



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Commande Electrique

Présenté par :

- 1. Moad Mohammed**
- 2. Kadri Zine El Abidine**

Intitulé :

**Optimisation de l'efficacité énergétique des systèmes de pompage
photovoltaïques à l'aide d'approches MPPT hybrides avec des technologies
d'intelligence artificielle (IA)**

Soutenue le :/..... /2025

Devant le jury composé de :

Dr : Toumi Djaafar.

Président

Dr : Boughezala Mohammed Salah.

Examineur

Dr : Chaouki Ilyes.

Encadreur

Année académique : 2024/2025

Résumé

Ce mémoire examine l'amélioration de l'efficacité des systèmes de pompage photovoltaïques (PV) grâce à des méthodes hybrides de suivi du point de puissance maximale (MPPT) combinant des algorithmes classiques (Perturb & Observe, Incrément de conductance) et des techniques d'intelligence artificielle (IA) comme la logique floue (FLC) et les réseaux de neurones artificiels (ANN). L'objectif est de maximiser la production d'énergie solaire malgré les variations d'ensoleillement et de température.

Mots-clés : Photovoltaïque, MPPT hybride, Intelligence Artificielle, Logique floue, Réseaux de neurones, Efficacité énergétique.

المخلص

تناقش هذه الأطروحة تحسين كفاءة أنظمة ضخ الطاقة الكهروضوئية (PV) من خلال طرق تتبع نقطة القدرة القصوى الهجينة (MPPT) التي تجمع بين الخوارزميات الكلاسيكية (Perturb & Observe) ، (Conductance Increment) وتقنيات الذكاء الاصطناعي (AI) مثل المنطق الضبابي (FLC) والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN). الهدف هو تعظيم إنتاج الطاقة الشمسية على الرغم من الاختلافات في سطوع الشمس ودرجات الحرارة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، MPPT الهجين، الذكاء الاصطناعي، المنطق الضبابي، الشبكات العصبية، كفاءة الطاقة.

Abstract

This thesis discusses improving the efficiency of photovoltaic (PV) pumping systems using hybrid maximum power point tracking (MPPT) methods that combine classical algorithms (Perturb & Observe, Conductance Increment) with artificial intelligence (AI) techniques such as fuzzy logic (FLC) and artificial neural networks (ANN). The goal is to maximize solar energy production despite variations in solar brightness and temperature.

Keywords: Solar energy, Hybrid MPPT, Artificial intelligence, Fuzzy logic, Neural networks, Energy efficiency.

Dédicace

Avec tout amour et respect, nous dédions cet humble travail, fruit de deux années d'apprentissage, de découverte et d'innovation, à l'éminent professeur, le Dr. Ilyes Chaouki.

Vous étiez plus qu'un enseignant, vous étiez un guide, un motivateur et un père scientifique. Nous ne méritons pas tous ces dons de votre part.

Notre honorable docteur,

Ces mots ne vous rendent pas justice, mais ils portent en eux une part de notre gratitude infinie.

Qu'Allah vous récompense en notre nom comme un professeur récompense son élève.

Je dédie également ce travail à :

***"Aux cœurs chaleureux qui m'ont porté dans leurs bras,
Aux mains sûres qui m'ont soutenu lorsque mes pas ont faibli.*

***À ma famille**..*

Ma mère qui a éclairé mon chemin par sa patience, mon père qui m'a appris que le succès exige des efforts et de la détermination, et mes frères qui ont été mon soutien et mes compagnons.

***Et à mes amis**..*

Des compagnons qui ont transformé la fatigue en beaux souvenirs, l'échec en leçon et le succès en joie que nous vivons ensemble.

Cette réalisation est le fruit de votre amour et de votre soutien. Je vous suis très reconnaissant et reconnaissant.

Merci de faire partie de mon histoire.

*« Et si vous êtes patients et craignez Allah, cela fait partie des choses dignes d'être résolues. »
[Al-Imran: 186]*

Écrit par vos étudiants reconnaissants :

*****Kadri Zine El-Abidine*****

*****Moad Mohammed*****

Table des Matières

Résumé	I
Dédécace	II
Table des Matieres	IV
Liste des Tableaux	V
Liste des Figures	VI
Liste des Abriviations	VII
Liste des Symboles	VIII
Introduction Générale	IX

Chapitre I : État de l'art des systèmes de pompage photovoltaïques

I.1. Systèmes photovoltaïques (PV).....	2
I.1.1 Principe de fonctionnement :	2
* Captation de l'énergie solaire :	2
* Conversion de l'énergie solaire en électricité :	2
* Inversion du courant électrique :	3
* Utilisation directe de l'électricité :	3
* Stockage de l'électricité (optionnel) :	3
* Injection de l'excédent dans le réseau (optionnel) :	3
* Gestion et suivi :	3
- L'effet photovoltaïque dans une cellule photovoltaïque :	4
I.1.2 Rendement et facteurs influents	5
- Choix de l'exposition et inclinaison des panneaux :	7
- Distance entre les chaînes de modules :	8
- Coefficient d'ombrage :	9
- Pertes d'énergie :	11
I.1.3 Types des panneaux et caractéristiques	12
I.1.3.1 Types des panneaux	12
A- Les panneaux solaires monocristallins :	13
B- Les panneaux solaires poly-cristallins :	14
C- les panneaux solaires à couches minces :	15
D- Les panneaux solaires à cellule Tandem :	16
E- Les panneaux solaires à cellule multi-jonction :	16

I.1.3.2 caractéristiques des panneaux :	17
- La capacité de production du panneau photovoltaïque :	17
* La tension :	17
* La puissance :	18
- La durée de vie du panneau solaire photovoltaïque :	18
I.2. Systèmes de pompage photovoltaïque.....	18
I.2.1 Structure et composant :	19
I.2.1.1 le générateur photovoltaïque :	20
- Zones de fonctionnement du module solaire :	21
- Association des modules photovoltaïques :	22
* Association En série	22
* Association En parallèle	23
* Association mixte (En Série et En Parallèle)	23
I.2.1.2 le groupe moteur-pompe :	24
A- le moteur électrique :	24
* Utilisation de moteur à courant continu :	24
* Utilisation de moteur asynchrone :	24
* la différence entre les deux types des moteurs :	25
B - la pompe à eau :	26
*Types des pompes :	26
a- Les pompes volumétriques :	26
b- Les pompes centrifuges :	26
I.2.1.3 l'électronique de commande et de contrôle :	26
*Conversion et adaptation de la puissance :	27
*Optimisation du point de fonctionnement (MPPT) :	27
*Protection de la pompe :	27
*Génération de signaux PWM :	27
*Commande dynamique :	27
I.2.1.4 la partie stockage :	27
* Types des batteries de stockage :	28
- Batteries au plomb-acide (plomb ouvert, AGM, Gel) :	28
- Batteries lithium-ion :	28
- Autres technologies (sodium-soufre, Nickel-Fer, LTO) :	28
I.2.2 Applications et avantages :	29
I.2.2.1 Les Applications principales des systèmes de pompage photovoltaïques :.....	29

- Irrigation agricole :	29
- Abreuvement du bétail :	29
- Approvisionnement en eau potable :	29
- Applications industrielles et résidentielles :	29
- Aquaculture :	29
- Transfert et mise sous pression de l'eau :	29
I.2.2.2 Les avantages de systèmes de pompage photovoltaïques.....	29
I.2.3 Contraintes énergétiques et environnementales.....	30
I.2.3.1 Les Contraintes énergétiques.....	30
I.2.3.2 Les Contraintes environnementales.....	31
I.3. Méthodes classiques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT).....	31
* Principe de la commande MPPT.....	33
*Techniques de commande MPPT.....	34
- Les méthodes indirectes.....	34
- Les Méthodes directes.....	35
I.3.1 Algorithme de perturbation et observation (P&O).....	35
I.3.1.1 Les Avantages de l'algorithme P&O.....	37
I.3.1.2 Les inconvénients de l'algorithme P&O.....	38
I.3.2 Algorithme Incrémental Conductance (IncCond).....	38
I.3.2.1 Les avantages de l'algorithme incrémentation de conductance (IncCond).....	41
I.3.2.2 Les Inconvénients de l'algorithme incrémentation de conductance (IncCond)	41
I.3.3 Autres approches (FLC, Neural Networks, etc.).....	42
* Approches classiques de MPPT.....	42
* Approches hybrides et avancées.....	42
*Autres méthodes alternatives.....	42
I.3.3.1 Approches FLC(Fuzzy Logic Classic).....	42
- MPPT flou adaptatif.....	42
- Combinaison logique floue et réseaux de neurones artificiels (ANN).....	43
- Contrôleurs flous avancés comme Takagi-Sugeno.....	43
- Commandes floues indirectes et directes.....	43
I.3.3.2 Approches Neural Networks.....	43
* Avantages clés des RNA pour le MPPT.....	43
* Architecture typique d'un RNA pour MPPT.....	43
* Performances comparatives.....	44
* Cas concrets et résultats.....	44

* Défis et perspectives.....	44
I.3.4 Limite des méthodes traditionnelles.....	44
- Tableau résumé des limites des méthodes classiques MPPT.....	45
Conclusion.....	45

Chapitre II : Approches hybrides MPPT basées sur l'IA

Introduction	46
II.1. Intelligence Artificielle appliquée au MPPT.....	46
II.1.1 Réseaux de neurones artificiels (ANN).....	46
II.1.1.1 Modélisation mathématique pour un neurone artificiel.....	46
II.1.1.2 Structure des réseaux de neurones.....	48
II.1.1.2.1 Réseaux non bouclés.....	48
II.1.1.2.2 Réseaux bouclés.....	48
II.1.1.3 Apprentissage des réseaux de neurones artificiels (ANN)	49
II.1.1.3.1 Modes d'apprentissages des ANN.....	49
a- Apprentissage supervisé.....	49
b- Apprentissage non supervisé.....	49
II.1.1.3.2 : Méthodes d'apprentissage des ANN.....	49
• Algorithmes basés sur la rétro propagation du gradient.....	49
• Algorithmes qui n'utilisent pas de la rétro propagation du gradient.....	49
II.1.1.4 Intérêts et limites des réseaux de neurones.....	50
II.1.2 Algorithmes évolutionnaires (GA, PSO)	51
II.1.2.1 L'algorithme d'essaims de particules (PSO)	51
II.1.2.2 Algorithme Génétique.....	52
II.1.3 Logique floue (Fuzzy Logic Control)	54
II.1.3.1 La logique floue	54
II.1.3.1.1 Définition de la logique floue.....	54
II.1.3.1.2 La fuzzification.....	55
II.1.3.1.3 La fonction d'appartenance.....	56
II.1.3.1.4 Les règles floues.....	57
II.1.3.1.5 La défuzzification.....	58
II.2. Méthodologie des approches hybrides.....	58
II.2.1 Principe d'hybridation des techniques MPPT	58
- Combinaison de méthodes classiques et intelligentes/optimisées.....	58
- Approche séquentielle ou parallèle.....	59

- Utilisation d'un superviseur ou d'un contrôleur hybride.....	59
- Adaptabilité et apprentissage en ligne.....	59
- Avantages des approches hybrides MPPT basées sur l'IA.....	59
II.2.2 Association des algorithmes MPPT avec l'IA.....	59
II.2.2.1 Association d'algorithmes MPPT classiques et IA	59
II.2.2.2 Contrôleur flou adaptatif	60
II.2.2.3 Réseaux de neurones artificiels	60
II.2.2.4 Algorithmes bio-inspirés et optimisation	60
II.2.2.5 Validation expérimentale et simulation	60
II.2.2.6 Avantages d'association des algorithmes MPPT avec l'IA.....	60
a) Amélioration de la précision du MPPT	60
b) Gestion adaptative.....	60
c) Prédiction et optimisation	60
d) Réduction du temps de convergence	60
II.2.3 Comparaison des performances des différentes approches.....	61
II.2.3.1 Fonctionnement sous des conditions climatiques standards.....	61
II.2.3.2 Fonctionnement avec des changements brusques du niveau de rayonnement.....	61
II.2.3.3 Fonctionnement avec des changements progressif du niveau de rayonnement.....	63
II.2.3.4 Discussion des résultats	64
Conclusion.....	65

Chapitre III : Conception et simulation d'un système hybride MPPT basé sur l'IA

III.1 Présentation de l'environnement de simulation.....	67
III.1.1 Modèle Simulink de PV array.....	67
III.1.2 Modélisation du convertisseur Boost.....	70
A. Premier étage de fonctionnement.....	72
B. Deuxième étage de fonctionnement.....	73
C. Première étape (Interrupteur on).....	73
D. Deuxième étape (Interrupteur off).....	73
III.2 Développement et implémentation des algorithmes.....	74
III.2.1 Simulation MPPT l'algorithme classique Perturber et observer (P&O).....	74
Objectifs.....	74
Méthodologie.....	75

III.2.2 Simulation MPPT l'algorithme technique d'intelligence artificielle	
Fuzzy-logic-control (<i>FLC</i>).....	76
III.2.3 Simulation MPPT l'algorithme technique d'intelligence artificiel neural réseau (<i>ANN</i>).....	79
III.3 Simulation MPPT par Fusion P&O Classique et IA (<i>FLC/ANN</i>) -	80
Modélisation MATLAB.....	80
III.4 Analyse des résultats.....	81
Performance comparée:.....	85
Conclusion de chapitre.....	85
Conclusion Générale.....	86
Références Bibliographiques.....	87

Liste des Tableaux

Chapitre I : État de l’art des systèmes de pompage photovoltaïques

Tableau (I.1) : Performances comparatives.....	44
Tableau (I.2) : Résumé des limites des méthodes classiques MPPT.....	45

Chapitre II : Approches hybrides MPPT basées sur l’IA

Tableau II.1 : Caractéristiques majeures des commandes MPPT.....	65
---	----

Chapitre III : Conception et simulation d’un système hybride MPPT basé sur l’IA

Tableau (III.1) : Caractéristiques électriques du module PV.....	68
Tableau (III.2): Valeurs des composants du convertisseur DC/DC.....	71
Tableau (III.3) : Performance Comparée.....	85

Liste des Figures

Chapitre I : État de l'art des systèmes de pompage photovoltaïques

Figure (I.1) : systèmes de pompage photovoltaïques	1
Figure (I.2) : Conversion de l'énergie solaire en électricité	2
Figure (I.3) : Fonctionnement de système photovoltaïque	3
Figure (I.4) : Le fonctionnement de l'effet photovoltaïque dans une cellule photovoltaïque	5
Figure (I.5) : Facteurs d'influence du rendement des panneaux photovoltaïques	7
Figure (I.6) : Exposition et inclinaison des panneaux.....	8
Figure (I.7) : Distance entre les rangées de panneaux solaires	9
Figure (I.8) : Mesure Azimut d'un arbre	10
Figure (I.9) : Diagramme solaire pour la vérification de l'ombrage issu du logiciel Solarius PV	11
Figure (I.10) : Types des panneaux solaires	12
Figure (I.11) : panneaux solaires monocristallins	13
Figure (I.12) : panneaux solaires poly-cristallins	14
Figure (I.13) : panneaux solaires à couche mince	15
Figure (I.14) : Cellule solaire tandem pérovskite-silicium	16
Figure (I.15) : cellule solaire multi-jonction à base de silicium	17
Figure (I.16) : Système de pompage utilisant le moteur à courant continu	20
Figure (I.17) : Système de pompage utilisant le moteur à courant alternative	20
Figure (I.18) : Composants d'un GPV	21
Figure (I.19) : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$, $T=25^{\circ}C$	21
Figure (I.20) : Caractéristique résultante du regroupement de N_s cellules en Série	22
Figure (I.21) : Caractéristique résultante du regroupement de N_p cellules en parallèle	23
Figure (I.22) : Connexions mixtes des modules photovoltaïques sur la caractéristique $I(V)$	24
Figure (I.23) : Caractéristique $I(V)$ d'un GPV avec résistance shunt	32
Figure (I.24) : Caractéristique $I(V)$ pour différentes températures ($G=1000W/m^2$) Sans résistance shunt.....	32
Figure(I.25) : Caractéristique $I(V)$ pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^{\circ}C$) Sans résistance shunt.....	33
Figure(I.26): Principe général d'une commande MPPT	33
Figure (I.27) : Caractéristique puissance-tension du panneau PV.....	34

Figure (I.28) : Caractéristique PPV(VPV)	35
Figure (I.29) : Organigramme de la méthode P&O.....	36
Figure (I.30) : Modèle Simulink de l'algorithme P&O.....	37
Figure (I.31) : Schéma bloc d'algorithme P&O	37
Figure (I.32) : Modèle Simulink de l'algorithme INC.....	40
Figure (I.33) : Schéma bloc d'algorithme INC.....	41

Chapitre II : Approches hybrides MPPT basées sur l'IA

Figure (II.1) : Mise en correspondance d'un neurone biologique et d'un neurone artificiel.....	46
Figure (II.2) : Modélisation mathématique d'un neurone artificiel	47
Figure (II.3) : Différents types de fonctions qui activent les réseaux de neurones	47
Figure (II.4) : Architecture des réseaux non bouclés	48
Figure (II.5) : Architecture des réseaux bouclés	48
Figure (II.6) : Algorithmes d'apprentissage (ANN)	50
Figure (II.7) : Organigramme PSO.....	52
Figure (II.8) : Organigramme GA	53
Figure (II.9) : Structure principale d'un contrôleur logique floue.....	55
Figure (II.10) : Graphiques des différentes fonctions d'appartenance d'un contrôleur logique floue	57
Figure (II.11) : Puissance à la sortie de GPV avec différentes commandes MPPT sous STC ...	61
Figure (II.12) : Puissance à la sortie de GPV avec différentes commandes MPPT sous des changements brusques du niveau de rayonnement.....	62
Figure (II.13) : Puissance à la sortie de GPV avec différentes commandes MPPT sous des changements progressifs du niveau de rayonnement	63

Chapitre III : Conception et simulation d'un système hybride MPPT basé sur l'IA

Figure (III.1) : Modèle Simulink d'un parc photovoltaïque sans charge.....	69
Figure (III.2) : Caractéristiques P-V du réseau PV avec la variation de l'irradiance.....	69
Figure (III.3) : Caractéristiques I-V du réseau PV avec la variation de l'irradiance.....	70
Figure (III.4) : Schéma du convertisseur Boost.....	71
Figure (III.5) : Étage topologique du convertisseur élévateur C.....	72
Figure (III.6) : Formes d'onde théoriques du convertisseur boost.....	74
Figure (III.7) : Bloc MATLAB Function MPPT (P&O).....	76

Figure (III.8): Paramètres de l'algorithme Perturb and Observe.....	76
Figure (III.9) : Éditeur de règles et fonctions d'appartenance du FLC pour le MPPT".....	78
Figure (III.10): Bloc MATLAB Function MPPT FLC.....	78
Figure (III.11): Modèle de contrôle de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisant des réseaux de neurones artificiels.....	79
Figure (III.12): Bloc MATLAB Function MPPT ANN	79
Figure (III.13): Schéma Fonctionnel du Bloc de Simulation.....	80
Figure (III.14): Bloc de Simulation d'un Système PV avec Contrôleurs MPPT Hybrides (Perturber et observer+ Logique Floue + Réseaux de Neurones) Sous MATLAB.....	81
Figure (III.15): Système PV de Génération d'Énergie et de Tension.....	82
Figure (III.16): Gestion de l'énergie photovoltaïque basée sur MPPT à l'aide de la méthode P&O.....	82
Figure (III.17): Commande avancée hybride (MPPT P&O + FLC + ANN) pour l'extraction maximale d'énergie photovoltaïque.....	84

Liste des Abréviations

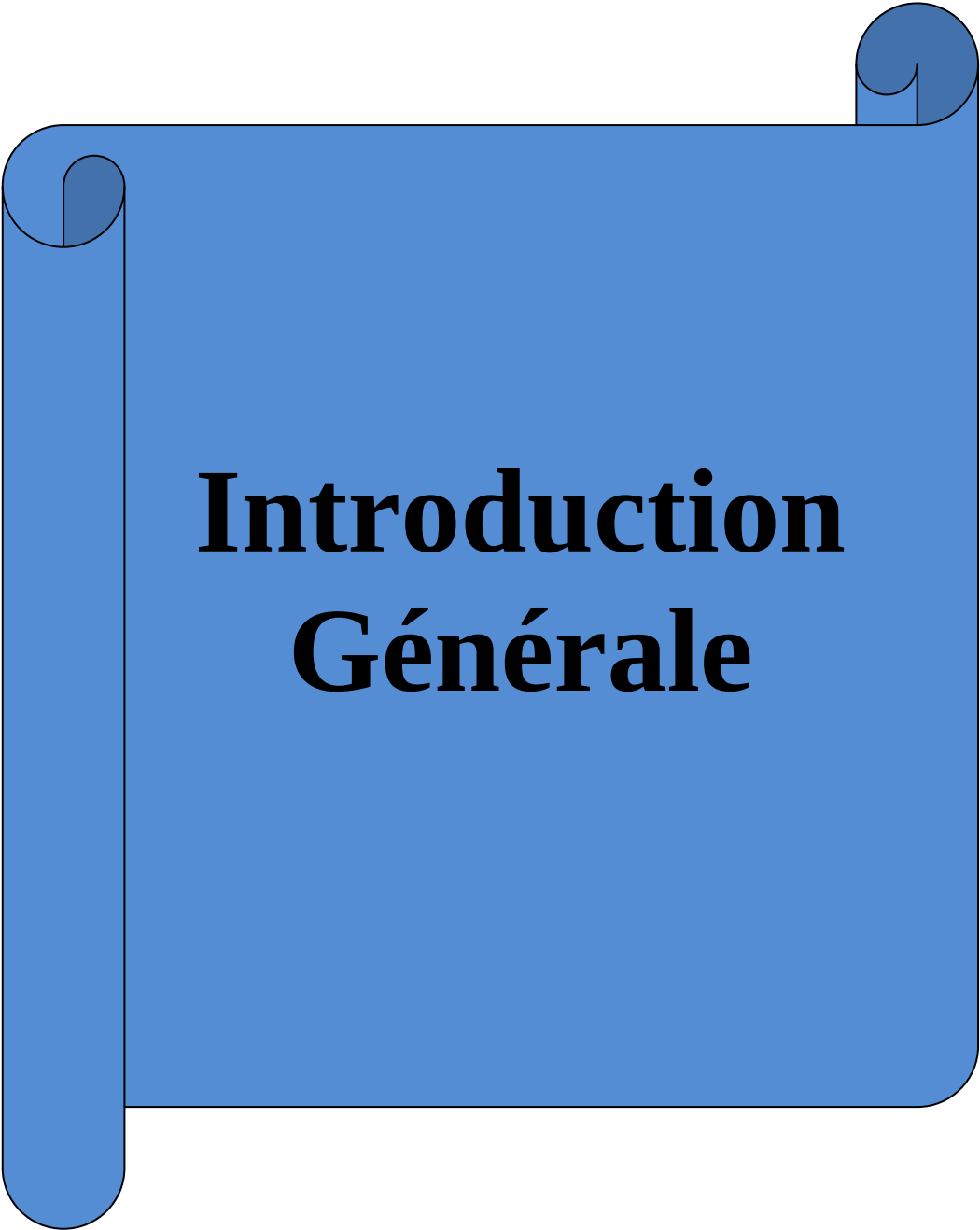
MPPT	Suivi du Point de Puissance Maximale
P&O	Perturber et Observer
IA	Intelligence Artificielle
FLC	Commande par Logique Floue
ANN	Réseau de Neurones Artificiels
PV	Photovoltaïque
DC-DC	Convertisseur Continu-Continu
MPP	Point de Puissance Maximale
I-V	Courant-Tension
P-V	Puissance-Tension
PWM	Modulation de Largeur d'Impulsion
SW	Interrupteur
MOSFET	Transistor à Effet de Champ Métal-Oxyde-Semi-conducteur
IncCond	Conductance Incrémentielle
AC	Courant Alternatif
AGM	Tapis de Fibre de Verre Absorbant
BOS	Équilibre du Système
CdTe	Tellurure de Cadmium
CO₂	Dioxyde de Carbone
EMS	Système de Gestion de l'Énergie
GaAs	Arséniure de Gallium
Gel	Batterie Gel
HMT	Hauteur Manométrique Totale
HP	Cheval-vapeur
LFP	Lithium Fer Phosphate
STC	Conditions de Test Standard
T-S	Modèle de Takagi-Sugeno
VOC	Tension en Circuit Ouvert
INC	Conductance Incrémentielle
FCC	Courant de Court-Circuit Fractionnaire
FCO	Tension de Circuit-Ouvert Fractionnaire

Hill Climbing	Ascension de Colline
ICI	Contrôle de Courant Indirect
ADC	Contrôle de Rapport Cyclique Adaptatif
INC	À pas variable
GPV	Générateur Photovoltaïque

Liste des Symboles

- (P)** : Puissance électrique produite par le panneau
(V) : Tension du panneau photovoltaïque
(I) : Courant du panneau photovoltaïque
(G) : Irradiance solaire (W/m^2)
(T) : Température des cellules ($^{\circ}\text{C}$)
(η) : Rendement du panneau
(V_{MPP}) : Tension au MPP
(I_{MPP}) : Courant au MPP
(V_{ok}) : Tension en circuit ouvert
(I_{cc}) : Courant de court-circuit
(α) : Rapport cyclique du convertisseur
(ΔG) : Incrément de conductance
(dP/dV) : Dérivée de la puissance par rapport à la tension
(N_s) : Nombre de cellules en série
(N_p) : Nombre de cellules en parallèle
(H) : Hauteur manométrique (pompage)
(D) : Distance entre les rangées de panneaux
(θ) : Angle d'inclinaison
(φ) : Azimut
(λ) : Longueur d'onde du photon
(E_g) : Énergie de bande interdite
(P_{max}) : Puissance maximale du panneau
(STC) : Conditions standard de test (1000 W/m^2 , 25°C)
(DC) : Courant continu
(AC) : Courant alternatif
(BOS) : Pertes du système photovoltaïque
(DoD) : Profondeur de décharge des batteries
(ϕ) : Fonction d'activation d'un neurone
(x_m) : Entrée d'un neurone
(ω_m) : Poids synaptiques
(b) : Biais d'un neurone
(E_{gl}) : Erreur quadratique globale

(e(k)) : Erreur entre la valeur désirée et la sortie
(V_{in}) : Tension d'entrée du convertisseur Boost
(V_o) : Tension de sortie du convertisseur Boost
(I_i) : Courant dans l'inductance
(I_{ks}) : Courant dans le condensateur de sortie
(I_{ke}) : Courant dans le condensateur
(R) : Résistance de charge
(I_r) : Courant de charge
(L) : Inductance du convertisseur
(C_e) : Condensateur d'entrée
(C_s) : Condensateur de sortie
(f) : Fréquence de commutation du MOSFET



Introduction Générale

Introduction Général

Avec la tendance mondiale vers l'amélioration de la durabilité et la rationalisation de la consommation d'énergie, les systèmes de pompage photovoltaïques apparaissent comme une solution prometteuse pour fournir de l'eau et de l'énergie dans les zones reculées et agricoles.

Les systèmes de pompage alimentés par l'énergie solaire (PV) sont cruciaux dans le domaine agricole, principalement pour l'irrigation, car ils proposent une alternative durable et rentable pour satisfaire les exigences hydriques. Toutefois, ces systèmes doivent relever des défis importants pour améliorer leur rendement énergétique, notamment en raison des variations de conditions climatiques (comme l'ensoleillement et la température) et des contraintes inhérentes aux méthodes traditionnelles de recherche du point de puissance maximale (MPPT). Les méthodes traditionnelles, telles que l'algorithme Perturb and Observe (P&O), sont fréquemment sujettes à des fluctuations autour du point de puissance maximale et manquent de réactivité face aux changements rapides de l'environnement. Le défi majeur est donc d'améliorer l'efficacité énergétique de ces systèmes tout en corrigeant les défauts des méthodes MPPT conventionnelles, qui sont souvent imprécises et de flexibilité. L'incorporation de technologies d'intelligence artificielle (IA) dans ces systèmes, comme les réseaux de neurones, la logique floue ou encore les algorithmes génétiques, est promise pour offrir des réponses novatrices en vue d'améliorer l'exactitude, la rapidité de convergence et la solidité du suivi du point de puissance maximale.

L'optimisation des systèmes de pompage PV est primordiale pour diverses raisons : elle contribue à améliorer l'efficacité énergétique en maximisant la puissance tirée des panneaux solaires, à diminuer les coûts en réduisant la taille des éléments nécessaires, à accroître la fiabilité en prévenant les surtensions et surintensités, et à s'ajuster aux conditions environnementales changeantes pour assurer une performance avérée dans toutes les situations.

Les stratégies hybrides de suivi du point de puissance maximal, alliant des méthodes classiques à des techniques d'intelligence artificielle, montrent une meilleure performance en matière de précision et de rapidité, surtout dans des situations d'ensoleillement instables et variées. Ainsi, l'intention majeure est de maximiser l'efficacité énergétique, d'améliorer le rendement du MPPT, de diminuer les dépenses financières, d'accroître la fiabilité et de favoriser le développement durable en encourageant l'usage de l'énergie solaire pour le pompage de l'eau. Afin d'atteindre ces buts, une approche organisée est suggérée, comprenant une étape d'étude et de recherche bibliographique, une phase de conception et de modélisation, un segment de simulation et de validation, un stade d'implémentation et d'essais, ainsi qu'une appréciation économique et environnementale.

Cette méthode a pour objectif de proposer des outils et des techniques simples et efficaces pour l'implémentation et le déploiement de ces systèmes dans une variété d'applications, en particulier dans les régions rurales et éloignées [1][2][3].

Cette recherche vise à améliorer l'efficacité des systèmes de pompage photovoltaïque en combinant des techniques d'intelligence artificielle (IA) avec des méthodes hybrides de suivi du point de puissance maximale, ce qui contribue à maximiser l'utilisation de l'énergie solaire et à réduire les pertes.

En plus d'une introduction générale et une conclusion générale, qui résume notre étude, le présent travail est subdivisé en trois chapitres organisés comme suit :

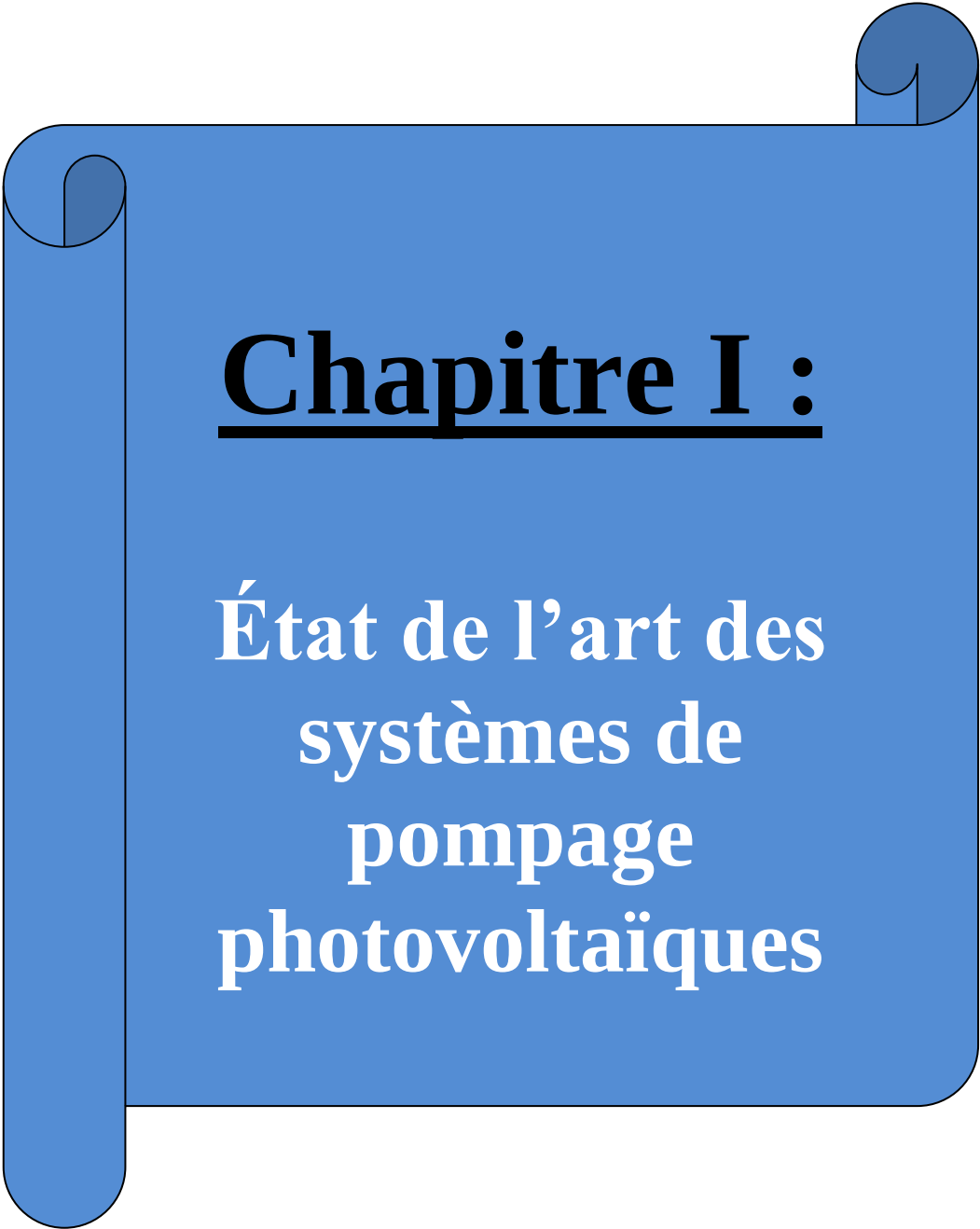
Dans le premier chapitre, nous avons passé en revue l'état actuel des systèmes de pompage photovoltaïque, en commençant par les principes de fonctionnement et les composants des systèmes photovoltaïques, en passant aux détails des systèmes de pompage et de leurs applications, et enfin en discutant des méthodes MPPT traditionnelles telles que les algorithmes P&O et IncCond, en soulignant leurs limites dans le traitement des conditions dynamiques.

Dans le chapitre 2, nous nous sommes concentrés sur les approches hybrides qui combinent des techniques d'IA (telles que les réseaux neuronaux, les algorithmes évolutifs et la logique floue) avec des systèmes MPPT, dans le but de surmonter les limites des approches classiques. Il compare également les performances de ces techniques et explique les mécanismes permettant de les améliorer pour accroître la stabilité et l'efficacité.

Au chapitre 3, nous avons abordé l'aspect pratique en concevant un système hybride et en le simulant à l'aide d'outils tels que MATLAB/Simulink. Les algorithmes proposés ont été testés et leurs résultats analysés pour évaluer la faisabilité pratique et les avantages obtenus, tout en discutant des défis restants et des opportunités de développement futures.

Nous concluons cette étude en résumant les réalisations accomplies et en soulignant leurs contributions au domaine des énergies renouvelables, en plus de présenter de nouveaux horizons de recherche tels que l'intégration de l'apprentissage profond ou le développement de systèmes intelligents capables de s'adapter à des environnements plus complexes.

En intégrant théorie et pratique, ce travail vise à stimuler l'innovation vers des systèmes énergétiques durables et efficaces.

A blue scroll graphic with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a slight shadow effect.

Chapitre I :

**État de l'art des
systèmes de
pompage
photovoltaïques**

Introduction

Les énergies renouvelables sont issues des phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [4].

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque [5][6].

L'électricité photovoltaïque est une technologie remarquable qui transforme le rayonnement lumineux en électricité. L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel mais il n'a été expliqué que près d'un siècle plus tard par le scientifique Albert Einstein, ce qui lui a valu le Prix Nobel de physique en 1921. De façon très schématique, Cette filière s'est ensuite développée par la nécessité d'approvisionner en électricité solaire les satellites [7].

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.[8]



Figure (I.1) : systèmes de pompage photovoltaïques [9].

I.1. Systèmes photovoltaïques (PV)

I.1.1 Principe de fonctionnement :

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

- « Photo », qui signifie la lumière.
- « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827), inventeur de la pile électrique [10].

Le principe de fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque est relativement simple ; il s'agit de convertir le rayonnement du soleil en électricité [8].

