

Nouvelle technique d'adaptation et de planification par logique floue d'un algorithme P&O sur un système PV

par

Mahdi BENNOUI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 11 SEPTEMBRE 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Mahdi Bennoui, 2024



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Ambrish Chandra, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Abdeldjebar Hazzab, codirecteur
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure
Centre de recherche et d'innovation en intelligence énergétique (Cr2ie)

M. Liu Zhaoheng, président du jury
département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Imad Mougharbel, examinateur externe
département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE "10 SEPTEMBRE 2024"

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes ayant participé à la réalisation de mon mémoire.

Tout d'abord, je souhaite remercier chaleureusement mon directeur de recherche, le professeur Ambrish Chandra, ainsi que mon superviseur, le professeur Abdeldjebar Hazzab, pour leur soutien inébranlable, leurs conseils avisés et leurs encouragements constants tout au long de ce projet. Leur expertise et leurs suggestions précieuses ont été déterminantes pour la réussite de ce travail.

Je tiens à remercier Dr. Hicham Gouabi pour son aide précieuse dans l'exécution de mes expériences. Son encouragement et ses conseils ont été d'une grande aide tout au long de la rédaction de mon mémoire.

Enfin, je remercie du fond du cœur ma famille pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien constant. Leur présence et leurs encouragements m'ont été d'une précieuse motivation.

Nouvelle technique d'adaptation et de planification par logique floue d'un algorithme P&O sur un système PV

Mahdi BENNOUI

RÉSUMÉ

Cette étude se concentre sur l'amélioration de l'efficacité et de la fiabilité des systèmes photovoltaïques (PV) grâce à des techniques avancées de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Une revue détaillée de la littérature sur les algorithmes MPPT et les récents progrès en énergie solaire a été réalisée. La recherche aborde le problème de dérive dans les algorithmes P&O conventionnels et les limitations des méthodes à pas fixe. Un algorithme MP&O adaptatif amélioré par la logique floue a été introduit. Ce nouvel algorithme ajuste dynamiquement la taille du pas, équilibrant la vitesse de réponse et les oscillations de puissance autour du MPP. La validité de l'algorithme dans des conditions réelles a été confirmée par les tests effectués en temps réel dans notre laboratoire GRÉPCI,ETS. Ces tests ont démontré une adaptation rapide aux variations d'irradiance et une diminution des oscillations en régime permanent, atteignant une efficacité de 97,21 %. Les résultats indiquent que l'algorithme MP&O adaptatif avec logique floue est beaucoup plus performant que les méthodes conventionnelles en termes de stabilité et d'efficacité, en faisant une solution prometteuse pour améliorer les performances des systèmes PV.

Mots-clés: systèmes photovoltaïques, MPPT, MATLAB Simulink, taille de pas, logique floue, adaptation

New Technique for Adaptation and Planning Using Fuzzy Logic for a P&O Algorithm on a PV System

Mahdi BENNOUI

ABSTRACT

This study focuses on improving the efficiency and reliability of photovoltaic (PV) systems through advanced maximum power point tracking (MPPT) techniques. A detailed review of the literature on MPPT algorithms and recent advancements in solar energy was conducted. The research addresses the drift issue in conventional P&O algorithms and the limitations of fixed step-size methods. An adaptive MP&O algorithm enhanced with fuzzy logic was introduced. This new algorithm dynamically adjusts the step size, balancing response speed and power oscillations around the MPP. The validity of the algorithm in real-world conditions was confirmed through real-time tests conducted in our laboratory at GRÉPCI. These tests demonstrated a rapid adaptation to irradiance variations and a reduction in steady-state oscillations, achieving an efficiency of 97.21%. The results indicate that the adaptive MP&O algorithm with fuzzy logic significantly outperforms conventional methods in terms of stability and efficiency, making it a promising solution for enhancing the performance of PV systems.

Keywords: photovoltaic systems, MPPT, MATLAB Simulink, step-size, fuzzy logic, adaptation, drift

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 Introduction	7
1.2 Énergie solaire	8
1.3 Système photovoltaïque	10
1.4 Type des systèmes photovoltaïques	10
1.4.1 Système d'énergie solaire lié au réseau (connecté au réseau)	11
1.4.2 Système d'énergie solaire autonome	12
1.4.3 Système d'énergie solaire hybride	13
1.5 Panneau Photovoltaïque	15
1.6 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	16
1.7 Différents types de panneaux solaire	17
1.8 Modélisation du module photovoltaïque	18
1.9 Performances d'un module photovoltaïque	20
1.9.1 Effet de température	22
1.9.2 Effet d'irradiance	23
1.10 Modélisation des convertisseurs CC-CC	24
1.10.1 Convertisseur Abaisseur (Buck)	25
1.10.2 Convertisseur Élévateur (boost)	26
1.10.3 Convertisseurs Abaisseur-Élévateur (Buck-Boost))	26
1.11 Classification des méthodes de suivi du point de puissance maximale	27
1.12 Les méthodes hors ligne (indirectes)	29
1.12.1 Technique du tension en circuit ouvert (FOCV)	29
1.12.2 Technique du courant de court-circuit (FSCC)	31
1.13 Les méthodes en ligne (direct)	32
1.13.1 Technique de la perturbation et observation (P&O)	32
1.13.2 Technique de la conductance incrémentale (INC)	34
1.14 Problématiques	36
1.14.1 Problème d'équilibrer la vitesse et la stabilité	37
1.14.2 Problèmes de précision et de dérive (drift) lors des fluctuations rapides d'irradiance.	38
1.15 Objectifs de la recherche	38
1.16 Méthodologie	39
1.17 Conclusion	40
CHAPITRE 2 IMPACT DU PROBLÈME DE DÉRIVE (DRIFT) SUR L'ALGORITHME MODIFIÉ ET CONVENTIONNEL PERTURBATION ET OBSERVATION (P&O)	43
2.1 Introduction	43

2.2	Recherches anterieures sur les p&o modifié avec une perturbation fixe :	43
2.3	Analyse du problème de dérive et l'algorithme P&O modifié	45
2.3.1	Problème de dérive	45
2.3.2	Algorithme P&O modifié	47
2.4	Simulation	52
2.4.1	Structure de simulation	52
2.4.2	Méthodologie de simulations	53
2.5	Résultats	55
2.6	Conclusion	59
CHAPITRE 3 NOUVEL ALGORITHME P&O MODIFIÉ ET ADAPTATIF BASÉ SUR LA LOGIQUE FLOUE POUR SUIVI DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE DUN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE 61		
3.1	Introduction	61
3.2	Méthodologie de la logique floue	61
3.2.1	La Fuzzification	63
3.2.2	Base de règles et définitions	63
3.2.3	Défuzzification	64
3.2.4	Système d'inférence floue Mamdani	64
3.3	Recherches anterieures sur les p&o basées sur la logique floue (FLC)	65
3.4	Problématique	66
3.5	Simulation	69
3.5.1	Structure de simulation	69
3.5.2	La configuration du contrôleur à logique floue proposée	69
3.5.3	Méthodologie de simulations	73
3.6	Résultats	75
3.7	Conclusion	79
CHAPITRE 4 VALIDATION DE L'ALGORITHME MP&O ADAPTATIF PROPOSÉ EN TEMPS RÉEL DANS LE LABORATOIRE 81		
4.1	Introduction	81
4.2	Schéma de la configuration expérimentale du système PV et spécifications techniques	81
4.3	Description du Prototype et Validation expérimentale	83
4.4	Résultats Expérimentaux	85
4.5	Conclusion	89
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		91
BIBLIOGRAPHIE		95

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Revue sur les méthodes MPPT 36
Tableau 2.1	Paramètres de panneaux solaires 54
Tableau 2.2	Paramètres de convertisseur élévateur 54
Tableau 3.1	Des règles floues pour MP&O adaptatif 72
Tableau 3.2	Comparaison des résultats entre l'algorithme MP&O proposé et l'algorithme P&O modifié 79
Tableau 4.1	Spécifications techniques des composants principaux du système PV .. 83

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Les expéditions de panneaux solaires photovoltaïques aux États-Unis 2
Figure 0.2	Frais d'expédition des panneaux solaires au cours des 10 dernières années 3
Figure 0.3	Opportunités d'emploi dans le domaine des énergies renouvelables 3
Figure 0.4	Emploi dans le solaire photovoltaïque en 2022 dans les dix premiers pays 4
Figure 1.1	Tendances et statistiques des systèmes photovoltaïques 2021 8
Figure 1.2	Évolution des installations annuelles de PV 9
Figure 1.3	Carte montrant la capacité photovoltaïque (en MW) au Canada 2021 9
Figure 1.4	Plan de fonctionnement d'un système solaire photovoltaïque 10
Figure 1.5	Catégories de systèmes photovoltaïques 11
Figure 1.6	Système solaire connecté à un réseau 11
Figure 1.7	Système solaire autonome 13
Figure 1.8	Système solaire hybride 14
Figure 1.9	Processus de construction Panneau Photovoltaïque 15
Figure 1.10	La structure d'une cellule solaire photovoltaïque 16
Figure 1.11	Différents de cellules photovoltaïques 18
Figure 1.12	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque 19
Figure 1.13	Courbes I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension) avec température variable 22
Figure 1.14	Courbes I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension) avec irradiance variable 24
Figure 1.15	Différents types de convertisseurs 25
Figure 1.16	Circuit d'un Convertisseur Abaisseur 25

Figure 1.17	Circuit d'un Convertisseur Convertisseur Élévateur (Boost)	26
Figure 1.18	Circuit d'un Convertisseurs Abaisseur-Élévateur	27
Figure 1.19	Les différentes catégories MPPT	28
Figure 1.20	Nouvelle classification des techniques MPPT	29
Figure 1.21	Organigramme de l'algorithme du tension en circuit ouvert (FOCV)	30
Figure 1.22	Organigramme de l'algorithme courant de court-circuit (FSCC)	31
Figure 1.23	Principe de fonctionnement de L'algorithme P&O	33
Figure 1.24	Organigramme de l'algorithme perturbation et observation	34
Figure 1.25	Organigramme de l'algorithme (INC)	35
Figure 1.26	Organigramme de notre Méthodologie	40
Figure 2.1	Analyse de dérive, (a) dérive en cas d'augmentation normale et (b) dérive en cas l'augmentation rapide de l'irradiance	46
Figure 2.2	Organigramme de l'algorithme P&O conventionnel avec dérive	47
Figure 2.3	Caractéristiques I-V pour analyser le changement de courant avec l'augmentation d'irradiance	50
Figure 2.4	Caractéristiques P-V avec un algorithme Perturbation et Observation (P&O) modifié	50
Figure 2.5	Organigramme de l'algorithme (P&O) modifié	51
Figure 2.6	Structure de simulation	52
Figure 2.7	Bloc Simulink de l'algorithme (P&O) modifié	53
Figure 2.8	Courbe d'irradiance pour scénario 2	55
Figure 2.9	Suivi de puissance Avec algorithme P&O conventionnel et modifié du scénario 1	56
Figure 2.10	Suivi de tension Avec algorithme P&O conventionnel et modifié du scénario 1	56
Figure 2.11	Suivi de puissance Avec algorithme P&O conventionnel et modifié du scénario 2	58

