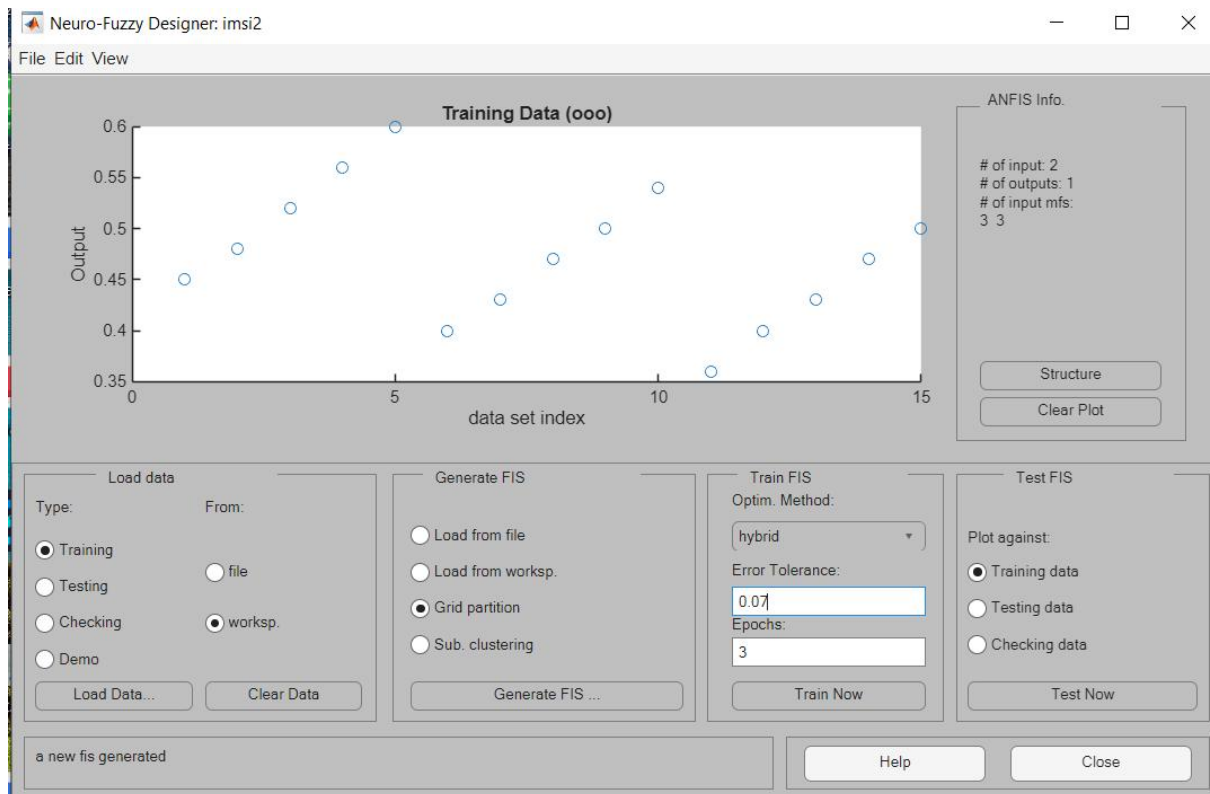
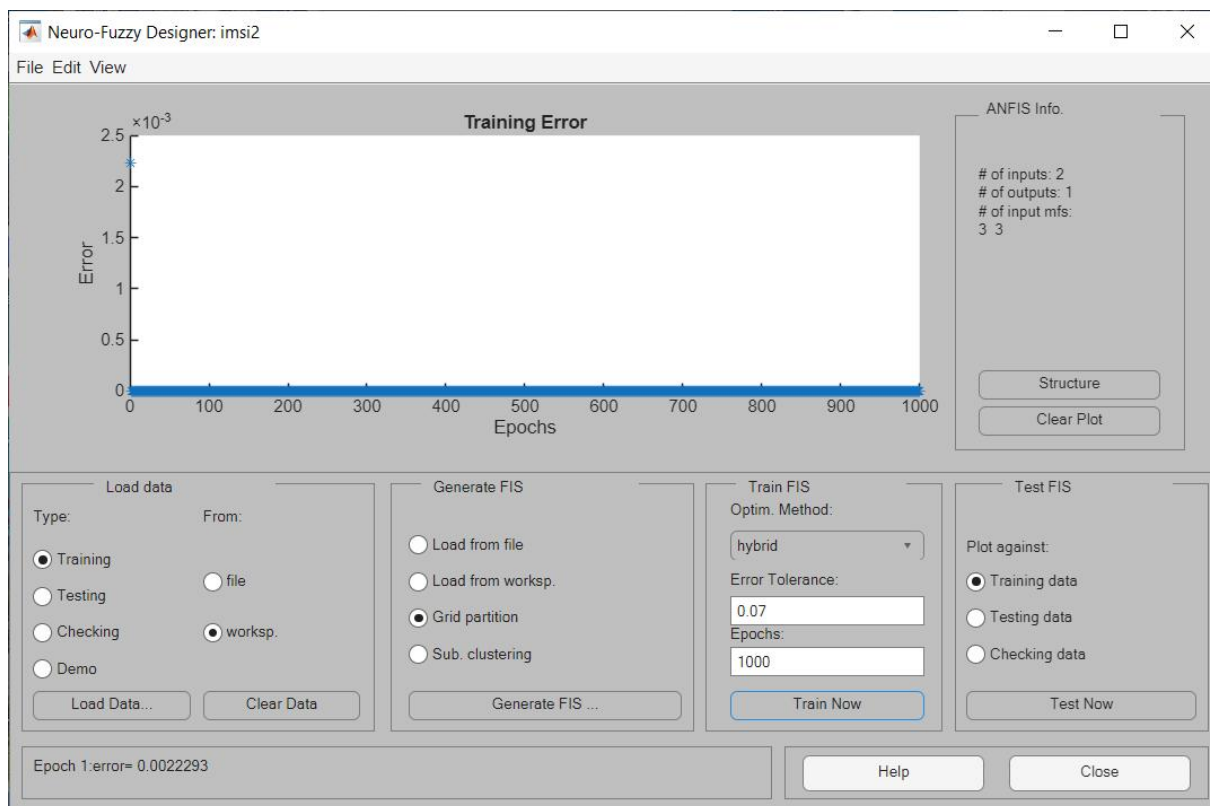