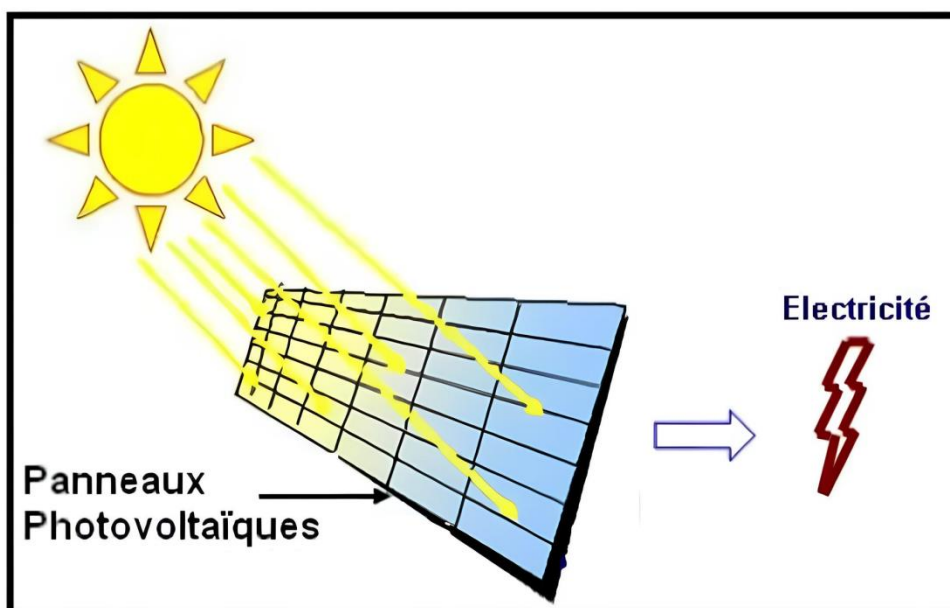


Figure (I.2) : Conversion de l'énergie solaire en électricité [59].

Le fonctionnement de système photovoltaïque repose sur l'utilisation des panneaux solaires pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire.

Voici les principales étapes et composants impliqués dans ce processus :

*** Captation de l'énergie solaire :**

Les panneaux solaires photovoltaïques sont installés généralement sur le toit d'un bâtiment ou au sol dans un emplacement bien ensoleillé. Ils captent la lumière du soleil grâce à des cellules photovoltaïques constituées principalement de silicium.

*** Conversion de l'énergie solaire en électricité :**

Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en courant électrique continu (CC). Ce processus repose sur l'effet photovoltaïque, où l'énergie des photons de la lumière du soleil excite les électrons dans le silicium, générant ainsi un courant électrique.

* Inversion du courant électrique :

Un onduleur (ou convertisseur) est utilisé pour transformer le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif (CA), qui est le type de courant utilisé par la plupart des appareils électriques domestiques.

* Utilisation directe de l'électricité :

L'électricité produite est utilisée en priorité pour alimenter les besoins en énergie du bâtiment (autoconsommation).

Cela inclut l'éclairage, les appareils électroménagers, le chauffage, la climatisation, etc.

* Stockage de l'électricité (optionnel) :

Si un système de stockage (batteries) est installé, l'excédent d'électricité non consommée directement peut être stocké pour une utilisation ultérieure, par exemple durant la nuit ou par temps nuageux.

En 2025, les solutions de stockage d'énergie ont considérablement évolué, notamment avec l'émergence des batteries lithium-fer-phosphate (LFP), qui offrent une durée de vie accrue et une meilleure sécurité. Par ailleurs, des alternatives comme les batteries au sodium ou les volants d'inertie commencent à gagner en popularité grâce à leur faible impact environnemental.

* Injection de l'excédent dans le réseau (optionnel) :

En l'absence de stockage, l'excédent d'électricité produit peut être injecté dans le réseau électrique public. Cela permet de revendre l'électricité non utilisée à un fournisseur d'énergie, souvent à un tarif réglementé.

* Gestion et suivi :

Un système de gestion de l'énergie (EMS) peut être utilisé pour optimiser l'utilisation de l'électricité produite, en surveillant la production et la consommation en temps réel. Cela permet de maximiser l'autoconsommation et de réduire la dépendance au réseau public [7].

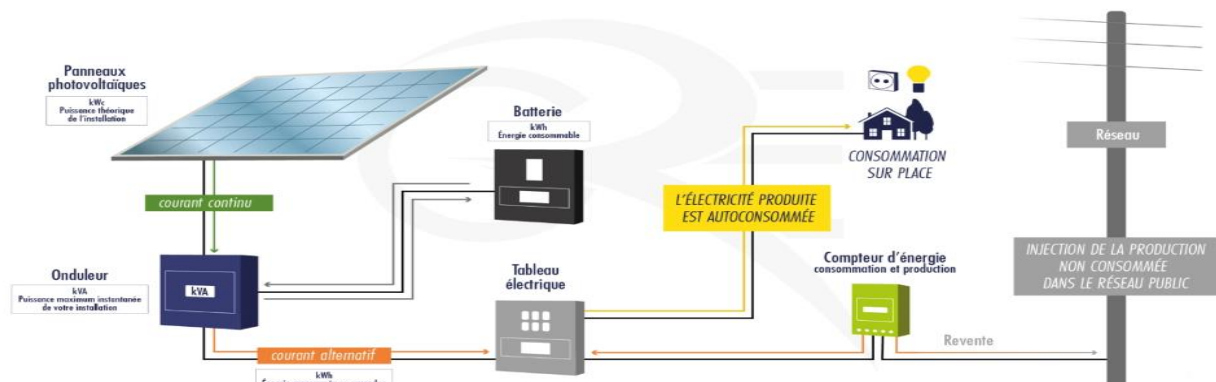


Figure (I.3) : Fonctionnement de système photovoltaïque [60].

- L'effet photovoltaïque dans une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est constituée d'un de ces matériaux, généralement du silicium, et conçue de telle façon que les électrons émis soient récupérés pour former un courant électrique. Les cellules sont assemblées pour créer un courant suffisamment élevé pour être exploité, cet assemblage de cellules est appelé module photovoltaïque ou, plus souvent, panneau solaire [8].

La photopile ou la cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de semi-conducteurs de différents types, elle constitue l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. Son rôle est de transformer de manière directe l'énergie reçue par le soleil en énergie électrique avec un certain rendement qui est caractéristique du semi-conducteur utilisé dans la fabrication.

La photopile utilise deux couches de semi-conducteur, une dopée de type N qui est excédentaire en électrons et l'autre dopée P qui est excédentaire en trous.

Ces deux couches sont comprises entre deux électrodes métalliques (+) et (-) pour collecter le courant.

L'énergie du photon absorbée par le semi-conducteur va servir à arracher des électrons qui vont passer à un état d'énergie supérieur créant un déséquilibre électrique se traduisant par une paire électron- trou. Lorsque les deux couches entrent en contact, les électrons libérés se déplacent de la zone dopée N vers la zone dopée P, de même pour les trous qui se déplacent de la zone P vers la zone N, ceci va créer une jonction P-N et donc un champ électrique.

Le champ permet de déplacer les électrons de la zone N vers la surface négative où ils deviennent disponibles pour le circuit électrique. En même temps les trous se déplacent dans la direction opposée, vers la surface positive où ils attendent les électrons entrants. Quand les trous et les électrons rejoignent la jonction P-N, une tension est générée, elle peut varier entre 0,3V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé, de la température et du vieillissement de la cellule [11][12].

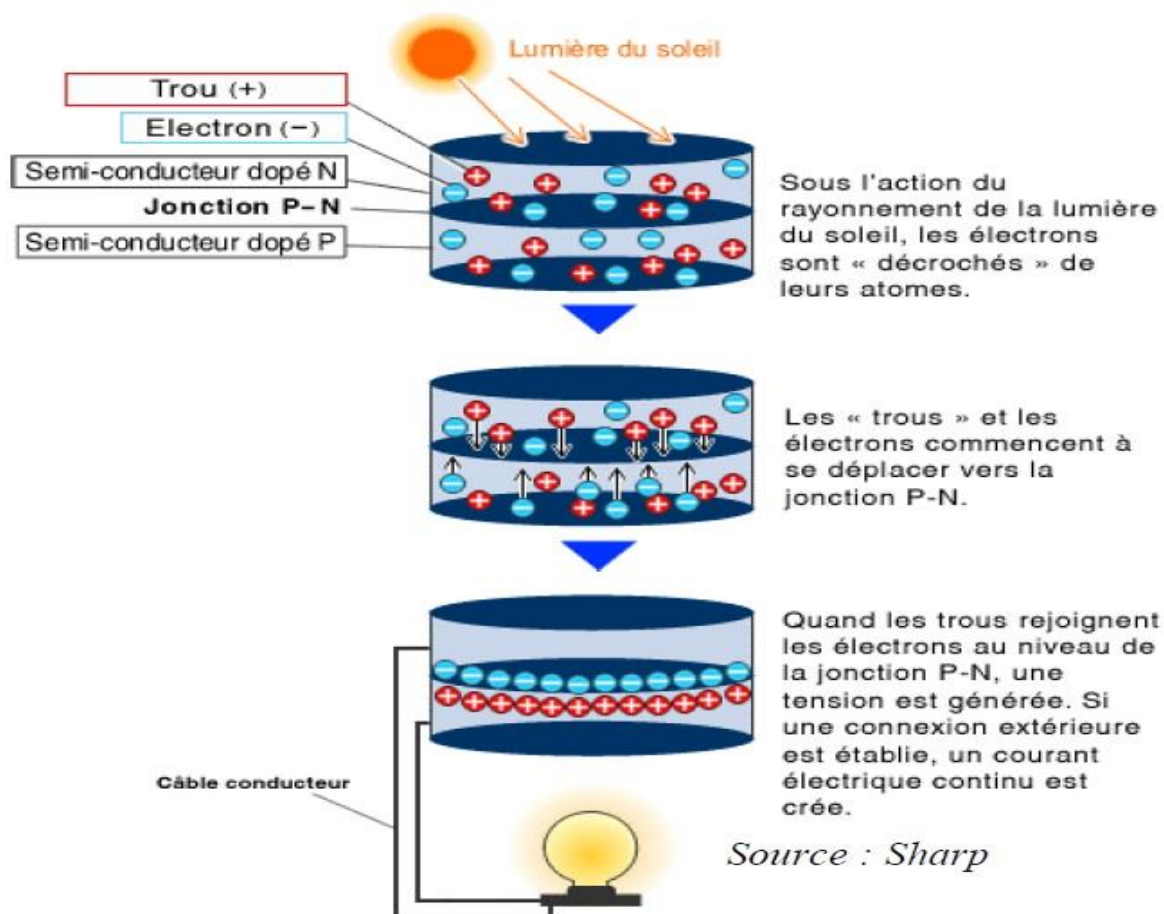


Figure (I.4) : Le fonctionnement de l'effet photovoltaïque dans une cellule photovoltaïque [12].

I.1.2 Rendement et facteurs influents

La mise en place d'une installation photovoltaïque peut présenter de nombreux avantages tant d'un point de vue environnemental qu'économique.

Cependant, le rendement des panneaux solaires est influencé par divers aspects qui affectent de manière significative la production énergétique annuelle. Une évaluation inadéquate de ces éléments pourrait compromettre l'efficacité de l'ensemble de l'installation.

Qu'entend-on par le rendement du système photovoltaïque ?

Lors de la conception, il convient de prendre en compte certaines caractéristiques qui influencent la quantité d'énergie captée et produite et le rendement de l'installation.

Avant d'analyser le rendement de l'installation photovoltaïque, il faut tenir en compte le rendement des panneaux photovoltaïques.

La puissance de crête des panneaux photovoltaïques est calculée dans des conditions STC (Standard Test Condition), c'est-à-dire avec un rayonnement de 1000 W/m², une température de 25 °C, une distribution spectrale = 1,5.

Le rendement nominal d'un panneau est la quantité d'énergie solaire qu'il parvient à convertir en énergie électrique par unité de surface et constitue toujours le rendement maximal aux conditions STC.

Le rendement d'un panneau photovoltaïque se calcule en mesurant la puissance de crête et les dimensions :

$$Eff = \left(\frac{\text{Power (W)}}{\frac{\text{Surface (m}^2\text{)}}{1000}} \right) \cdot 100 \quad \text{I.1}$$

Dans cette formule :

- la puissance (Power) est la puissance de crête exprimée en W ;
- la surface (Surface) est la surface du panneau en m² ;
- 1000 est la constante en condition STC du rayonnement de 1000 W/m² ;
- 100 est la constante relative au pourcentage.

Prenons un exemple pratique : dans le cas d'un panneau de 250W_p de taille égale à 1.65 m x 1 m (surface égale à 1.65 m²), nous obtenons :

$$\text{Rendement} = (250 / 1,65 / 1000) \cdot 100 = 15,15\%$$

Les dimensions et la puissance de crête sont détectables sur les fiches techniques des panneaux ou sur les étiquettes.

À ce stade, nous pouvons introduire le concept de rendement de l'installation photovoltaïque, qui exprime le rapport entre la quantité produite et la quantité maximale productible.

Le rendement de l'installation est influencé par plusieurs facteurs (et pas seulement par le rendement des modules).

Les principaux facteurs qui influent sur le rendement de l'installation sont : caractéristiques intrinsèques des panneaux ; inclinaison des panneaux ; exposition des panneaux ; ombrage ; distance entre les rangées ; pertes énergétiques [13].



Figure (I.5) : Facteurs d'influence du rendement des panneaux photovoltaïques [13].

- Choix de l'exposition et inclinaison des panneaux :

Avant la mise en place de l'installation photovoltaïque, il convient de vérifier que le panneau a une exposition correcte au soleil et une inclinaison adéquate.

Pour capter un maximum de rayonnement solaire, les panneaux solaires doivent être orientés vers le sud ; cependant, les modules exposés vers le sud-est et le sud-ouest peuvent également être performants.

L'inclinaison (tilt) est variable et dépend de la latitude. Les valeurs optimales indicatives à nos latitudes sont 20-40°.

Pour déterminer avec précision la meilleure valeur en fonction de la zone d'installation, nous vous recommandons de vous fier à un logiciel photovoltaïque, qui vous permet d'estimer la production solaire photovoltaïque à partir de données concrètes de rayonnement solaire tirées des principales bases de données climatiques de référence :

PVGIS pour l'Europe, l'Afrique, le bassin méditerranéen et l'Asie du Sud-Ouest.

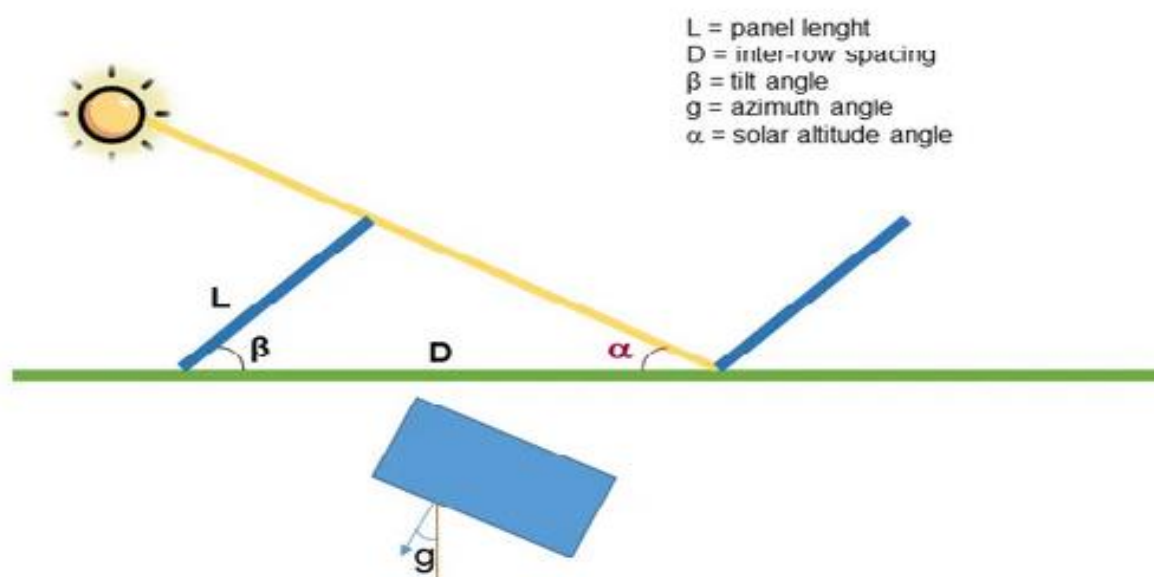


Figure (1.6) : Exposition et inclinaison des panneaux.

- Distance entre les chaînes de modules :

En cas de positionnement sur une surface horizontale, en plus d'établir l'orientation et l'inclinaison, il faut calculer la distance entre les rangées de modules afin de trouver le bon compromis entre la maximisation de la puissance installée sur la surface et la minimisation des ombrages entre les rangées. C'est un aspect fondamental pour maximiser le rendement des panneaux photovoltaïques.

Pour déterminer la distance optimale entre les rangées, il faut tenir compte de la surface sur laquelle l'installation sera mise en place :

- si la surface est inclinée, les panneaux sont généralement installés parallèlement à la pente du toit et il n'est pas nécessaire de calculer la distance (l'inclinaison est celle de la pente) ;
- si l'installation est installée au sol ou sur un toit plat, il convient de déterminer correctement l'inclinaison et la distance entre les rangées, afin d'éviter les ombres dues aux modules eux-mêmes, y compris en tenant compte de l'heure et des périodes de l'année.

Il sera, donc, nécessaire de calculer la hauteur (H) et la distance (D) entre une rangée de modules et l'autre. Dans le cas où la distance n'est pas calculée correctement, le phénomène des ombres porteuses peut se produire, c'est-à-dire que les modules placés devant créent des ombres sur les panneaux qui sont derrière [13].

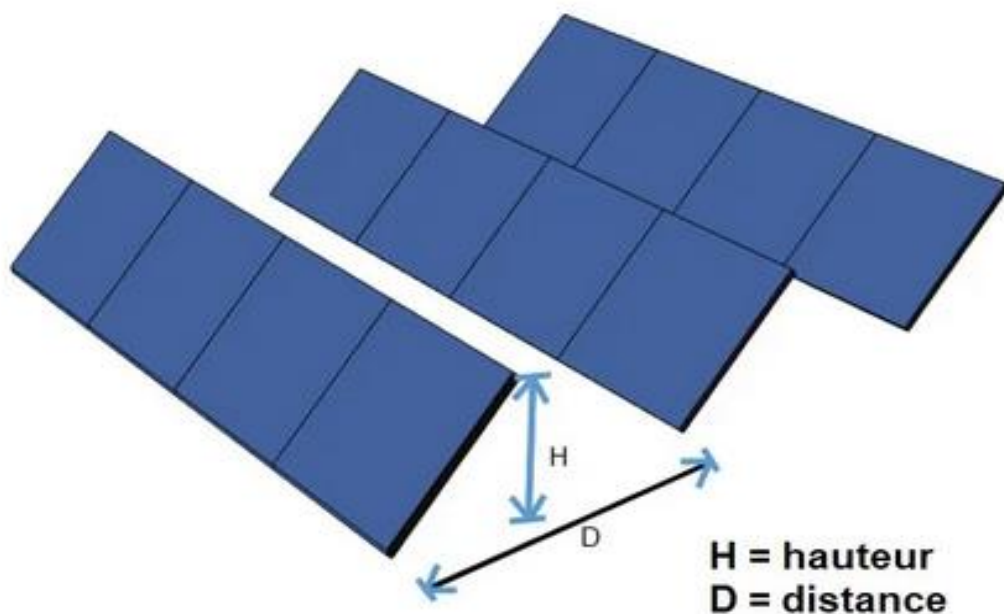


Figure (1.7) : Distance entre les rangées de panneaux solaires [13].

- Coefficient d'ombrage :

Un autre facteur fondamental pour garantir la performance optimale des panneaux est le coefficient d'ombrage, qui est calculé à l'aide de ce que l'on appelle l'analyse d'ombrage. L'analyse des ombres est l'étude des éléments architecturaux ou naturels entourant l'installation, qui permet de vérifier comment ils peuvent affecter le rayonnement solaire incident et s'ils provoquent des ombres sur les surfaces de captage.

Une analyse d'ombrage correcte prévoit une inspection, au cours de laquelle une analyse inclinométrique est effectuée, c'est-à-dire que la présence d'objets éventuels pouvant causer des ombres est vérifiée et leur azimut est calculé.

La détection de l'azimut se fait de la manière suivante :

1. vous vous positionnez sur le site où vous allez installer l'installation et avec une boussole, vous pouvez détecter à quel point cardinal se trouve l'élément par rapport à nous (dans ce cas, l'arbre est situé vers l'Est) ;
2. on calcule l'élévation de cet élément (par exemple 10°) ;
3. on calcule la valeur d'inclinaison en regardant avec une application pour téléphone mobile munie de clinomètre ou avec une jumelle ou un appareil photo, la pointe de l'arbre, qui représente la frontière entre la voûte céleste et l'élément qui peut faire de

l'ombre, on observe le niveau d'inclinaison, représenté par l'angle alfa (α). Pour mesurer cet angle α , on utilise l'inclinomètre, c'est-à-dire un goniomètre avec un fil de plomb ou plus simplement une application d'astronomie qui utilise le clinomètre pour téléphone mobile, qui permet de comprendre à quel point on est élevé par rapport à une vue horizontale.

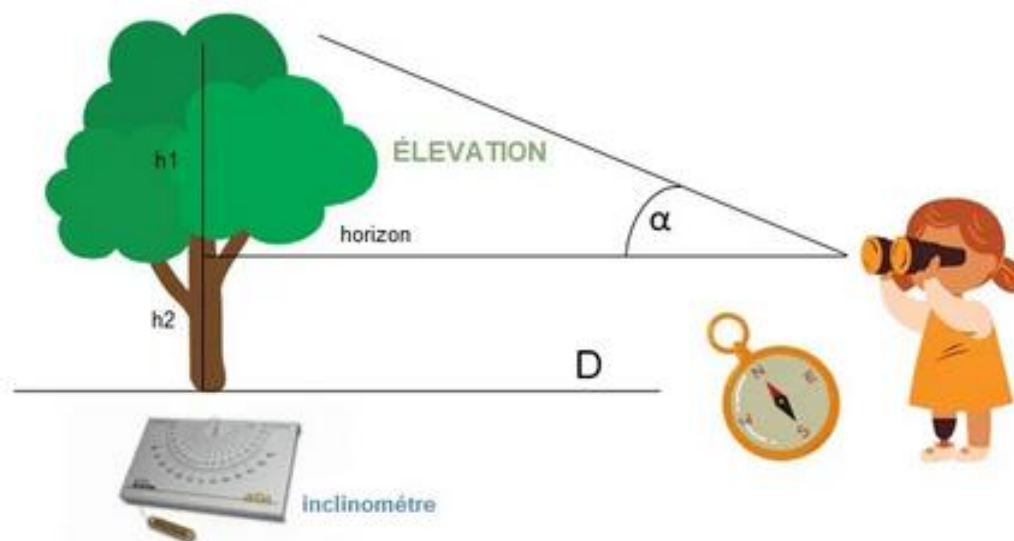


Figure (I.8) : Mesure Azimut d'un arbre [13].

Ce facteur est calculé pour chaque objet qui peut causer une ombre sur les panneaux. Ensuite, ces valeurs seront intégrées sur une carte solaire de coordonnées cartésiennes (diagramme solaire) et analysées avec un logiciel photovoltaïque spécifique qui permet de vérifier si, pendant certaines périodes de l'année, ces éléments apporteront des ombres sur l'installation.

Le calcul précis des valeurs d'élévation et d'orientation des éléments entourant les modules peut devenir un processus très difficile si l'on ne s'appuie pas sur des logiciels de référence spécifiques. Avec le logiciel photovoltaïque Solarius PV, vous pourrez évaluer les ombrages provenant de tous les obstacles éloignés ou proches de l'installation (hauteurs, bâtiments, arbres, etc.) à partir d'un simple relevé photographique et réaliser le diagramme solaire du site d'installation.

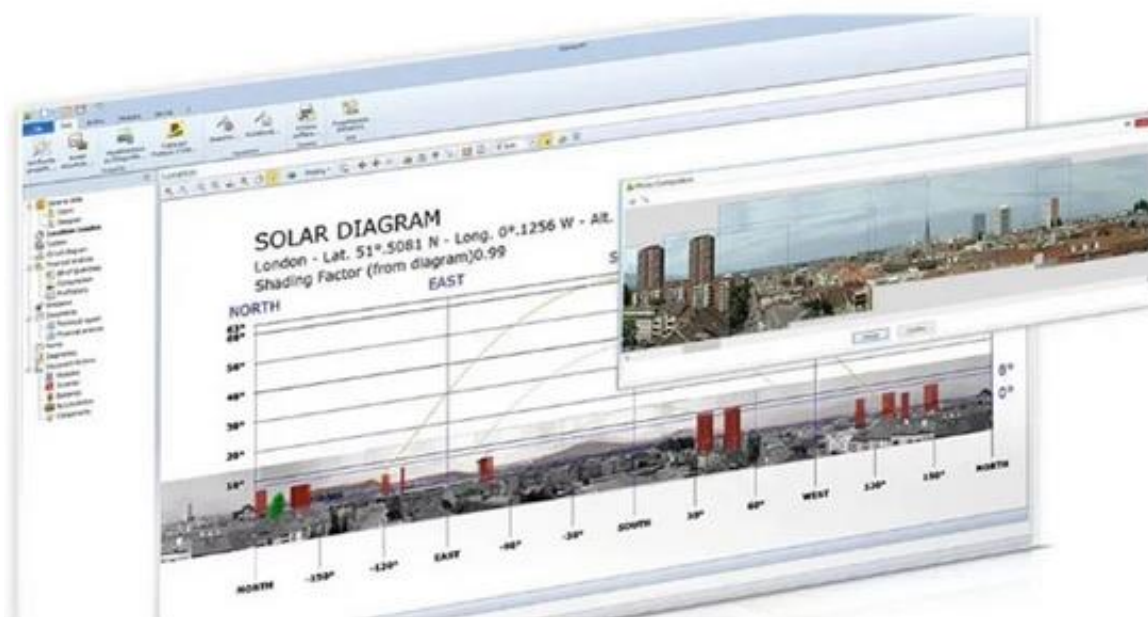


Figure (1.9) : Diagramme solaire pour la vérification de l'ombrage issu du logiciel Solarius PV [13].

L'image est un exemple de diagramme solaire dans lequel nous pouvons voir :

- les points cardinaux sur les abscisses ;
- les valeurs d'élévation sur les ordonnées ;
- les courbes solaires représentées par les lignes jaunes ;
- la schématisation géométrique des éléments qui causent l'ombre (par exemple des cercles verts pour représenter les arbres) [13].

- Pertes d'énergie :

Pour calculer le rendement réel de l'installation solaire, il faut prendre en compte les différentes pertes d'énergie qui peuvent se produire lors de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

À cet égard, nous pouvons considérer le balance of system (BOS) qui exprime en pourcentage les pertes d'énergie dans l'installation dues à divers facteurs, tels que le couplage entre les différents modules photovoltaïques, les connexions à l'onduleur, les pertes dans les tableaux, les pertes dans les conducteurs, etc.

Il s'agit de :

- pertes par reflet ;
- pertes par ombrage ;
- pertes liées à la disparité (mismatching) ;

- pertes dues à l'effet de la température ;
- pertes dans les circuits en continu ;
- pertes dans les onduleurs ;
- pertes dans les circuits alternatifs.

Les pertes dans le cadre du courant continu dépendent de la longueur des câbles : des câblages plus longs entraîneront des pertes plus importantes.

Le phénomène de mismatching est dû aux petites différences dans les caractéristiques électriques qui existent entre les différents modules ; selon la configuration des chaînes, cela peut entraîner une diminution de l'énergie produite.

Pour calculer avec précision le rendement réel des panneaux photovoltaïques, il convient de prendre en compte tous les facteurs mentionnés ci-dessus [13].

I.1.3 Types des panneaux et caractéristiques

I.1.3.1 Types des panneaux

Plusieurs techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, et cela à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), ou le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication et leur utilisation est en général limitée aux applications spatiales, mais le matériau le plus utilisé reste le silicium.

On a trois types des panneaux photovoltaïques : monocristalline, poly-cristalline, panneaux à couche mince.

Dans les lignes qui suivent, nous verrons chaque type de panneaux photovoltaïques en détail, avec leurs avantages, et leurs inconvénients.

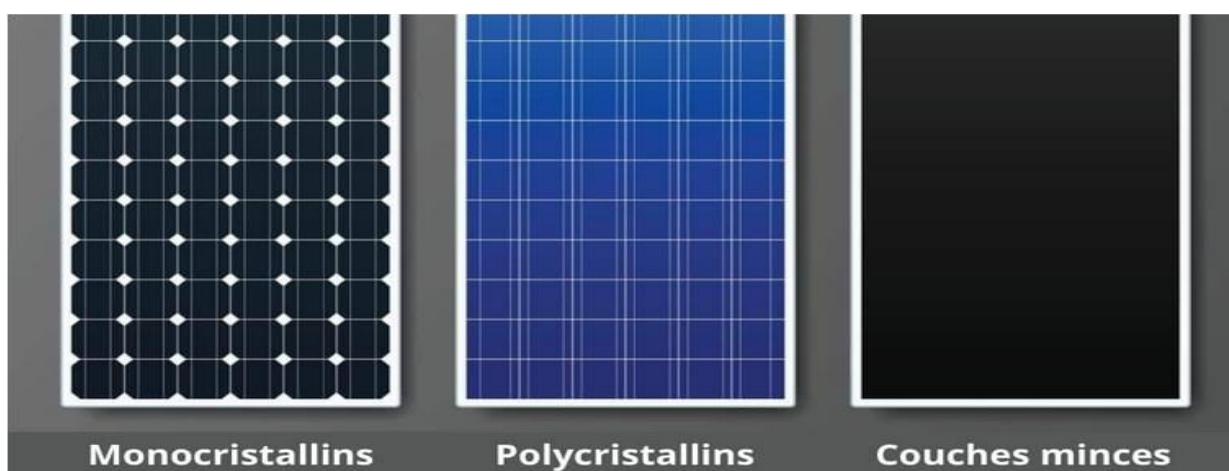


Figure (I.10) : Types des panneaux solaires [14].

A- Les panneaux solaires monocristallins :

Les panneaux solaires photovoltaïques monocristallins sont les modules photovoltaïques les plus performants du marché. Avec un rendement de 20 % ou plus, les panneaux photovoltaïques monocristallins dépassent leurs cousins poly-cristallins d'environ 3 à 4 % en moyenne.

Les panneaux solaires monocristallins sont des modules à cellules à couches épaisses et sont souvent utilisés par les utilisateurs ayant peu d'espace pour leur installation solaire et qui attachent de l'importance à l'esthétique de l'installation.

Les cellules monocristallines sont fabriquées selon des procédés complexes, par exemple en produisant des barres monocristallines (composées d'un seul cristal) à partir du semi-conducteur en silicium, puis en les découpant en puces.

Les cellules photovoltaïques monocristallines bleu foncé à noires sont très homogènes et se distinguent par un rendement particulièrement élevé. Mais elles sont aussi beaucoup plus chères [14].

Les avantages :

- puissance et haut rendement.
- bonne solution pour des conditions pas optimales.
- très productifs sur des espaces limités.

Les inconvénients :

- cher à l'achat.
- installation par une entreprise spécialisée



Figure (I.11) : panneaux solaires monocristallins [14].

B- Les panneaux solaires poly-cristallins :

Les modules solaires poly-cristallins, avec leur aspect reconnaissable de grille bleu foncé, sont très répandus dans notre pays et très appréciés des propriétaires de maisons individuelles. Cela s'explique d'une part par les prix plus bas que les panneaux monocristallins, et d'autre part par leur bonne performance. En moyenne, les modules solaires poly-cristallins atteignent des valeurs d'efficacité de 12 à 16 % montés sous forme de modules traditionnels à couche épaisse (comme les monocristallins), les panneaux solaires poly-cristallins sont très résistants aux intempéries. C'est une des raisons pour lesquelles les fabricants leur attribuent une longue durée de vie de 25 à 30 ans.

L'inconvénient des panneaux solaires photovoltaïques dits poly-cristallins est l'aspect de leur surface assez irrégulier. C'est pourquoi de plus en plus de propriétaires qui attachent de l'importance à l'esthétique de leur toiture se tournent vers les modules monocristallins, d'un noir homogène [14].

Les avantages :

- grande efficacité.
- moins onéreux que les monocristallins.
- robustes contre les intempéries.

Les inconvénients :

- moins puissant et efficace que les monocristallins.
- installation par une entreprise spécialisée.

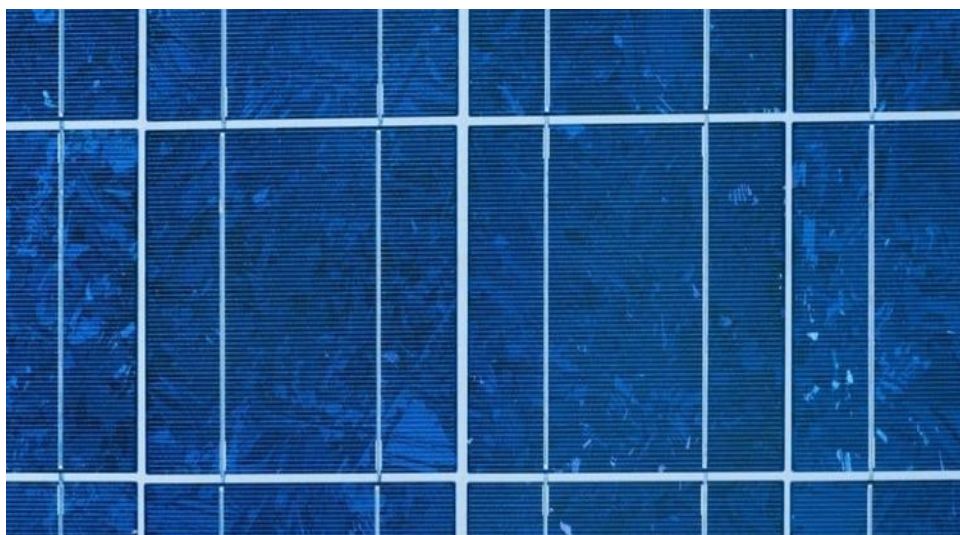


Figure (I.12) : panneaux solaires poly-cristallins [14].

C- les panneaux solaires à couches minces :

Les modules à couches minces (ou fines) sont composés de silicium amorphe. Dans le cas des cellules solaires amorphes, le matériau semi-conducteur est déposé en couches extrêmement fines par évaporation ou par pulvérisation sur une plaque de verre ou un autre support. Cela permet aussi, par exemple, de fabriquer des capteurs solaires flexibles.

Les coûts de fabrication des cellules solaires amorphes sont particulièrement bas, mais le rendement des modules l'est également. C'est pourquoi les panneaux solaires à cellules amorphes sont surtout utilisés dans les centrales solaires, où les coûts d'investissement sont faibles et où la surface n'est pas limitée.

Les avantages :

- peu coûteux.
- montage facile.
- flexibilité d'utilisation.

Les inconvénients :

- rendement peu efficace.
- plus grande surface requise.
- sensible aux influences météorologiques.



Figure (I.13) : panneaux solaires à couche mince [14].

D- Les panneaux solaires à cellule Tandem :

C'est un empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbantes dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines [15].



Figure (I.14) : Cellule solaire tandem pérovskite-silicium [61].

E- Les panneaux solaires à cellule multi-jonction :

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximal de la quelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. D'un autre côté, en deçà de cette longueur d'onde, le surplus d'énergie véhiculé par le photon est perdu. D'où l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible (en multipliant leur nombre d'autant) de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé, ce qui génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire [15].

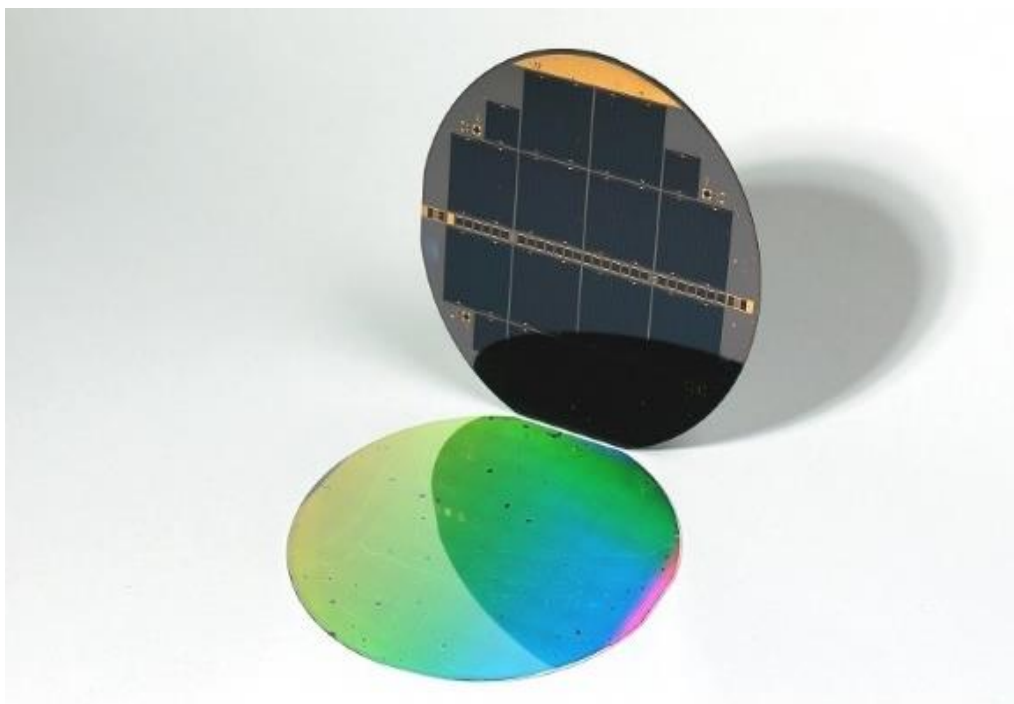


Figure (I.15) : cellule solaire multi-jonction à base de silicium [62].