Figure 2.12	Suivi de tension Avec algorithme P&O conventionnel et modifié du scénario 2	58
Figure 3.1	Configuration de base d'un contrôleur à logique floue	62
Figure 3.2	Différentes les configurations des fonctions d'appartenance d'un ensemble flou	64
Figure 3.3	Les flèches représentent le pas de la perturbation (la taille du pas fixes et adaptatives) utilisé pour suivre le MPP	67
Figure 3.4	Organigramme de l'algorithme MP&O adaptatif proposé	68
Figure 3.5	Structure du modèle l'algorithme MP&O adaptatif proposé	69
Figure 3.6	Organigramme du contrôleur à logique floue proposé	70
Figure 3.7	Fonctions d'appartenance pour le paramètre (E)	71
Figure 3.8	Fonctions d'appartenance pour le paramètre (DE)	71
Figure 3.9	Fonctions d'appartenance pour C(Taille de pas adaptative)	72
Figure 3.10	Surfaces des règles floues pour MP&O adaptative	73
Figure 3.11	Modèle Simulink de l'algorithme MP&O adaptatif	74
Figure 3.12	Modèle SIMULINK du contrôleur logique flou (FLC) proposé	74
Figure 3.13	Courbe de l'irradiance	75
Figure 3.14	Suivi de la puissance avec l'algorithme MP&O adaptatif proposé et P&O modifié	76
Figure 3.15	Vue agrandie à 0,5 seconde	76
Figure 3.16	Suivi de la puissance avec l'algorithme MP&O adaptatif proposé et P&O modifié	77
Figure 3.17	Vue agrandie à 0,5 seconde	77
Figure 4.1	Schéma de l'architecture électrique expérimentale d'un système photovoltaïque	82
Figure 4.2	Installation Expérimentale en Laboratoire pour Tester le Système PV avec Algorithme MP&O Adaptatif	84

Figure 4.3	Simulateur Photovoltaïque TerraSAS	85
Figure 4.4	Module dSPACE CP1104	85
Figure 4.5	Courbes de Puissance pour MP&O Adaptatif (en bas) et P&O modifié (en haut)	86
Figure 4.6	Courbes de Courant pour MP&O Adaptatif (en bas) et P&O modifié (en haut)	87
Figure 4.7	Courbes de Tension pour MP&O Adaptatif (en bas) et P&O modifié (en haut)	88

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

EIA	Energy Information Administration
MPPT	Maximum Power Point Tracking (suivi de point de puissance maximale)
P&O	Perturb and Observe (Perturbation et observation)
PV	Photovoltaic Systems (Systèmes photovoltaïques)
INC	Incremental Conductance (Conductance Incrémentale)
CC	Short Circuit Current (Courant de Court-Circuit)
OCV	Open Circuit Voltage (la tension en circuit ouvert)
IEA PVPS	International Energy Agency Photovoltaic Power Systems (Agence Internationale de l'Énergie - Systèmes Photovoltaïques)
MPP	Maximum Power Point (Point de Puissance Maximale)
P-V	Power-Voltage Curve (Courbe Puissance-Tension)
I-V	Current-Voltage Curve (Courbe courant-tension)
GWO	Grey Wolf Optimization (Optimisation par Loup Gris)
FLC	Fuzzy Logic Controller (Contrôleur par Logique Floue)
IA	Artificial Intelligence (Intelligence Artificielle)
CC-CC	Convertisseur élévateur
C	Taille de pas adaptatif
E	Erreur
DE	variation d'erreur
MP&O	Algorithme proposé
PSO	Particle Swarm Optimization (Optimisation par Essaim de Particules)
ANN	Artificial Neural Networks (Réseau de Neurones Artificiels)
IRENA	International Renewable Energy Agency (Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

GW	Giga Watt
°C	Temperature
I_d	Courant de diode (A)
T_a	temps de perturbation (s)
dI	changement de courant (A)
IPV	Courant du panneau PV (A)
G	irradiance absolue (W/m ²)
G _n	irradiance nominale (W/m ²)
R _L	Résistance de charge (Ohm)
C _i	Capacité du condensateur
L	Inductance (H)
W/m ²	watt par mètre carré
P	Puissance (watt)

INTRODUCTION

Actuellement, le monde souffre du changement climatique. Il s'agit d'un des défis mondiaux les plus urgents. Il est principalement causé par l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Gil-Antonio, Belem Saldivar-Marquez & Portillo-Rodriguez, 2016). Les effets du changement climatique incluent l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation des températures, les phénomènes météorologiques extrêmes plus fréquents (ondes de chaleur, tempêtes, sécheresses, inondations), la perturbation des écosystèmes, la perte de biodiversité et des conséquences sur la santé humaine.

Les activités humaines, telles que la combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole, et gaz naturel), ont considérablement augmenté la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Avec plus de 7 milliards de personnes dans le monde (Hamza, Chanaba, Merah, Krim & Harrag, 2021), les besoins en énergie augmentent, ce qui rend nécessaire de trouver des alternatives aux énergies traditionnelles. (charbon, pétrole, gaz naturel).

Lutter contre la chaleur est l'une des préoccupations des chercheurs pour assurer la transition vers un avenir énergétique plus durable. L'énergie solaire joue un rôle central dans la réalisation de ces objectifs. Parce qu'elle exploite une lumière solaire abondante et renouvelable et qu'elle est considérée comme une alternative prometteuse aux combustibles fossiles traditionnels, l'énergie solaire continue de plus en plus populaire et abordable (Ahmad, Murtaza & Sher, 2019). Sa capacité à fournir une énergie abondante et renouvelable tout en réduisant les effets environnementaux en fait un rôle crucial pour relever les défis du XXI^e siècle.

Au cours des dix dernières années, la technologie solaire photovoltaïque (PV) a connu une forte croissance. Selon les statistiques de l'Energy Information Administration (EIA) des États-Unis, les expéditions de panneaux solaires ont augmenté. La figure 0.1 montre cette augmentation, tandis que la figure 0.2 montre également une diminution significative des coûts d'expédition des panneaux solaires au cours des dix dernières années. Cette baisse des coûts a été essentielle

pour la croissance de ce secteur et la création d'opportunités d'emploi. Un rapport de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) indique, comme le montre la figure 0.3, que les opportunités d'emploi dans les énergies renouvelables ont augmenté entre 2012 et 2022. En 2022, 4,9 millions d'emplois ont été créés dans le monde en 2022 grâce à l'énergie solaire photovoltaïque. La Chine est devenue très importante dans l'industrie solaire photovoltaïque. Elle représente environ 56% des emplois dans ce domaine dans le monde, comme illustré par la figure 0. 4.

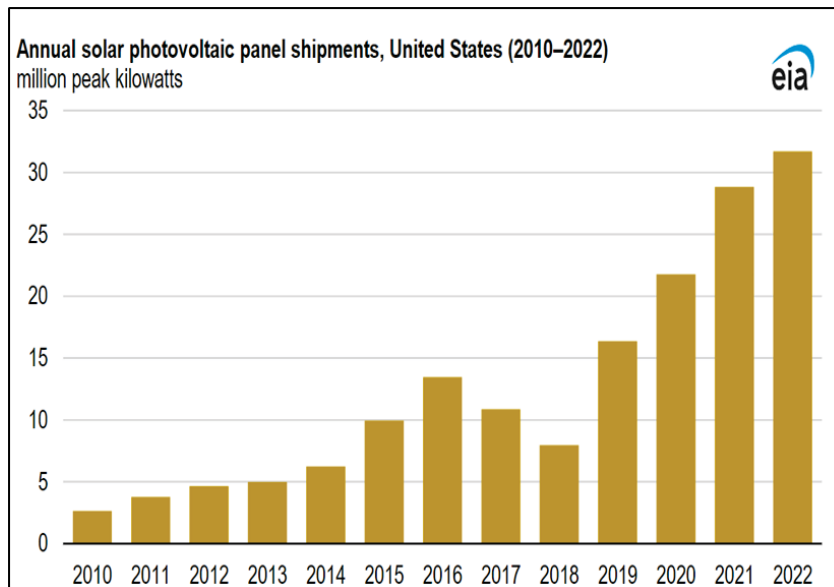


Figure 0.1 Les expéditions de panneaux solaires photovoltaïques aux États-Unis

Tirée de eia.gov (2023)

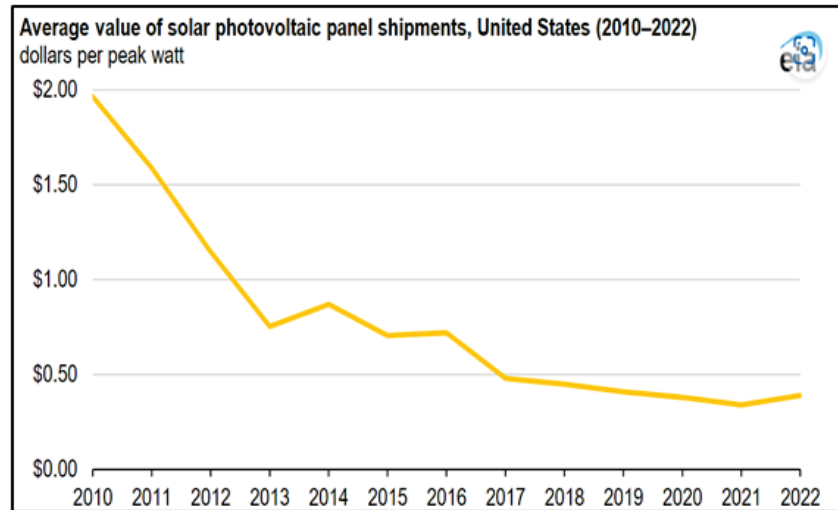


Figure 0.2 Frais d'expédition des panneaux solaires au cours des 10 dernières années
Tirée de eia.gov (2023)