Figure 4.8: de l'outil de anfisedit de matlab

4.4. Simulation de la méthode MPPT par l'algorithme P&O

De la même manière que pour les méthodes MPPT basées sur l'algorithme Perturb and Observe (P&O) et la logique floue étudiées dans le chapitre précédent, considérons un générateur photovoltaïque (PV) composé de cinq colonnes de dix panneaux en série chacune, connecté à une charge via un convertisseur DC-DC contrôlé par une commande MPPT utilisant un contrôleur neuro-flou.

Pour pouvoir comparer les différentes méthodes MPPT, nous effectuons les mêmes simulations que celles réalisées avec les algorithmes P&O et logique floue.

La Figure 4.8 présente le modèle Simulink « NEUROFLOUE_imsi.slx » utilisé pour nos simulations. Le bloc MPPT neuro-flou, illustré à la Figure 4.9, est composé de deux sous-blocs et d'un intégrateur :

- Le premier bloc, représenté par la Figure 4.10, utilise l'irradiance et la température à l'entrée du générateur PV pour calculer les variables ΔD

L'intégrateur utilise ensuite ΔD pour calculer le rapport cyclique D .

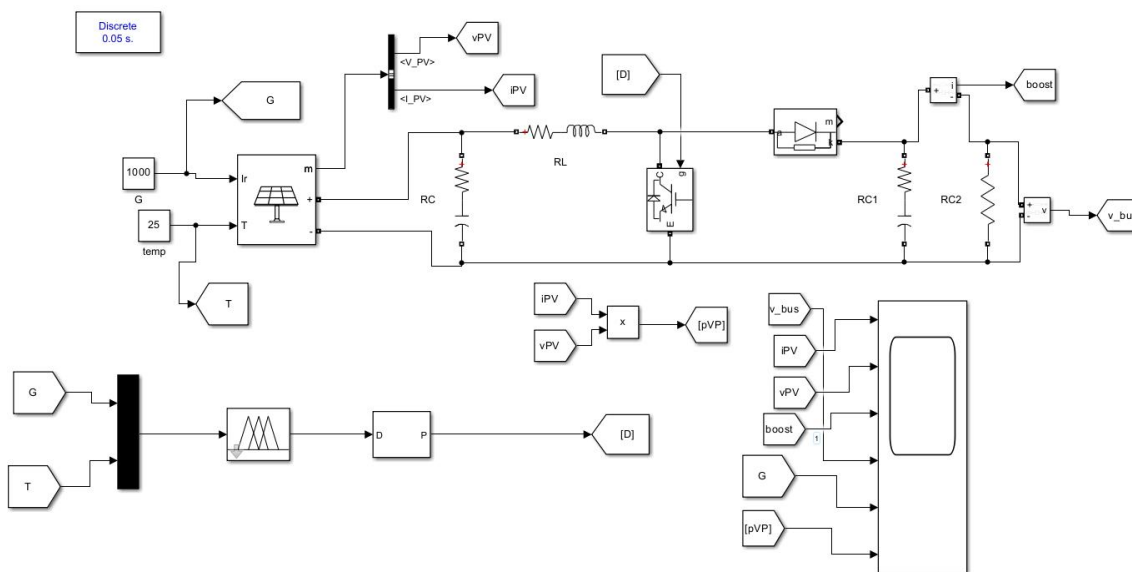


Figure 4.8. Modèle Simulink d'un générateur PV relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT Neuro Floue