I.1.3.2 caractéristiques des panneaux :

Parmi les caractéristiques des panneaux photovoltaïques, on peut citer :

- La capacité de production du panneau photovoltaïque :

La principale caractéristique d'un panneau solaire est sa capacité de production. Cela se mesure en puissance de production d'énergie électrique (autoconsommation ou revente). La puissance de production d'un panneau solaire photovoltaïque s'exprime en kilowatt-crête (kWc). Cette puissance de production électrique en kilowatt-crête se calcule en fonction du type de panneau (monocristallin, poly cristallin, amorphe). Ensoleillement, orientation et inclinaison des panneaux solaires photovoltaïques jouent aussi un rôle.

* La tension :

Autre caractéristique d'un panneau solaire, la tension électrique : tension nominale, tension de sortie, et tension en puissance maximum. La tension électrique de sortie (c.o, ou Voc) est la tension d'un panneau photovoltaïque déconnecté des batteries ou du circuit d'une installation solaire.

La tension nominale des panneaux photovoltaïques indique quelle batterie ou installation (12, 18, ou 36 volts) ils peuvent alimenter. La tension de puissance maximale est la tension réelle de sortie des panneaux solaires (VMPP ou Pm).

*** La puissance :**

La puissance d'un panneau solaire photovoltaïque constructeur est le produit de tests en laboratoire. Ils sont « STC », sous conditions de test standard. Ils supposent un éclairement solaire d'une mesure de 1000 watts/m², sous 25°C ambiants.

Cela correspond à un ensoleillement au zénith, pour des panneaux inclinés à 30°. Mais la caractéristique d'un panneau solaire est de se prêter à tout type d'installation. La puissance nominale des panneaux photovoltaïques correspond à la puissance crête corrigée des données d'exposition et d'implantation [16].

- La durée de vie du panneau solaire photovoltaïque :

La durée de vie des panneaux solaires photovoltaïques est la caractéristique d'un panneau solaire la moins médiatisée. Pourtant, l'effet direct est de réduire sa capacité à créer de l'énergie électrique. Les études prouvent qu'au-delà de 40 ans, la capacité maximale à fournir de l'énergie électrique des panneaux solaires diminue.

La durée de vie des panneaux solaires qui fait consensus se situe aux alentours de 30 années. Tout au long de cette durée, le potentiel de l'installation solaire à créer de l'électricité diminue de 100 à 80 %. La caractéristique d'un panneau solaire la plus fiable est cette longévité [16].

- Le rendement des panneaux solaires :

Le correspond rendement d'un panneau à son potentiel de conversion des rayons solaires en électricité. Le rendement moyen des panneaux photovoltaïques varie selon le type de cellules photovoltaïques. Un panneau monocristallin a un rendement de 18 à 21 %. Cela signifie qu'il transforme en électricité 18 à 21 % de la lumière du soleil captée. Un panneau poly-cristallin a un rendement de 14 à 18 %. Un panneau en silicium amorphe a un rendement d'environ 10 %. Ne pas confondre avec le rendement de surface des panneaux, exprimé en watt/m² [16].

I.2. Systèmes de pompage photovoltaïques

Parmi les avantages importants de la conversion photovoltaïque, nous pouvons citer, la décentralisation de la production d'énergie pour de petites communautés très dispersées comme le prouve déjà les pompes solaires dont le fonctionnement s'est révélé très acceptable et l'autonomie du système photovoltaïque, autonomie de lieu mais tout aussi importante est l'autonomie de fonctionnement.

Un des systèmes photovoltaïques intéressant du point de vue facilité d'installation et utilité et d'autre part autonomie et fiabilité est le système photovoltaïque de pompage. Ce système là est

très utilisé dans les zones rurales et sites isolés pour le pompage de l'eau. L'installation ainsi définie est soumise aux impératifs suivants:

- un bon rendement,
- une excellente fiabilité,
- une autonomie de fonctionnement [17].

I.2.1 Structure et composant :

Le système de pompage solaire est constitué généralement par:

- le générateur photovoltaïque,
- le groupe moteur-pompe,
- l'électronique de commande et de contrôle,
- la partie stockage.

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons: stockage d'énergie électrique ou stockage d'eau.

Cette dernière méthode est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds coûteux et fragiles, de plus le rendement énergétique est meilleure quand il n'y a pas d'accumulateurs.

L'énergie fournie par le générateur photovoltaïque est une énergie chère malgré l'abaissement du coût du watt-crête. Il est donc nécessaire de faire fonctionner ces générateurs à leur puissance optimale. L'approche du problème consiste à intercaler entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique (hacheur ou onduleur) pour effectuer le transfert optimal de puissance. La commande du convertisseur se fait par variation d'un paramètre de contrôle; rapport cyclique pour le hacheur et fréquence pour l'onduleur.

Deux méthodes d'optimisation sont utilisées, la première résulte du fait que la tension permettant d'extraire le maximum de puissance des photopiles est en première approximation constante: le point de fonctionnement des photopiles est asservi à cette tension optimale. La deuxième méthode considère le générateur photovoltaïque comme un dipôle sans caractéristiques particulières. Une recherche extrémale est effectuée en agissant sur un paramètre de contrôle du convertisseur.

La figure suivante montre le schéma simplifié d'un système de pompage utilisant le moteur à courant continu. Le couplage est direct (sans stockage électrique) avec optimisation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance commandé par son rapport cyclique. L'installation ainsi définie nécessite une électronique relativement simple mais présente l'inconvénient du moteur à courant continu: un entretien régulier [17].

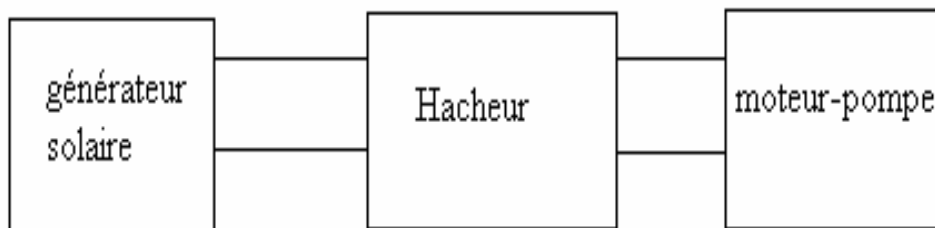


Figure (1.16) : Système de pompage utilisant le moteur à courant continu [17].

De ce fait l'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé) plus robuste moins cher et sans entretien devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe.

L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur (Fig1.17).

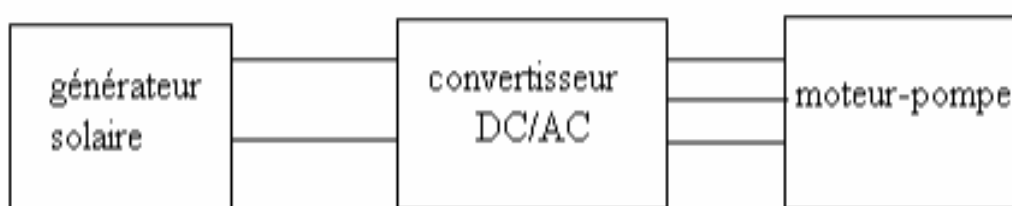


Figure (1.17) : Système de pompage utilisant le moteur à courant alternatif [17].

I.2.1.1 le générateur photovoltaïque :

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel (Figure I.18). Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur.

Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [18].

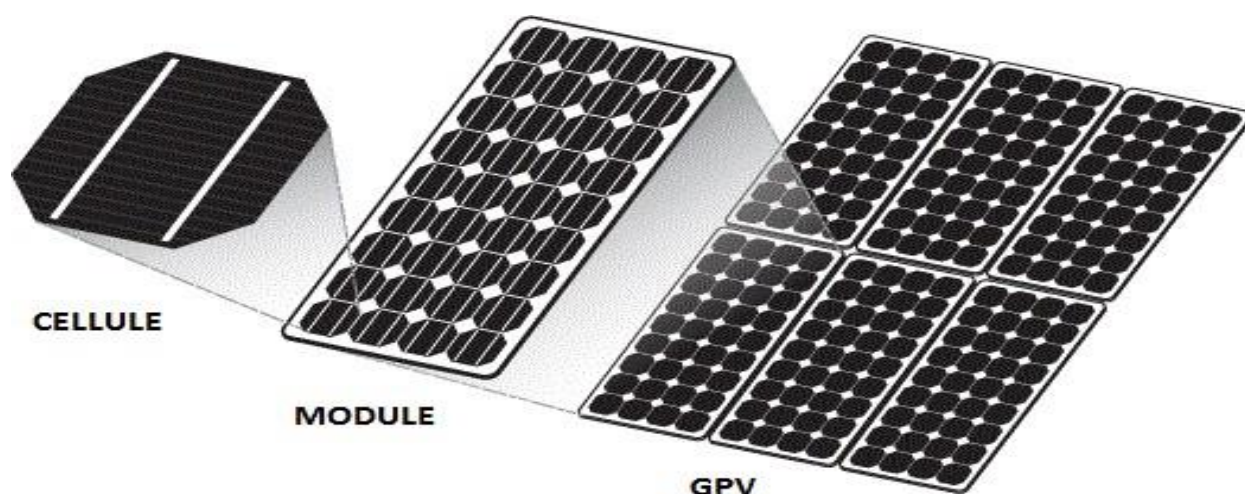


Figure (I.18) : Composants d'un GPV [18].

- Zones de fonctionnement du module solaire :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe $I(V)$ est fixée.

C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (I.19) représente trois zones essentielles :

- * **La zone (I) :** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- * **La zone (II) :** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- * **La zone (III) :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension [19].

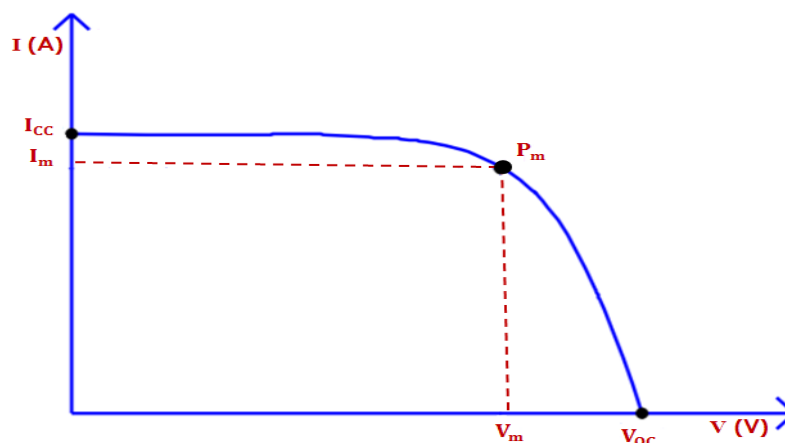


Figure (I.19) : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$, $T=25^{\circ}\text{C}$ [19].

- Association des modules photovoltaïques :

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

*** Association En série :** La tension délivrée par une cellule photovoltaïque est limitée à la tension du gap du semi-conducteur utilisé, c'est pour cela qu'on connecte plusieurs cellules en série afin d'augmenter la tension de sortie. Ces cellules sont traversées par le même courant et la tension du générateur est proportionnelle à leur nombre [20].

En termes d'équations on aura:

$$\begin{cases} V_{CO_{ns}} = N_s V_{CO} \\ I_{CC} = I_{CC_{ns}} \end{cases} \quad \text{I.2}$$

Avec

$V_{CO_{ns}}$: Tension aux bornes de N_s cellules en série

N_s : Nombre de cellules en série

V_{CO} : Tension aux bornes d'une seule cellule

I_{CC} : Courant traversant une cellule

$I_{CC_{ns}}$: Courant traversant N_s cellules en série

La caractéristique I-V représentée par la **figure (I.20)** du groupement série est donc obtenue par addition des tensions à un courant donné.

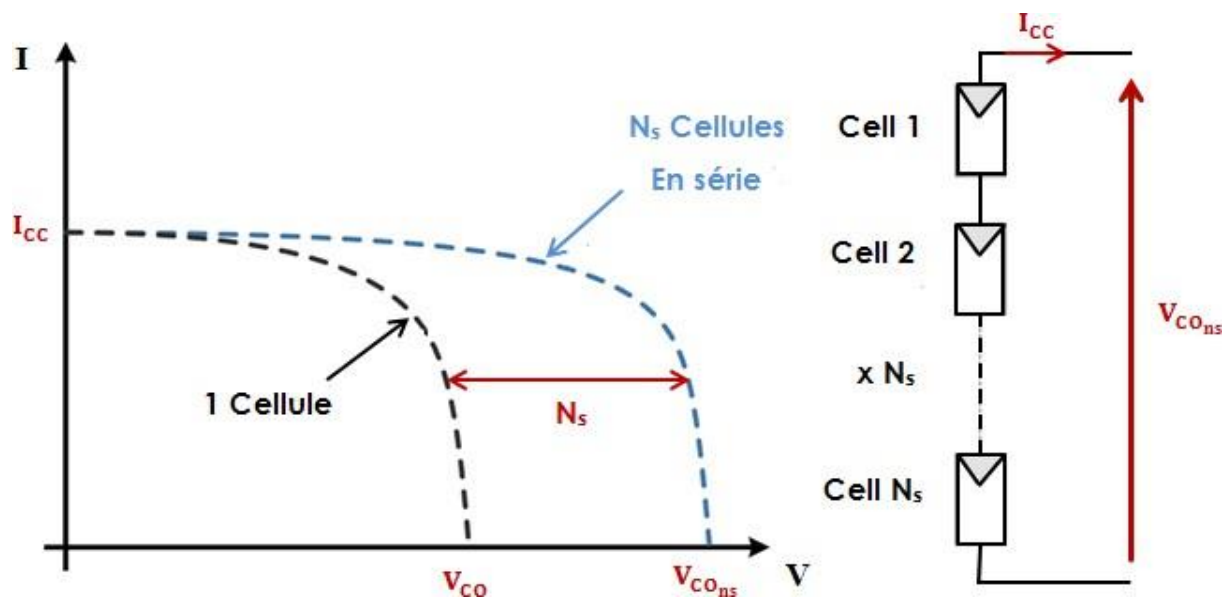


Figure (I.20) : Caractéristique résultante du regroupement de N_s cellules en Série [20].

* Association En parallèle :

Pour l'association en parallèle, on doit vérifier que les tensions des photopiles sont identiques, et le courant obtenu représente le produit entre le courant de la cellule élémentaire et le nombre de ces cellules pour une tension qui reste la même [20].

$$\begin{cases} I_{CC_{np}} = N_p I_{CC} \\ V_{OC_{np}} = V_{OC} \end{cases} \quad \text{I.3}$$

Avec

- $I_{CC_{np}}$: Courant traversant N_p cellules en parallèle
- $V_{OC_{np}}$: Tension aux bornes de N_p cellules en parallèle
- N_p : Nombre de cellules en parallèle

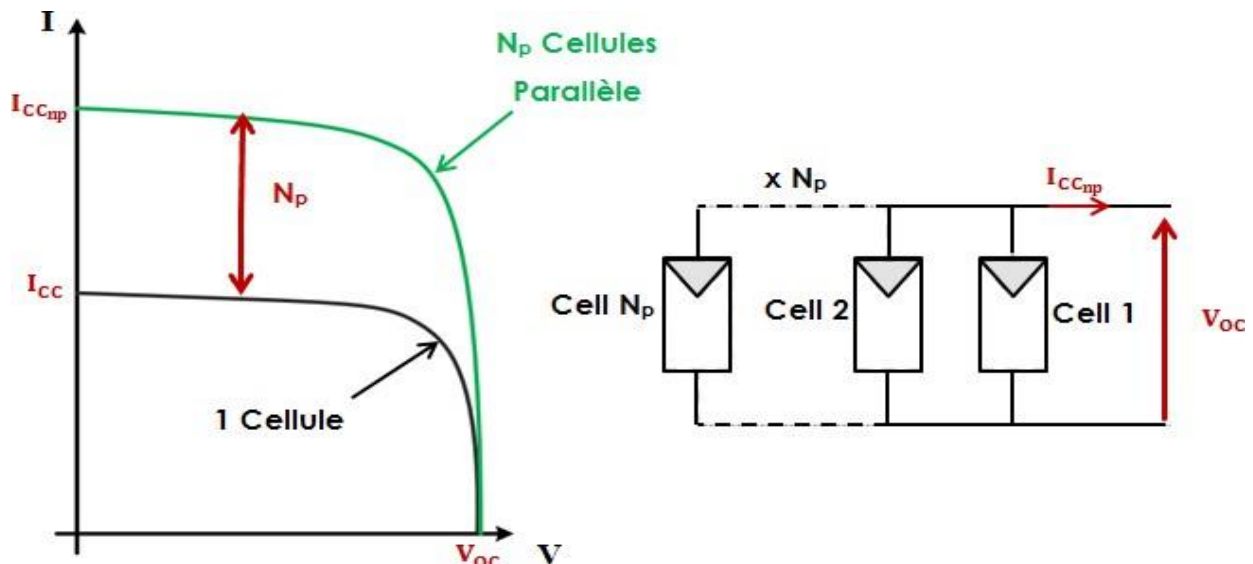


Figure (I.21) : Caractéristique résultante du regroupement de N_p cellules en parallèle [20].

* Association mixte (En Série et En Parallèle) :

Afin d'augmenter la puissance des générateurs photovoltaïques on est obligé à grouper les cellules photovoltaïques en série et en parallèle pour obtenir un générateur mixte équivalent. La courbe de puissance d'un groupement série parallèle est analogue à celle d'un générateur photovoltaïque élémentaire tous les paramètres de celle-ci sont appliqués pour un générateur mixte, mais certaines conditions doivent être respectées [21].

S'assurer que les cellules connectées en série ont le même courant de court-circuit. Il faut connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension de circuit ouvert **VOC**.

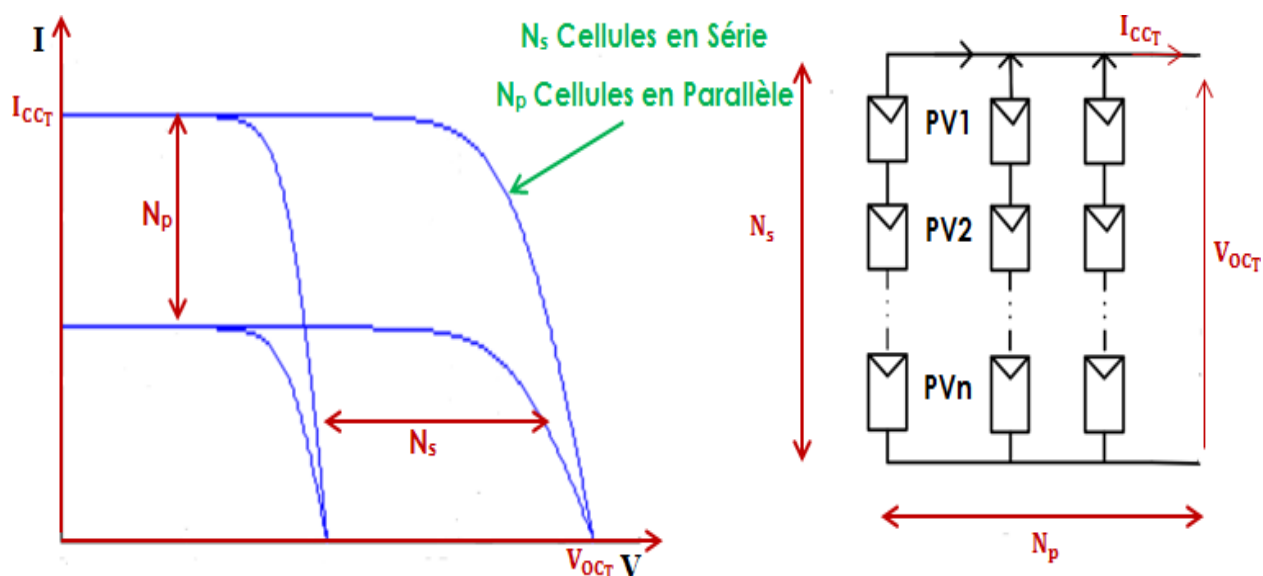


Figure (I.22) : Connexions mixtes des modules photovoltaïques sur la caractéristique I(V) [21].

I.2.1.2 le groupe moteur-pompe :

A- le moteur électrique :

Dans le domaine des pompes à eau solaires, sélectionner le bon moteur revient à choisir le partenaire idéal pour une danse. C'est un équilibre entre l'efficacité, la puissance et l'adéquation. Mais comment déterminer si un moteur AC ou DC est la solution idéale pour la pompe à eau solaire ?

* Utilisation de moteur à courant continu :

Les moteurs à courant continu, en particulier pour les systèmes de moins de 3 CV, sont les héros méconnus de l'efficacité. Leur prouesse réside dans leur capacité à convertir l'énergie solaire directement en énergie mécanique, éliminant ainsi le besoin d'un onduleur. Cette conversion directe signifie moins de pertes d'énergie et un système globalement plus efficace. Mais voici une variante : au lieu de pompes à vis, optez pour des pompes centrifuges. Ils conviennent mieux aux petits systèmes, offrant un rendement élevé, des économies de panneaux solaires et des coûts inférieurs.

* Utilisation de moteur asynchrone :

Lorsque votre système nécessite plus de 3 CV, les moteurs à courant alternatif sont mis à l'honneur. Malgré la nécessité d'un onduleur, leurs performances dans les applications hautes puissance sont inégalées. Ils apportent stabilité et longévité, notamment dans les grands systèmes d'irrigation et de pompage d'eau. De plus, la variété de types de pompes disponibles avec des moteurs AC permet une plus grande flexibilité dans la conception du système.

*** la différence entre les deux types des moteurs :**

La principale différence réside dans leurs méthodes de conversion de puissance. Les moteurs à courant continu utilisent directement l'énergie solaire, tandis que les moteurs à courant alternatif nécessitent un onduleur pour convertir l'énergie continue des panneaux solaires en courant alternatif. Cette distinction fondamentale conduit à des efficacités, des coûts et une adéquation variables pour différentes applications [22].

Généralement pour choisir entre un moteur AC (courant alternatif) et un moteur DC (courant continu) pour une pompe solaire, il faut considérer plusieurs facteurs:

• Efficacité et Coût:

- Pour les petites et moyennes applications (moins de 3 HP), les pompes DC sont plus efficaces et rentables. Les pompes DC sont généralement 20 à 40 % plus efficaces que les pompes AC.
- Les pompes AC sont plus adaptées aux applications plus importantes (plus de 3 HP) en raison de leur capacité à gérer des capacités et des pressions plus élevées.

• Alimentation et Conversion de Courant:

- Les moteurs DC utilisent directement l'énergie solaire (courant continu) sans conversion, ce qui simplifie le système.
- Les pompes AC nécessitent un onduleur pour convertir le courant continu des panneaux solaires en courant alternatif, ce qui entraîne une certaine perte d'efficacité. Cependant, certaines pompes peuvent utiliser à la fois l'alimentation DC et AC.

• Maintenance et Durabilité:

- Les pompes DC peuvent être difficiles à entretenir dans les zones reculées car elles nécessitent des centres de service spécialisés.
- Les moteurs AC sont robustes, ont une longue durée de vie, nécessitent peu d'entretien et offrent un bon rapport qualité/prix.

• Applications et Usages:

- Les pompes DC sont idéales pour les petites applications où l'efficacité et la faible consommation d'énergie sont cruciales.
- Les pompes AC sont généralement préférées pour leur capacité à gérer de plus grands volumes d'eau et des exigences de pression plus élevées, ce qui les rend adaptées aux applications plus exigeantes.

En résumé, le choix dépend de l'ampleur de l'application, des exigences d'efficacité, des coûts et de la flexibilité souhaitée.

B - la pompe à eau :

Une pompe est un appareil transformant une énergie mécanique (couple et vitesse de rotation de l'arbre), en énergie hydraulique (débit et pression). Elle est utilisée dans des forages et choisie selon la hauteur manométrique que devra fournir la pompe pour garantir le fonctionnement.

***Types des pompes :**

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : la pompe à aspiration et la pompe à refoulement [23].

a- Les pompes volumétriques :

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement.

b- Les pompes centrifuges :

Les pompes centrifuges sont les plus rencontrées dans le domaine du pompage d'eau. Elles sont couplées avec les moteurs asynchrones constituant un groupe électropompe.

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes.

L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur.

On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres).

I.2.1.3 l'électronique de commande et de contrôle :

L'électronique de commande et de contrôle dans un système de pompage solaire joue un rôle crucial pour optimiser le fonctionnement du système. Elle assure le transfert optimal de puissance du générateur photovoltaïque vers le moteur-pompe, adapte la fréquence et la tension fournies au moteur selon l'irradiation solaire, et protège la pompe contre des conditions anormales comme le fonctionnement à vide (absence d'eau) [24].

Cette électronique inclut souvent un onduleur (convertisseur DC/AC) qui alimente un moteur asynchrone en maintenant un rapport tension-fréquence constant, grâce à des signaux PWM (modulation de largeur d'impulsion) générés par des circuits intégrés spécialisés [24][25]. Elle intègre également des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour maximiser l'efficacité énergétique en adaptant en temps réel la puissance fournie en fonction des variations d'ensoleillement [25].

Les Fonctions principales de l'électronique de commande et de contrôle :

***Conversion et adaptation de la puissance :**

Le courant continu produit par les panneaux solaires est transformé en courant alternatif triphasé (pour un moteur asynchrone) via un onduleur. Ce dernier ajuste la fréquence et la tension de sortie pour correspondre aux besoins du moteur, garantissant ainsi un transfert optimal de puissance [17][25].

***Optimisation du point de fonctionnement (MPPT) :**

L'électronique intègre des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) qui permettent d'extraire la puissance maximale possible des panneaux solaires malgré les variations d'ensoleillement. Cela se fait en contrôlant des paramètres comme le rapport cyclique du hacheur ou la fréquence de l'onduleur [17][19].

***Protection de la pompe :**

Elle assure la protection contre le fonctionnement à vide (absence d'eau), ce qui évite la détérioration de la pompe. Des capteurs ou sondes de niveau peuvent être intégrés pour arrêter automatiquement la pompe en cas de manque d'eau [17].

***Génération de signaux PWM :**

Pour contrôler précisément le moteur, l'électronique génère des signaux PWM (modulation de largeur d'impulsion) qui pilotent les transistors de puissance dans l'onduleur, maintenant un rapport tension-fréquence constant pour un fonctionnement stable du moteur triphasé [17].

***Commande dynamique :**

Elle ajuste en temps réel la fréquence et la tension de sortie en fonction de la variation de l'irradiation solaire, ce qui permet d'adapter la vitesse de la pompe à la puissance disponible [26].

I.2.1.4 la partie stockage :

La partie stockage dans un système de pompage solaire permet de conserver l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques pour une utilisation ultérieure, notamment quand l'ensoleillement est insuffisant (nuits, jours nuageux). Elle est généralement constituée de

batteries électriques qui stockent le courant continu produit par le générateur photovoltaïque [27].

Ce stockage assure une alimentation continue et stable de la pompe à eau, évitant ainsi les interruptions de fonctionnement dues à la variabilité du rayonnement solaire. Le régulateur de charge contrôle la charge et la décharge des batteries afin d'éviter leur surcharge ou décharge profonde, ce qui prolonge leur durée de vie [27].

Dans certains systèmes, le stockage peut aussi être hydraulique : l'eau pompée est stockée dans un réservoir ou château d'eau situé en hauteur, créant une réserve d'eau sous forme d'énergie potentielle gravitationnelle. Cette eau stockée peut être utilisée en continu même sans production électrique immédiate. Ce type de stockage hydraulique est souvent utilisé pour pallier les variations journalières de la disponibilité de l'eau [28].

*** Types des batteries de stockage :**

La durée de vie des batteries solaires dépend fortement du type de batterie utilisé, car chaque technologie possède des caractéristiques spécifiques en termes de cycles de charge, profondeur de décharge (DoD), sensibilité à la température, entretien et coût.

- Batteries au plomb-acide (plomb ouvert, AGM, Gel) :

Ce sont les plus courantes et économiques, mais elles ont une durée de vie plus courte, généralement entre 3 et 10 ans selon la technologie (plomb ouvert : environ 500 à 1500 cycles, AGM et Gel un peu plus, jusqu'à 600-1000 cycle). Elles sont sensibles à la profondeur de décharge et nécessitent un entretien régulier (remplissage d'électrolyte pour plomb ouvert) et un bon environnement (ventilation). Leur performance diminue au-delà de 30 °C, ce qui réduit leur longévité [29][30].

- Batteries lithium-ion :

Elles offrent une durée de vie plus longue, souvent entre 10 et 20 ans, avec une capacité à supporter entre 3000 et 7000 cycles de charge-décharge selon la chimie (LiFePO₄ étant la plus durable et sécurisée). Elles ont un rendement élevé (>90 %), nécessitent peu d'entretien, et supportent mieux les décharges profondes. Leur coût est plus élevé, mais compensé par leur longévité et compacité. Elles sont toutefois sensibles aux températures extrêmes [30].

- Autres technologies (sodium-soufre, Nickel-Fer, LTO) :

Plus rares et coûteuses, elles peuvent offrir une durée de vie très longue (plusieurs décennies) et une meilleure tolérance aux conditions extrêmes, mais restent peu utilisées dans le solaire résidentiel classique [29].

I.2.2 Applications et avantages :

Les systèmes de pompage photovoltaïques utilisent l'énergie solaire captée par des panneaux photovoltaïques pour alimenter des pompes à eau électriques. Ces systèmes sont particulièrement adaptés aux zones rurales, isolées ou sans accès fiable à l'électricité, car ils fonctionnent de manière autonome grâce à l'énergie solaire [27].

I.2.2.1 Les Applications principales des systèmes de pompage photovoltaïques :

- Irrigation agricole :

Ils fournissent de l'eau pour l'irrigation des cultures, notamment dans les régions arides, en synchronisant naturellement la disponibilité de l'eau avec les besoins des plantes, qui sont plus importants quand le soleil brille [27].

- Abreuvement du bétail :

Ces systèmes permettent d'assurer l'approvisionnement en eau pour les animaux, même dans des zones reculées sans réseau électrique [31].

- Approvisionnement en eau potable :

Ils sont utilisés pour pomper l'eau potable à partir de puits, forages ou sources naturelles, améliorant l'accès à l'eau dans les zones isolées [27][31].

- Applications industrielles et résidentielles :

Ils peuvent alimenter en eau des installations industrielles, des piscines, ou des systèmes de traitement des eaux usées, réduisant ainsi les coûts énergétiques et l'empreinte carbone [27].

- Aquaculture :

Maintien du niveau d'eau dans les bassins piscicoles pour assurer des conditions optimales à la croissance des poissons ou crevettes [27].

- Transfert et mise sous pression de l'eau :

Utilisés pour remplir des réservoirs, citerne, ou pour transférer de l'eau sur de longues distances [31].

I.2.2.2 Les avantages de systèmes de pompage photovoltaïques :

Les avantages de système de pompage photovoltaïques sont nombreux :

- Autonomie et fiabilité :

Ils fonctionnent de manière autonome sans dépendre du réseau électrique, ce qui est idéal pour les zones isolées ou mal des servies [32].

- Adaptation naturelle aux besoins en eau :

La production d'eau est directement liée à l'ensoleillement, ce qui correspond souvent aux périodes de plus forte demande en eau, notamment en agriculture et élevage [33][32].

- Économies sur le long terme :

Malgré un coût initial parfois élevé, ils n'entraînent pas de frais de carburant ni de coûts d'exploitation importants, réduisant ainsi les dépenses sur la durée [33].

- Faible entretien :

Ces systèmes nécessitent peu de maintenance comparé aux pompes à combustible fossile, et les composants comme les panneaux peuvent être remplacés sans arrêt complet du système [33].

- Avantages environnementaux :

Ils utilisent une énergie propre, renouvelable et inépuisable, sans émissions de CO₂ ni pollution sonore, contribuant à la réduction de l'empreinte carbone][33][32].

- Facilité d'installation :

Ils peuvent être installés rapidement et sans travaux lourds, même dans des endroits difficiles d'accès [33].

- Réduction de la main-d'œuvre :

Ils automatisent le pompage, économisant du temps et de l'énergie humaine [32].

I.2.3 Contraintes énergétiques et environnementales :

Les systèmes de pompage photovoltaïques offrent une solution écologique mais sont contraints par la variabilité de l'énergie solaire, les besoins en stockage, la surface nécessaire et la gestion durable de la ressource en eau.

I.2.3.1 Les Contraintes énergétiques :

- Dépendance à l'ensoleillement :

La production d'énergie solaire est limitée à environ 6-7 heures par jour, ce qui restreint la durée quotidienne de pompage. L'eau est pompée uniquement lorsque le soleil est présent, ce qui peut ne pas correspondre aux pics de consommation d'eau matin et soir.

- Variabilité saisonnière et météorologique :

L'irradiation solaire varie selon les saisons et les conditions climatiques (nuages, aérosols), impactant la performance des panneaux et la disponibilité de l'eau pompée.

- Rendement affecté par la température :

Les panneaux photovoltaïques fonctionnent de manière optimale autour de 25°C. Des températures élevées réduisent leur rendement énergétique.

- Dimensionnement complexe :

Il faut bien dimensionner le nombre de panneaux et la puissance de la pompe pour répondre aux besoins en eau. Un sous-dimensionnement entraîne un fonctionnement inefficace ou des arrêts fréquents.

- Nécessité de stockage :

Pour pallier l'inadéquation entre production solaire et demande en eau, il est souvent nécessaire d'intégrer des solutions de stockage d'énergie (batteries) ou d'eau (réservoirs/châteaux d'eau), ce qui augmente les coûts et l'espace requis [34].

I.2.3.2 Les Contraintes environnementales :

- Surface foncière importante :

Les panneaux solaires nécessitent un espace conséquent, ce qui peut être un frein dans les zones densément peuplées ou à usage agricole intensif [34].

- Risque de surexploitation des nappes :

L'absence de contraintes énergétiques directes peut encourager un pompage excessif, menaçant la durabilité des ressources en eau souterraines [35].

- Impacts liés à la fabrication et au recyclage :

La production des panneaux solaires implique des ressources et des déchets à gérer, même si l'impact global reste inférieur aux énergies fossiles.

- Sensibilité aux conditions locales :

La performance et la durabilité du système dépendent fortement du contexte environnemental (ombrage, poussière, saleté sur panneaux), nécessitant un entretien régulier [36].

I.3. Méthodes classiques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) :

La puissance délivrée par un générateur PV dépend fortement du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules. Sachant que la courbe caractéristique de puissance du GPV présente un point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point) correspondant à un certain point de fonctionnement des coordonnées $VMPP$ pour la tension et $IMPP$ pour le courant (voir figure I.23). La position de ce député varie dans le temps car cela dépend du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules (figure I.24) et (figure I.25).

Un adapte de ce traquer de point de puissance maximale (MPPT) doit donc être utilisé de manière à obliger le GPV à opérer au MPP et donc à fournir puissance maximale à tout moment.

Les premières utilisations des MPPTs remontent à 1968 dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux photovoltaïques.