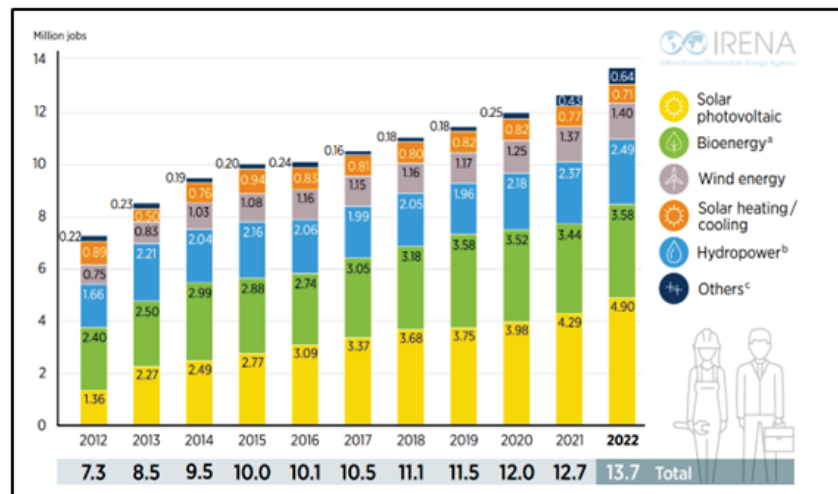


Figure 0.3 Opportunités d'emploi dans le domaine des énergies renouvelables
Tirée d'IRENA (2023)

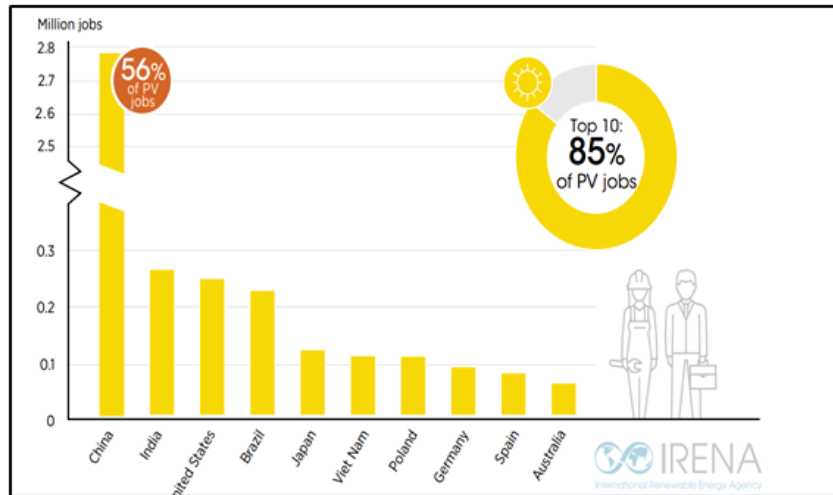


Figure 0.4 Emploi dans le solaire photovoltaïque en 2022 dans les dix premiers pays
Tirée d'IRENA (2023)

Les centrales photovoltaïques rencontrent des difficultés pour maximiser l'extraction d'énergie des panneaux solaires. Pour résoudre ces problèmes, les systèmes photovoltaïques bénéficient de l'intégration de la technologie Maximum Power Point Tracking (MPPT). L'objectif de cette technique est d'optimiser les performances des panneaux solaires en les exploitant à leur point de puissance maximum. (Motahhir, El Hammoumi & El Ghzizal, 2020).

Parmi les différents algorithmes MPPT disponibles, l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O) est largement reconnu pour son utilisation élevée et son efficacité. Cet algorithme est préféré en raison de sa simplicité et de son faible coût. Cependant, il a certaines limites et problèmes, en particulier lorsque le système photovoltaïque fonctionne dans des conditions de rayonnement fluctuant rapidement (Guiza, Ounnas, Soufi, Bouden & Maamri, 2019). De nombreux chercheurs ont proposé des stratégies pour traiter ces problèmes en modifiant l'algorithme de perturbation et d'observation de MPPT et en incluant d'autres ajustements. Mais ces modifications ont finalement des limites et des problèmes (GOUABI).

Dans cette étude, nous proposons une nouvelle méthode qui implique l'intégration de technologies intelligentes telles que la logique floue afin de surmonter ces limites. La logique floue permet la

création de règles et de fonctions organiques qui décrivent comment les entrées (telles que la tension et le courant) sont liées aux sorties (telles que le rapport cyclique, C). Cela améliore les performances des contrôleurs MPPT en augmentant leur adaptation, leur précision et leur efficacité. Ce mémoire est structuré en plusieurs chapitres principaux et les chapitres sont organisés comme suit :

Premier chapitre, revue de la littérature sur les algorithmes MPPT, l'énergie solaire, et les systèmes photovoltaïques (PV) Cela impliquera d'étudier et d'analyser l'évaluation de la réponse des systèmes photovoltaïques aux conditions de l'irradiance et de température qui fluctuent rapidement. Nous analyserons également les statistiques relatives aux progrès de l'énergie solaire au cours des dernières années. Et aussi. Comprendre l'environnement actuel des technologies MPPT, leur évolution et leurs types.

deuxième chapitre , L'algorithme P&O modifié sera émulé et comparé au P&O conventionnel à l'aide de MATLAB Simulink. Nous analyserons également le problème de dérive (drift) dans l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O) conventionnel. Cette analyse couvrira à la fois l'aspect théorique et les études de simulation.

troisième chapitre, nous simulons le nouvel algorithme P&O proposé, qui est adaptatif et modifié en utilisant la logique floue. L'intégration du module de logique floue améliorera l'efficacité du système à faire des jugements précis et opportuns, améliorant ainsi sa réactivité aux fluctuations rapides de l'irradiance. Toutes les méthodes que nous étudions seront testées et évaluées en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink.

Le dernier chapitre traite de l'implémentation en temps réel de l'algorithme MP&O adaptatif basé sur la logique floue, et valide son efficacité. Il décrit la configuration matérielle et logicielle, les étapes expérimentales et l'analyse des résultats obtenus en laboratoire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

L'épuisement des ressources fossiles cause des problèmes environnementaux et des risques pour la santé. Il est important de passer à des énergies plus propres et durables pour réduire ces effets et les émissions de carbone. L'énergie solaire est une solution propre et renouvelable. Contrairement aux combustibles fossiles, les panneaux solaires génèrent de l'électricité sans produire d'émissions.

Pour améliorer les performances et l'efficacité des systèmes photovoltaïques, il est crucial d'effectuer un suivi efficace du point de puissance maximal (MPPT). La technique du point de puissance maximal (MPPT) est une méthode utilisée pour optimiser la puissance des panneaux solaires. Il implique de faire des ajustements constants aux paramètres de fonctionnement des panneaux pour garantir qu'ils fonctionnent à leur point de puissance le plus élevé (MPP) (Katche, Makokha, Zachary & Adaramola, 2023). Les méthodes de perturbation et observation (P&O) et de la conductance incrémentale (INC) sont largement utilisées pour surveiller le MPPT dans les systèmes solaires (Subudhi & Pradhan, 2012). En plus de ces techniques, il existe des méthodes fractionnelles qui mesurent spécifiquement les valeurs fractionnaires de certains paramètres, comme le courant de court-circuit (FSCC) et la tension de circuit ouvert (FOCV) (Bollipo, Mikkili & Bonthagorla, 2020).

Dans ce chapitre, nous présentons une revue de la littérature consacrée aux systèmes photovoltaïques (PV) et les énergies renouvelables (Énergie solaire). Nous présentons les types de systèmes PV, les composants essentiels comme les panneaux solaires et les convertisseurs, ainsi que les différents algorithmes de suivi du point de puissance maximal (MPPT). Nous analysons aussi les avantages et les limitations de chaque algorithme MPPT.

1.2 Énergie solaire

selon les statistiques d'agence (IEA PVPS), la figure 1.1, À la fin de l'année 2021, la capacité photovoltaïque globale avait atteint 945,7 GW, tandis que le marché annuel des installations photovoltaïques avait atteint 176 GW à l'échelle mondiale. Ces chiffres montrent une croissance importante de l'industrie de l'énergie solaire. De plus, la capacité photovoltaïque a contribué à réduire les émissions de carbone, en évitant l'émission de 1060 millions de tonnes de CO₂ en 2021, soit environ 3 % des émissions mondiales.

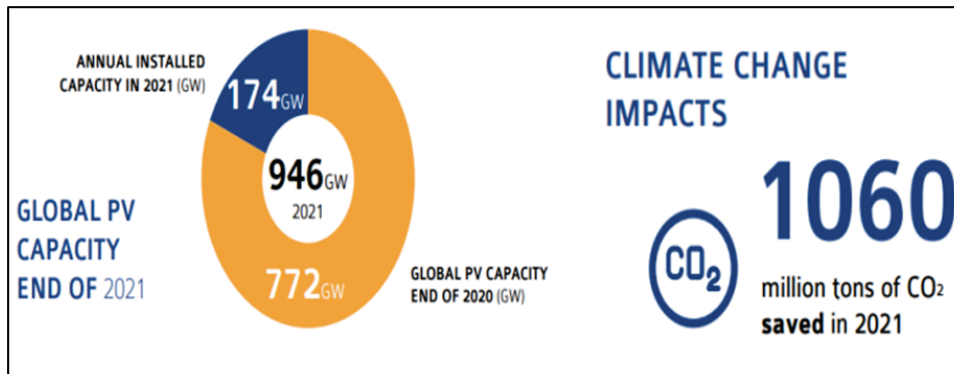


Figure 1.1 Tendances et statistiques des systèmes photovoltaïques 2021

Tirée de IEA PVPS (T1-43 :2022)

En 2021, les pays membres du Programme des systèmes d'énergie photovoltaïque de l'Agence internationale de l'énergie (IEA PVPS) ont installé plus de 129 GW. De plus, les pays non-membres de l'IEA PVPS ont ajouté environ 44 GW de capacité photovoltaïque. Comme le montre la figure 1.2.