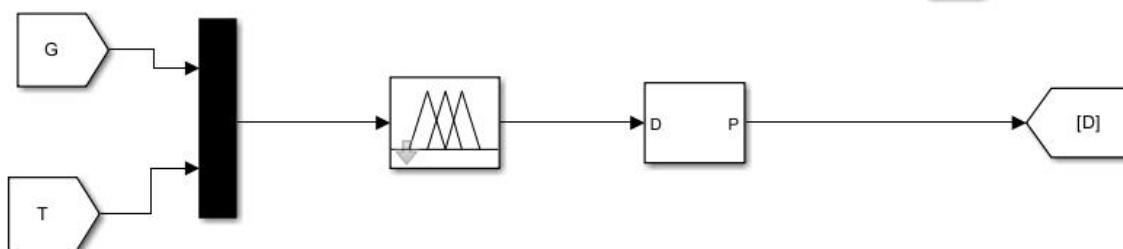


Figure 4.9. Modèle Simulink de la MPPT Neuro Floue

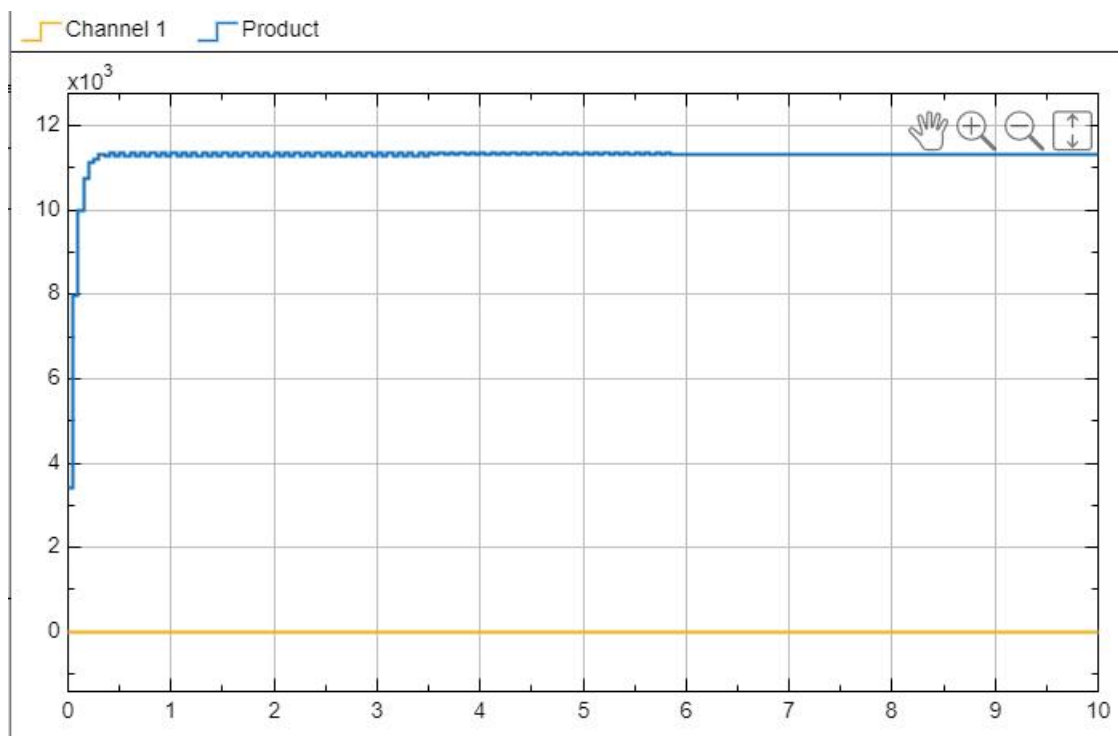
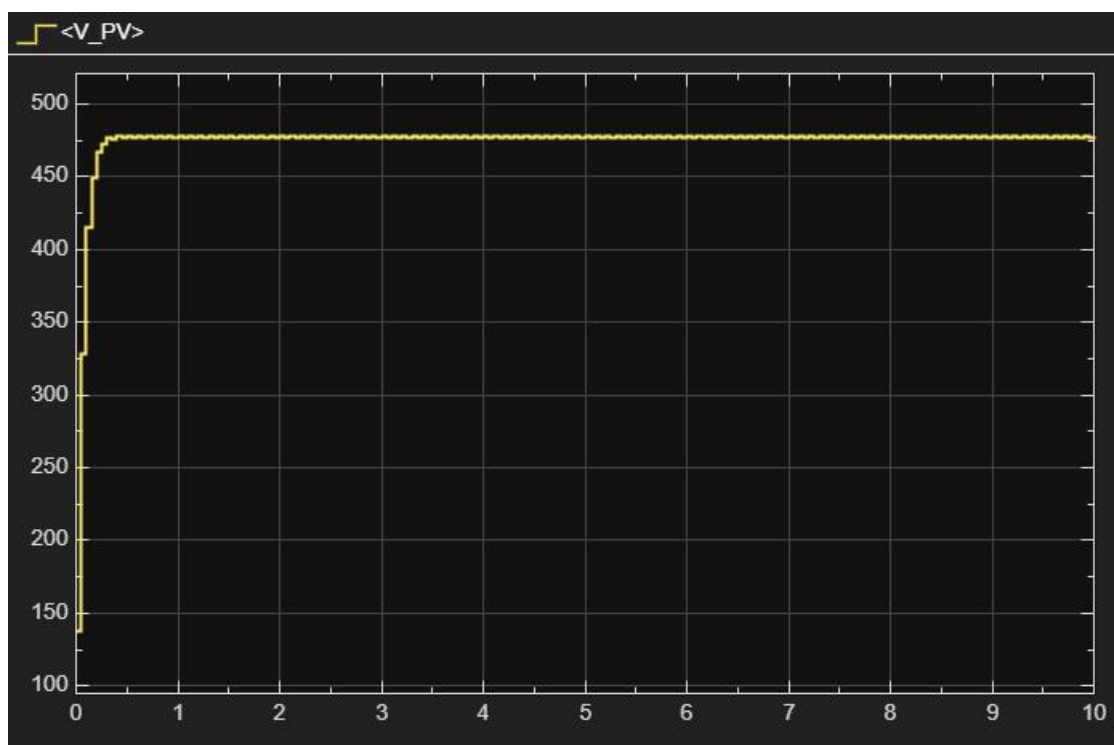