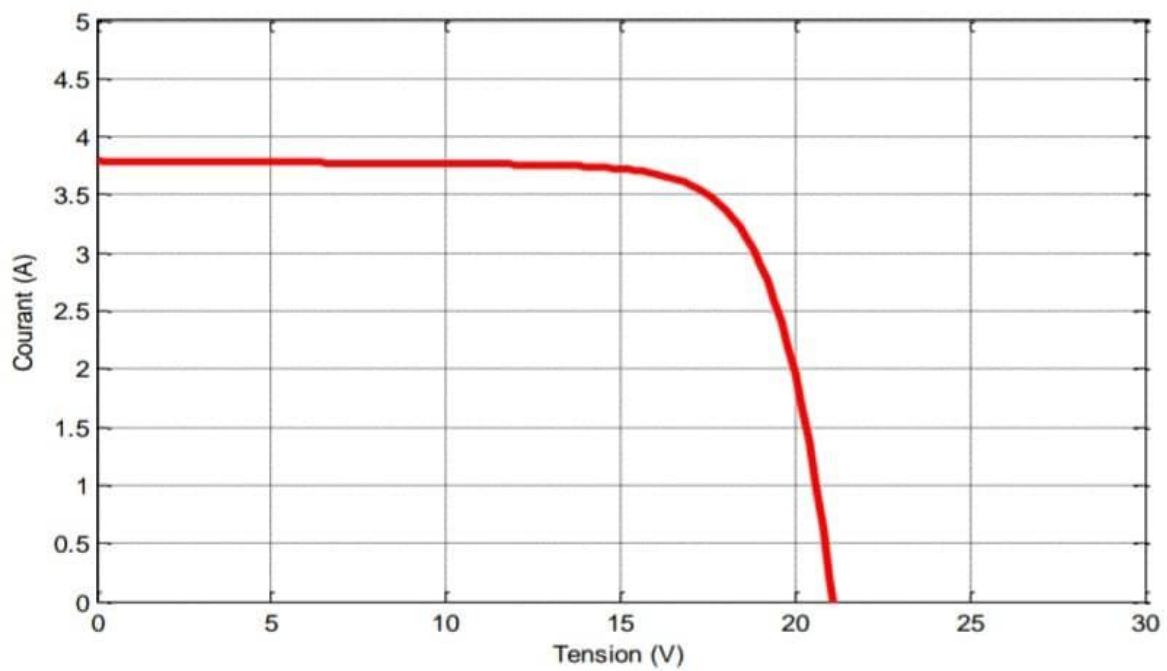
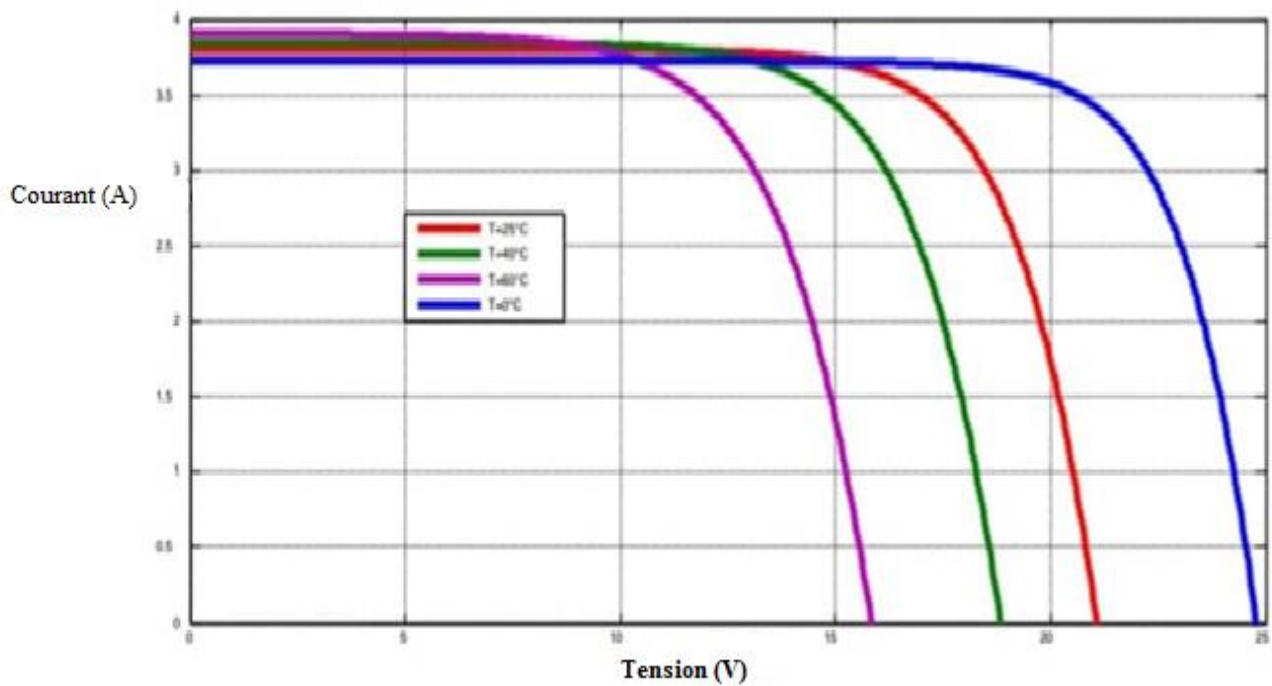
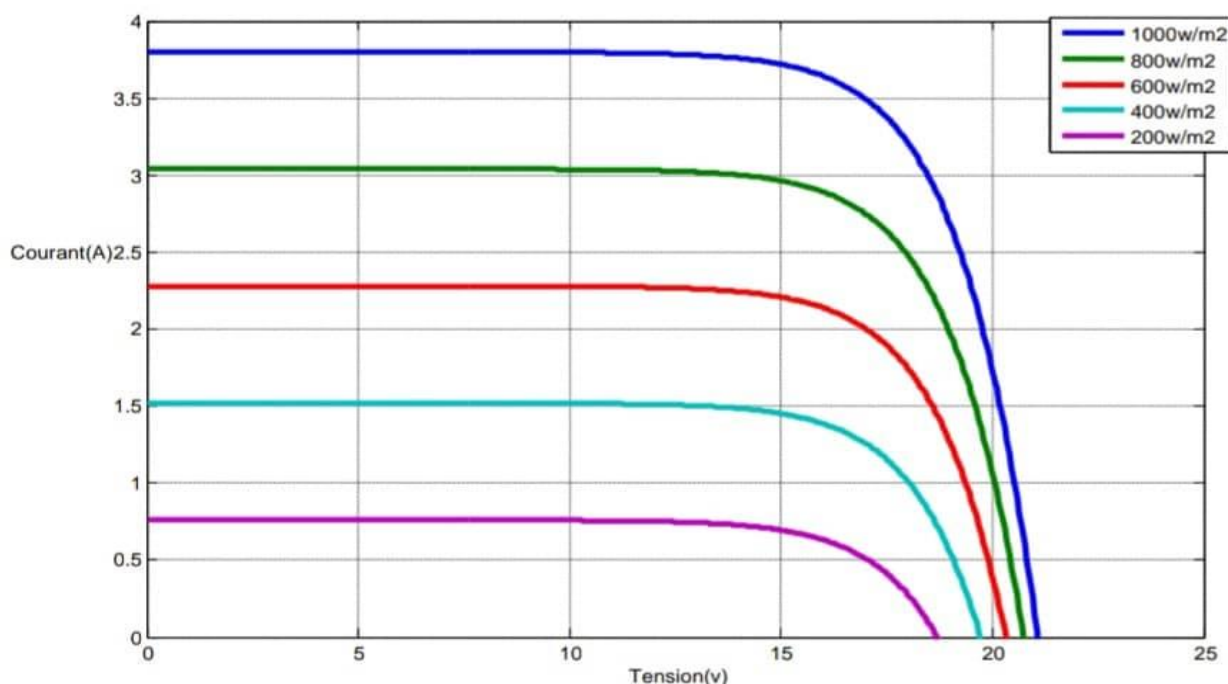


Figure (I.23) : Caractéristique I(V) d'un GPV avec résistance shunt



Figure(I.24) : caractéristique I(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$) Sans résistance shunt

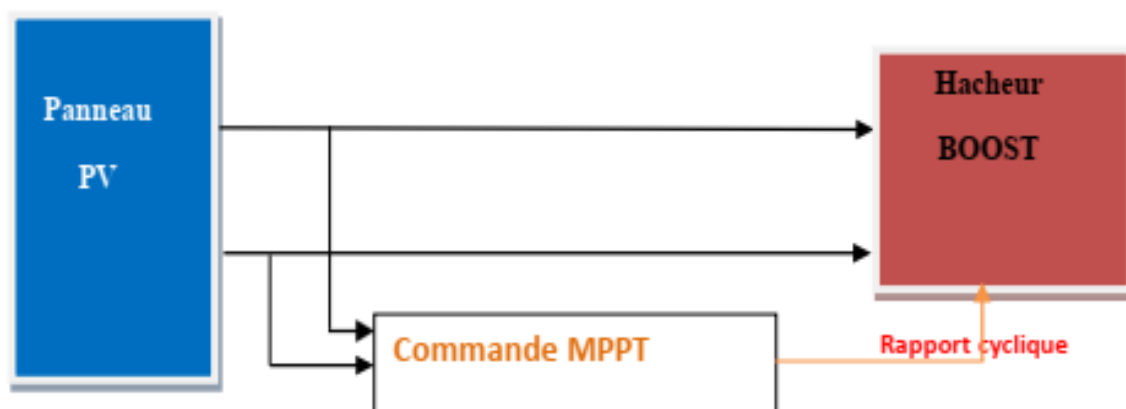


Figure(I.25) : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C)
Sans résistance shunt

* Principe de la commande MPPT :

Le principe de cette commande est basé sur la modification automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale pour maximiser la puissance délivrée par le panneau solaire. Pour cette raison, nous présenterons et analyserons ensuite l'algorithme de contrôle de la méthode "perturbation et observation".

La (figure I.26) montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module [37]. Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.



Figure(I.26): Principe général d'une commande MPPT

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) (Figure I.27) jusqu'à se placer sur le MPP [38].

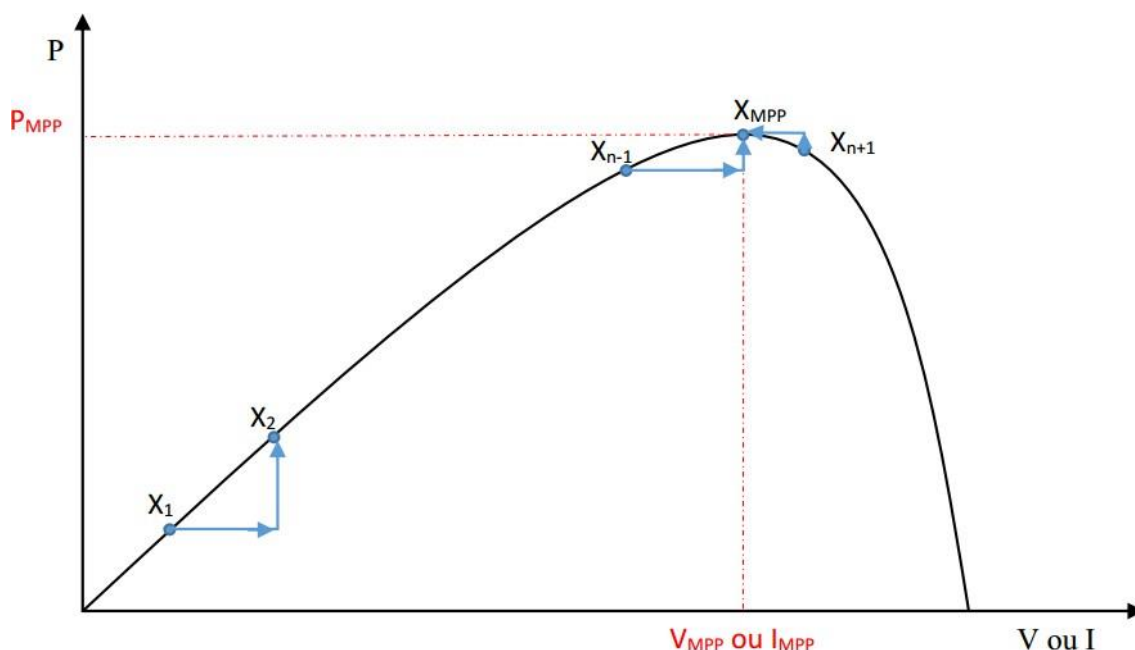


Figure (I.27) : Caractéristique puissance-tension du panneau PV.

*Techniques de commande MPPT :

La classification des algorithmes suiveurs peut être basée sur la fonction des techniques ou stratégies de contrôle utilisées.

Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes.

- Les méthodes indirectes:

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum.

Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc.....

- Les Méthodes directes:

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux, l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV.

Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance, etc..... [39].

I.3.1 Algorithme de perturbation et observation (P&O):

Dans la littérature, beaucoup de concentration a été mis sur la méthode perturbe et observe (P&O), c'est une méthode itérative permettant d'obtenir le point de puissance maximal.

Elle consiste à perturber la tension de la charge d'une faible valeur et d'analyser la variation de puissance délivrée par le générateur photovoltaïque et la comparer à celle du cycle de perturbation précédente (**figure I.28**). Il peut être vu que l'incrément ou la décrémentation de la tension augmente ou diminue la puissance, si la puissance est augmenté, la prochaine perturbation devrait être dans le même sens jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, et si la puissance diminue, la perturbation devrait être inversée [40].

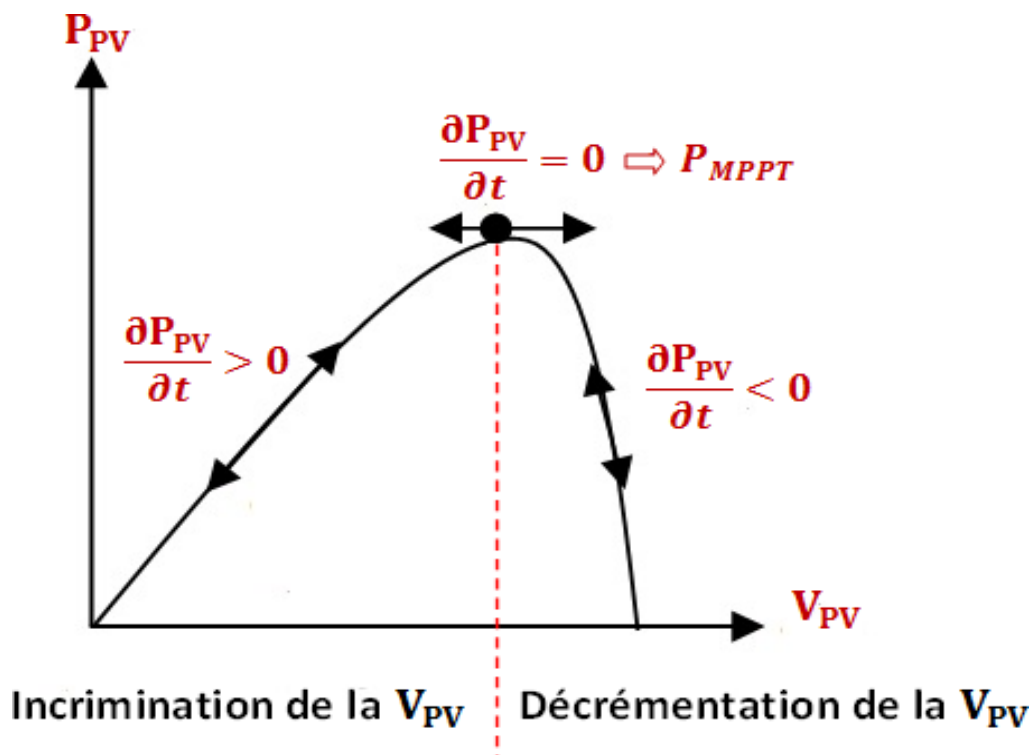


Figure (I.28) : Caractéristique PPV(VPV) [52].

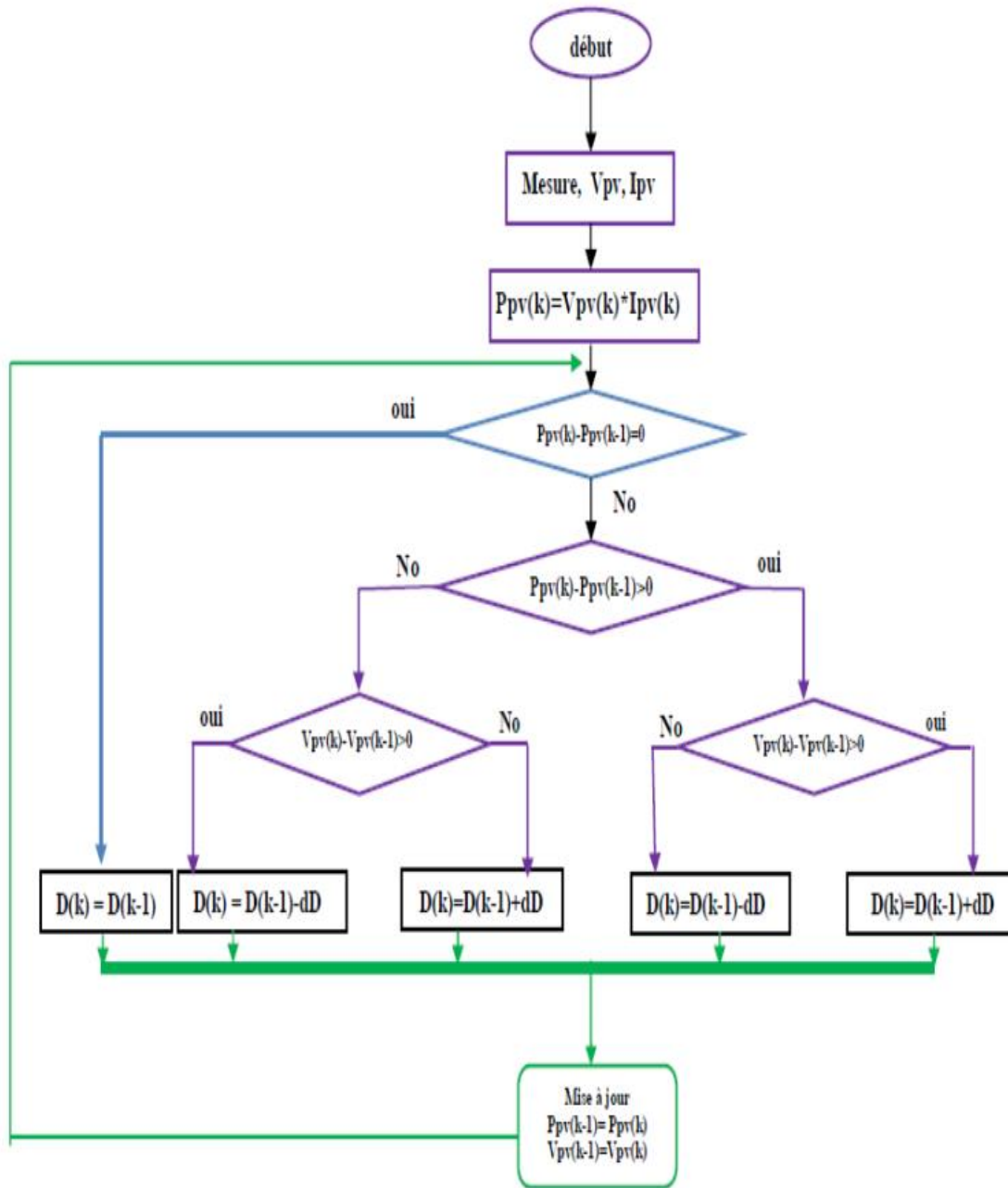


Figure (I.29) : Organigramme de la méthode P&O.

Dans l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension, pour ce type de commande, deux capteurs sont habituellement nécessaire (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) pour calculer la puissance à chaque instant [41]. Dans la référence le courant est estimé à partir de la tension photovoltaïque, ceci utile pour éviter la nécessité d'un capteur de courant. Son modèle Simulink est donné par la figure ci-dessous [42].

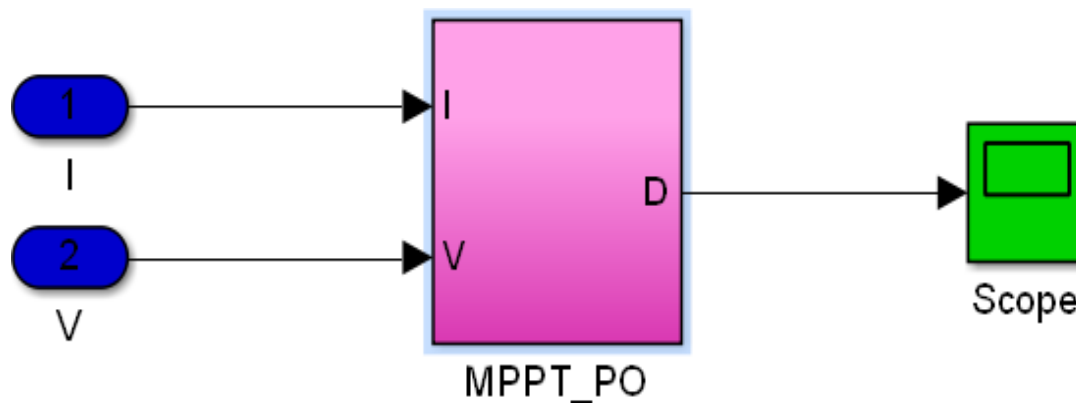


Figure (I.30) : Modèle Simulink de l'algorithme P&O

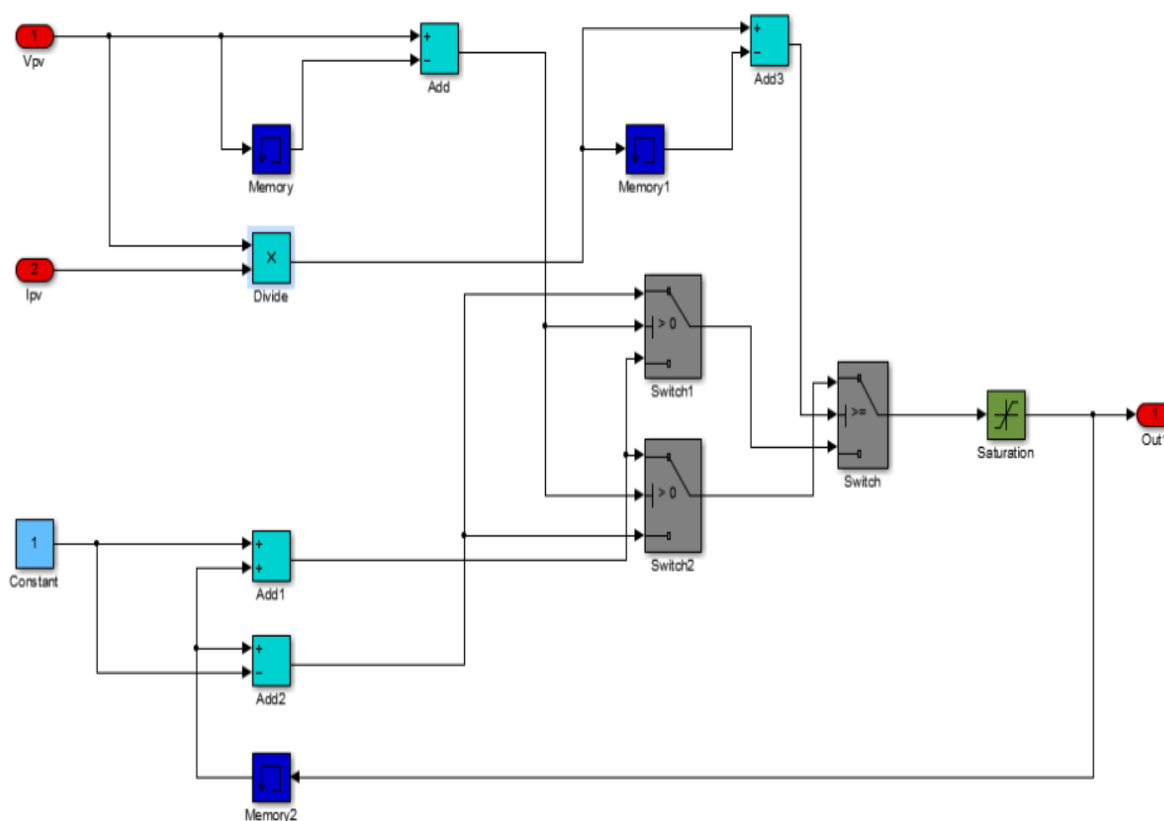


Figure (I.31) : Schéma bloc d'algorithme P&O

I.3.1.1 Les Avantages de l'algorithme P&O :

- Simplicité et facilité de mise en œuvre, ne nécessitant que la mesure de la tension et du courant du panneau photovoltaïque.
- Large popularité et utilisation dans de nombreux systèmes PV grâce à son principe intuitif.
- Capable de suivre le MPP même en présence de variations modérées d'ensoleillement et de température.

- Bonne efficacité moyenne, avec des rendements typiques entre 81,5 % et 96,5 % selon les conditions [43].

I.3.1.2 Les inconvénients de l'algorithme P&O :

- Génère des oscillations autour du point de puissance maximale, ce qui entraîne une perte d'énergie.
- Peut échouer ou s'éloigner du MPP lors de changements rapides des conditions atmosphériques (ensoleillement ou température), car il interprète mal les variations de puissance dues à l'environnement comme résultant de sa propre perturbation [1][44][43].
- La précision et la rapidité de convergence dépendent fortement du pas de perturbation : un pas trop grand augmente les oscillations et les pertes, un pas trop petit ralentit la réponse [43].
- Moins adapté aux conditions dynamiques où la température et l'irradiation varient rapidement, nécessitant parfois des améliorations ou adaptations de l'algorithme [44].

I.3.2 Algorithme Incrémental Conductance (IncCond) :

Dans cet algorithme la dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée d'une autre manière. Elle est calculée en fonction de la tension V et sa différence dV et du courant I et sa différence dI .

Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite [45].

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = IV \quad \text{I.4}$$

La dérivé partielle $\frac{dP}{dV}$ est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad \text{I.5}$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{1}{V} + \frac{dI}{dV}$$

On définit la conductance de la source $G = \frac{1}{V}$ et l'incrémentale conductance $\Delta G = \frac{dI}{dV}$.

Puisque la tension V du panneau est toujours positive, les relations expliquent que le point de puissance maximale MPPT est atteint si la conductance de la source G égale l'incrémentale conductance ΔG de la source avec un signe négatif, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance G est supérieure à l'incrémentale conductance ΔG .

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ si } \frac{1}{V} > -\frac{dI}{dV}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ si } \frac{1}{V} = -\frac{dI}{dV}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ si } \frac{1}{V} < -\frac{dI}{dV}$$

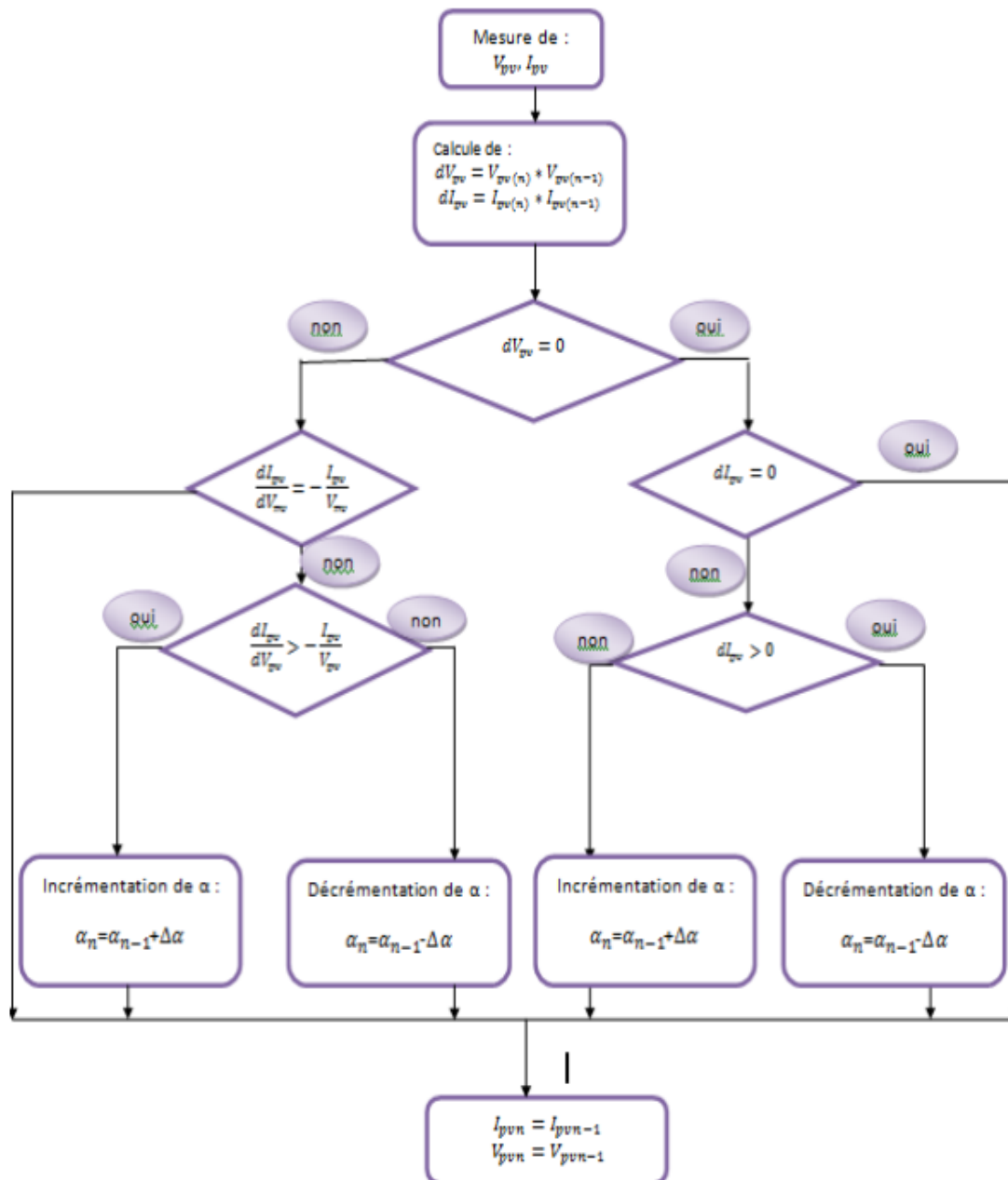


Figure (I.33) : Algorithme d'incrément de la conductance.

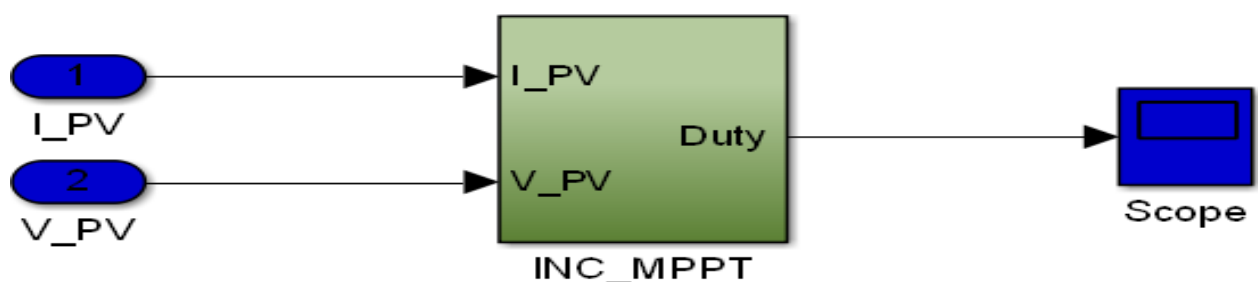


Figure (I.34) : Modèle Simulink de l'algorithme INC.

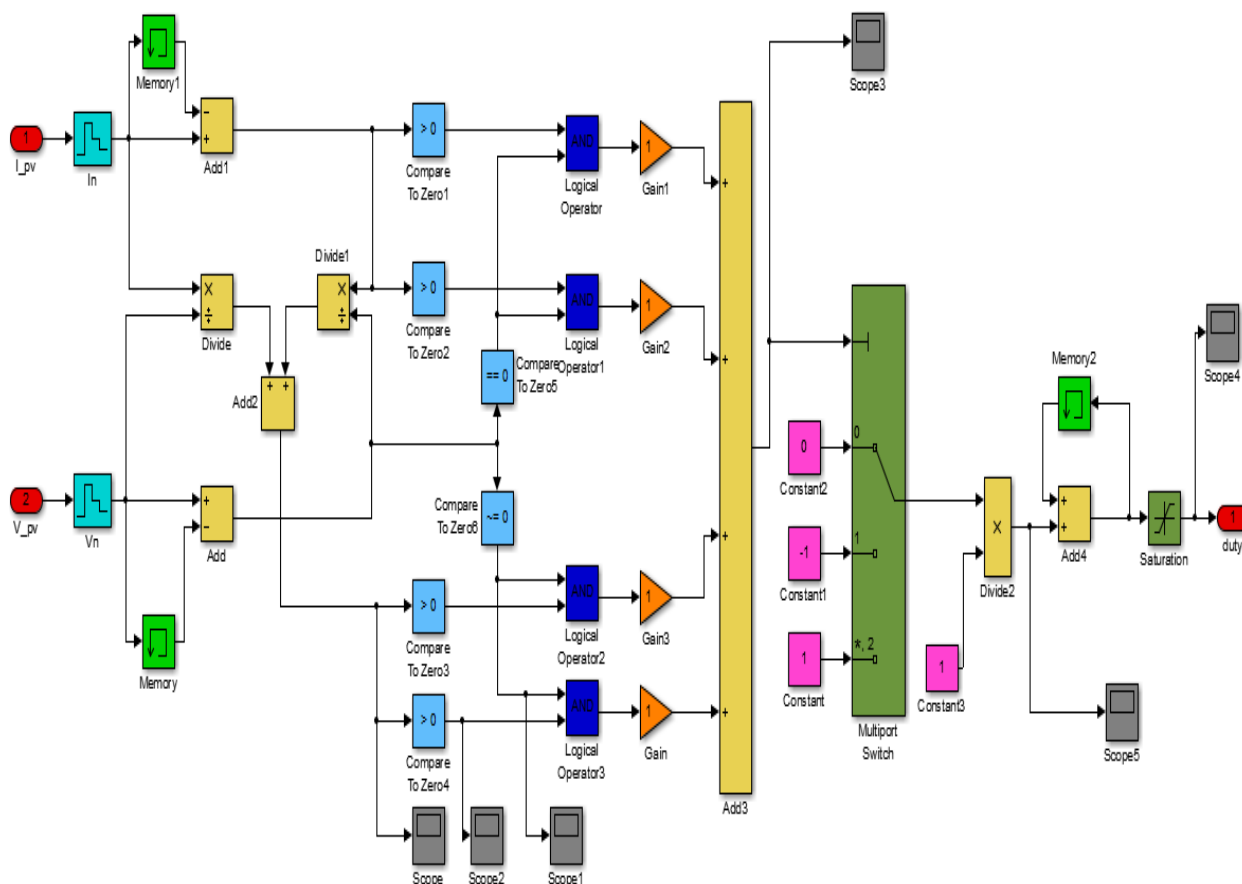


Figure (I.35) : Schéma bloc d'algorithme INC.

I.3.2.1 Les avantages de l'algorithme incrémentation de conductance (IncCond) :

- Elle permet une recherche plus précise du point de puissance maximale (MPP) en utilisant la dérivée de la puissance par rapport à la tension, ce qui améliore la précision par rapport à la méthode Perturb and Observe (P&O) [46][47].
- Meilleure adaptation aux variations rapides des conditions d'irradiance et de température, grâce à l'analyse fine de la pente de la courbe puissance-tension [46][47].
- Réduction des oscillations autour du MPP, car la méthode stabilise la tension une fois le point optimal atteint, ce qui diminue les pertes d'énergie [46].

I.3.2.2 Les Inconvénients de l'algorithme incrémentation de conductance (IncCond) :

- Complexité de calcul plus élevée que P&O, nécessitant des mesures précises et un traitement plus important, ce qui peut compliquer l'implémentation sur des microcontrôleurs simples [46][47].
- Sensibilité au bruit et aux erreurs de mesure, puisque la méthode repose sur la dérivée des mesures de courant et de tension, ce qui peut induire des erreurs dans la détection du MPP [47].
- Performance parfois dégradée en cas de conditions très instables ou de variations très rapides, bien que généralement meilleure que P&O [47].

I.3.3 Autres approches (FLC, Neural Networks, etc.) :

En plus de l'algorithme P&O, il existe des méthodes et algorithmes classiques et avancés pour la commande MPPT notamment les suivants :

*** Approches classiques de MPPT :**

- **Fractional Short Circuit Current (FSCC)** : Estime le point de puissance maximale en mesurant une fraction du courant de court-circuit du panneau, méthode simple mais moins précise.
- **Logique floue (Fuzzy Logic)** : Utilise des règles floues pour ajuster le point de fonctionnement, offrant une meilleure stabilité et moins d'oscillations que P&O, mais avec une complexité plus élevée [48][49].

*** Approches hybrides et avancées :**

- **MPPT hybride** : Combine plusieurs méthodes, par exemple un contrôle en mode glissant assisté par P&O, pour améliorer la rapidité, la stabilité et la précision [48].
- **Contrôle indirect P&O avec régulateur PID** : Améliore la méthode P&O classique en réduisant les oscillations et en accélérant la réponse [49].
- **Réseaux de neurones (Neural Networks)** : Apprennent à prédire le point optimal en fonction des conditions environnementales, offrant une grande adaptabilité et précision dans des environnements changeants [49].

***Autres méthodes alternatives :**

- **Contrôle direct non linéaire** : Approche basée sur des modèles non linéaires du système PV pour un suivi plus précis.
- **Méthodes basées sur la théorie des systèmes flous de Takagi-Sugeno (T-S fuzzy)** : Utilisées pour la commande MPPT sur convertisseurs boost, combinant robustesse et performance [50].

I.3.3.1 Approches FLC(Fuzzy Logic Classic) :

Les autres approches basées sur la logique floue (FLC) pour le MPPT vont au-delà du contrôle flou classique et intègrent souvent des techniques hybrides ou adaptatives pour améliorer la performance :

- MPPT flou adaptatif :

Combine la logique floue avec un algorithme P&O classique pour ajuster dynamiquement la taille du pas de perturbation. Cela permet un meilleur compromis entre vitesse de convergence et réduction des oscillations autour du point de puissance maximale (PPM), avec une efficacité améliorée (jusqu'à 97,2 %) et une meilleure adaptation aux variations rapides d'irradiance [51].