La Chine est restée le pays leader en termes d'installations photovoltaïques pour la neuvième année consécutive, ajoutant près de 55 GW de capacité en 2021. La capacité installée totale de la Chine a atteint 308,5 GW, représentant 31 % des installations photovoltaïques mondiales de l'année

Selon statistiques d'agence (IEA PVPS) Figure 1.3, au 31 décembre 2021, le secteur photovoltaïque du Canada avait atteint une capacité installée d'environ 4,55 gigawatts (GW). Cette capacité

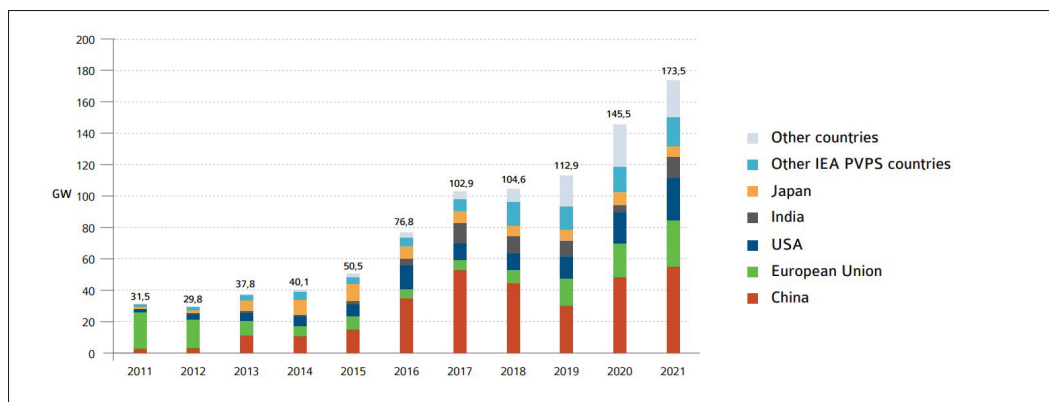


Figure 1.2 Évolution des installations annuelles de PV

Tirée de IEA PVPS (T1-43 :2022)

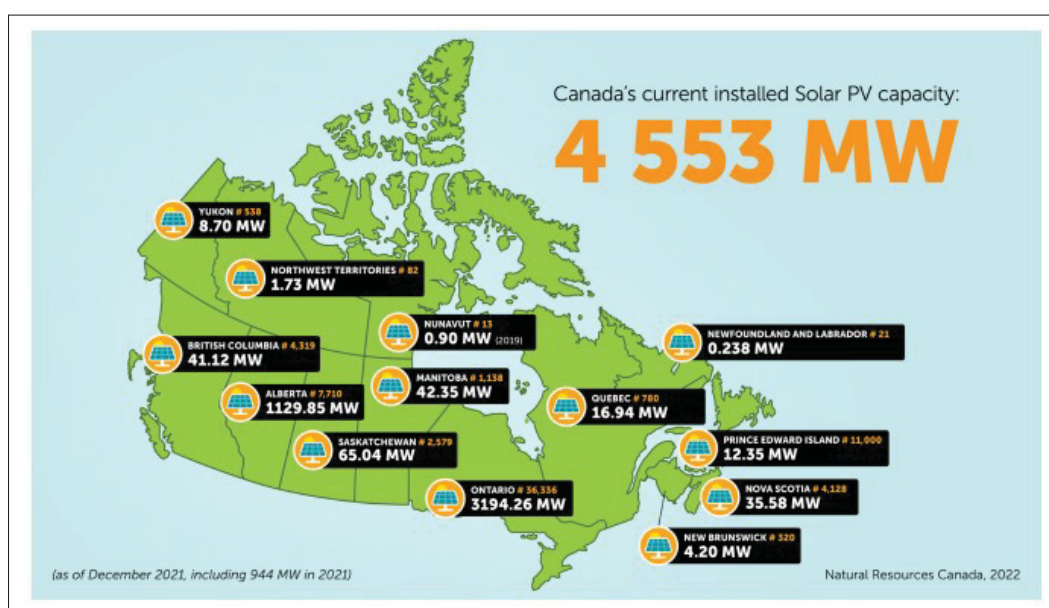


Figure 1.3 Carte montrant la capacité photovoltaïque (en MW) au Canada 2021

Tirée de IEA PVPS ANNUAL REPORT (2022 CANADA)

représentait une augmentation substantielle de 26 % par rapport à l'année précédente, démontrant ainsi une croissance significative du secteur de l'énergie solaire dans le pays.

1.3 Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque (PV), ou système d'énergie solaire, est un dispositif qui utilise des panneaux solaires pour transformer la lumière solaire en énergie électrique. Ces systèmes sont largement utilisés pour exploiter l'énergie renouvelable du soleil et peuvent fournir de l'électricité pour une multitude d'utilisations. La figure 1.4 illustre les différents composants d'un système photovoltaïque, tels que les panneaux solaires (modules photovoltaïques), l'onduleur, les batteries et le contrôleur.

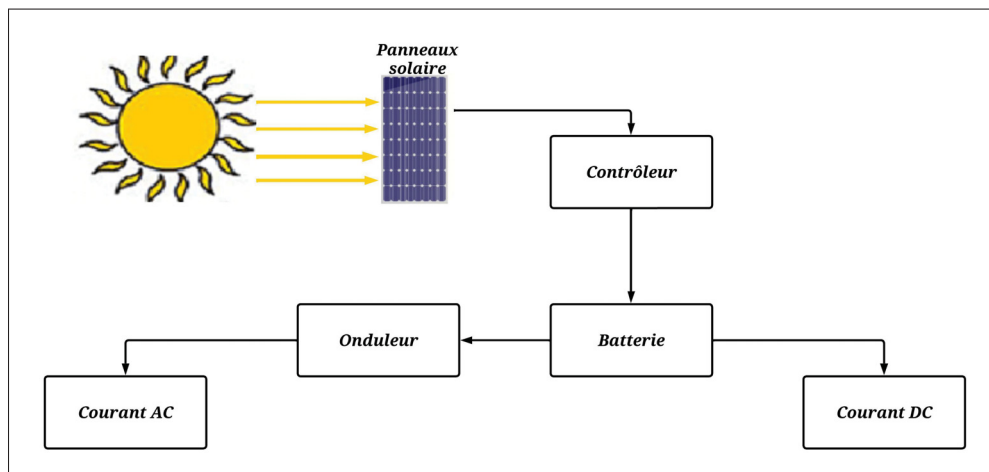


Figure 1.4 Plan de fonctionnement d'un système solaire photovoltaïque

1.4 Type des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques (PV) peuvent être généralement classés en trois groupes principaux en fonction de leur connexion et de leur fonctionnalité. La figure 1.5 présente les trois catégories. Ces trois catégories couvrent les principales fonctionnalités et les options de connectivité pour les systèmes photovoltaïques. Toutefois, chaque catégorie peut contenir divers sous-types et configurations adaptées aux besoins énergétiques et aux conditions environnementales distinctes.

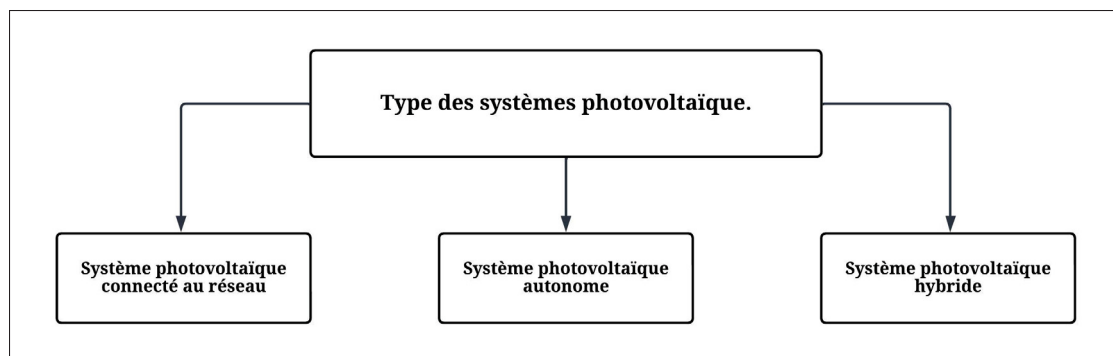


Figure 1.5 Catégories de systèmes photovoltaïques

1.4.1 Système d'énergie solaire lié au réseau (connecté au réseau)

Un système photovoltaïque (PV) est une centrale solaire reliée directement au réseau électrique local. Un compteur bidirectionnel dans un système PV connecté au réseau mesure le courant électrique dans les deux directions (Karthikeyan, Rajasekar, Das, Karuppanan & Singh, 2017)

Les avantages et inconvénients sont :

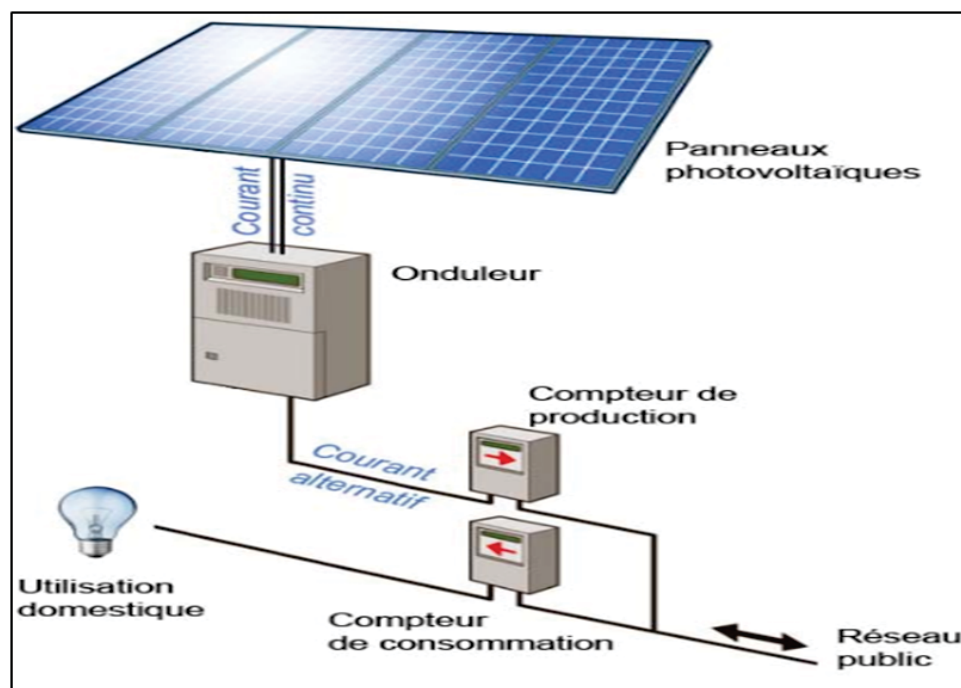


Figure 1.6 Système solaire connecté à un réseau

Tirée de aquaa.fr

Avantages :

1. Les systèmes connectés au réseau peuvent contribuer à la stabilité du réseau et réduire la pression sur le réseau.
2. Les systèmes photovoltaïques (PV) connectés au réseau peuvent entraîner des économies substantielles sur les factures d'électricité en réduisant la quantité d'énergie achetée à partir du réseau

Inconvénients :

1. Quand le réseau est en panne, les systèmes photovoltaïques (PV) ne produisent pas d'électricité.
2. Ces systèmes n'assurent pas une autonomie totale par rapport aux sources d'énergie extérieures. Ils sont liés par les politiques de réseau et la disponibilité du réseau

1.4.2 Système d'énergie solaire autonome

Un système photovoltaïque (PV) autonome est une installation solaire autonome qui ne dépend pas du réseau électrique local. Ces systèmes sont spécialement conçus pour produire et stocker leur propre électricité, ce qui les rend bien adaptés pour les régions isolées avec un accès limité ou nul au réseau électrique. Voici les avantages et les inconvénients :

Avantages :

1. Les systèmes photovoltaïques (PV) off-grid offrent une autonomie énergétique complète, permettant aux utilisateurs de produire et de stocker leur propre électricité sans dépendre du réseau électrique.
2. Les systèmes hors réseau, équipés d'un stockage de batterie et de générateurs d'urgence, peuvent assurer une alimentation électrique fiable même pendant de longues périodes de faible rayonnement solaire.