Figure 4.10 Simulation avec ANFIS de la puissance



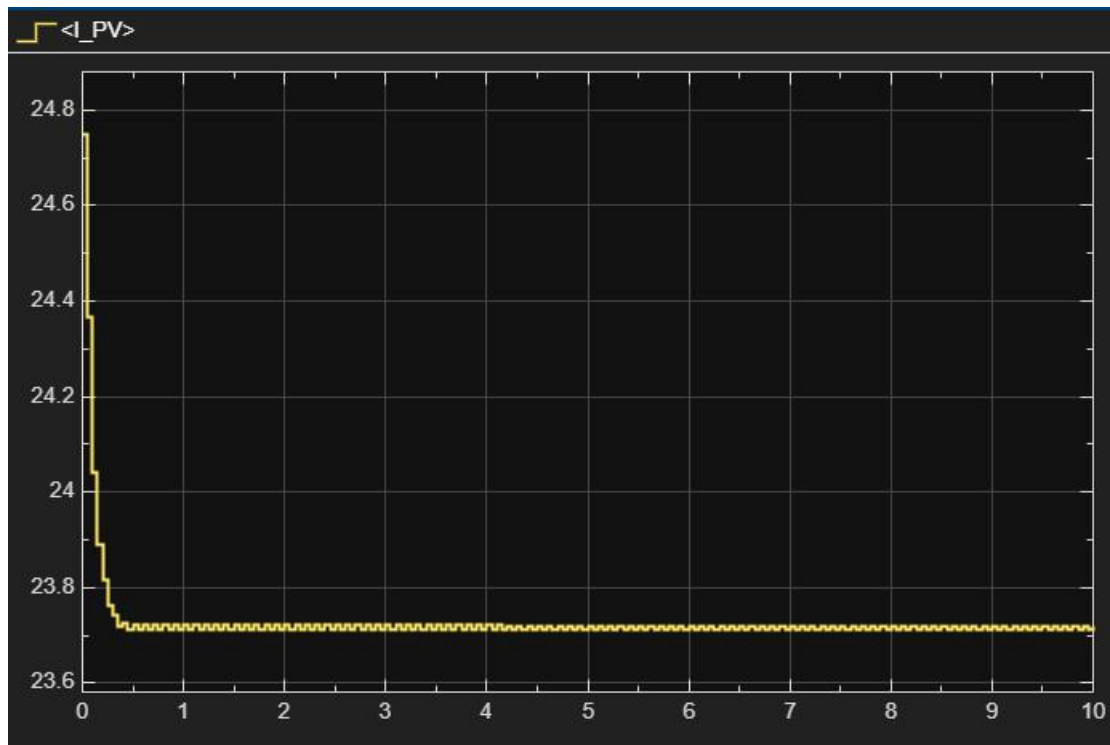


Figure 4.11 Simulation avec ANFIS de la Tension et du courant

4-5 : Interprétation des résultats :

Dans la première expérimentation les résultats de la simulation de la puissance par le générateur photovoltaïque est donnée par paliers et atteint une valeur maximale d'à peu près 4000 watts

Dans la deuxième expérimentation nous avons relié le générateur PV à une charge par un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT avec l'algorithme P&O et nous avons constaté que pour plus les valeurs de l'irradiation augmentait plus la valeur de la puissance qui est toujours exprimée par paliers augmentait.