- **Combinaison logique floue et réseaux de neurones artificiels (ANN) :** Cette approche hybride utilise un contrôleur flou associé à un réseau de neurones pour améliorer la précision et la robustesse du suivi MPPT, notamment dans des conditions non linéaires et variables [52].
- **Contrôleurs flous avancés comme Takagi-Sugeno :** Ces contrôleurs flous plus sophistiqués modélisent le système par des règles floues avec des fonctions mathématiques précises, offrant une meilleure stabilité et performance comparée aux contrôleurs flous classiques [53].
- **Commandes floues indirectes et directes :** Certaines méthodes MPPT floues utilisent une commande indirecte (par exemple, estimation du point optimal via logique floue) ou directe (pilotage direct du rapport cyclique du convertisseur) pour optimiser le fonctionnement du système PV [54].

I.3.3.2 Approches Neural Networks :

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) représentent une approche innovante pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques, offrant des performances supérieures aux méthodes classiques. Voici une synthèse des principaux aspects de cette technologie :

*** Avantages clés des RNA pour le MPPT:**

- **Adaptabilité dynamique :** Les RNA ajustent en temps réel les paramètres du système en réponse aux variations d'ensoleillement et de température, contrairement aux méthodes statiques comme P&O [55].
- **Précision accrue :** Les simulations sous Matlab/Simulink montrent une précision de suivi du MPP atteignant *99 %, surpassant les **95 %* de l'algorithme P&O [56].
- **Réduction des oscillations :** Contrairement à P&O, les RNA minimisent les fluctuations autour du MPP en régime permanent, améliorant l'efficacité énergétique [57][55].

*** Architecture typique d'un RNA pour MPPT:**

- **Entrées :** Variables environnementales (irradiance G_a , température T_a) et électriques (tension, courant) [57][55].
- **Structure :** Perceptron multicouche (MLP) avec :
 - A- Couche cachée :** Fonction d'activation sigmoïde (tansig) pour modéliser les relations non linéaires.
 - B- Couche de sortie :** Neurones linéaires (purelin) générant les valeurs optimales (V_{mpp} , I_{mpp} , P_{max}) [57].
- **Entraînement :** Basé sur des données expérimentales ou simulées (ex : module BP SX150S ou MSX60) couvrant diverses conditions [57].

*** Performances comparatives :**

Critère	RNA	P&O	Logique Floue
Précision	99 %	95 %	97 %
Temps de réponse	0,2 s	0,5 s	0,3 s
Stabilité	Excellente	Oscillations	Bonne
Complexité	Élevée	Faible	Moyenne

Tableau (I.1) : Performances comparatives*** Cas concrets et résultats :**

- **Simulation avec convertisseur Boost :** Un RNA entraîné sur le module BP SX150S (150W) ajuste le rapport cyclique du convertisseur, atteignant un rendement de *98,5 %* contre *94 %* pour P&O [55].

- **Robustesse aux variations brutales :** Lors d'un passage nuageux simulé, le RNA maintient le MPP avec une erreur inférieure à *1 %*, contre *5 %* pour P&O [56].

*** Défis et perspectives :**

- **Coût computationnel :** L'entraînement des RNA nécessite des ressources importantes, bien que leur déploiement sur microcontrôleurs devienne réalisable.

- **Hybridation :** Combiner RNA avec des techniques comme les réseaux convolutifs (CNN) pour la détection de défauts des panneaux émerge comme une piste prometteuse [56].

I.3.4 Limite des méthodes traditionnelles :

Voici les principales limites des méthodes classiques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) :

*** Oscillations autour du MPP :** Les algorithmes comme Perturb and Observe (P&O) génèrent des oscillations permanentes autour du point de puissance maximale, ce qui cause des pertes d'énergie [58][54].

*** Réponse lente aux variations rapides :** Ces méthodes ont du mal à suivre efficacement le MPP lorsque l'ensoleillement ou la température changent rapidement, pouvant entraîner un mauvais suivi temporaire [58][54].

*** Dépendance aux paramètres fixes :** Certaines méthodes, comme la tension de référence fixe, supposent que la tension optimale varie peu avec les conditions, ce qui n'est pas toujours vrai, réduisant la précision du suivi [58].

*** Complexité de calcul et mise en œuvre :** Par exemple, la méthode de conductance incrémentale nécessite le calcul en temps réel de dérivées, demandant un processeur rapide et une complexité de commande accrue [58].

* **Pertes supplémentaires dues à la perturbation** : La recherche du MPP implique des perturbations qui peuvent temporairement diminuer la puissance extraite [58].

* **Sensibilité au bruit et erreurs de mesure** : Les méthodes classiques peuvent être perturbées par des mesures bruitées, affectant la stabilité du suivi [54].

Ces limites motivent le développement de méthodes améliorées, incluant des contrôleurs flous, des algorithmes intelligents ou des approches analogiques pour réduire les oscillations, améliorer la rapidité et la précision du suivi.

- Tableau résumé des limites des méthodes classiques MPPT :

Limite principale	Description
Oscillations autour du MPP	Fluctuations permanentes causant des pertes d'énergie
Réponse lente aux variations	Difficulté à suivre rapidement les changements d'ensoleillement ou température
Paramètres fixes non adaptés	Hypothèses simplificatrices réduisant la précision
Complexité de calcul	Nécessité de calculs dérivés en temps réel (ex. méthode conductance incrémentale)
Pertes dues à la perturbation	Perturbations nécessaires pour rechercher le MPP diminuent temporairement la puissance extraite
Sensibilité au bruit	Mesures bruitées affectant la stabilité et la précision

Tableau (I.2) : Résumé des limites des méthodes classiques MPPT [58][54].

Conclusion :

Ce chapitre examine les bases scientifiques et techniques des systèmes de pompage solaire et des techniques de recherche du point de puissance maximale (MPPT), qui constituent le socle sur lequel repose l'amélioration de l'efficacité des systèmes solaires. De la compréhension du fonctionnement des cellules solaires et de la transformation de l'énergie lumineuse en électricité, à la connaissance des différentes sortes de panneaux solaires (monocristallins, poly cristallins et à couche mince), en passant par les variables influençant leur rendement telles que l'orientation, l'ombre et la déperdition d'énergie, jusqu'à la conception des systèmes de pompage solaire et de leurs éléments essentiels (générateur photovoltaïque, motopompe, électronique de contrôle et stockage).

A blue scroll graphic with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a slight shadow effect.

Chapitre II :

**Approches
hybrides MPPT
basées sur l'IA**

Introduction

De nombreuses études ont été effectuées afin de perfectionner l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Les algorithmes de contrôle et de commande basés sur l'intelligence artificielle deviennent plus importants dans le secteur de l'énergie, grâce à leur pouvoir de contrôle de systèmes très complexes.

Un sous-groupe de l'intelligence artificielle appelle les réseaux neuronaux artificiels (ANN) est l'une des méthodes les plus courantes d'apprentissage automatique.

Étant donné que les informations sur les caractéristiques physiques du procédé ne sont pas obligatoires, cette technique est considérée comme un modèle "boîte noire".

En effet, la façon dont un réseau de neurones artificiels fonctionne est similaire à la façon dont le système nerveux du cerveau humain fonctionne.

II.1. Intelligence Artificielle appliquée au MPPT

II.1.1 Réseaux de neurones artificiels (ANN)

Un neurone artificiel ressemble à un neurone biologique dans sa configuration la plus simple. Une technique d'ingénierie basée sur un neurone biologique est appelée neurone artificiel. Il accueille des entrées qui présentent les dendrites pour les neurones biologiques et à toute entrée un poids (synapses) est attribué.

La fonction de transfert qui permet de limiter la sortie du neurone (corps cellulaire) à un horizon de $[-1, 1]$ ou $[0, 1]$. Finalement, la composante de la sortie est représentée par l'axone.

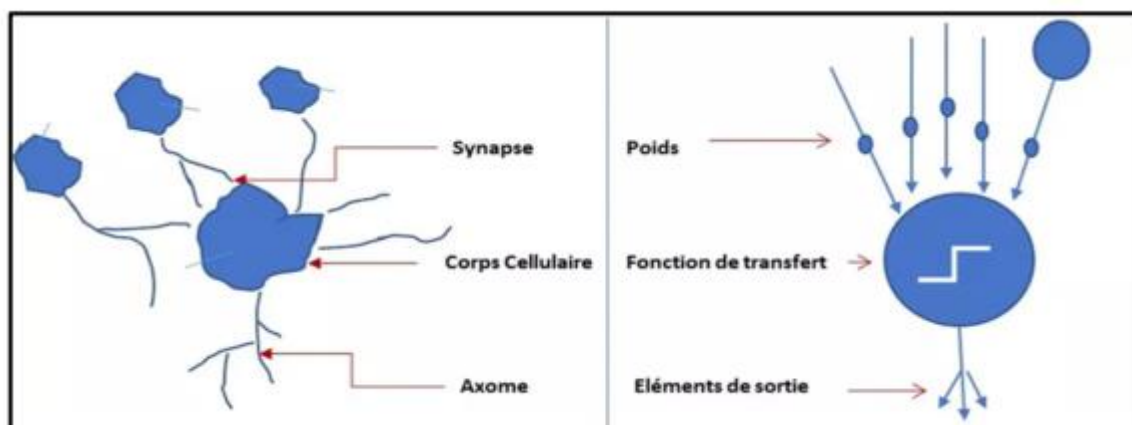


Figure (II.1) : Mise en correspondance d'un neurone biologique et d'un neurone artificiel [63].

II.1.1.1 Modélisation mathématique pour un neurone artificiel

L'équation II.1 et la (figure II.2) présentent la modélisation mathématique du neurone artificiel.

Par conséquent, la sortie y est exprimée de la manière suivante : [63]

$$y = \varphi (\sum_m (\omega_m \cdot x_m) + b) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- φ est la fonction d'activation.
- x_m est l'entrée élémentaire.
- ω_m sont les poids synaptiques.
- b représente le biais, qui est utilisé pour diminuer ou augmenter l'entrée de la fonction de transfert.

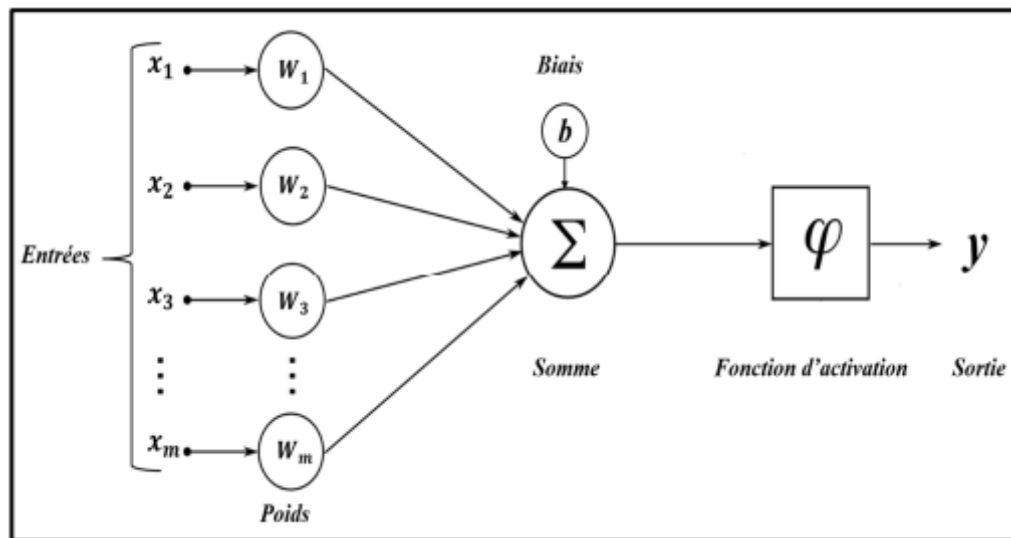


Figure (II.2) : Modélisation mathématique d'un neurone artificiel [63].

Les fonctions d'activation utilisées comprennent la linéaire, l'unité linéaire rectifiée (RELU), la binaire avec seuil, la rampe saturée, la gaussienne, la sigmoïde et l'hyperbolique tangente (Tanh). La figure ci-dessous présente les trois formes d'activation : le linéaire, l'unité linéaire rectifiée et l'hyperbolique tangente.

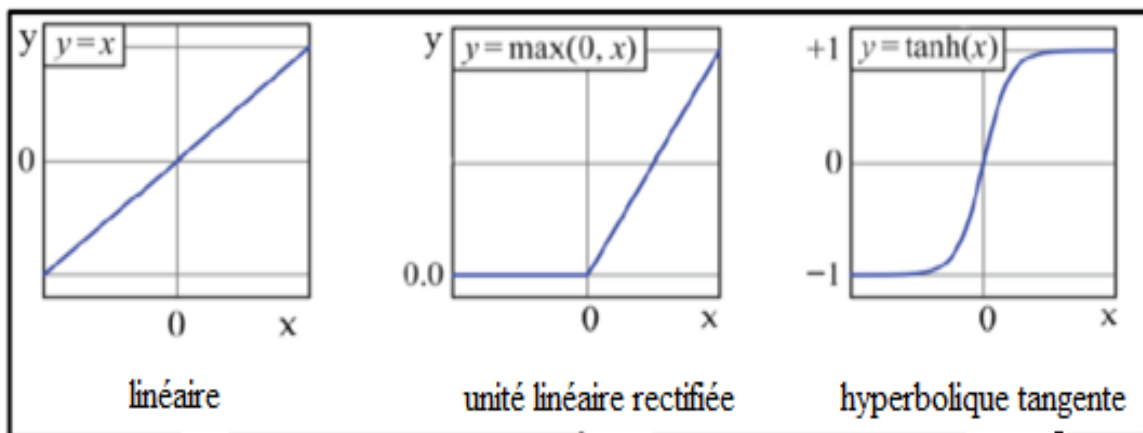


Figure (II.3) : Différents types de fonctions qui activent les réseaux de neurones [63].

II.1.1.2 Structure des réseaux de neurones

Le réseau neuronal comprend une ou de multiples couches cachées, une couche d'entrée et une couche de sortie. Les données sont reçues par la couche d'entrée. La couche de sortie d'un réseau de neurones répond ensuite à tous les mécanismes du réseau et les traitements doivent être effectués par la couche cachée. En outre, il existe deux catégories de réseaux distinctes :

Le réseau de neurones monocouche est constitué d'une seule couche de neurones, tandis que le réseau multicouche est constitué de plusieurs couches de neurones. Les réseaux neuronaux bouclés et non bouclés sont les deux types.

II.1.1.2.1 Réseaux non bouclés

Les réseaux non bouclés sont des réseaux statiques unidirectionnels sans retour en arrière. Ils sont également appelés « feed-forward » ou « réseaux de type perception ». La figure suivante présente leur structure.

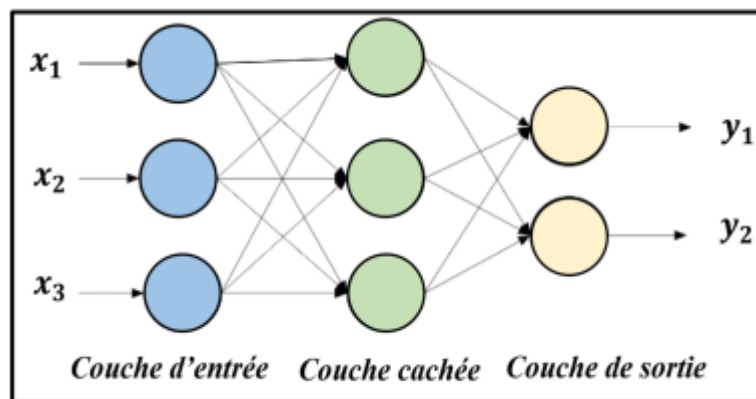


Figure (II.4) : Architecture des réseaux non bouclés [63].

II.1.1.2.2 Réseaux bouclés

Les réseaux bouclés, également appelés « feed-back » ou « réseaux récurrents », sont des réseaux dynamiques qui ont un retour en arrière. La figure suivante présente leur architecture.

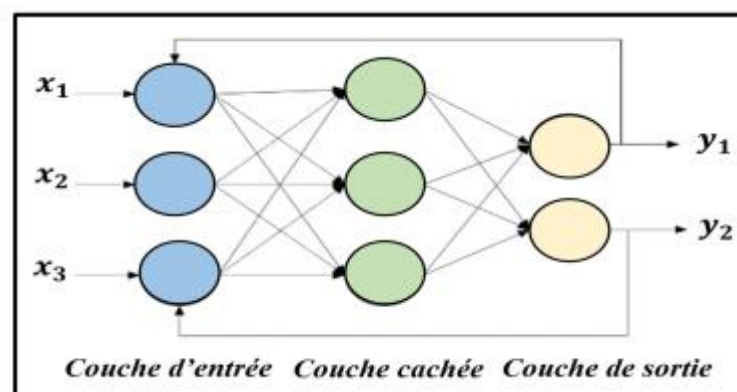


Figure (II.5) : Architecture des réseaux bouclés [63].

II.1.1.3 Apprentissage des réseaux de neurones artificiels (ANN)

L'apprentissage est une caractéristique importante de l'ANN, car il permet l'ajustement de ses paramètres pour que ses sorties soient suffisamment proches des sorties requises pour un ensemble d'échantillons appelés aussi ensemble d'apprentissage.

II.1.1.3.1 Modes d'apprentissages des ANN

Il existe principalement deux modes d'apprentissage, tels que l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

a- Apprentissage supervisé :

L'apprentissage supervisé nécessite des associations entrée/sortie au réseau pour orienter son comportement vers un autre comportement de référence. Par conséquent, dans ce type d'apprentissage, le réseau compare à chaque fois les résultats obtenus aux résultats souhaités.

b- Apprentissage non supervisé :

Pour l'apprentissage non supervisé, il ne faut que des entrées, qui sont regroupées pour créer des classes. Ainsi, dans ce type d'apprentissage, le réseau doit s'organiser pour produire la sortie souhaitée.

II.1.1.3.2 : Méthodes d'apprentissage des ANN

Il existe de multiples méthodes d'apprentissage, que l'on peut répartir en deux catégories principales.

• Algorithmes basés sur la rétro propagation du gradient :

Ces algorithmes sont généralement combinés à la méthode classique de rétro propagation du gradient, ainsi qu'à l'algorithme de Levenberg-Marquardt et à la méthode classique du gradient conjugué.

• Algorithmes qui n'utilisent pas de la rétro propagation du gradient :

Les autres méthodes, comme celle de Newton ou quasi-Newton.

L'apprentissage est généralement effectué avec un processus spécifique pour calculer mathématiquement les dérivées des données d'entrée, mettre à jour les paramètres des vecteurs de poids de chaque couche et les adapter de manière à minimiser l'erreur quadratique globale sur l'ensemble d'apprentissage[63].

L'erreur quadratique globale E est donnée par l'expression suivante :

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_k e(k)^2 \quad \text{II.2}$$

Avec :

- . $e(k)$: l'erreur entre la valeur désirée et la sortie obtenue.
- . k : est le nombre d'itérations.

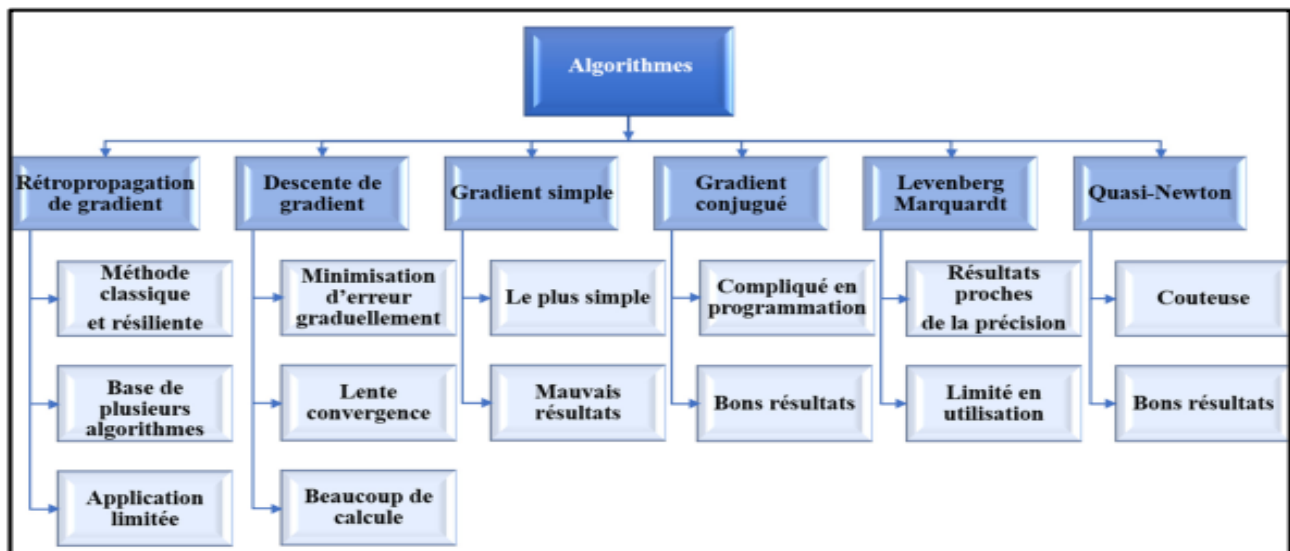


Figure (II.6) : Algorithmes d'apprentissage (ANN) [63].

II.1.1.4 Intérêts et limites des réseaux de neurones

En raison de leurs nombreux avantages, les ANN sont fréquemment utilisées dans divers domaines, tels que :

- La capacité de représenter tout type de fonction, qu'elle soit complexe ou simple, soit linéaire ou non linéaire.
- L'apprentissage à partir d'exemples représentatifs est automatique et facultatif.
- Les réseaux de neurones sont généralement connus pour leurs rapidités. Ils peuvent prédire et classer rapidement et effectuer des calculs complexes.
- En ajoutant des neurones supplémentaires à la couche cachée, ils sont résistants au bruit et peuvent compenser le manque des données et produire des résultats précis.
- Ils n'exigent pas beaucoup de travail personnel comme l'analyse statistique classique et ne nécessitent pas également des connaissances en mathématiques ou en statistique informatique.
- Adaptation aux problèmes non structurés : ils peuvent trouver les relations entre les variables sans savoir la fonction à estimer avant.

Il est intéressant de noter que les techniques basées sur les réseaux de neurones ANN ont fait preuve de capacités et performance exceptionnelles, mais il est également important de souligner qu'ils présentent des inconvénients tels que :

- L'absence de la technique standard servant à définir la structure d'un réseau.
- Les réseaux de neurones sont des boîtes noires où les connaissances sont floues pour l'utilisateur et rendre l'interprétation des résultats et la compréhension de comment le réseau a pris ses décisions une tâche difficile.

- Le sur apprentissage est un problème fréquent pour les modèles de réseaux neuronaux, appelés sur apprenti « Over fitting ».

La capacité du réseau ANN est limitée à un certain niveau d'erreur d'échantillonnage.

Cela indique que l'apprentissage est fini et que la valeur finale peut ne pas être la meilleure.

II.1.2 Algorithmes évolutionnaires (GA, PSO)

Les algorithmes évolutionnaires comme l'algorithme génétique (GA) et l'optimisation par essaim particulaire (PSO) sont des techniques avancées appliquées au MPPT (Maximum Power Point Tracking) des systèmes photovoltaïques pour améliorer la recherche du point de puissance maximale, notamment en présence de conditions variables ou de multi-pics.

II.1.2.1 L'algorithme d'essaims de particules (PSO)

En anglais (**Particle Swarm Optimization**).

La (PSO) a été développée par deux scientifiques le socio-psychologue "James Kennedy" et l'ingénieur électricien "Russel Eberhart" en 1995 pour la résolution des problèmes à variables continues.

Cet algorithme a été modélisé en se basant sur le comportement social ou pour plus de précision sur les interactions sociales entre des "agents" nommées "particules" et qui représente un "essaim".

L'optimisation par essaim particule optimise les problèmes en utilisant l'itération de la solution candidate, puis nous changeons la position et la vitesse et vérifions à quel point nous sommes proches pour résoudre le problème et pour connaître la meilleure solution, puis mettons à jour l'autre particule au fur et à mesure que nous optimisons le problème, cet algorithme peut rechercher un grand espace de solutions candidates. Tout d'abord, l'algorithme commence par générer des particules initiales avec leurs vitesses aléatoirement comme vous pouvez le voir dans l'organigramme (**figure II.7**), afin d'initialiser une population dans notre domaine de recherche.

Ensuite, à l'intérieur d'une boucle qui se répète jusqu'à convergence on détermine les meilleures positions de la particule, du voisin et aussi de l'essaim qui va nous permettre de mettre à jour la vitesse et la position de chaque particule pour trouver la meilleure solution dans notre domaine de recherche [64].

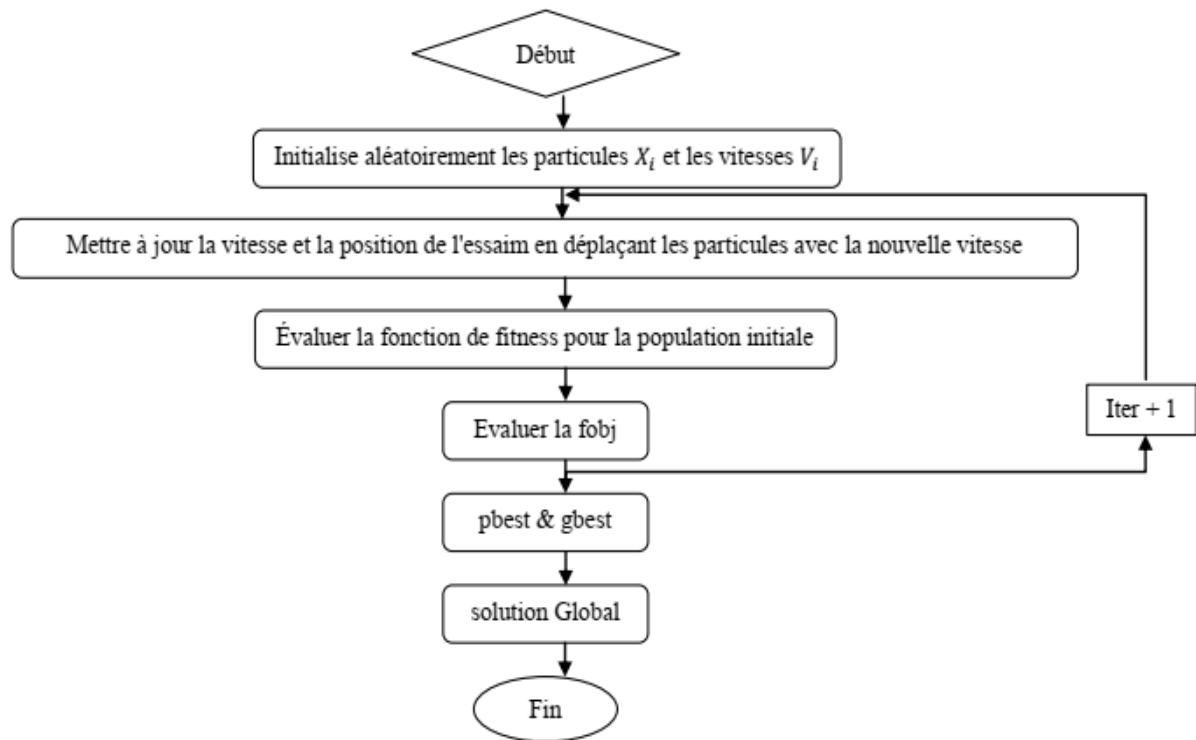


Figure (II.7) : Organigramme PSO [64].

II.1.2.2 Algorithme Génétique

L'algorithme génétique est un algorithme évolutionnaire qui a pour but de trouver une solution approchée des problèmes d'optimisation dont la solution est inconnue dans un temps raisonnable.

De nos jours les scientifiques et les ingénieurs ont un énorme volume de données, et qu'ils ont besoin d'une solution dans le plus bref délai c'est pourquoi ils ont créé cet algorithme basé sur l'évolution génétique dans la nature. L'algorithme génétique ne vérifie pas toutes les possibilités mais c'est un moyen rapide de trouver une très bonne solution pour des problèmes qui ont beaucoup de données.

L'algorithme génétique se résume sur trois étapes essentielles sélection-crossover-mutation comme vous pouvez le constater dans l'organigramme (**figure II.8**).

D'abord une population de données est générée aléatoirement dans l'espace de recherche chaque individu appelés chromosome, a ses propre caractéristiques nommés gènes. Ensuite, nous passons à la première étape essentielle de l'algorithme qui est la sélection qui contient deux critères de sélection ; l'ordonnancement qui consiste de classifier la population par ordre de performance en utilisant la fonction de fitness de la problématique étudiée pour évoluée les

chromosomes, et la roue de fortune qui consiste à attribuer pour chaque chromosome une probabilité proportionnelle à sa fonction d'adaptation.

Après avoir choisi les meilleurs parents de notre population on passe à la deuxième étape qui est le croisement et qui consiste de générer deux nouveaux points en échangeant un certain nombre de gènes entre les parents chromosomes en se basant sur une probabilité de croisement.

Enfin nous passons à la dernière étape de l'algorithme génétique qui est la mutation qui consiste de faire changer aléatoirement certaines caractéristiques ou certain gène du nouveau chromosome en se basant sur la probabilité de mutation afin de créer la nouvelle génération, ce processus se répète jusqu'à atteindre le nombre de génération fixé ou atteindre l'optimum souhaité[64].

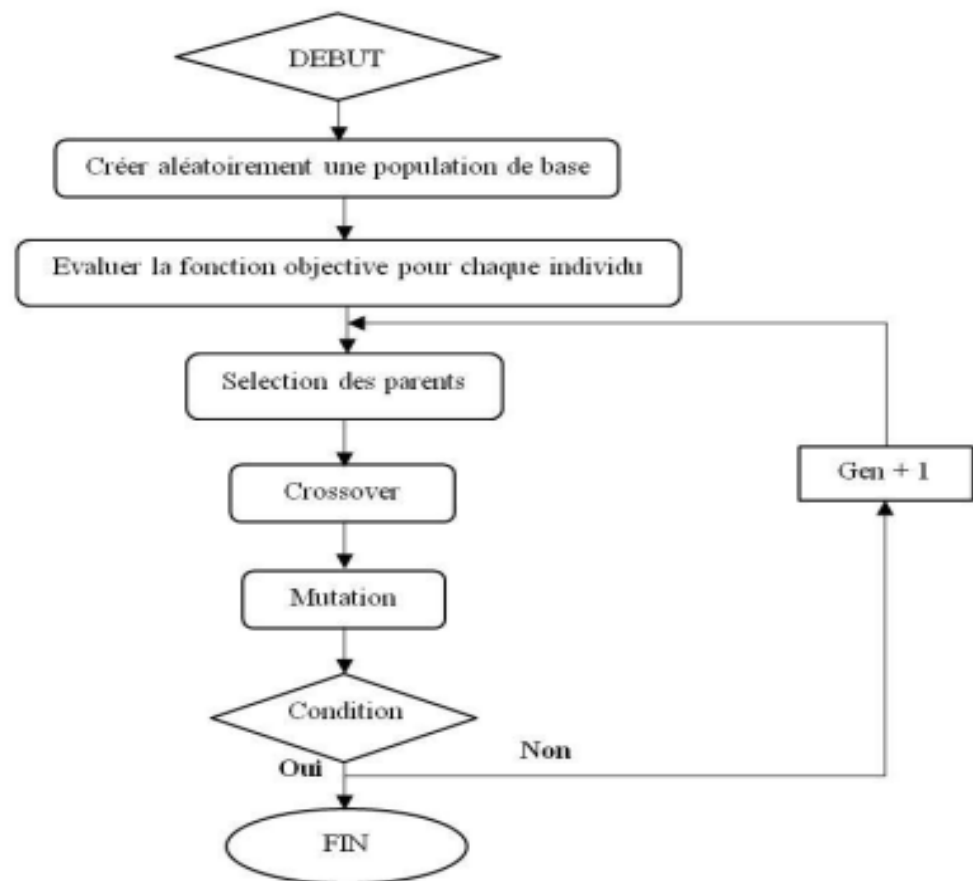


Figure (II.8) : Organigramme GA [64].

Ces algorithmes surpassent souvent les méthodes classiques (Perturb & Observe, Incrément de conductance) en termes de précision, rapidité et stabilité dans le suivi du MPP, notamment dans des environnements dynamiques.

En résumé, GA et PSO sont des approches intelligentes qui optimisent la commande MPPT en adaptant dynamiquement la tension ou le courant du système PV pour maximiser la puissance extraite, avec une meilleure gestion des conditions non linéaires et changeantes [64].

II.1.3 Logique floue (Fuzzy Logic Control)

L'application de l'intelligence artificielle, en particulier la logique floue (Fuzzy Logic Control), au suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques permet d'améliorer significativement les performances par rapport aux méthodes classiques.

Comme mentionné au chapitre I, la méthode P&O-MPPT est une méthode populaire pour le PV-MPPT en raison de son faible coût et de sa mise en œuvre simple. Cependant, elle pose de nombreux défis, tels qu'une vitesse de convergence plus faible, une oscillation élevée autour d'un point de puissance maximale MPP, et un problème de dérive associé à un changement rapide de l'irradiance.

Plusieurs modifications ont été introduites sur la base d'une courbe puissance-tension (P-V), mais elles sont considérées comme des solutions insuffisantes pour résoudre tous ces problèmes.

Par conséquent, des techniques d'intelligence artificielle basées sur le MPPT ont été proposées pour résoudre les problèmes importants des méthodes MPPT classiques. De plus, ces techniques n'ont pas besoin de paramètres précis ou de mathématiques complexes pour gérer le système.

En particulier, la technique FLC-MPPT est l'un des contrôleurs les plus puissants pour un système PV en raison de sa vitesse de convergence élevée et de sa faible fluctuation autour du MPP. De plus, elle ne nécessite pas de données d'apprentissage, ce qui lui permet de fonctionner pour différents types de modules PV avec la même conception MPPT. Cependant, les principaux inconvénients sont le problème de dérive susmentionné associé à la variation de l'irradiance et une mise en œuvre complexe par rapport aux méthodes MPPT classiques.

II.1.3.1 La logique floue

II.1.3.1.1 Définition de la logique floue

La logique floue a été créée par le Professeur Lofti A. Zadeh en 1965 à partir de sa théorie des sous ensembles flous. Les entités floues sont une façon mathématique de représenter l'imprécision du langage humain, elles peuvent être considérées comme une application de la théorie classique des ensembles. La logique floue est appelée aussi "logique linguistique" en raison du fait que ses valeurs de vérité sont des mots du vocabulaire courant : "plutôt vrai, plutôt faux, loin, assez loin, assez près, fort, faible...". La logique floue est utilisée pour étudier la représentation des connaissances incertaines, pour approximer le raisonnement et pour modéliser les notions vagues du langage naturel.

La logique floue fonctionne en désignant et en appliquant des règles qui combinent les entrées d'un expert avec les sorties souhaitées. Il existe généralement quatre étages déterminants de la logique floue : l'interface de fuzzification, la base de connaissance, le bloc d'inférence et l'interface de défuzzification. Ces quatre blocs sont expliqués ci-dessous. La (figure II.9) montre la structure principale d'un système de logique floue [1].

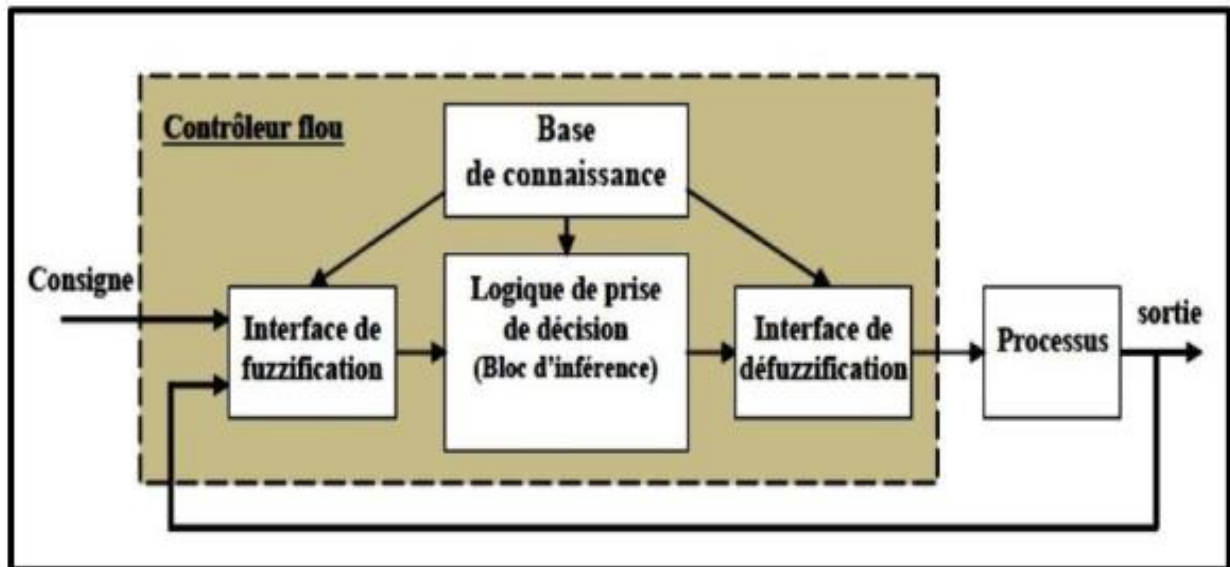


Figure (II.9) : Structure principale d'un contrôleur logique floue [1].