Inconvénients :

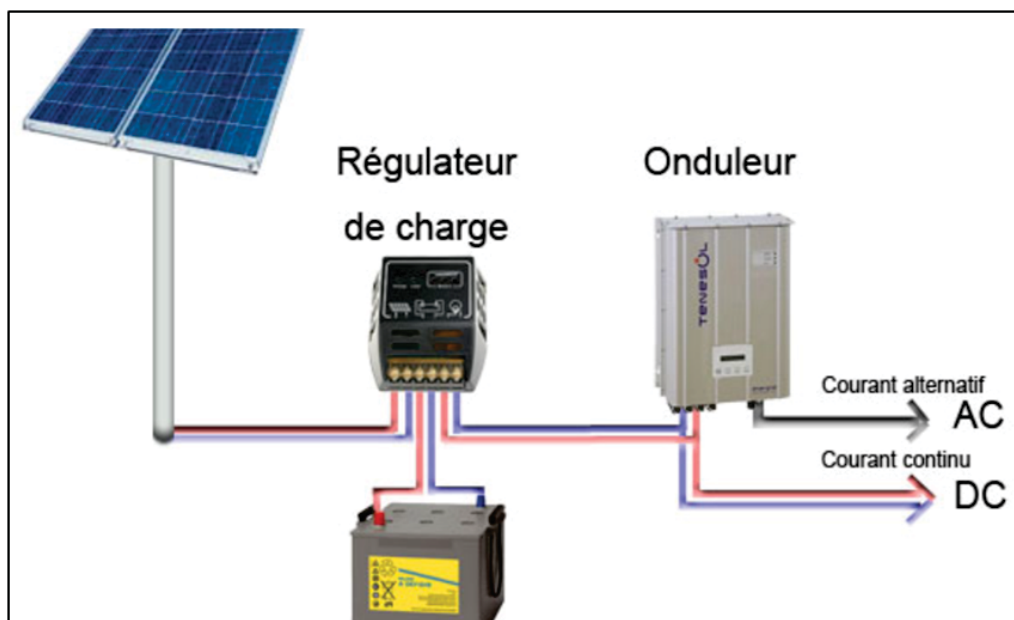


Figure 1.7 Système solaire autonome

Tirée de solutionselectricitegenerale.com

1. Une perte d'énergie se produit lors de la conversion du courant continu en courant alternatif et pendant la recharge et le déchargement des batteries, ce qui pourrait affecter l'efficacité du système.
2. Les batteries ont une durée de vie limitée et nécessitent une maintenance régulière et un remplacement ultérieur, ce qui contribue aux dépenses existantes.

1.4.3 Système d'énergie solaire hybride

Un système photovoltaïque hybride intègre des panneaux solaires, d'autres sources d'énergie et des batteries pour fournir une électricité plus fiable et efficace. Ces systèmes sont conçus pour surmonter certaines des limites des systèmes solaires PV, y compris la production sporadique d'énergie et la dépendance à l'électricité du réseau pendant les périodes de faible luminosité solaire. Voici les avantages et les inconvénients :

Avantages :

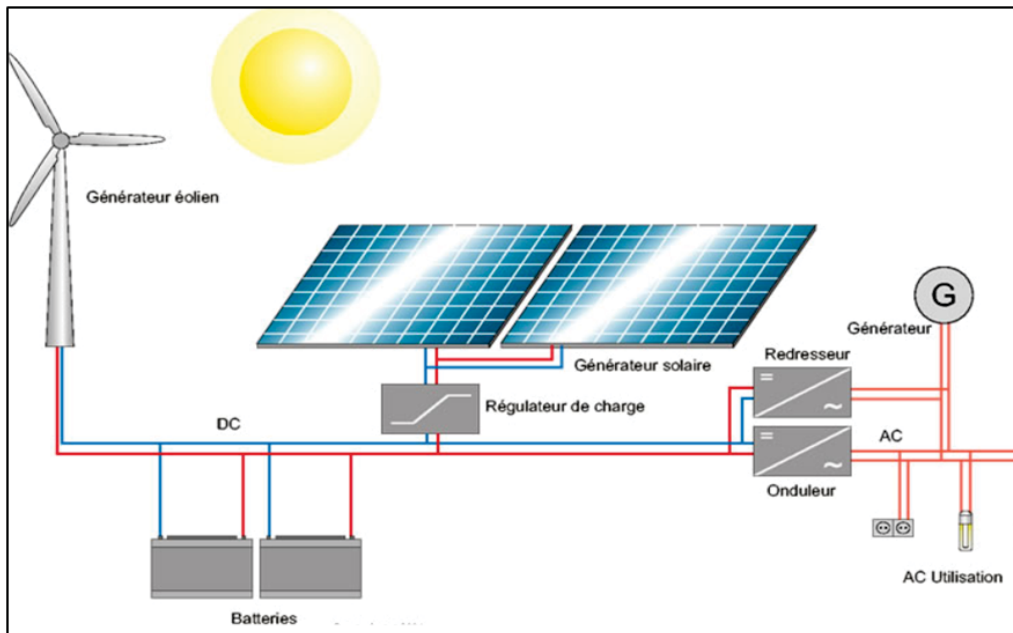


Figure 1.8 Système solaire hybride

Tirée de transtech-africa.de

1. Un système hybride garantit une alimentation plus fiable en utilisant de nombreuses sources, telles que l'énergie solaire, les batteries et les générateurs d'urgence. Cela réduit le risque d'interruptions de courant pendant les périodes de faible rayonnement solaire.
2. Ce type de système offre également la flexibilité de choisir entre la revente totale (toute l'énergie produite est vendue au réseau) ou la revente du surplus (L'énergie est d'abord utilisée pour le foyer, et l'excédent est revendu, réduisant ainsi les coûts énergétiques) de l'énergie produite.

Inconvénients :

1. Le coût de l'installation d'un système hybride est plus élevé qu'avec un système solaire autonome ou connecté au réseau en raison des composants supplémentaires tels que les batteries et les générateurs de secours.

1.5 Panneau Photovoltaïque

Les cellules solaires photovoltaïques forment un panneau solaire. Ces cellules sont généralement faites de silicium, un matériau semi-conducteur. Lorsque la lumière solaire frappe une cellule solaire, elle excite les électrons dans le silicium. Un panneau solaire est composé de plusieurs cellules solaires sur un support rigide. Pour les protéger et les rendre plus durables, les panneaux sont souvent recouverts de verre.

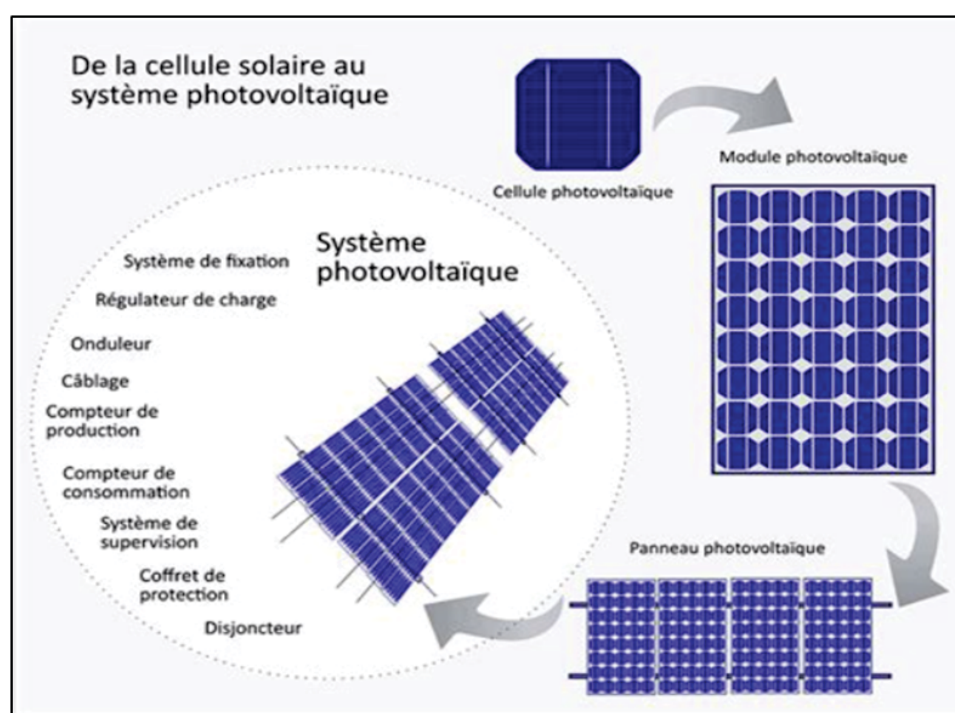


Figure 1.9 Processus de construction Panneau Photovoltaïque

Tirée de aezeo.com

La figure 1.9 montre les étapes de la construction d'un système photovoltaïque. Cela commence par une unité de base de capture d'énergie solaire, appelée cellule solaire, et se termine avec un système complet qui est capable de convertir l'énergie de la lumière solaire.

1.6 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Une cellule solaire, appelée cellule photovoltaïque, est un appareil électronique spécialement conçu pour transformer directement l'énergie solaire en électricité par l'utilisation de l'effet PV, qui englobe à la fois les phénomènes physiques et chimiques. Le concept opérationnel d'une cellule photovoltaïque peut être délimité à travers une série d'étapes (Al-Ezzi & Ansari, 2022) :

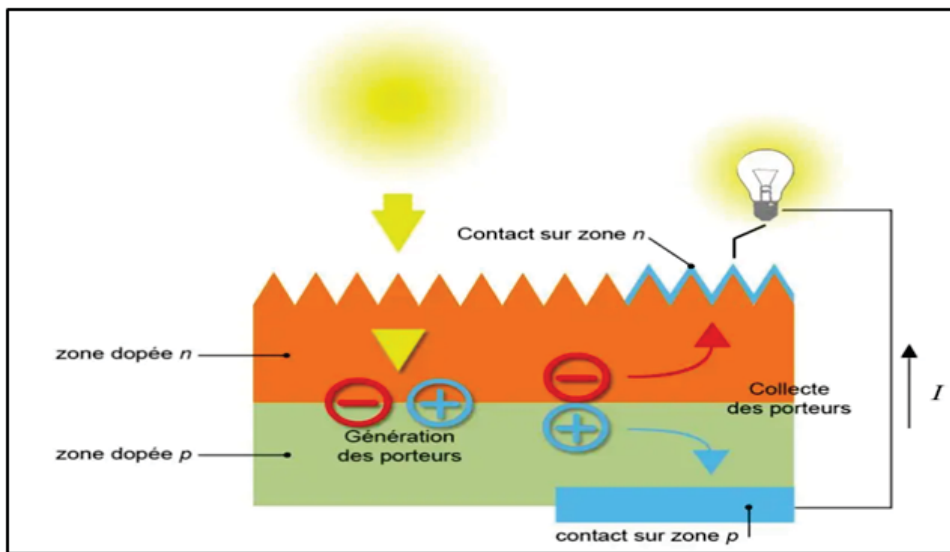


Figure 1.10 La structure d'une cellule solaire photovoltaïque

Tirée de futura-sciences.com

- Lorsque le rayonnement solaire interagit avec la cellule photovoltaïque, le matériau semi-conducteur, généralement le silicium, absorbe les photons. L'énergie des photons est transférée aux électrons dans le matériau semi-conducteur, ce qui leur permet de se libérer de leur position normale à l'intérieur de la grille atomique. Cela crée des "trous" (les positions vacantes laissées par les électrons libérés). La séparation des charges électriques (électrons et trous) crée un potentiel électrique.
- Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec une jonction P-N, qui est essentiellement une interface entre deux types de matériaux semi-conducteurs (type P et type N). Le côté P est dopé par des éléments qui ont moins d'électrons que le silicium, tandis que le côté N est dopé par des éléments qui ont plus d'électrons. Cette jonction crée un champ électrique

permanent à l'interface entre les deux matériaux. Lorsque les électrons sont libérés, ils sont attirés vers le côté N, tandis que les trous sont attirés sur le côté P.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque peut être affecté par plusieurs facteurs, tels que la température, l'angle d'incidence de la lumière, la présence de poussière ou d'autres couvertures sur la surface de la cellule, et l'effet des ombres, La Figure 1.10 illustre le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