Avec le contrôleur ANFIS les résultats sont fortement supérieurs et la valeur de la puissance atteint les 11000 watts pour les conditions d'irradiation et d'éclairement que le générateur photovoltaïque.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion General

Conclusion Générale

Dans ce travail réalisé à l'intérieur de notre projet scientifique, le but était d'effectuer la conception (hardware, software), la modélisation mathématique et la simulation (software) d'une commande MPPT implémentant un contrôleur Neuro Flou pour le suivi du point de puissance maximale d'un système solaire photovoltaïque. Le contrôleur Neuro Floue est un contrôleur fondé sur l'intégration des réseaux de neurones et la logique floue.

Nous avons surtout passé en revue les différentes ressources en énergie renouvelable, en s'intéressant particulièrement à l'énergie solaire photovoltaïque. Nous avons étudié le principe de fonctionnement des panneaux photovoltaïques pour la production de la puissance électrique.

Nous avons ensuite développé le modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque PV sous forme d'un réseau réduit en groupement série et parallèle de panneaux photovoltaïques pour une installation donnée.

La simulation de ce générateur photovoltaïque nous montre que sa puissance n'atteint une valeur maximale que par le biais d'une conversion DC-DC contrôlé par un mécanisme de suivi MPPT.

Après cela, nous avons étudié de la commande MPPT à la recherche du point de maximum puissance d'un générateur photovoltaïque avant de modéliser et simuler deux commandes MPPT, avec le P & O et un contrôleur neuro-flou ANFIS

La simulation montre que pour les deux commandes MPPT, la puissance maximale produite oscille suivant la valeur du courant de charge de l'éclairement avec un temps de réponse plus rapide pour l'algorithme P&O; contrairement avec la logique floue la valeur maximale de la puissance est atteinte sans dépendre de la variation de la valeur du rapport cyclique et de la valeur en charge du courant.

Ainsi ensuite, on a fait une étude suivie d'une modélisation mathématique du contrôleur Neuro-Floue et de la commande MPPT- ANFIS pour la recherche du point de puissance maximum d'un générateur depuis les panneaux photovoltaïques. Nous avons implémenté sous Simulink la commande MPPT-ANFIS pour un générateur photovoltaïque, ce qui a permis d'en évaluer les performances par simulation.

Les résultats obtenus démontrent que cette approche offre des performances comparables à celles de la MPPT floue classique, tout en réduisant significativement le temps de calcul. Cet avantage découle de sa structure simplifiée, qui ne nécessite aucune règle d'inférence floue, contrairement à la MPPT floue traditionnelle reposant sur vingt-cinq règles complexes.

Cette optimisation rend la MPPT Neuro Floue particulièrement adaptée aux applications nécessitant rapidité et efficacité, tout en maintenant une grande précision dans le suivi du point de puissance maximale.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Agence Internationale de l'Énergie (AIE), *Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy*, 2014.
- [2] Commissariat aux Énergies Renouvelables (CDER), Algérie, *Potentiel solaire en Algérie* — www.cder.dz
- [3] A. E. Becquerel, "On the production of electricity by light", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1839.
- [4] Perlin, J. *From Space to Earth: The Story of Solar Electricity*. Earthscan, 2000.
- [5] Chapin, D. M., Fuller, C. S., Pearson, G. L., "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power", *Journal of Applied Physics*, 1954.
- [6] www.ecologie.gouv.fr (section "Énergie").
- [7] IRENA. (2023). Solar Photovoltaic Technology Brief. Disponible sur www.irena.org
- [8] Zemmour Seif ElIslam memoire “d optimisation de la puissance delivre par un systeme PV “ 2017 par encadreur Mme lazreg p “9-10”
- [9] ADEME. (2019). *Guide technique – Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau et autonomes*. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.
- [10]. A. O. M. Yahya, A. O. Mahmoud, I. Youm, ‘ Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque ‘, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483.
- [11] ZEMOUR N , BENZEROUALI « optimisation de la puissance delivree par un system photovoltaïque». Mémoire Master2 IMSI ,Oran,2017
- [12]. H. Patel, V. Agarwal, “Matlab-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp 302-310, Mar 2008.
- [13]. K.S. Parlak, H. Can , “A new MPPT method for PV array system under partially shaded conditions”, *Conf. Rec. PEDG 2012, Aalborg, Denmark*, pp. 437 – 441, June 2012.
- [14]. Hernández, O.G.G.J.C., Jurado, F., “ Photovoltaic Devices under Partial Shading Conditions” (2012) *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 5 (1), pp. 414-425;
- [15]. R.Ramaprabha, Dr.B.L.Mathur “ Comparative Study of Series and Parallel configurations of Solar PV Array under Partial Shaded Conditions ” *iremos* Vol. 3. n. 6, pp. 1363-1371
- [16]. M. Mostefai, A. Miloudi ,Y .Miloud, “ An Intelligent Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems Based on Neural Network ” *International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.)*, Vol. 6, N. 5 ISSN 1974-9821 October 2013.