- L'interface de fuzzification transforme les entrées en des variables linguistiques que le bloc d'inférence peut ensuite utiliser pour désigner et suivre des règles.
- La base de connaissances comporte des règles Si-ALORS. Ces règles comprennent généralement des quantifications en logique floue effectuées par un expert afin d'atteindre un contrôle optimal.
- Le bloc d'inférence imite de manière optimale la prise de décision des experts en comprenant les informations et en les appliquant, toujours dans le but de contrôler de manière optimale les facteurs d'entrée.
- L'interface de défuzzification transforme les résultats du bloc d'inférence en entrées numériques utilisables qui seront des entrées du système (processus).

II.1.3.1.2 La fuzzification

La fuzzification est un processus par lequel des valeurs clairement délimitées sont rendues floues. Pour réaliser la fuzzification, il faut d'abord définir les variables et les termes linguistiques à utiliser. Les valeurs numériques ne sont pas utilisées dans ce processus ; ce sont plutôt des mots et/ou des phrases issues d'un langage naturel qui constituent les variables d'entrée et de sortie. Pour démarrer le processus, une variable linguistique spécifique est décomposée en

ses termes linguistiques composites. Prenons, par exemple, un système de panneau photovoltaïque. Dans ce système, l'irradiation solaire (I_r) est la variable linguistique qui désigne la quantité de lumière projeté sur le panneau, qui peut être décrite en termes linguistiques généraux comme "grande" ou "petite". En partant de ce point, irradiation (I_r) = {trop grande, grande, moyenne, petite, trop petite} peut alors servir d'ensemble de décomposition pour la variable linguistique irradiation. Les caractéristiques individuelles de cette décomposition sont étiquetées comme des termes linguistiques et représentent une partie des valeurs totales de l'irradiation. Ensuite, afin de traduire les données d'entrée qui sont numériques en termes linguistiques flous, des fonctions d'appartenance seront appliquées [1].

II.1.3.1.3 La fonction d'appartenance

La fonction d'appartenance est un moyen d'exprimer graphiquement le niveau de participation des entrées. Elle attribue une valeur aux entrées qui peuvent également servir de chevauchements fonctionnels entre les entrées. Ce faisant, la fonction d'appartenance influence fortement la réponse de sortie. Un facteur déterminant de la fonction d'appartenance est sa configuration c'est-à-dire sa forme. Les différentes formes possibles sont les suivantes : gaussienne, triangulaire, trapézoïdale, en cloche généralisée et sigmoïdale. Parmi celles-ci, la forme triangulaire est la plus couramment utilisée, et le degré de la fonction d'appartenance se situe généralement dans la plage [0 1]. Les définitions et les graphiques des différentes fonctions d'appartenance sont illustrés à la (figure II.10).

En outre, les fonctions d'appartenance désignent les différents éléments d'un ensemble comme étant soit discrets, soit continus.

La fonction d'appartenance de forme discrète se présente sous la forme d'une liste, tandis que la forme continue est une fonction mathématique, voir un programme. Généralement, la forme discrète est plus couramment appliquée. Une fonction d'appartenance triangulaire comprend des segments de ligne droite et elle est facile et pratique à appliquer dans le cadre d'une commande floue. Cependant, l'approche de la fonction d'appartenance gaussienne est plus adaptée lorsqu'une sortie lisse et continue est souhaitée [1].

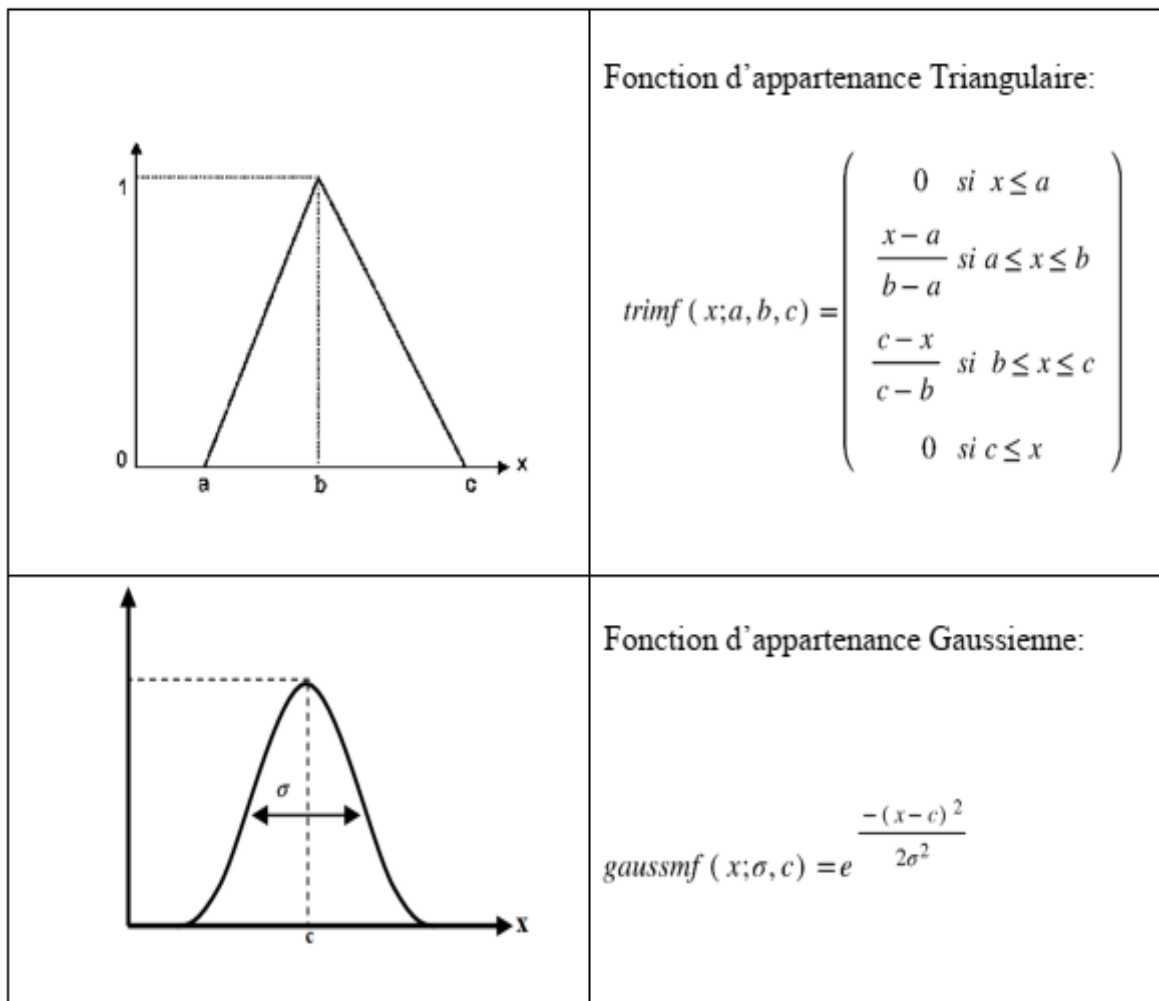


Figure II.10 : Graphiques des différentes fonctions d'appartenance d'un contrôleur logique floue [1].

II.1.3.1.4 Les règles floues

Des règles floues sont développées pour contrôler les variables de sortie dans un système qui comporte un contrôleur logique floue. L'objectif principal des systèmes flous est de créer une base théorique permettant d'établir des hypothèses et des associations logiques entre des termes de référence inexacts. Dans les systèmes technologiques de logique floue, on appelle cela le raisonnement approximatif. Les principaux sujets et verbes de la logique floue sont constitués d'ensembles flous et d'opérateurs flous, ou d'énoncés de règles dites "Si-Alors". Ces derniers sont appliqués lors de l'élaboration des énoncés conditionnels "Si-Alors" qui constituent l'identité et la base de la logique floue. Ainsi, par exemple, si une règle floue affirme que si x est A , alors y doit être B si A et B sont des valeurs désignées par des ensembles flous stipulant une plage de X et Y , respectivement. Dans cette règle, la partie " Si " est considérée comme l'antécédent ou la prémisse, tandis que la partie " Alors " est désignée comme le conséquent conditionnel ou la

conclusion. En fin de compte, une règle floue est, à la base, une règle Si-Alors qui comporte à la fois des conditions et une conclusion. Le processus de contrôle par logique floue part d'un ensemble de données d'entrée provenant d'un nombre quelconque de capteurs (tension, courant, irradiation, température) ; ces données sont ensuite introduites dans le système de contrôle. Simultanément, les valeurs de ces variables d'entrée subissent une modification appelée fuzzification, qui transforme les valeurs discrètes en une large gamme de valeurs. Les entrées floues sont ensuite mesurées par rapport à une série de règles de production, et les règles sélectionnées génèrent les sorties. Enfin, les données de sortie sont défuzzifiées par des commandes de contrôle [1].

II.1.3.1.5 La défuzzification

Le processus de défuzzification est un moyen de transformer la sortie floue du bloc d'inférence en une sortie clairement définie en appliquant des fonctions d'appartenance telles que celles utilisées lors de la fuzzification. Les exemples d'approches de défuzzification comprennent le centre de gravité (COG), la bissectrice de surface (BOA), la moyenne pondérée, la moyenne du maximum (MOM), le premier des maxima et le dernier des maxima. Bien que chaque procédure de défuzzification soit basée sur les propriétés de l'application, le choix d'une stratégie de défuzzification appropriée est basé sur l'expérience [1].

II.2. Méthodologie des approches hybrides

Les approches hybrides MPPT (Maximum Power Point Tracking) basées sur l'intelligence artificielle (IA) combinent différentes techniques ou algorithmes pour optimiser le suivi du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. Ces méthodes visent à améliorer la précision, la rapidité et la robustesse du MPPT, en particulier dans des conditions environnementales variables et difficiles.

L'approche hybride en MPPT consiste généralement à combiner des techniques traditionnelles (par exemple, Perturb & Observe, Incremental Conductance) avec des algorithmes IA (tels que les réseaux de neurones, les algorithmes évolutionnaires, ou les fuzzy logic). La synergie permet de tirer parti de la rapidité et de la simplicité des méthodes classiques tout en bénéficiant de la capacité d'adaptation et de prédiction des modèles IA.

II.2.1 Principe d'hybridation des techniques MPPT

Le principe de l'hybridation repose sur l'intégration de plusieurs méthodes pour compenser leurs limites respectives :

- Combinaison de méthodes classiques et intelligentes/optimisées

***Méthodes classiques** : P&O, Incrément de conductance, qui sont simples, rapides mais peuvent osciller autour du MPP ou être moins efficaces en cas de variations rapides.

***Méthodes intelligentes :** Logique floue (FLC), réseaux de neurones artificiels (ANN), qui gèrent mieux l'imprécision et les non-linéarités du système.

***Méthodes optimisées :** Algorithmes métaheuristiques comme PSO (Particle Swarm Optimization) ou GWO (Grey Wolf Optimization) qui améliorent la recherche du MPP en optimisant le réglage des paramètres.

- Approche séquentielle ou parallèle :

Approche séquentielle : un algorithme traditionnel est utilisé pour le suivi principal, tandis que l'IA ajuste ou affine la recherche.

Approche parallèle : deux ou plusieurs algorithmes tournent simultanément, et leur résultat est combiné pour déterminer le MPP optimal.

- Utilisation d'un superviseur ou d'un contrôleur hybride :

Un contrôleur basé sur l'IA supervise ou contrôle la stratégie MPPT, en tenant compte des données environnementales en temps réel (irradiance, température).

- Adaptabilité et apprentissage en ligne :

Les systèmes IA peuvent apprendre et s'adapter en temps réel, améliorant ainsi la performance du MPPT face à des conditions changeantes et non linéaires.

- Avantages des approches hybrides MPPT basées sur l'IA

*** Meilleure précision :** Capacité à localiser plus précisément le MPP.

*** Réactivité accrue :** Réagit rapidement aux variations rapides de l'irradiance ou de la température.

*** Robustesse :** Fonctionne efficacement dans des conditions environnementales complexes et imprévisibles.

*** Optimisation continue :** Capacité d'apprentissage pour améliorer la performance au fil du temps.

II.2.2 Association des algorithmes MPPT avec l'IA

Les approches hybrides pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) associent les algorithmes classiques MPPT avec des techniques d'intelligence artificielle (IA) pour améliorer la précision, la rapidité de convergence et la robustesse face aux variations rapides des conditions environnementales.

II.2.2.1 Association d'algorithmes MPPT classiques et IA

On combine des méthodes comme Perturb & Observe (P&O) avec des contrôleurs à logique floue (FLC) ou des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour corriger les limites des algorithmes traditionnels et s'adapter dynamiquement aux changements de conditions (ensoleillement, température) [1].

II.2.2.2 Contrôleur flou adaptatif

Par exemple, un contrôleur flou ajuste dynamiquement le pas de perturbation du cycle de commande en fonction des variations de puissance, ce qui améliore la précision et la stabilité du suivi MPPT dans les systèmes hybrides photovoltaïque/éolien [65].

II.2.2.3 Réseaux de neurones artificiels

Les RNA sont utilisés pour modéliser la relation complexe entre les variables d'entrée (tension, courant, température) et la commande optimale du rapport cyclique du convertisseur, permettant une meilleure adaptation aux conditions changeantes sans nécessiter un modèle physique précis du système [56].

II.2.2.4 Algorithmes bio-inspirés et optimisation

Des algorithmes comme Particle Swarm Optimization (PSO) ou Seagull Optimization Algorithm (SOA) sont intégrés pour optimiser la recherche du point de puissance maximale, offrant une meilleure vitesse de convergence et une robustesse accrue face aux ombrages partiels et fluctuations rapides [66].

II.2.2.5 Validation expérimentale et simulation

Ces approches hybrides sont souvent validées par simulation Matlab/Simulink et sur bancs d'essai pour évaluer leur performance énergétique, leur rapidité de suivi et leur capacité à gérer des conditions météorologiques variables [66].

II.2.2.6 Avantages d'association des algorithmes MPPT avec l'IA

a) Amélioration de la précision du MPPT : Utiliser des réseaux neuronaux pour prédire le point de puissance maximum en fonction des mesures d'entrée (irradiance, température, tension, courant).

Le réseau peut ajuster dynamiquement les paramètres de l'algorithme MPPT pour accélérer la convergence.

b) Gestion adaptative : Lors de conditions variables ou bruitées, l'IA peut décider quand utiliser un MPPT classique ou un algorithme basé sur l'apprentissage pour une meilleure adaptation.

c) Prédiction et optimisation : L'IA peut prévoir la performance future du système en fonction des tendances météorologiques, permettant une planification proactive.

d) Réduction du temps de convergence : En utilisant une IA pour fournir une estimation initiale du point de puissance maximale, le MPPT peut converger plus rapidement, améliorant ainsi l'efficacité globale.

II.2.3 Comparaison des performances des différentes approches

Les approches hybrides combinant algorithmes MPPT classiques et techniques d'intelligence artificielle présentent des performances variables selon leur conception et les conditions d'application. Voici une analyse comparative basée sur les études récentes.

Pour cette partie, l'objectif est de faire une étude comparative entre les performances de différentes méthodes de MPPT (P&O, INC, FCC, FCO, Hill Climbing, ICI, ADC, P&O et INC avec pas variable) sous des conditions climatiques standards et variables.

II.2.3.1 Fonctionnement sous des conditions climatiques standards

Les conditions atmosphériques choisies dans cette partie sont les conditions standards de fonctionnement (un rayonnement de 1000 W/m^2 et une température de 25°C) donc la puissance maximale désirée en sortie du GPV est 80 W . Les résultats obtenus sont donnés par la **figure (II.11)**.

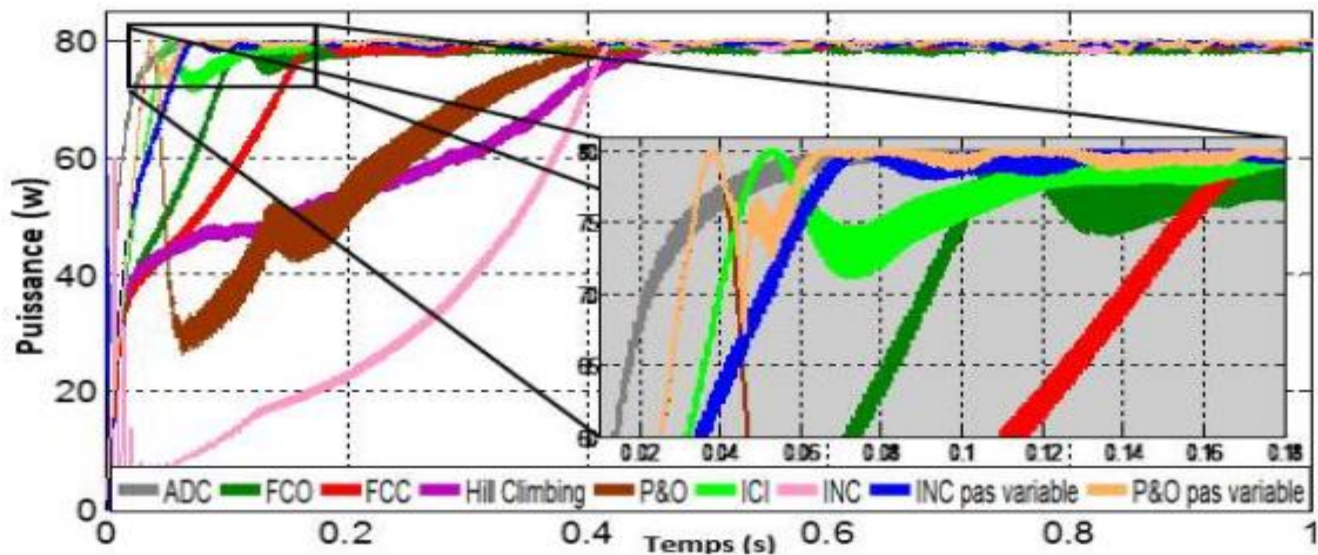


Figure (II.11) : Puissance à la sortie de GPV avec différentes commandes MPPT sous STC [67].

II.2.3.2 Fonctionnement avec des changements brusques du niveau de rayonnement

La **Figure (II.12)** représente les résultats de simulation de différentes commandes MPPT avec des changements brusques de l'éclairement solaire qui varie de 1000 W/m^2 à 700 W/m^2 .

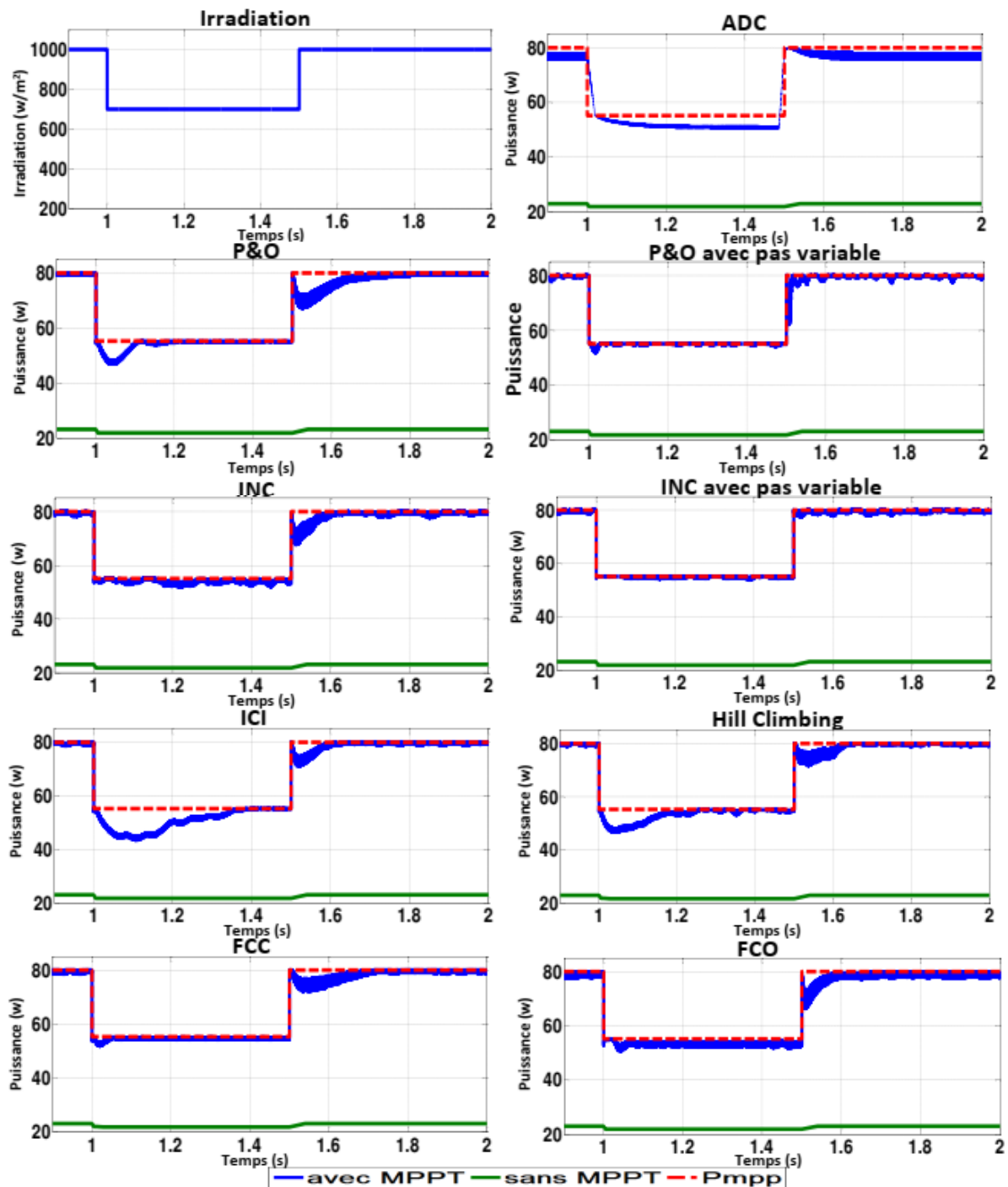


Figure (II.12) : Puissance à la sortie de GPV avec différentes commandes MPPT sous des changements brusques du niveau de rayonnement [67].

II.2.3.3 Fonctionnement avec des changements progressif du niveau de rayonnement

La Figure (II.13) représente les résultats de simulation de différentes commandes MPPT avec des changements progressifs de l'éclairement solaire qui varie de 1000W/m² à 700W/m².

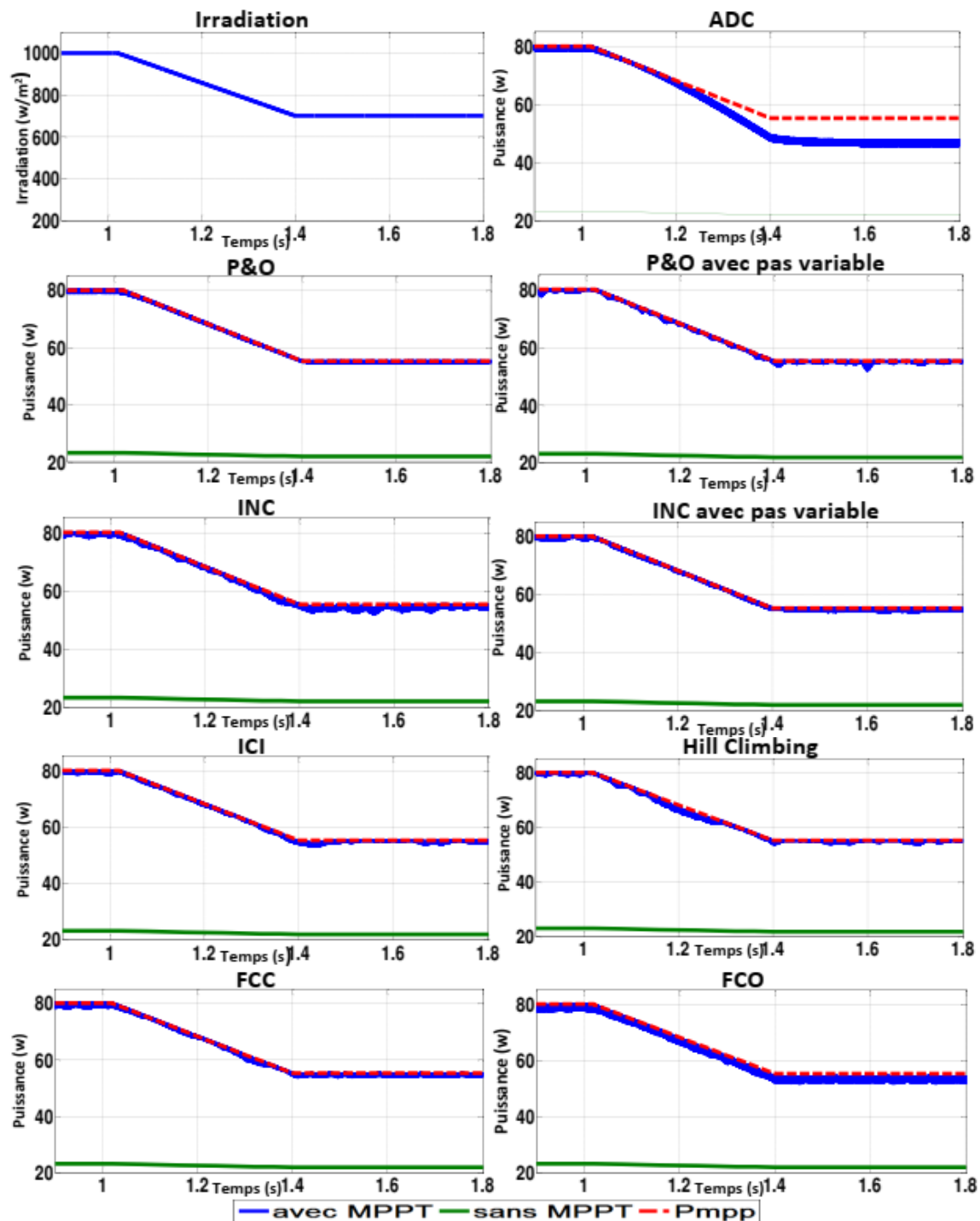


Figure (II.13) : Puissance à la sortie de GPV avec différentes commandes MPPT sous des changements progressifs du niveau de rayonnement [67].

II.2.3.4 Discussion des résultats

- L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En générale, cet algorithme dépend fortement des conditions initiales et il présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM et son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement.
- L'algorithme INC semble une amélioration de l'algorithme P&O. En effet, il se comporte mieux lors d'un changement rapide des conditions météorologiques.

Cependant, c'est un algorithme plus compliqué que le précédent.

- Les algorithmes basés sur la mesure d'une fraction de tension du circuit ouvert (FCO) ou d'une fraction de courant de court-circuit (FCC) sont très simples et faciles à implémenter. L'inconvénient majeur est les pertes d'énergie et l'arrêt de transfert de puissance lorsqu'on mesure les grandeurs V_{oc} et I_{cc} .
- L'algorithme Hill Climbing est largement utilisé dans les systèmes PV en raison de sa simplicité et parce qu'il ne nécessite pas d'étude ou de modélisation préalable des caractéristiques de la source et peut tenir compte de la dérive des caractéristiques résultant du vieillissement, de l'ombrage ou d'autres irrégularités de fonctionnement. Cependant, son inconvénient est son mauvais comportement suite à un changement climatique.
- L'algorithme ADC est un algorithme très rapide et simple mais son inconvénient majeur est la variation de rendement avec la variation d'irradiation.
- Par rapport à l'algorithme P&O, L'algorithme ICI est un algorithme utilise un seul capteur en plus il est rapide et stable mais son inconvénient est son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement.
- Les algorithmes P&O et INC avec pas variable son des algorithmes robuste, très rapide et efficace. En effet, ces algorithmes fonctionnent au point optimal presque sans oscillations.

Le tableau suivant résume les principales spécifications des différents algorithmes MPPT précédemment étudiés. Nous avons évalué et comparé ces algorithmes en termes de connaissance technique des paramètres du panneau PV, complexité, rapidité et précision.

MPPT Technique	η MPPT (%)	Connaissance technologique du GPV nécessaire	Vitesse de convergence	Complexité	Nombre et type de capteurs
P&O (pas fixe)	99.3%	Non	Moyenne	Basse	1 Tension 1 Courant
P&O (pas variable)	99.7%	Non	Très rapide	Basse	1 Tension 1 Courant
INC (pas fixe)	99.75%	Non	Moyenne	Moyenne	1 Tension 1 Courant
INC (pas variable)	99.75%	Non	Très rapide	Moyenne	1 Tension 1 Courant
Hill Climbing	99.3%	Non	Moyenne	Basse	1 Tension 1 Courant
FCO	96%	Oui	Rapide	Basse	1 Tension
FCC	97.9%	Oui	Rapide	Basse	1 Courant
ICI	99.8%	Non	Rapide	Moyenne	1 Tension
ADC	variable	Non	Très rapide	Moyenne	1 Tension 1 Courant

Tableau II.1 : Caractéristiques majeures des commandes MPPT [67].**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous examinons les approches hybrides de recherche du point de puissance maximale (MPPT) dans les installations solaires, qui fusionnent des stratégies d'intelligence artificielle (IA) avec des techniques conventionnelles afin d'optimiser l'efficacité et la précision. Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) prouvent leur aptitude à représenter des relations complexes sans avoir besoin de connaître au préalable le système physique, tandis que les algorithmes évolutifs comme PSO et GA se basent sur des processus adaptatifs inspirés de la

nature pour trouver la solution parfaite. Par ailleurs, la logique floue (FLC) se présente comme un instrument performant pour gérer l'incertitude et les modifications brusques des conditions environnementales.

La puissance des méthodes hybrides est ancrée dans leur capacité à pallier les lacunes de chaque technique prise isolément. L'association de techniques traditionnelles (comme P&O et INC) avec des approches d'intelligence artificielle optimise la rapidité et diminue les fluctuations autour du point de puissance maximale (MPP), notamment lors de modifications brusques d'ensoleillement ou de température. Le tableau II.1, qui présente des comparaisons, indique également que les techniques à pas variables (comme P&O et INC) surpassent les autres algorithmes en matière d'efficacité (99,7 %) et de vitesse.

A blue scroll graphic with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a slight shadow effect.

Chapitre III :

**Conception et
simulation d'un
système hybride
MPPT basé sur
l'IA**

III.1 Présentation de l'environnement de simulation

Ce projet propose un système intelligent de suivi du point de puissance maximale (MPPT) combinant l'algorithme classique Perturber et observer (P&O) avec des techniques d'intelligence artificielle (logique floue et réseaux de neurones). L'objectif est d'améliorer l'efficacité des installations photovoltaïques en :

Accélérant la convergence vers le point optimal

Réduisant les oscillations autour du MPP

S'adaptant dynamiquement aux variations climatiques

La solution hybride sera modélisée sous MATLAB/Simulink puis validée par simulation pour différents scénarios d'exploitation réelle [68].

- Panneaux et configurations.

Prochaines étapes :

- 1 Implémentation des équations du modèle PV dans Simulink.
- 2 Validation par comparaison avec des données de constructeur.
- 3 Intégration avec un convertisseur DC-DC et algorithme MPPT.

III.1.1 Modèle Simulink de PV array

Ce projet présente la modélisation sous Simulink d'un champ photovoltaïque (PV array) pour étudier ses caractéristiques électriques et optimiser son rendement. L'objectif est de créer un modèle précis et paramétrable qui reproduit le comportement réel des panneaux solaires sous différentes conditions d'ensoleillement et de température.

- Ce modèle servira de base pour :

Analyser les courbes I-V et P-V

Tester des algorithmes MPPT (P&O, Fuzzy logic et artificial neural network (ANN).)

Évaluer la performance du système dans des scénarios réels

Une approche modulaire permettra de facilement adapter le modèle à différents types de panneaux et configurations [69][70].

La (**figure III.1**) présente le modèle Simulink du sous-système photovoltaïque. Les (**figures III.2 et III. 3**) illustrent les caractéristiques PV et I-V du panneau photovoltaïque en fonction de la température et de l'irradiance. Les résultats obtenus par le modèle photovoltaïque correspondent parfaitement aux données fournies par les caractéristiques PV et I-V du panneau photovoltaïque. Nous avons observé une augmentation de la puissance avec l'augmentation de

l'irradiance et une diminution de la puissance avec la température. Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque utilisé sont résumées dans le **Tableau (III.1)**.

 Block Parameters: PV Array

PV array (mask) (parameterized link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series.
 Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters

Advanced

Array data

Parallel strings

Series-connected modules per string

Module data

Module:

User-defined

Maximum Power (W)

Cells per module (Ncell)

Open circuit voltage Voc (V)

Short-circuit current Isc (A)

Voltage at maximum power point Vmp (V)

Current at maximum power point Imp (A)

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)

Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)

Display I-V and P-V characteristics of ...

array @ 25 deg.C & specified irradiances

Irradiances (W/m2)

Plot

Model parameters

Light-generated current IL (A)

Diode saturation current IO (A)

Diode ideality factor

Shunt resistance Rsh (ohms)

Series resistance Rs (ohms)

Tableau (III.1) : Caractéristiques électriques du module PV

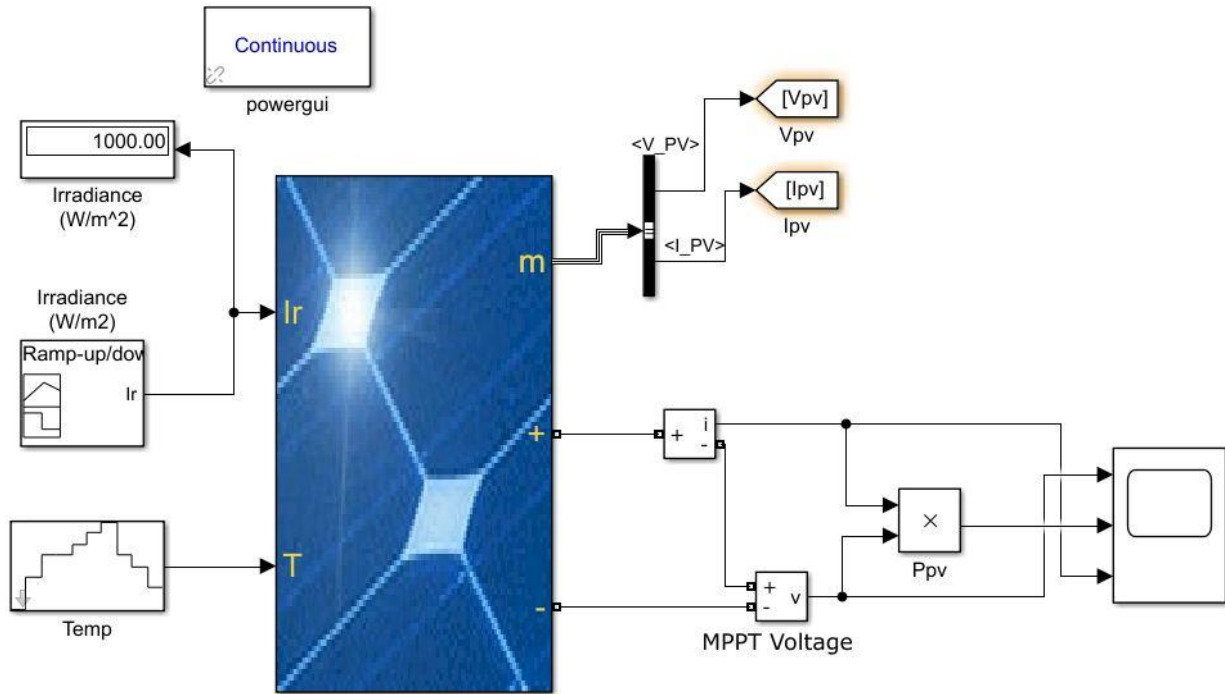


Figure (III.1) : Modèle Simulink d'un parc photovoltaïque sans charge.