1.7 Différents types de panneaux solaire

Il existe plusieurs types de Panneaux solaire, chaque type a ses propres caractéristiques et applications(Anduła & Heim, 2020). Les principaux types sont :

Panneaux solaires monocristallins :

- Fabriqués à partir de silicium monocristallin.
- Efficacité élevée (environ 15-20%).
- Coût plus élevé que les autres types.
- Utilisées dans des applications nécessitant une haute efficacité dans un espace limité.
- Performances supérieures dans des conditions de faible luminosité.
- Longue durée de vie (jusqu'à 25 ans ou plus).
- Aspect noir uniforme.

Panneaux solaires polycristallins :

- Composés de silicium polycristallin.
- Efficacité légèrement inférieure à celle des panneaux monocristallins (environ 13-16%).
- Moins chers que les panneaux monocristallins.
- Utilisées dans des installations résidentielles et commerciales où l'espace n'est pas une contrainte majeure.
- Durée de vie légèrement plus courte.
- Aspect bleuté et moins uniforme que les panneaux monocristallins.

Panneaux solaires en couches minces :

- Technologie différente, utilisant des matériaux comme le tellure de cadmium ou le silicium amorphe.
- Plus flexible et peut être utilisé sur des surfaces courbes.
- Moins efficace que les panneaux monocristallins et polycristallins (environ 10-13%).
- Plus sensible à la dégradation environnementale.
- Coût de production généralement plus bas.
- Aspect plus uniforme et souvent plus sombre.

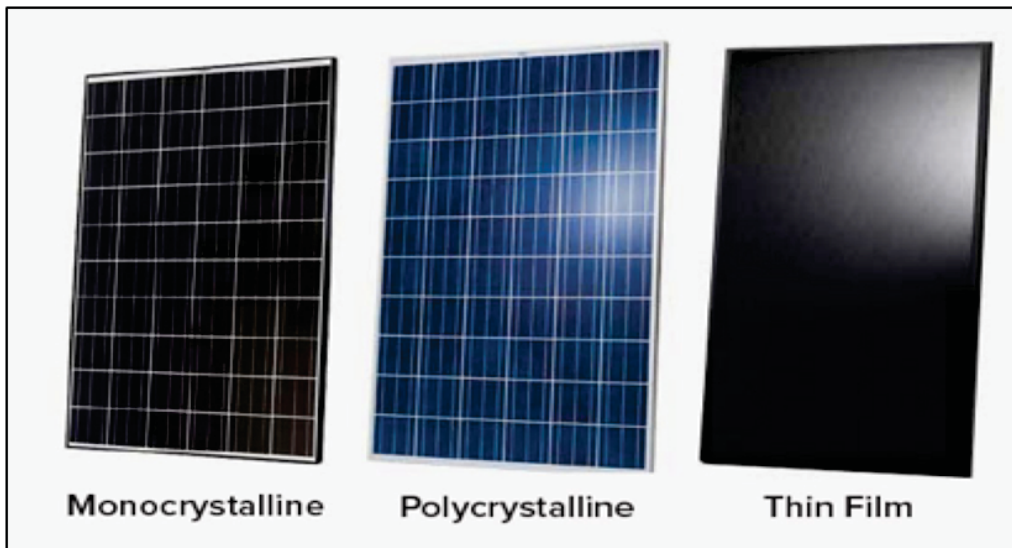


Figure 1.11 Différents de cellules photovoltaïques

Tirée de artyseo.fr

1.8 Modélisation du module photovoltaïque

La modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque permet de comprendre et de prédire son comportement en réponse à différentes conditions de d'irradiance et de température. Une cellule photovoltaïque peut être modélisée comme un circuit électrique composé de sources de courant, de diodes et de résistances, La figure 1.12 représente le schéma électrique d'une cellule solaire.(Khabou, Souissi & Aitouche, 2020)

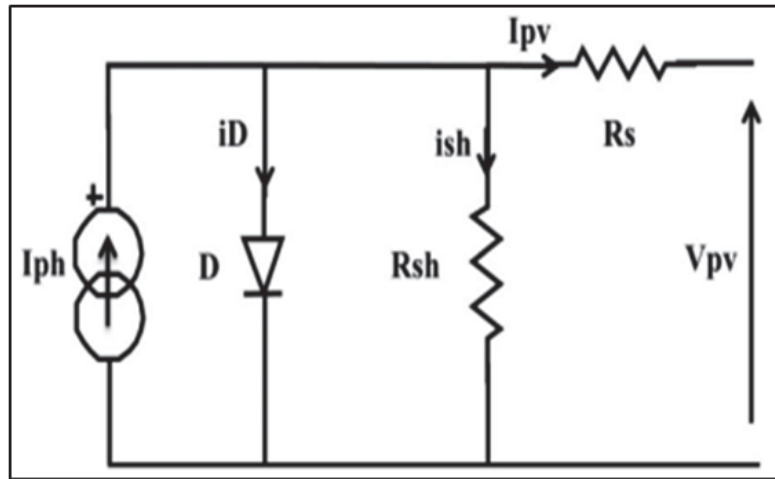


Figure 1.12 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Le modèle à diode simple est le plus couramment utilisé en raison de sa simplicité et de sa capacité à décrire avec précision le comportement de la cellule dans des conditions de fonctionnement standard. Dans ce modèle, la cellule est représentée par une source de courant en parallèle avec une diode. Les équations électriques qui décrivent le comportement de la cellule incluent les effets de ces composants. (Isknan, Asbayou, Aamoume, Ihlal & Bouhouch, 2022) :

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{N \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) \quad (1.1)$$

- I_d (Diode) : Il s'agit de la diode à jonction p-n qui représente le courant de diode (I_d) circulant à travers la cellule, qui est dû aux porteurs de charge dans le matériau semi-conducteur.

$$I_{ph} = \left[I_{sc} + K_1 (T_c - T_{ref}) \right] \frac{G}{G_{ref}} \quad (1.2)$$

- I_{ph} (Courant Photo-généré) : c'est la source de courant qui représente le courant généré par la cellule en raison de l'absorption de lumière.

$$I_{sh} = \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

- I_{sh} : représente le courant , il passe à travers la résistance de dérivation (R_{sh}) à cause des défauts dans la cellule, créant des chemins alternatifs pour le courant.

Le courant de sortie de la cellule PV peut être décrit par l'équation :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.4)$$

$$I = \left[I_{sc} + K_t (T_c - T_{ref}) \right] \cdot \frac{G}{G_{ref}} - \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{N \cdot K \cdot T} \right) \right] - \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

- K : est la constante de Boltzmann.
- T : la température de fonctionnement.
- N : le paramètre idéal d'une cellule solaire photovoltaïque.
- R_s : La résistance du diode PV en série.
- R_{sh} : la résistance du diode PV à la shunt.
- G : irradiance absolue (W/m²)
- G_{ref} : irradiance nominale (W/m²)

1.9 Performances d'un module photovoltaïque

Les performances d'un module photovoltaïque (PV) sont sensiblement affectées par les variations d'irradiance solaire et de température (Saravanan & Babu, 2016), Les courbes I-V (courant-

tension) et P-V (puissance-tension) sont cruciales pour évaluer la performance des modules photovoltaïques (PV).

Courbe courant-tension(I-V) :

La courbe I-V, ou courbe courant-tension, est une caractéristique essentielle dans le domaine photovoltaïque. La courbe I-V représente la relation entre le courant (I) et la tension (V) et montre comment le courant varie en fonction de la tension. La forme de la courbe peut indiquer la qualité de la cellule solaire et sa performance sous différentes conditions (Irradiance et température).Points clés sur la courbe :

- Courant de court-circuit (I_{sc}) : C'est le courant lorsque la tension est nulle. Il représente le courant maximal que la cellule peut produire dans un ensemble donné de conditions.
- Tension de circuit ouvert (V_{oc}) : C'est la tension lorsque le courant est nul. Elle indique la tension maximale que la cellule peut produire.
- Point de puissance maximale (MPP) : Ce point sur la courbe représente la tension et le courant auxquels la cellule peut délivrer la puissance maximale.

Courbe puissance-tension (P-V) :

La courbe P-V, ou courbe puissance-tension, est importante pour étudier les systèmes photovoltaïques (PV). Elle montre la relation entre la puissance (P) produite par une cellule PV et la tension (V) à ses bornes. Cette courbe aide à comprendre comment la puissance varie en fonction de la tension. Elle est dérivée de la courbe I-V, car la puissance est calculée en multipliant le courant par la tension ($P = I * V$).Points clés sur la courbe :

- Forme de la Courbe : Contrairement à la courbe I-V linéaire, la courbe P-V a un pic distinct, représentant le point de puissance maximale (MPP).
- Point de Puissance Maximale (MPP) : C'est la caractéristique la plus importante de la courbe P-V. Il représente le point où le produit de l'intensité du courant et de la tension ($P = I * V$) est au maximum. Ce point de fonctionnement optimal permet au module PV de produire la puissance maximale possible.

- Tension au Point de Puissance Maximale (V_{mpp}) : C'est la tension à laquelle le module produit la puissance maximale.

1.9.1 Effet de température

Le premier cas est une température variable avec une irradiance constante. La température a un impact significatif sur la performance des panneaux solaires, ce qui est clairement démontré par les courbes I-V et P-V dans la figure 1.13, avec l'utilisation de MATLAB (Simulink). La figure 1.13 montre un ensemble de courbes caractéristiques I-V et P-V pour un panneau solaire, spécifiquement pour le modèle Zyltech Solar ZT265P. Ces courbes sont utilisées pour montrer comment le courant (I) et la puissance (P) varient avec la tension (V) sous différentes conditions de température (25 °C, 55 °C et 75 °C) pour un module photovoltaïque (PV).