Bibliographie

- [17]. Marcelo.G, Jonas.R, Ernesto.R, ‘Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays’, IEEE Transactions on power electronics, vol.24,no.5, May 2009.
- [18]. Labouret,M. Villos, ‘Energie Solaire Photovoltaïque’, 2ème édition, 2003-2005, pp. 67.85
- [19]. L.A. Hecktheuer, A. Krenzinger, C.W.M. Prieb, “Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. 24, no. 1, pp. 26-32, 2002.
- [20]. R.Foster, M.Ghassemi, A.Cota, ‘Solar Energy, Renewable Energy and the Environnement’, 2010, pp.118-133.
- [21]. M.Boudjmea, N.Belhaouas « Commande d’un poursuit du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de neurons et l’implimentation sur FPGA et DSP». Mémoire d’ingénieur,ENP, Alger, 2007.
- [22]. S.Issaadi « Commande d’une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de neurones », 2006.
- [23]. A.Benmusbah, A.Mechraoui « Implémentation sur FPGA des méthodes MPPT : P&O et floue optimisée par les algorithmes génétiques ». Mémoire d’Ingénieur, ENP, Alger, 2006.
- [24]. M. Veerachary, T. Senjyuan and K. Uezato, “Feedforward Maximum Power Point Tracking of PV systems using fuzzy controller”, IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, Vol. 38, No. 3, pp. 969-981, Jul. 2002.
- [25]. N. S. D’Souza, L. A. C. Lopes, X. Liu, “An intelligent maximum power point tracker using peak current control”, IEEE Power Electronics Specialists Conference 2005, PESC’05, pp. 172-177, 2005.
- [26]. B. Robyns, F. Berthereau, J.-P. Hautier et H. Buyse, « A fuzzy-logic based multimodel field orientation in an indirect f.c. of an induction motor ”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, pp. 380-388, 2000.
- [27]. Yahia. Miloud, “Etude de l’estimation de la résistance rotorique dans la commande vectorielle d’un moteur asynchrone en utilisant la logique floue”, Thèse de Doctorat, U.S.T.Oran, Algérie, Février 2006.
- [28] A Djelouat , .M Belkhir « Poursuite du point de puissance maximale d’un système solaire photovoltaïque en utilisant un contrôleur neuro flou». Mémoire Mster 2, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda ,2019
- [29] A Djelouat , .M Belkhir « Poursuite du point de puissance maximale d’un système solaire photovoltaïque en utilisant un contrôleur neuro flou». Mémoire Mster 2, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda ,2019

Bibliographie

- [30]. J.-S. R. Jang, « Self-learning fuzzy controllers based on temporal back propagation, » IEEE Trans. Neural Networks, vol. 3, pp. 714–723, Sept. 1992.
- [31]. J.-S. R. Jang, « ANFIS: Adaptive – network – based fuzzy inference system, » IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 23, pp. 665–684, May/June 1993.
- [32]. J.-S. R. Jang and C.-T. Sun, « Neuro-fuzzy modeling and control, » Proc. IEEE, vol. 83, pp. 378–406, Mar. 1995