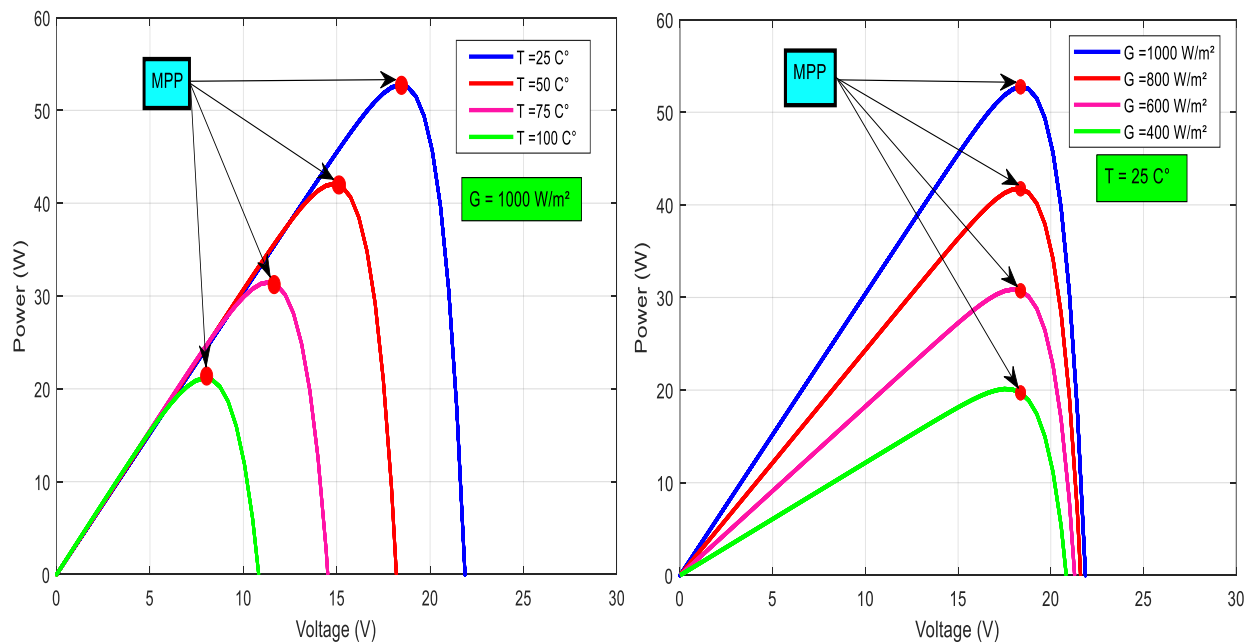


Figure (III.2) : Caractéristiques P-V du réseau PV avec la variation de l'irradiance.

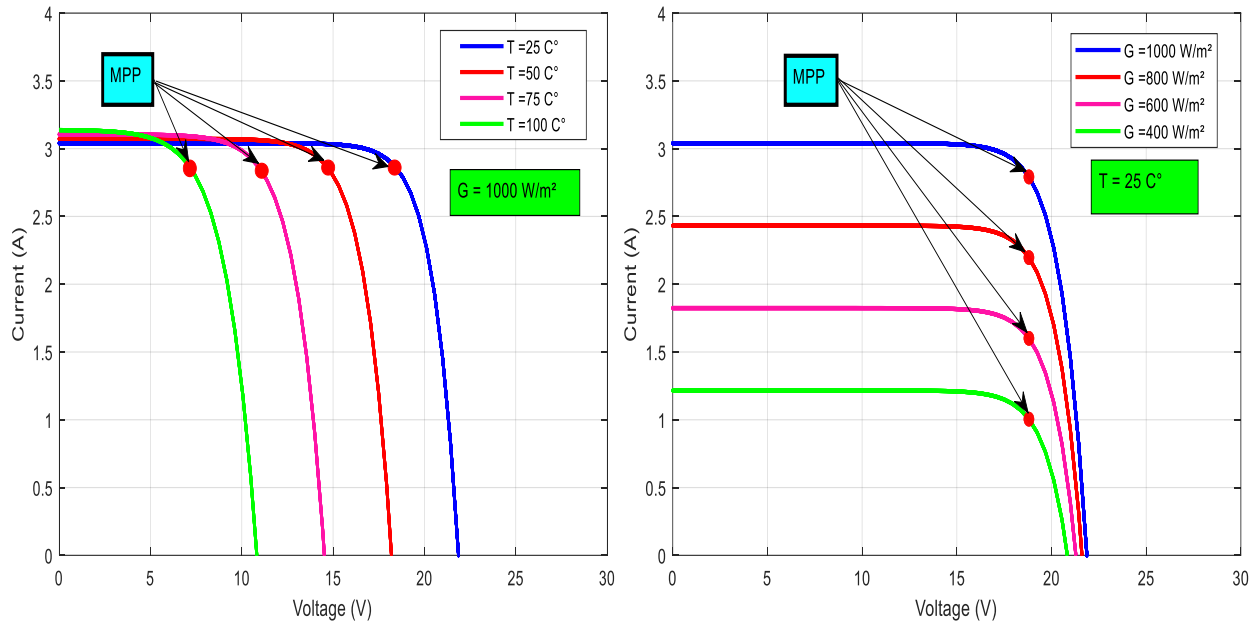


Figure (III.3) : Caractéristiques I-V du réseau PV avec la variation de l'irradiance [71].

III.1.2 Modélisation du convertisseur Boost

Les convertisseurs DC-DC sont utilisés pour transférer la puissance générée par le panneau solaire vers la charge, afin d'assurer une transmission optimale de l'énergie et d'atteindre le point de puissance maximale (MPP). Ceci est réalisé en insérant un convertisseur de puissance entre le champ photovoltaïque et la charge [72].

Pour suivre le MPP, le convertisseur est piloté en variant le rapport cyclique (α). Comme illustré dans la (Figure III.4) [73], le convertisseur utilisé dans ce travail est un convertisseur élévateur (boost), où la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée, selon l'expression :

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad \text{III. 1}$$

- Fonction du convertisseur boost: Augmente la tension du panneau solaire pour adapter la charge.
- Rôle du rapport cyclique (α) : Contrôle la tension de sortie pour optimiser le transfert de puissance.
- Avantages : Efficacité élevée, réponse rapide aux variations d'ensoleillement [74].

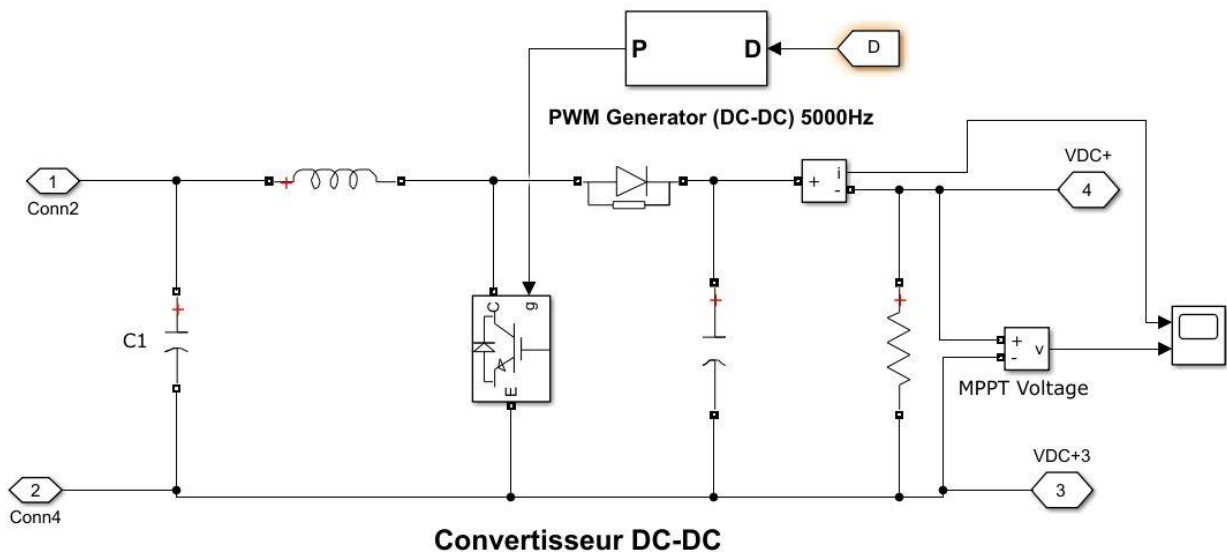


Figure (III.4) : Schéma du convertisseur Boost.

Paramètres	Valeur
Bobine L_{pv}	3.5e-3mH
Condensateur d'entrée C_e	200e-6 μ F
Condensateur de sortie C_s	100e-6 μ F
Fréquence de commutation du MOSFT f	5000Hz
Charge R	300 Ohm

Tableau (III.2): Valeurs des composants du convertisseur DC/DC

Des équations et des modèles mathématiques sont établis pour la construction d'un convertisseur de puissance électronique boost, car les modèles à grands et petits signaux du convertisseur DC DC sont également conçus pour simuler la réponse échelonnée du système [75].

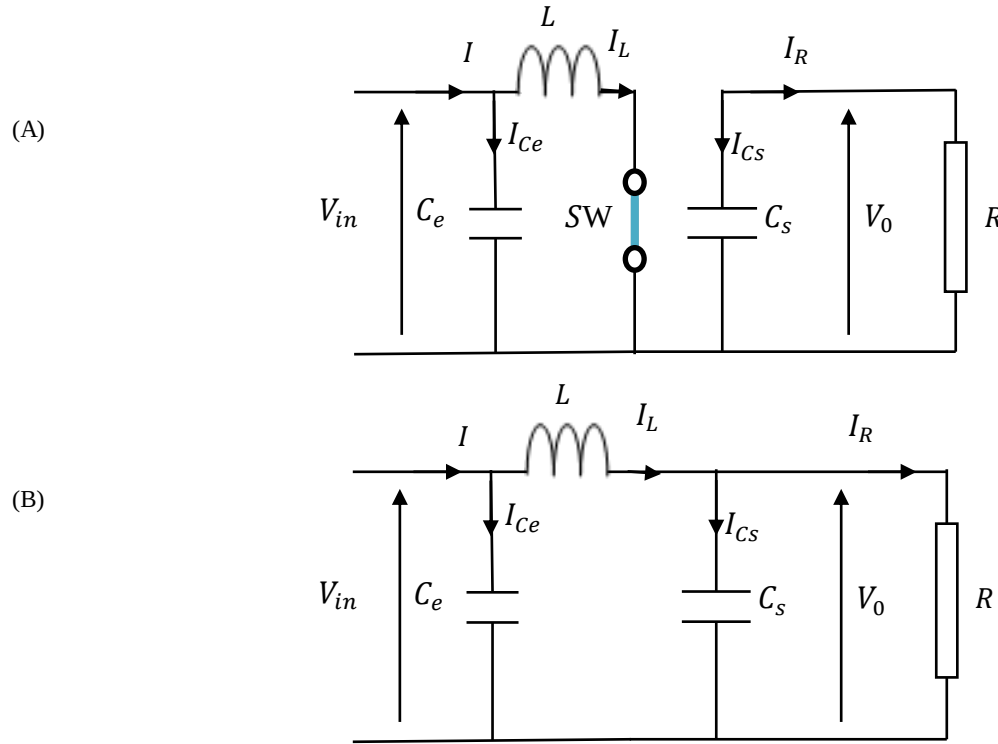


Figure (III.5): Étape topologique du convertisseur élévateur C.

L'énergie est stockée dans l'inductance du premier étage. Cette énergie est convertie vers la charge du second étage. (A) représente l'étage un et (B) le second étage.

A. Premier étage de fonctionnement

Le premier étage commence lorsque l'interrupteur SW est fermé (activé), comme illustré dans la Figure 5 (A). Durant cette phase :

- Toute l'énergie de la source (panneau solaire) est transférée à l'inductance (L).
- La charge est déconnectée de la source.
- La diode D est bloquée (polarisée en inverse).
- La charge est alimentée uniquement par l'énergie stockée dans le condensateur de sortie (C).

Cette phase s'achève lorsque l'interrupteur SW est ouvert.

B. Deuxième étage de fonctionnement

La fin du premier étage déclenche le deuxième étage (Figure 5 (B)). Durant cette phase:

- L'énergie est transférée directement de la source vers la charge via la diode D (devenue passante).
- L'énergie accumulée dans l'inductance (L) est également restituée à la charge via la diode D. Cette phase prend fin lorsque l'interrupteur SW est à nouveau fermé.

Modélisation mathématique

Les lois de Kirchhoff peuvent être appliquées à chaque topologie du convertisseur boost, selon l'état de l'interrupteur. Les équations suivantes sont établies pour chaque phase:

1. Interrupteur fermé (ON) :
 - Équations décrivant la charge de l'inductance.
2. Interrupteur ouvert (OFF) :
 - Équations décrivant le transfert d'énergie vers la charge via la diode.

Points clés à retenir:

- Rôle de l'inductance : Stockage et transfert d'énergie.
- Rôle de la diode : Assure un transfert unidirectionnel vers la charge.
- Alternance des phases : Permet d'élever la tension de sortie (boost). [76]

C. Première étape (Interrupteur on)

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{in} \quad \text{III. 2}$$

$$C \frac{di_{Cs}}{dt} = -\frac{V_0}{R} \quad \text{III. 3}$$

D. Deuxième étape (Interrupteur off)

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_0 + V_{in} \quad \text{III. 4}$$

$$C \frac{di_{Cs}}{dt} = i_L - \frac{V_0}{R} \quad \text{III. 5}$$

Forme d'onde de sortie théorique du convertisseur boost

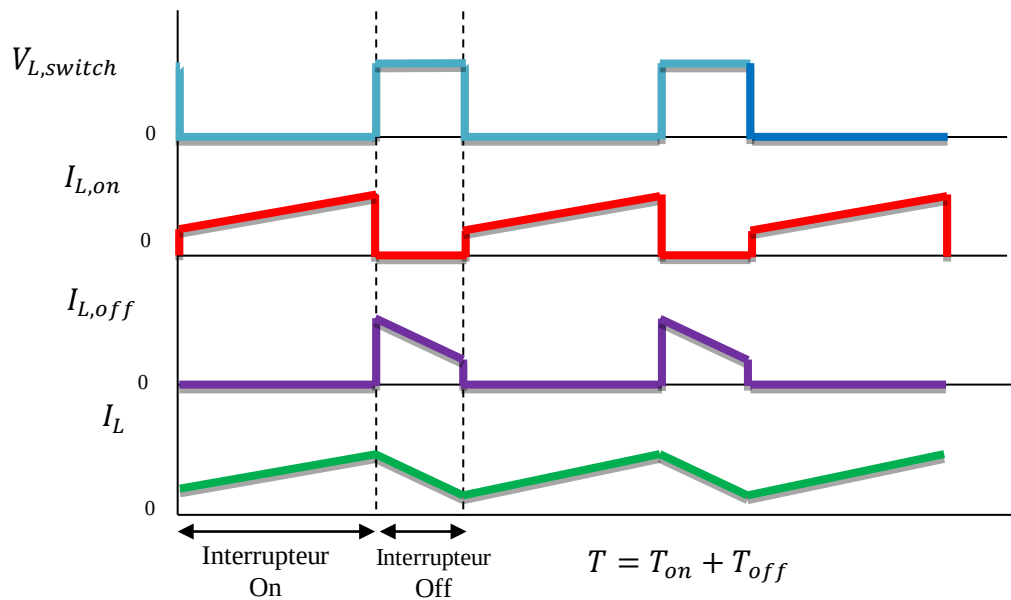


Figure (III.6) : Formes d'onde théoriques du convertisseur boost.

III.2 Développement et implémentation des algorithmes

III.2.1 Simulation MPPT l'algorithme classique Perturber et observer (P&O)

Cette étude présente l'implémentation sous Simulink de l'algorithme classique Perturber et observer (P&O) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) des systèmes photovoltaïques.

Objectifs:

- Modéliser le comportement dynamique d'un panneau PV.
- Implémenter la logique P&O basée sur :

```
function D = PandO(Param, Enabled, V, I)
% MPPT controller based on the Perturb & Observe algorithm.
% D output = Duty cycle of the boost converter (value between 0 and 1)
% Enabled input = 1 to enable the MPPT controller
% V input = PV array terminal voltage (V)
% I input = PV array current (A)
% Param input:
Dinit = Param(1); %Initial value for D output
Dmax = Param(2); %Maximum value for D
Dmin = Param(3); %Minimum value for D
deltaD = Param(4); %Increment value used to increase/decrease the
duty cycle D
```

```

% ( increasing D = decreasing Vref )
persistent Vold Pold Dold;
dataType = 'double';
if isempty(Vold)
Vold=0;
Pold=0;
Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

if dP ~= 0 & Enabled ~=0
if dP < 0
if dV < 0
D = Dold - deltaD;
else
D = Dold + deltaD;
end
else
if dV < 0
D = Dold + deltaD;
else
D = Dold - deltaD;
end
end
else D=Dold;
end

if D >= Dmax | D <= Dmin
D=Dold;
end

Dold=D;
Vold=V;
Pold=P;

```

Méthodologie:

1. Construction du modèle PV avec bloc "Solar Cell"
2. Intégration de l'algorithme P&O via :
 - Bloc "MATLAB Function" pour la logique.
 - "PWM Generator" pour contrôler le convertisseur DC-DC.

3. Validation par simulation avec scénarios :

- Échelond'irradiation (1000 → 600 W/m²)
- Variation temporelle de temperature

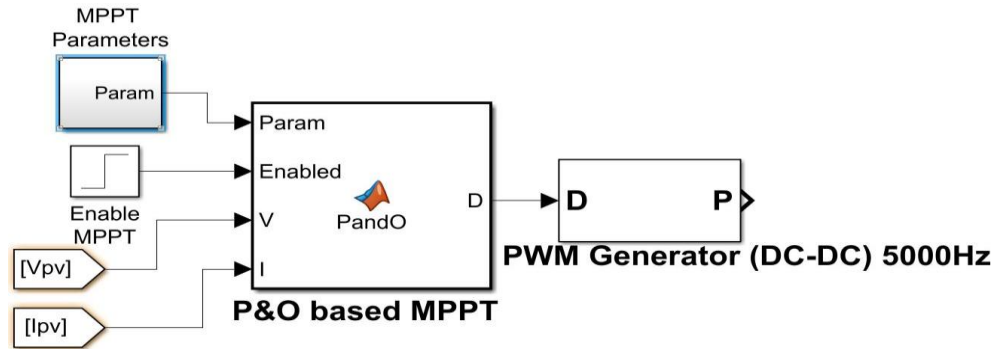


Figure (III.7): Bloc MATLAB Function MPPT (P&O).

(D = Boost converter duty cycle)

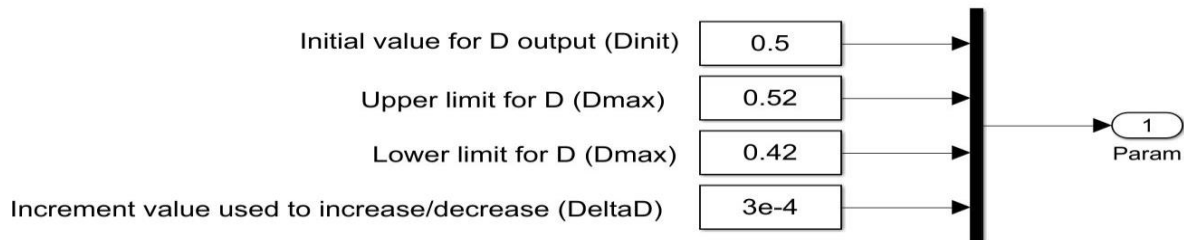
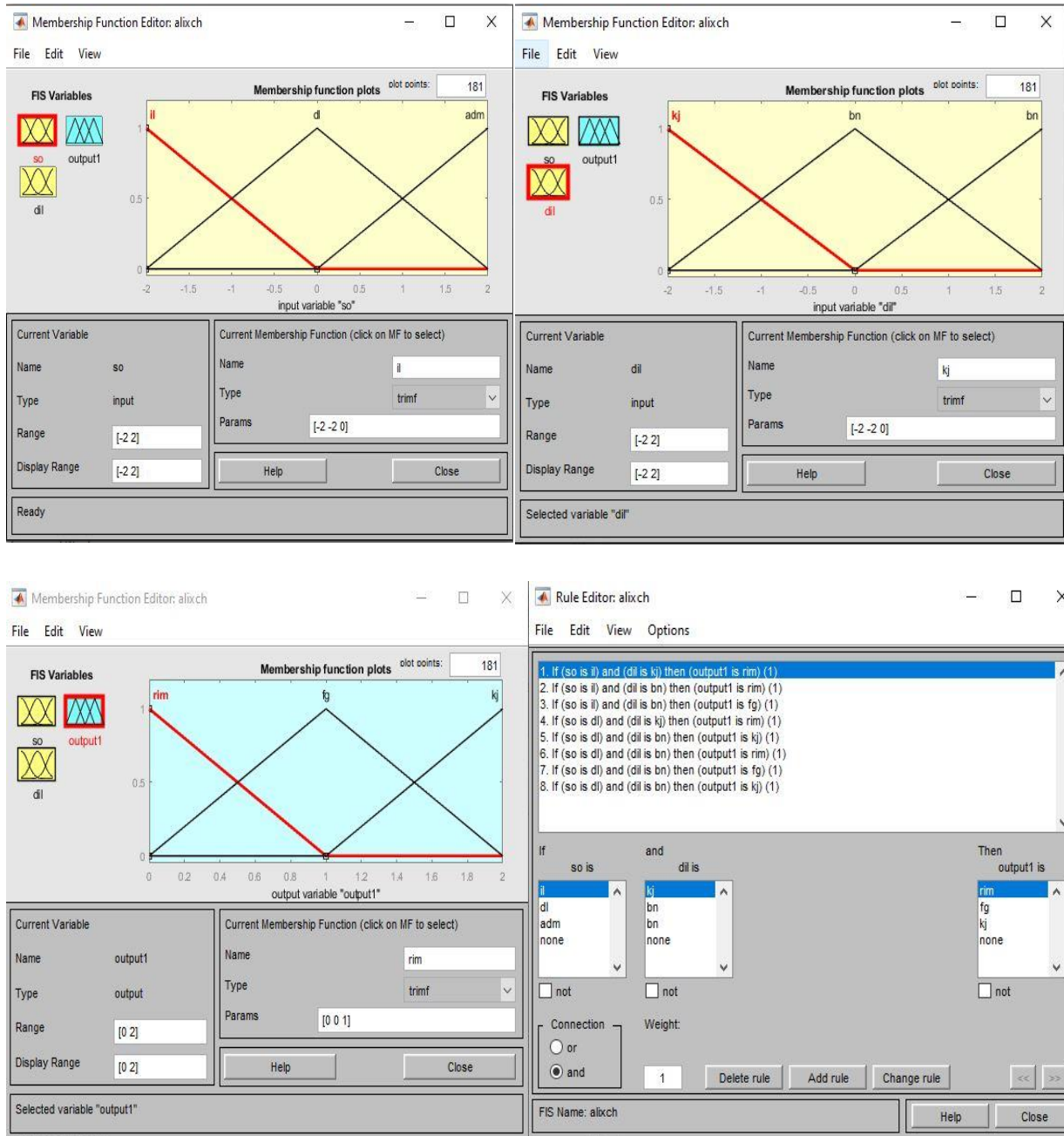


Figure (III.8): Paramètres de l'algorithme Perturb and Observe.

III.2.2 Simulation MPPT l'algorithme technique d'intelligence artificielle Fuzzy-logic-control (FLC)

Dans les systèmes photovoltaïques, les algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont essentiels pour maximiser l'efficacité de conversion d'énergie. Alors que les méthodes traditionnelles comme (P&O) utilisent des règles fixes, les techniques d'intelligence artificielle telles que la logique floue (Fuzzy Logic Control (FLC)) offrent une meilleure flexibilité et une adaptation optimisée aux variations des conditions environnementales (ensoleillement, température, etc.). [77]



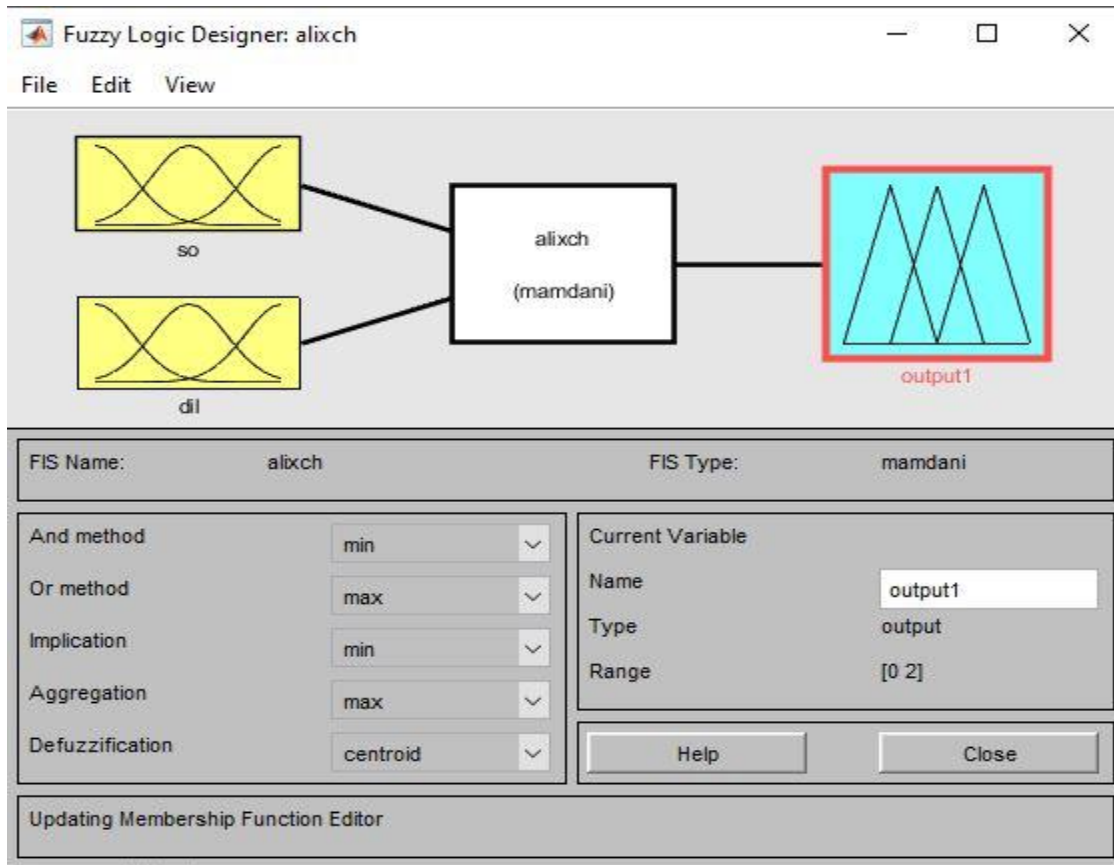


Figure (III.9) : Éditeur de règles et fonctions d'appartenance du FLC pour le MPPT".

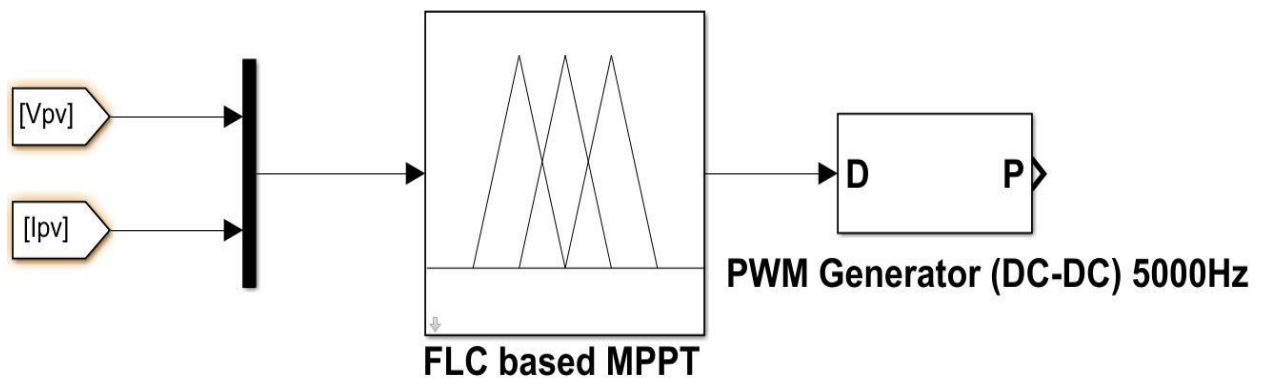


Figure (III.10): Bloc MATLAB Function MPPT FLC.

III.2.3 Simulation MPPT l'algorithme technique d'intelligence artificiel neural réseau (ANN)

Les réseaux de neurones artificiels (ANN) représentent une approche avancée pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. Contrairement aux méthodes traditionnelles (P&O, IncCond) ou même à la logique floue (FLC), les ANN peuvent apprendre des modèles complexes et s'adapter dynamiquement aux variations non linéaires de l'ensoleillement et de la température, offrant ainsi une précision et une rapidité accrues.

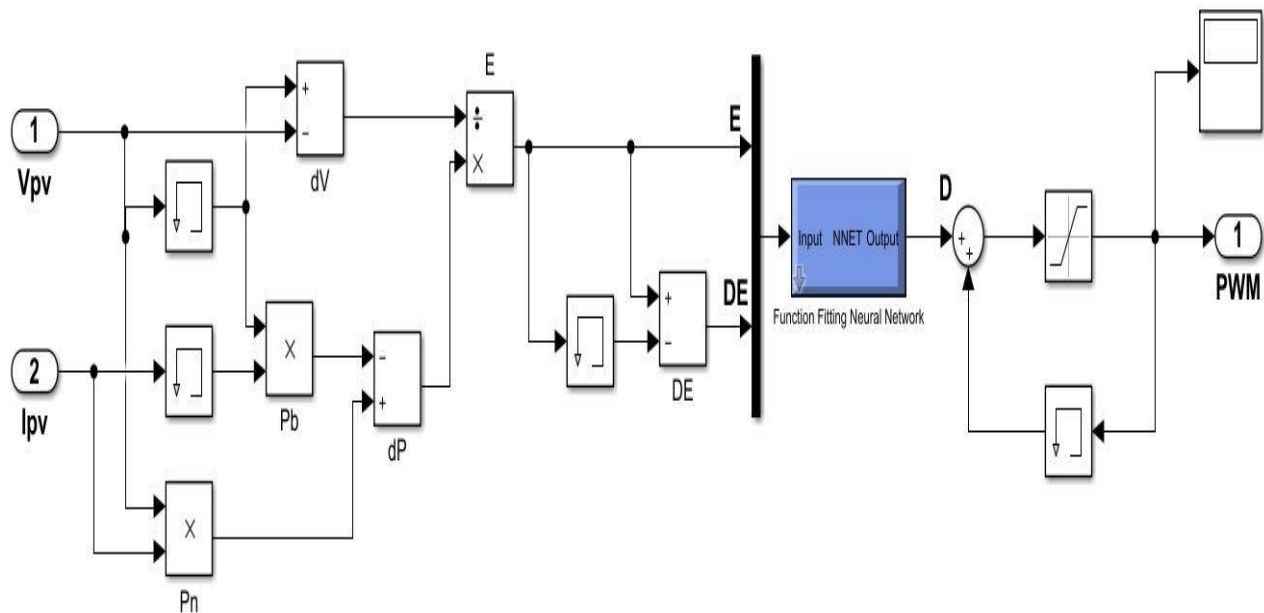


Figure (III.11): Modèle de contrôle de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisant des réseaux de neurones artificiels.

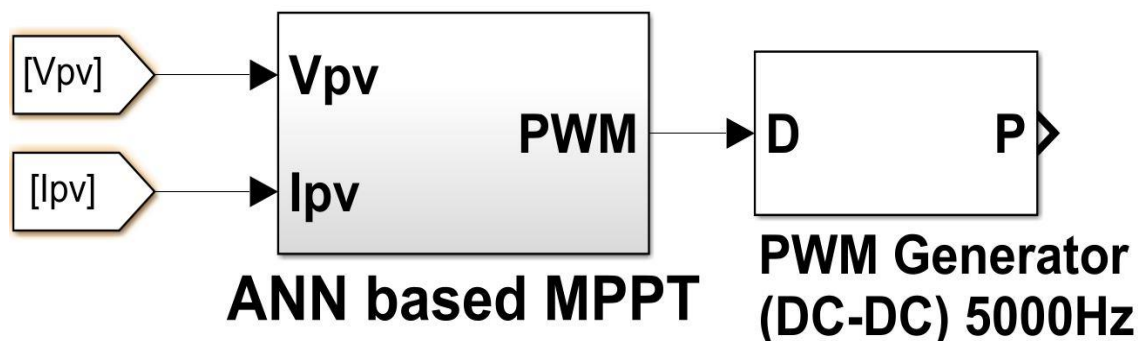


Figure (III.12): Bloc MATLAB Function MPPT ANN.

III.3 Simulation MPPT par Fusion P&O Classique et IA (FLC/ANN) - Modélisation MATLAB

Les systèmes photovoltaïques (PV) nécessitent des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) efficaces pour optimiser la production d'énergie. Les méthodes hybrides combinent les avantages des techniques classiques (comme Perturber et observer (P&O)) et des méthodes d'intelligence artificielle (IA) comme la logique floue (FLC) et les réseaux de neurones artificiels (ANN). Cette approche permet d'améliorer la rapidité, la stabilité et l'adaptabilité aux conditions environnementales variables [78].

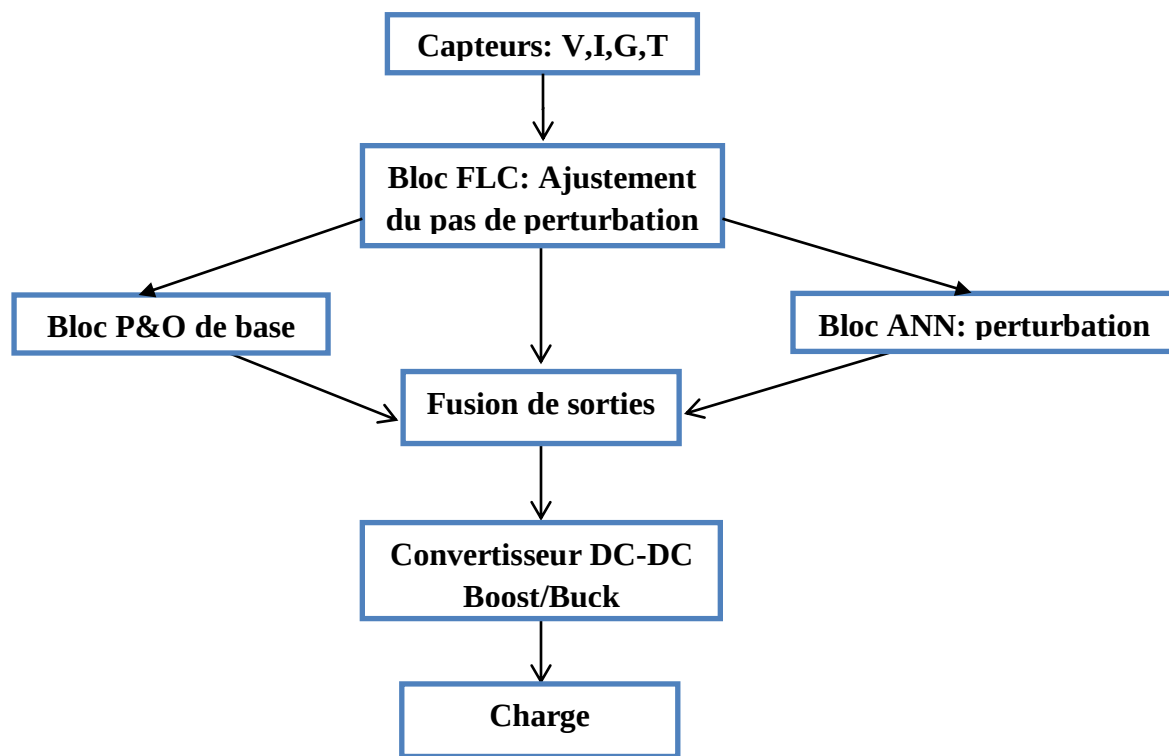


Figure (III.13): Schéma Fonctionnel du Bloc de Simulation

Ce bloc de simulation illustre l'implémentation d'une architecture hybride MPPT combinant :

- L'algorithme classique Perturber et observer(P&O) pour sa robustesse,
- La logique floue (FLC) pour l'adaptabilité dynamique,
- Les réseaux de neurones (ANN) pour la précision prédictive. L'objectif est d'optimiser l'efficacité d'un système photovoltaïque sous des conditions variables (ombres, changements d'irradiation).