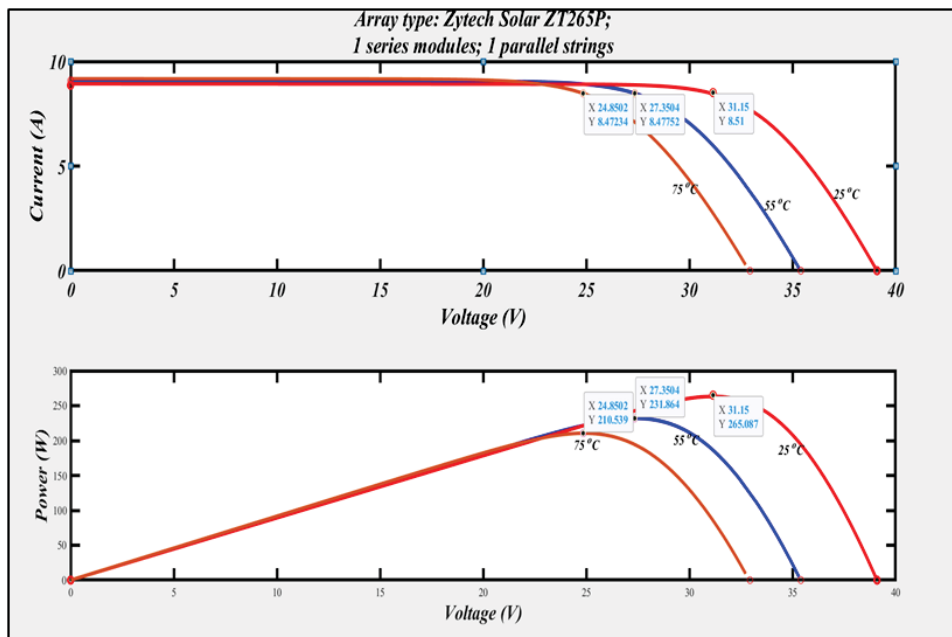


Figure 1.13 Courbes I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension) avec température variable

Effet de la température sur (I-V) et (P-V) :

- Lorsque la température augmente, la tension de sortie des cellules photovoltaïques diminue généralement.

- La puissance générée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension et du courant. Comme la tension diminue avec l'augmentation de la température, la puissance totale générée diminue également, même si le courant reste relativement stable.

Stabilité du courant sous une irradiance constante :

- Le courant généré par les cellules photovoltaïques dépend principalement de l'irradiance . Sous une irradiance constante, le courant reste relativement stable, car la quantité de photons frappant la cellule reste la même, ce qui permet de libérer un nombre constant d'électrons

1.9.2 Effet d'irradiance

La figure 1.14 montre un ensemble différent de courbes caractéristiques I-V et P-V pour un panneau solaire, cette fois sous différents niveaux d'irradiance ($0,3 \text{ kW/m}^2$, $0,6 \text{ kW/m}^2$ et 1 kW/m^2).

Caractéristiques courant-tension (I-V) :

- Le courant : Le courant généré par un panneau solaire est directement proportionnel à l'irradiance. À mesure que l'irradiance augmente (de $0,3 \text{ kW/m}^2$ à 1 kW/m^2), le courant augmente en conséquence. Ceci est dû au fait que davantage de photons frappent la surface du panneau solaire, libérant plus d'électrons et générant ainsi plus de courant.
- Tension (V) : La tension ne change pas beaucoup avec les variations d'irradiance. Elle reste relativement stable car elle dépend surtout de la température et des propriétés du matériau semi-conducteur, plutôt que de la quantité de lumière solaire.

Caractéristiques puissance-tension (P-V) :

- À des niveaux d'irradiance plus élevés, le point de puissance maximale (MPP) montre une sortie de puissance plus élevée, ce qui est indiqué par les coordonnées données sur les courbes (par exemple, à 1 kW/m^2 , la puissance est d'environ 265 W). Le MPP se déplace verticalement vers le haut avec une irradiance accrue mais reste horizontalement à la même tension, soulignant la relation directe entre la puissance et l'irradiance.

- La sortie de puissance est également directement proportionnelle à l'irradiance car la puissance est le produit du courant et de la tension, et puisque le courant augmente avec plus de lumière solaire, la puissance augmente également.

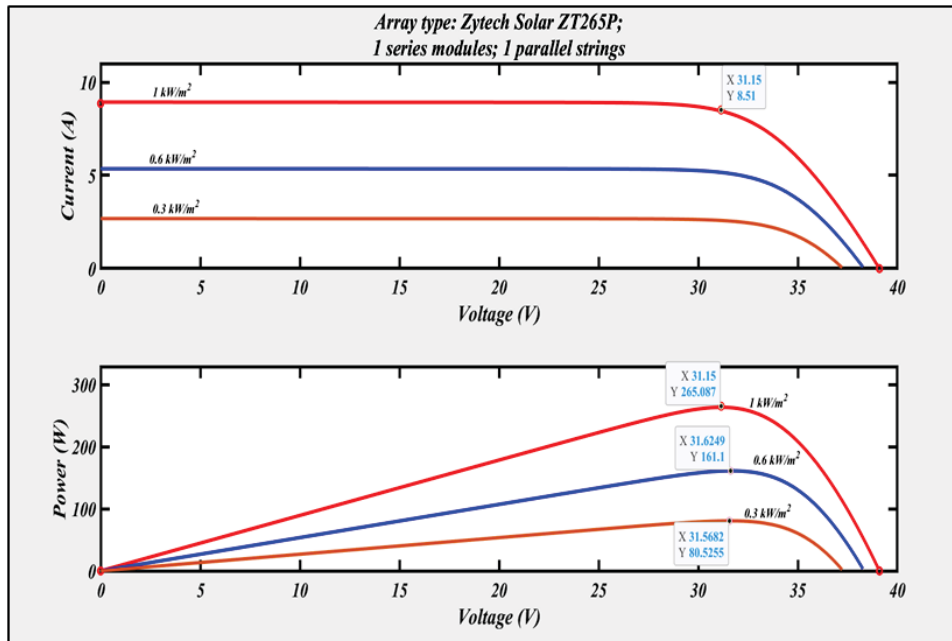


Figure 1.14 Courbes I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension) avec irradiance variable

1.10 Modélisation des convertisseurs CC-CC

Les convertisseurs DC-DC sont essentiels dans les systèmes photovoltaïques (PV), principalement dans la gestion et l'optimisation de la tension et du courant de sortie des panneaux PV pour répondre aux besoins de diverses charges ou de stockage. Lorsqu'ils sont intégrés avec des algorithmes MPPT, les convertisseurs DC-DC aident à suivre et à maintenir en continu le fonctionnement des panneaux PV à leur Point de Puissance Maximum (Coelho, Concer & Martins, 2009). Divers types de convertisseurs sont utilisés dans les applications PV, tels que les convertisseurs abaisseurs, élévateurs, et abaisseur-élévateur.

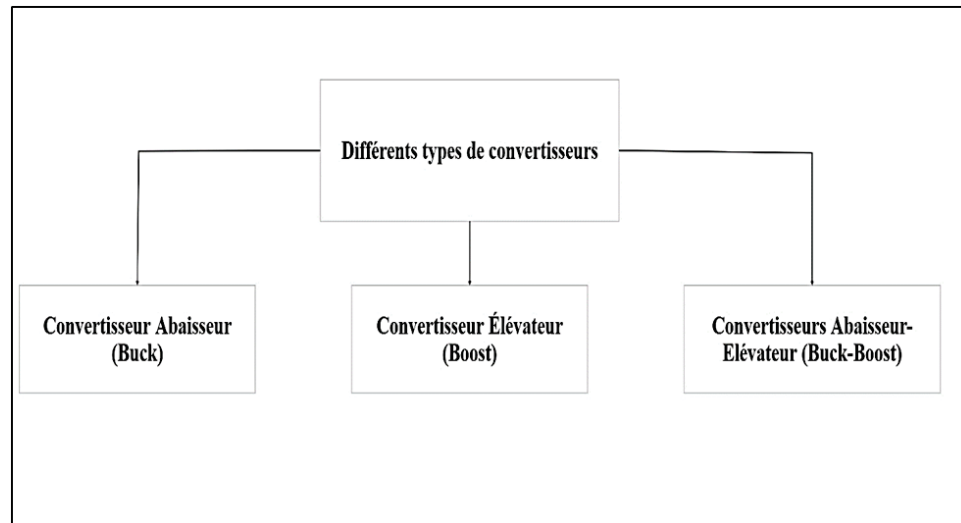


Figure 1.15 Différents types de convertisseurs

1.10.1 Convertisseur Abaisseur (Buck)

Ce type réduit la tension d'entrée à une tension de sortie plus basse. Il est couramment utilisé lorsque l'alimentation électrique est supérieure aux besoins de la charge. Quand l'interrupteur est activé, le courant traverse l'inducteur, stockant de l'énergie dans son champ magnétique. Lorsque l'interrupteur est désactivé, l'inducteur libère cette énergie vers la charge. La diode devient polarisée dans le sens direct, permettant au courant de continuer à circuler vers la charge tout en empêchant le courant inverse. La figure 1.16 illustre le circuit d'un convertisseur abaisseur (buck). (Chewale, A. Wanjari, B. Savakhande & R. Sonawane, 2018)

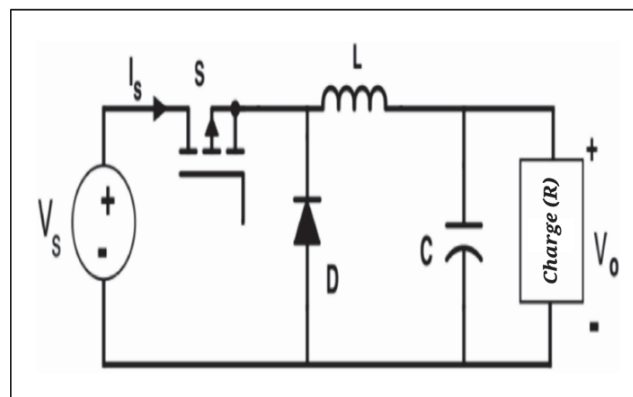


Figure 1.16 Circuit d'un Convertisseur Abaisseur

1.10.2 Convertisseur Élévateur (boost)

Contrairement au convertisseur abaisseur, La figure 1.17 montre le circuit d'un convertisseur élévateur (boost) (Chewale *et al.*, 2018), un convertisseur élévateur augmente la tension d'entrée pour obtenir une tension de sortie plus élevée. Il est utile lorsque la tension de l'alimentation électrique est inférieure à la tension requise pour la charge. Lorsque l'interrupteur est activé, le courant circule à travers l'inducteur, créant un champ magnétique et stockant de l'énergie. Lorsque l'interrupteur est désactivé, le champ magnétique de l'inducteur s'effondre, ce qui augmente la tension à ses bornes. Cette tension accrue s'ajoute à la tension d'entrée, augmentant ainsi la tension de sortie globale. La tension de sortie est réglée en ajustant le rapport cyclique (duty cycle) de l'interrupteur. (Saharia & Sarmah, 2022).