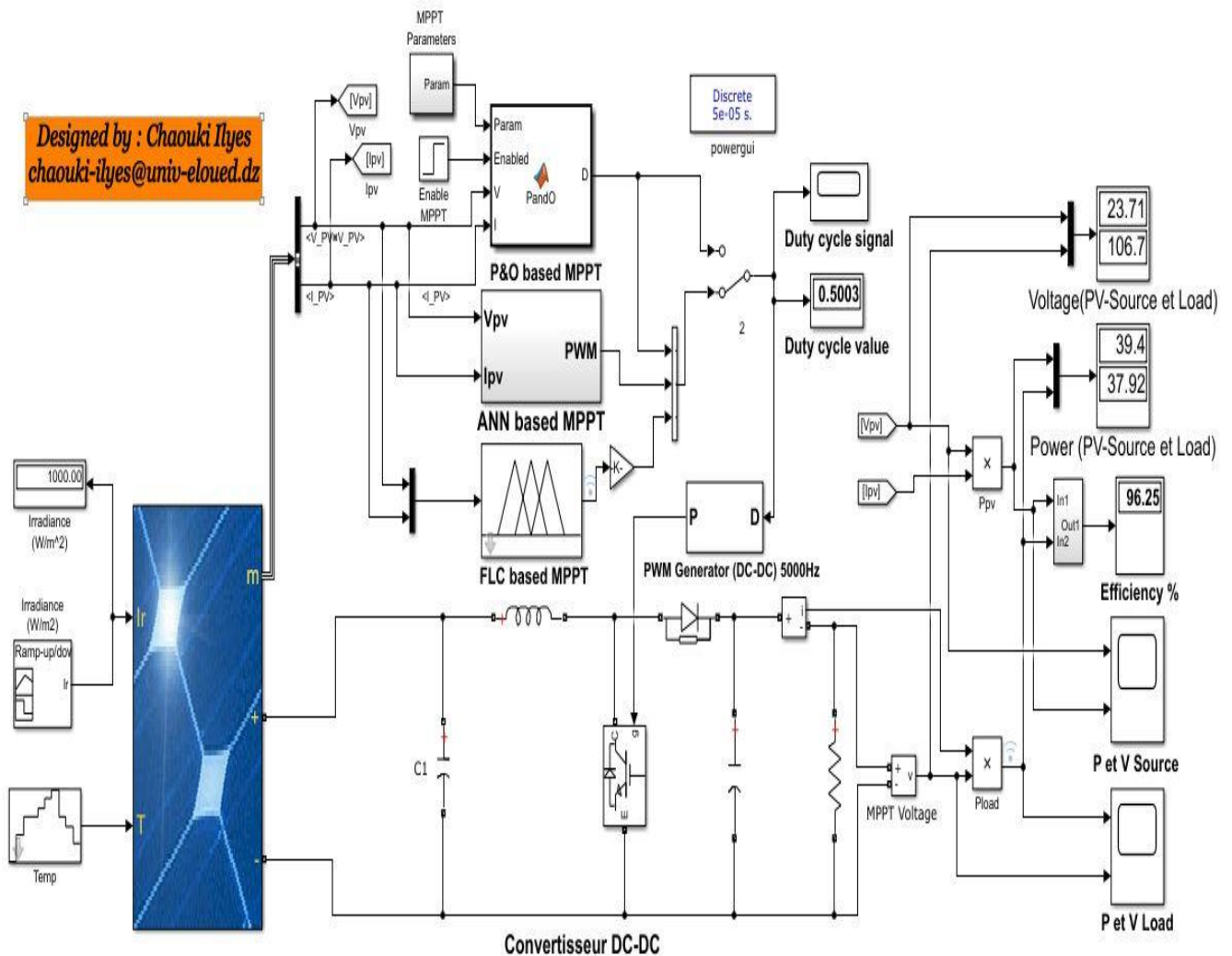


Figure (III.14): Bloc de Simulation d'un Système PV avec Contrôleurs MPPT Hybrides (Perturber et observer+ Logique Floue + Réseaux de Neurones) sous MATLAB.

III.4 Analyse des résultats

- Irradiation (G) passant de 1000 W/m² à 500 W/m² à t=5s.
- Température (T) constante à 25°C.

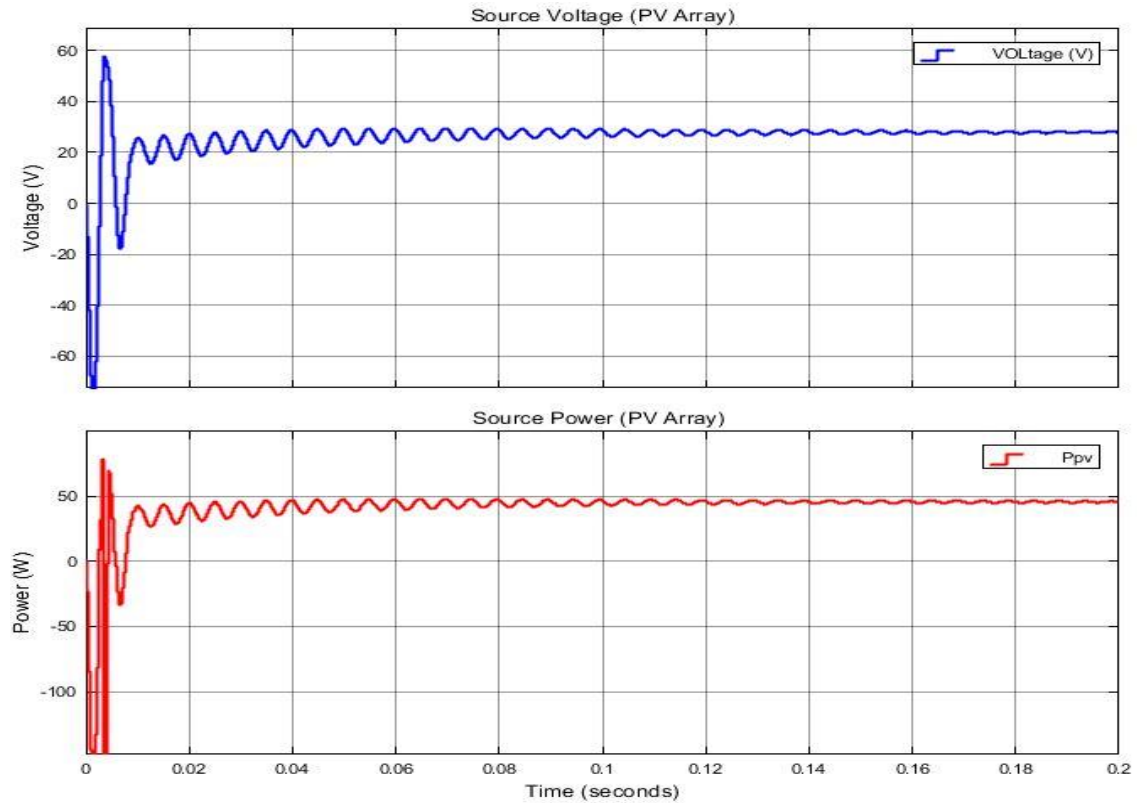


Figure (III.15): Système PV de Génération d'Énergie et de Tension

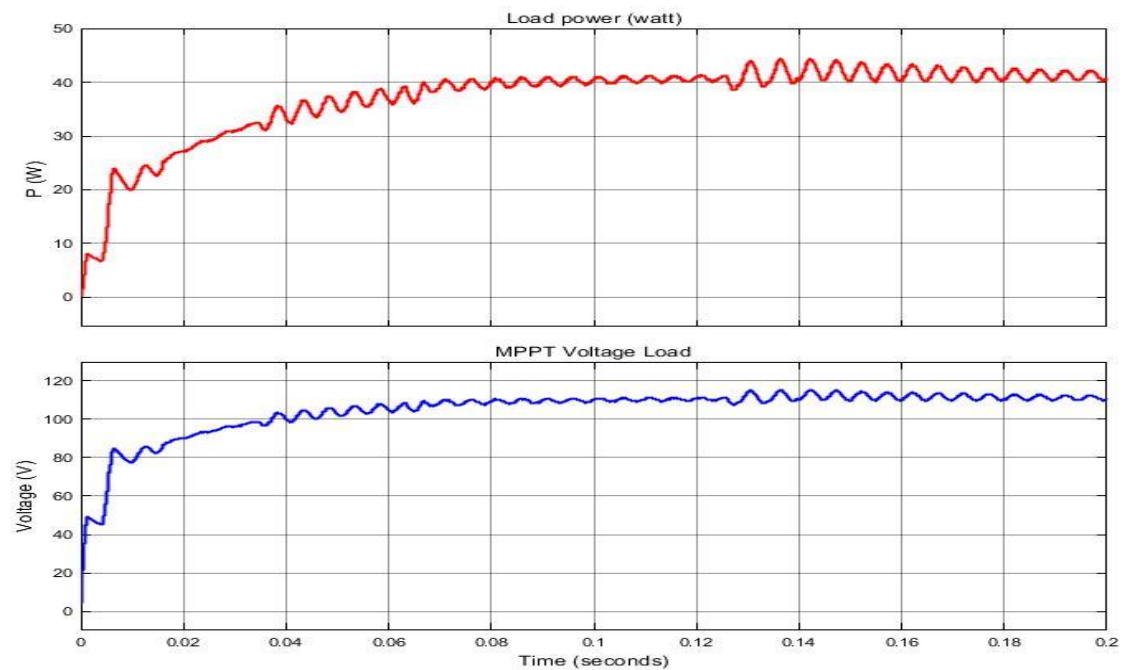


Figure (III.16): Gestion de l'énergie photovoltaïque basée sur MPPT à l'aide de la méthode P&O

- **Graphique supérieur** : Puissance de charge (Load power)

Observation:

La puissance commence à 0 W et augmente rapidement.

Elle atteint environ 42 W vers 0,1 s.

Après ce point, la puissance oscille légèrement autour de cette valeur.

Interprétation :

L'algorithme P&O réussit à atteindre le point de puissance maximale (MPP).

Les oscillations sont typiques de la méthode P&O, car elle fonctionne par perturbation autour du point de puissance maximale.

- **Graphique inférieur** : Tension de charge MPPT

- Observation:

La tension augmente rapidement à environ **100 V**.

Elle se stabilise ensuite avec de petites ondulations, indiquant que le système est en phase de suivi du MPP.

- Interprétation:

La tension atteint et se maintient proche de la tension correspondant au MPP.

La présence d'ondulations minimales reflète l'action continue du P&O pour rester au MPP.

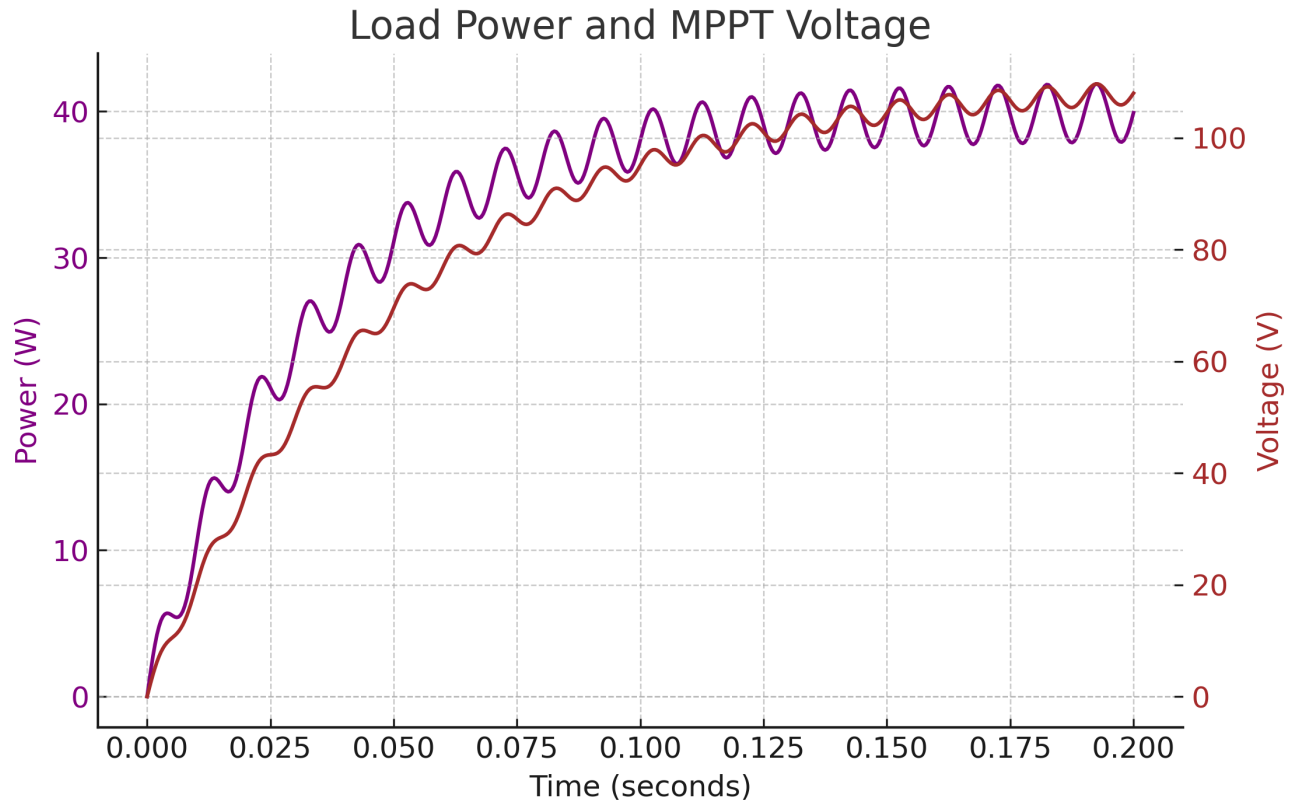


Figure (III.17): Commande avancée hybride (MPPT P&O + FLC + ANN) pour l'extraction maximale d'énergie photovoltaïque.

- **Graphique supérieur :** Puissance de charge (Load Power)

Observation:

Démarrage très rapide avec une montée de la puissance dès les premières millisecondes.

Stabilisation autour de 40 W après environ 0,1 s.

Ondulations beaucoup plus faibles que dans la méthode P&O seule.

Interprétation:

L'ajout des techniques FLC et ANN améliore la vitesse de convergence vers le point de puissance maximale.

La réduction notable des oscillations autour du MPP montre que le système est plus stable et précis, avec moins de pertes dynamiques.

- **Graphique inférieur :** Tension de charge (MPPT Voltage Load)

Observation :

Augmentation rapide de la tension atteignant environ 110 V.

Stabilisation très efficace avec de très faibles ondulations.

Interprétation :

La tension reste très proche de la tension optimale correspondant au MPP.

Cela confirme une meilleure régulation de la tension grâce à la commande hybride.

Performance comparée:

Critère	P&O seul	P&O + FLC + ANN
Temps de réponse	Rapide	Très rapide
Oscillations	Modérées	Très faibles
Stabilité	Bonne	Excellente
Précision MPPT	Moyenne	Élevée
Rendement énergétique	Correct	Supérieur
Efficacité	91%	97%

Tableau (III.3) : Performance Comparée.

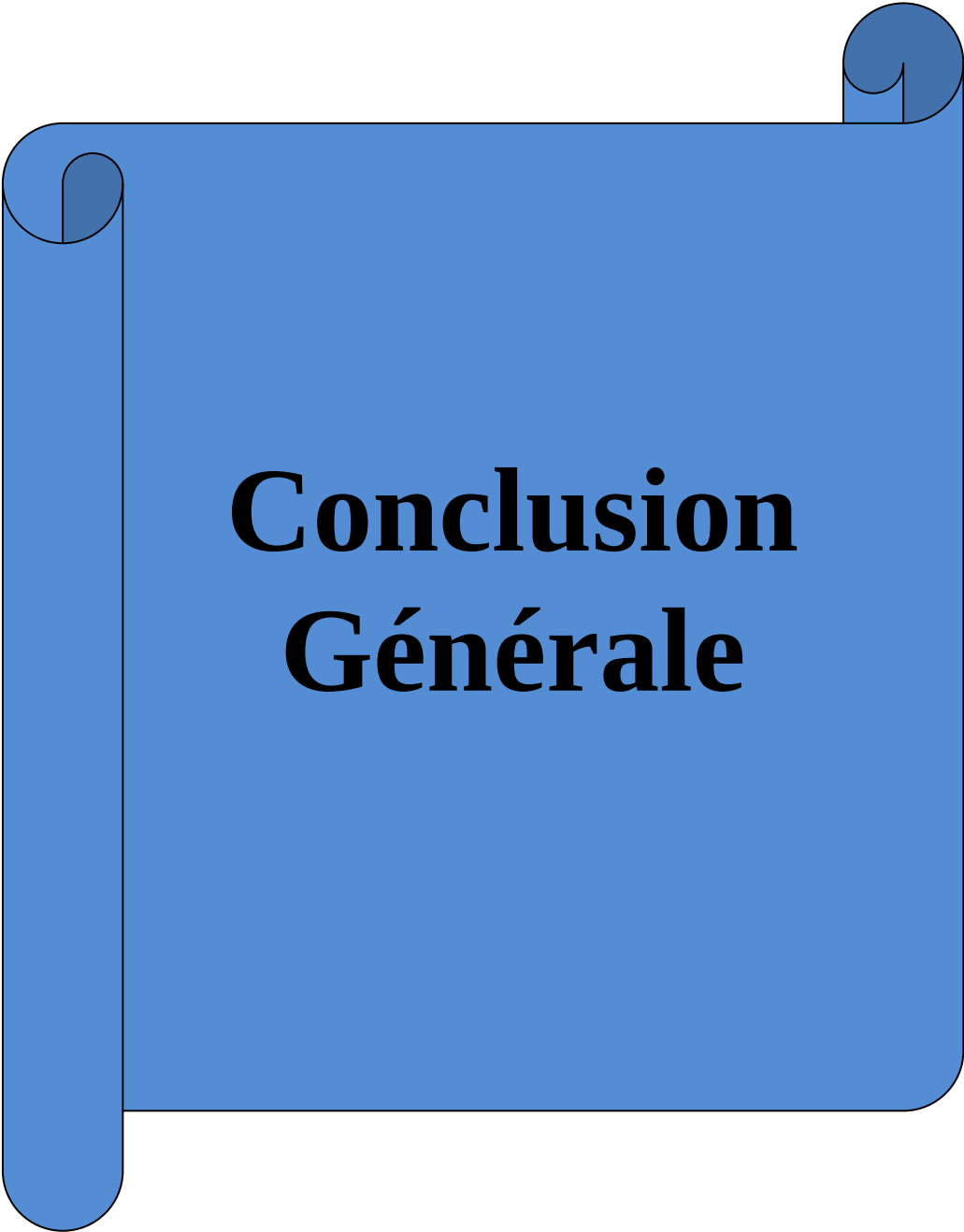
Conclusion de chapitre

Cette étude a présenté une approche innovante de commande MPPT hybride combinant l'algorithme classique P&O avec des techniques avancées d'intelligence artificielle (logique floue et réseaux de neurones) pour les systèmes photovoltaïques. Les simulations sous MATLAB ont démontré que cette méthode hybride surpasse significativement les approches conventionnelles en termes de :

1. Précision: Réduction des oscillations autour du MPP
2. Rapidité : Temps de convergence amélioré
3. Robustesse: Meilleure adaptation aux variations environnementales

Les principaux avantages observés incluent :

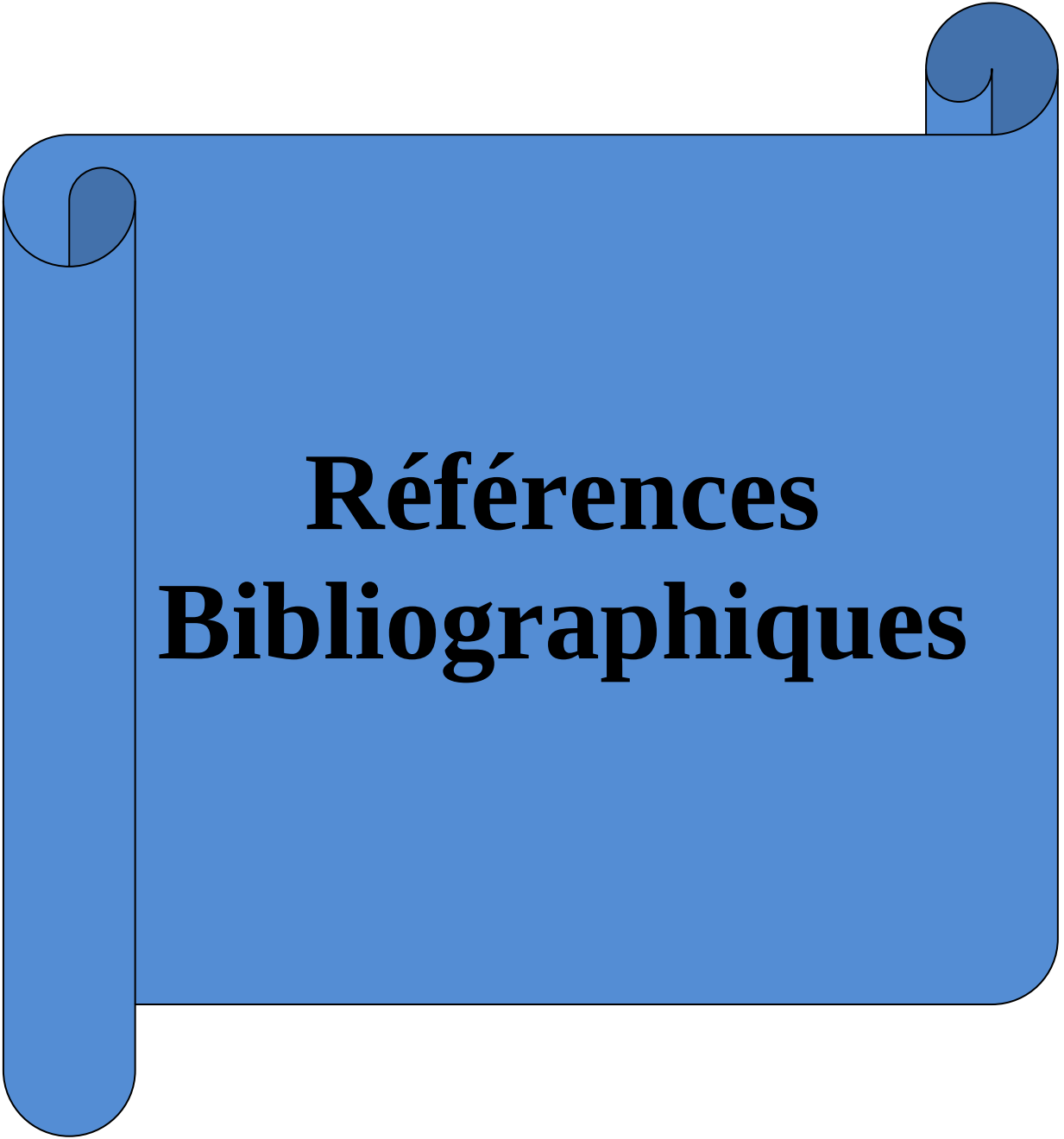
- La logique floue (FLC) permet un ajustement dynamique des paramètres et les ANN apportent une capacité prédictive élevée et l'algorithme P&O fournit une base stable.



Conclusion Générale

Dans ce travail, un système hybride avancé pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) a été développé, combinant l'algorithme classique P&O avec des techniques modernes d'intelligence artificielle. Le système repose sur une intégration tridimensionnelle : l'algorithme P&O fournit une base solide, tandis que la logique floue (FLC) apporte une flexibilité d'adaptation face aux changements environnementaux, et les réseaux de neurones (ANN) offrent une précision prédictive élevée. Les résultats montrent une amélioration significative des performances par rapport aux méthodes traditionnelles, avec une stabilité accrue, une réponse plus rapide et une réduction des oscillations autour du point de fonctionnement optimal.

Cette étude représente une étape importante vers des systèmes photovoltaïques plus intelligents et plus efficaces, ouvrant la voie à des applications plus larges dans le domaine des énergies renouvelables. Elle met également en évidence le potentiel de développement de cette méthodologie pour intégrer des techniques plus avancées comme l'apprentissage profond, ce qui pourrait conduire à des améliorations supplémentaires des performances. Il est à noter que cette approche hybride ne se limite pas uniquement aux systèmes solaires, mais peut être adaptée à d'autres types de systèmes d'énergie renouvelable, renforçant ainsi sa valeur pratique et son applicabilité à grande échelle.



Références Bibliographiques

- [1] Bacem Gaied Chortane,(Amélioration de l'algorithme MPPT pour un système PV par l'intégration des nouvelles techniques basées sur l'intelligence artificielle), Mémoire présenté à l'école de technologie supérieure comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise avec mémoire en génie énergies renouvelables et efficacité énergétique , Université du Québec, Montréal, le 4 juillet 2022.
- [2] Site Web: <https://aiguapres.es/fr/blog/avantages-systemes-de-pompage-solaire>.
- [3]- Chekired Fathia,(Optimisation des systèmes à énergies renouvelables par les algorithmes intelligents), Thèse de Doctorat , Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach, Alger,2014.
- [4] N.Touil, S.Ghenbazi, «Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque », Master académique, Université Echahid Hama Lakhder, El-Oued, Septembre 2015.
- [5] S.M.Ait-Cheikh, «Etude Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie.
- [6] M.Adouane, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie.
- [7] Site Web : <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaique/comment-fonctionne-le-panneau-solaire-photovoltaique/definition-principe-fonctionnement-photovoltaique/>.
- [8] Berregui Abdelfettah, Absa Amjed, «Etude technico-économique d'une installation photovoltaïque pour application dans la région de Ouargla» - Master académique, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Juin2020.
- [9] Site Web: <https://pin.it/6Jve1Incz> .
- [10] F.Hananou, A.Rouabah, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », Master académique, Université Kasdi Merbah,Ouargla, 09 /06/2014.
- [11] C.Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse du doctorat, Université TOULOUSE III – PAUL SABATIER.
- [12] A.Bisker, M.Chiri, « Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau», Projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'État en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique,Alger, Juin 2012.
- [13] Site Web: <https://biblus.accasoftware.com/fr/rendement-des-panneaux-photovoltaiques-les-facteurs-a-evaluer/>.
- [14] Site Web: <https://www.artyseofr.fr/type-panneau-solaire/>.

- [15] A. Labouret, M. Villoz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris.
- [16] Site Web: <https://www.jade-technologie.com/caracteristiques-dun-panneau-solaire/>.
- [17] M. T. Boukadoum, A. Hamidat et N. Ourabia Centre De Développement. des Energies Renouvelables, B.P.62, Route De l'Observatoire Bouzaréah 16340, Alger.
- [18] A.Ould Mohamed Yahya, A.Ould Mahmoud Et I. Youm, « Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque », revue des énergies renouvelables vol. 11 n°3 Sénégal.
- [19] T.Bouguerra, «Optimisation d'un système photovoltaïque: Application en continu et en alternatif», Mémoire Magister, Université Mentouri de Constantine 1, 30/06/2014.
- [20] A.Learrta «Réalisation de commande MPPT numérique», Rovira & Virgili.
- [21] R.Mukund, Ph.DPatel, « Wind and Solar Power Systems », édition CRC PRESS.
- [22] Site Web https://hobertek.com/fr/choosing-the-right-pump-motor-for-solar-water-pumps-ac-or-dc/?utm_source=perplexity#Why_Consider_DC_Motors_for_Smaller_Water_Pumps.
- [23] Jimmy Royer, thomas Djiako, Erico SCHILLER, Bokar Sada : «le pompage photovoltaïque».manuel de cour à l'intension des ingénieurs et des techniciens.
- [24] [PDF] Commande d'un Système de Pompage Photovoltaïque <https://dspace.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/8a1f5ce8-4fb4-4538-840495f0e60e9a6e/content>.
- [25] [PDF] CDER LE POMPAGE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE Manuel de cours https://www.pseau.org/outils/ouvrages/cder_le_pompage_solaire_photovoltaique_manuel_de_cours_2005.pdf
- [26] [PDF] Manuel d'utilisation et de maintenance Boitier de contrôle solaire <https://www.renson.fr/img/notices/818135/Notice-d%E2%80%99installation-Pompe-solaire.pdf>
- [27] Système de pompage solaire - Cabinet NPM <https://cabinetnpm.com/systeme-de-pompage-solaire/>
- [28] [PDF] Le pompage solaire - Actu-Environnement <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-25206-pompage-solaire.pdf>
- [29] Les différents types de batteries solaires : que choisir ? - ALLO SOLAR <https://allo.solar/base-de-connaissances/type-batterie.html>
- [30] Durée de vie des batteries solaires en Tunisie : astuces pratiques ! <https://protunisie.com/energie-solaire/duree-de-vie-des-batteries-solaires-en-tunisie/>
- [31] Site Web <https://www.ecosolaire.com/2017/10/10/pompage-solaire/>.
- [32] Les systèmes de pompage solaire : avantages et fonctionnement <https://www.serelio.fr/les-systemes-de-pompage-solaire/>

- [33] Avantages des systèmes de pompage solaire – Aiguapres
<https://aiguapres.es/fr/blog/avantages-systemes-de-pompage-solaire/>
- [34] Pompage solaire, des repères pour l'action :
https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ps_eau_le_pompage_solaire_des_reperes_pour_l_action_2023.pdf
- [35] Le Pompage Solaire • Sujets - Rural Water Supply Network <https://www.rural-water-supply.net/fr/developpement-durable-des-eaux-souterraines/solar-fr>
- [36] Quelles sont les raisons pour lesquelles les pompes solaires ...
<https://hobertek.com/fr/what-are-the-reasons-why-solar-pumps-stop-working/>
- [37] C. Alonso, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie », Thèse de HDR, Université Paul Sabatier – Toulouse III.
- [38] H.Abbes, H.Abid, K. Loukil, A.Toumi, M.Abid , «Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 435 -445, Tunisie.
- [39] M.Belkacem, «Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT) », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2015.
- [40] B. L. Grossman, E. F. Lyon, N. E. Rasmussen and L. L. Buciarelli, «The energy balance associated with the use of a MPPT in a 100 Kw peak power system », in IEEE photovoltaic .Spec .conf, pp 523–527.
- [41] P. J. Wolfs, L. Tang, "A single cell maximum power point tracking converter without a current sensor for high performance vehicle solar arrays," in 36th annu. IEEE power electron. spec.conf,pp.165-171.
- [42] T. Iida, H. Iwamoto, N. Kasa, «Maximum power point tracking with capacitor identifier for photovoltaic power system », in conf. power electron. variable speed drives, p. 130–135.
- [43] [PDF] Implémentation de l'algorithme P&O pour un système photovoltaïque
<https://dSPACE.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/11819/1/SEDRA TI-NOUAR.pdf>.
- [44] [PDF] Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques en utilisant l ...
<https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/3323/1/SIFI.Redouane.pdf>
- [45] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie.
- [46] [PDF] Fellah-Oussama-Sadallah-Housseem-Charef-Eddine.pdf

<https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/10/Fellah-Oussama-Sadallah-Houssem-Charef-Eddine.pdf>

- [47] [PDF] Etude et simulation des techniques de poursuite du point de ... [https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/29220/1/memoire-majid-et-aissa2%20\(2\)_compressed.pdf](https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/29220/1/memoire-majid-et-aissa2%20(2)_compressed.pdf)

- [48] A modified fractional short circuit current MPPT and multicellular ...

<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371%2Fjournal.pone.0309460>

- [49] [PDF] Study and simulation of MPPT techniques to control a stand-alone ...

<https://pdfs.semanticscholar.org/f62a/44fab76e372934eabff5c614ac613f31cfd5.pdf>

- [50] [PDF] New Direct Nonlinear MPPT design for Photovoltaic System Using ...

https://www.ijmcer.com/wp-content/uploads/2023/09/IJMCER_C05501425.pdf

- [51] [PDF] Nouvelle technique d'adaptation et de planification par logique floue ...

https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/3547/1/BENNOUI_Mahdi.pdf

- [52] A.B.G Bahgat, N.H.Helwab, G.E. Ahmad and T.El Shenwyb, « Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks », Renewable Energy. Vol. 30, pp. 1257–1268.

- [53] [PDF] Comparaison du contrôleur flou Takagi-Sugeno et de la commande ... <https://issr-journals.org/links/papers.php?journal=ijias&application=pdf&article=IJIAS-14-293-02>

- [54] [PDF] MASTER Algorithmes de Poursuite de Point de Puissance Maximale ...

<http://dspace.univ-ghardaia.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/5099/1/these%20final%20younes%20biblioth%C3%A8que%20finale.pdf>

- [55] [PDF] Introduction générale

<https://biblio.cuniv-naama.dz/wp-content/uploads/2024/03/Utilisation-des-reseaux-neurones-artificiel-pour.pdf>

- [56] -_Oussema Aloulou ,(Utilisation des réseaux de neurones artificiels pour l'optimisation de la commande MPPT et la détection des défauts des panneaux solaires), Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Octobre 2024.

- [57] [PDF] Modélisation et Commande MPPT d'un système photovoltaïque ...

http://uraer.cder.dz/sienr/sienr2012/pvh/Article_Bendib_B11.pdf

- [58] [PDF] Synthèse des méthodes de poursuite du point de puissance ...

<https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/7081/1/REZKI.Abderrahmane.pdf>

- [59] Dr.Belaid Lalouni Sofia ,Maitre de conférence classe B « Cour Energie solaire photovoltaïque » Département Génie électrique, Université de Bejaïa , 2015.
- [60] Site Web <https://www.gre-enr.fr/comment-fonctionne-panneau-solaire-photovoltaïque/>.
- [61] Site Web <https://www.pv-magazine.fr/2023/03/03/des-cellules-solaires-tandem-perovskite-silicium-conservent-80-de-rendement-au-bout-dun-an/>
- [62] Site Web <https://tecsol.blogs.com/a/6a00d8341bfe5d53ef02c8d39f96a4200d-popup>
- [63] : Wafa Gharsallaoui, (Design, Contrôle et Tests des performances en temps réel d'un convertisseur quasi-z-source à courant continu pour un système photovoltaïque autonome), Mémoire présenté à l'école de technologie supérieure comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise avec mémoire en génie énergies renouvelables et efficacité énergétique m. sc. a, Université du Québec, Montréal, le 18 décembre 2023.
- [64] : Sara Rhoulas, Norelislam El Hami, (Optimisation du coût de l'emballage industriel par les algorithmes d'optimisations PSO, SA et GA), Laboratoire Sciences et Ingénierie, Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Université Ibn Tofail, Kénitra, Maroc.
- [65] Site Web <https://www.cr2ie.com/nouvelle-publication-scientifique-loptimisation-du-suivi-du-point-de-puissance-maximale-mppt/>
- [66] Bougandoura Djihane, Boudjenih Hadjer , (Implémentation Software de l'algorithme bio-inspiré SOA pour la commande MPPT), Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électronique, Ecole national polytechnique, Alger, 2020.
- [67] Boulhares Ikhlas, Kadiri Hanane, (Etude comparative des performances de différentes commandes MPPT), Mémoire de fin d'étude en vue l'obtention du diplôme en master académique en électrotechnique, Université Ahmed Draïa –Adrar , 2020.
- [68] Haripriya T, Alivelu M, Rao UM, Performance evaluation of DC grid connected solar PV system for hybrid control of DC–DC boost converter. In: 10th international conference on intelligent systems and control (ISCO), pp 1–6, ISSN: 1868-5145, 7–8 Jan 2016.
- [69] Waleed, I.H.; Baha, A.S.; Ali, M.F. Voltage Tracking Control of DC-DC Boost Converter Using Fuzzy Neural Network. Int. J. Power Electron. Drive Syst, 9, 1657–1665.2018.
- [70] A Mohapatra, B. Nayak, P. Das, & K. B. Mohanty, “A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition,” Renewable and Sustainable Energy Reviews. , Vol.80, pp.854-867, Dec.2017.
- [71] Ahmed Lechelchah, Oussama Belaroussi, Ilyes Chaouki, V. F. Kalinin, A three-level diode-clamp inverter with a pulse generator and pulse width modulation as a case study, Журнал Вестник ТГТУ, УДК 681.5, 2022.

- [72] Chaouki Ilyes; Charge d'une batterie au plomb acide par un générateur photovoltaïque, Mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2017.
- [73] Ilyes Chaouki and Kalinin Vyacheslav Fedorovich, Future pem fuel cell system renewable energy systems based on hydrogen equipment for microgrid networks, IOP-science, volume 723. 2022.
- [74] Khaizaran Abdulhussein Al Sumarmad, Nasri Sulaiman, Noor Izzri Abdul Wahab, Hashim Hizam, Energy Management and Voltage Control in Microgrids Using Artificial Neural Networks, PID, and Fuzzy Logic Controllers, Energies, 15(303), 2022.
- [75] B. Saleh, Ali M. Yousef, Mohamed Ebeed, Farag K. Abo-Elyousr, Ahmed Elnozahy, Moayed Mohamed, Saad A. Mohamed Abdelwahab, Design of PID Controller with Grid Connected Hybrid Renewable Energy System Using Optimization Algorithms, Journal of Electrical Engineering & Technology, 16, p.3219.3233, 2021.
- [76] И. Шауки, В. Ф. Калинин, Б. Уссама, А. Лешелах, Повышение эффективности преобразователя источника напряжения и управление мощностью энергетического оборудования сети микрогридов, Журнал Вестник ТГТУ, УДК 681.5, 2021.
- [77] Ilyes Chaouki and Kalinin Vyacheslav Fedorovich, Using a Micro-grid to solve the problem of power outages and shortages in southern Algeria during the summer, IOP-science, volume 723. 2022.
- [78] B. Oussama, A. Lechelah, I. Chaouki, V. F. Kalinin, A Novel multilevel inverter's design and implementation based on photovoltaic systems, Журнал Вестник ТГТУ, УДК 681.5. p.055.065