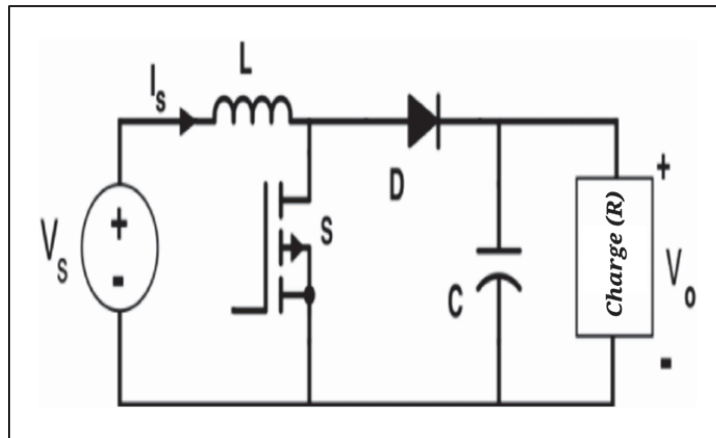


Figure 1.17 Circuit d'un Convertisseur Convertisseur Élévateur (Boost)

1.10.3 Convertisseurs Abaisseur-Élévateur (Buck-Boost))

La figure 1.18 présente le circuit d'un convertisseur abaisseur-élévateur (Chewale *et al.*, 2018). Ce type combine les fonctionnalités des convertisseurs abaisseurs et élévateurs. Il peut soit augmenter ou diminuer la tension d'entrée selon les besoins. Le mode de fonctionnement (abaisseur ou élévateur) est déterminé par les grandeurs relatives de la tension d'entrée, de la tension de sortie souhaitée et du rapport cyclique (duty cycle) de l'interrupteur. Le convertisseur

ajuste dynamiquement ce rapport cyclique (duty cycle) pour maintenir la tension de sortie souhaitée, soit pour augmenter ou diminuer la tension.(Saharia & Sarmah, 2022)

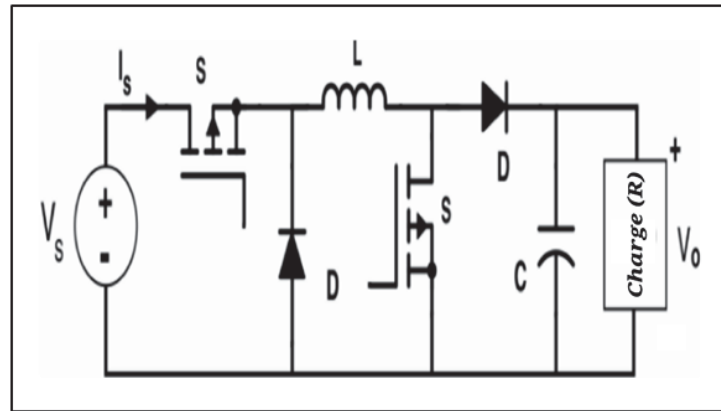


Figure 1.18 Circuit d'un Convertisseurs Abaisseur-Élévateur

1.11 Classification des méthodes de suivi du point de puissance maximale

Les panneaux solaires ont généralement une efficacité inférieure à celle d'autres formes de production d'énergie. De plus, leur efficacité peut diminuer davantage sous des conditions environnementales variables. Pour résoudre ces problèmes, en particulier dans des conditions environnementales variables et sous ombrage partiel, l'algorithme de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) est essentiel. Le MPPT est une technique utilisée dans les onduleurs solaires pour trouver le point de puissance maximale de l'ensemble photovoltaïque dans n'importe quelle condition environnementale donnée(Liu, Khan & Yuan, 2023). Cela garantit que le système solaire fonctionne à son efficacité la plus élevée possible, en extrayant la puissance maximale possible(Katche *et al.*, 2023). La classification des méthodes de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les cellules solaires peut être largement divisée en deux principaux types. Comme le montre la Figure 1.19, les méthodes hors ligne (indirect) incluent la technique de la Tension du Circuit Ouvert (FOCV) et courant de court-circuit (FSCC), et les méthodes en ligne (direct) comprennent la méthode Perturbation et Observation (P&O), Méthode de la conductance incrémentale (Saharia & Sarmah, 2022)et la méthode de corrélation RCC (corrélation entre la dérivée de la variation de la puissance avec la dérivée de la variation du courant). Cette

diversité a conduit au développement de différentes classes de techniques MPPT. Les différentes techniques MPPT sont classées selon une nouvelle classification. La Figure 1.20 montre cette nouvelle classification (Kumar, Panda, Rosas-Caro, Valderrabano-Gonzalez & Panda, 2023).

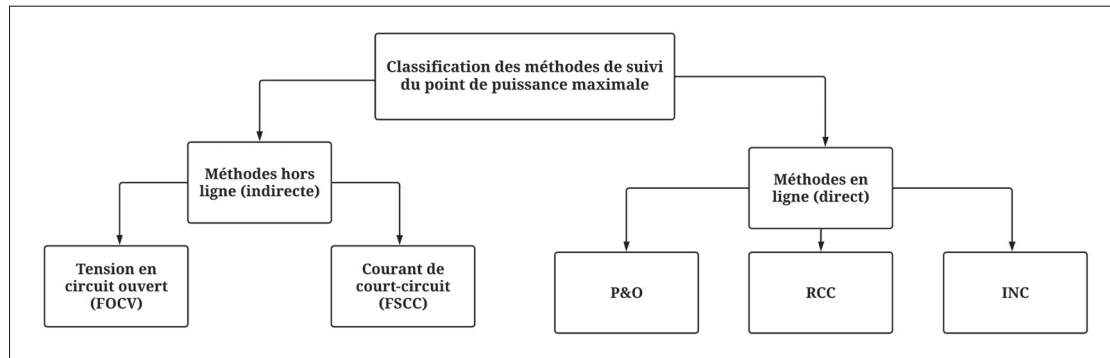


Figure 1.19 Les différentes catégories MPPT

- Intelligent : Comprend des méthodes qui intègrent une forme d'intelligence artificielle ou des techniques de contrôle avancées telles que le Contrôleur Logique Flou (FLC), le Réseau de Neurones Artificiels (ANN).
- Optimisation : Comprend des algorithmes basés sur des théories d'optimisation telles que l'Algorithme Génétique (GA), l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO), l'Optimisation par Loup Gris (GWO).
- • Hybride : Combine des méthodes de différentes catégories pour améliorer la performance, telles que P&O avec GA, P&O avec PSO, P&O avec FLC, P&O avec ANN.

Ce développement et cette diversité sont survenus pour répondre aux problèmes et limitations des algorithmes classiques. Chaque méthode est choisie selon des critères spécifiques, comme la complexité de mise en œuvre, la vitesse de convergence vers le MPP (Maximum Power Point), le coût, les conditions environnementales, et les caractéristiques du système photovoltaïque (PV).

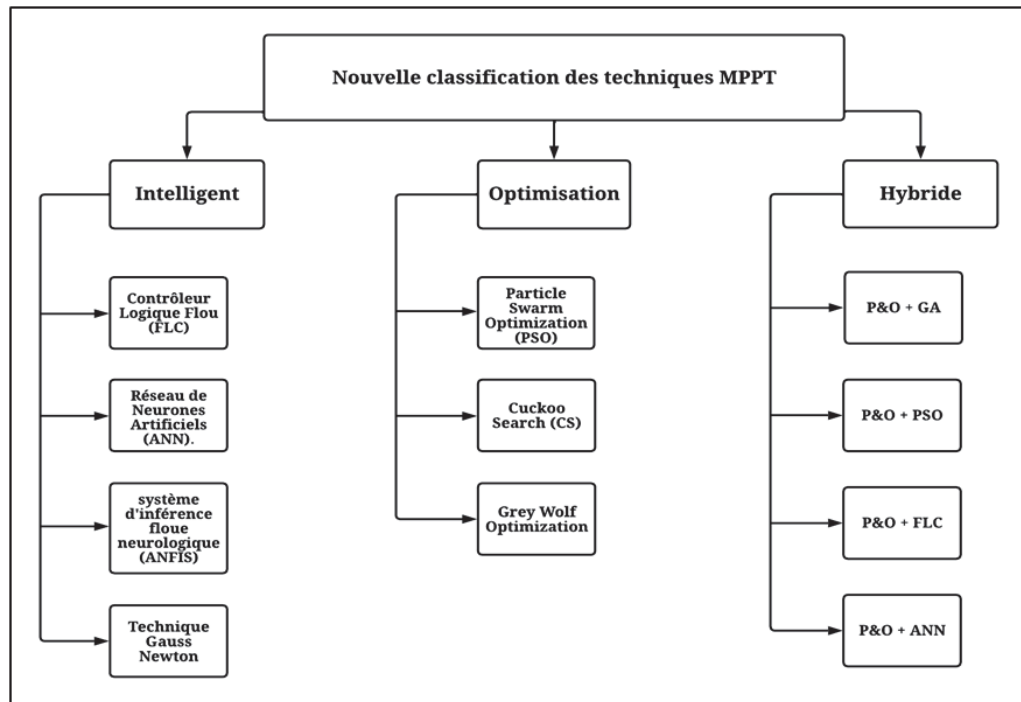


Figure 1.20 Nouvelle classification des techniques MPPT

1.12 Les méthodes hors ligne (indirectes)

Les méthodes indirectes ne mesurent pas la puissance directement. Elles se basent plutôt sur d'autres paramètres qui ont une relation connue avec le point de puissance maximale. Ces méthodes sont souvent fondées sur les caractéristiques des panneaux solaires et supposent une relation relativement stable entre ces caractéristiques et le point de puissance maximale (Reza Reisi, Hassan Moradi & Jamasb, 2013).

1.12.1 Technique du tension en circuit ouvert (FOCV)

La technique du tension en circuit ouvert (FOCV) représente une avancée dans les algorithmes de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) utilisés pour optimiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques (PV). Cette méthode tire parti de la relation entre la tension en circuit ouvert (V_{oc}) d'un panneau PV et sa tension au point de puissance maximale (V_{mpp}) dans des conditions environnementales variables. (Salas, Olias, Barrado & Lazaro, 2006) La relation linéaire de

la tension en circuit ouvert (V_{oc}) est illustrée par l'Équation (1.6). (Kumar *et al.*, 2023) du générateur PV et sa tension au MPP (V_{mpp}).

$$V_{mpp} = K * V_{oc} \quad (1.6)$$

Les algorithmes de tension en circuit ouvert (FOCV) peuvent être programmés dans les contrôleurs MPPT, comme le montre la figure 1.21.

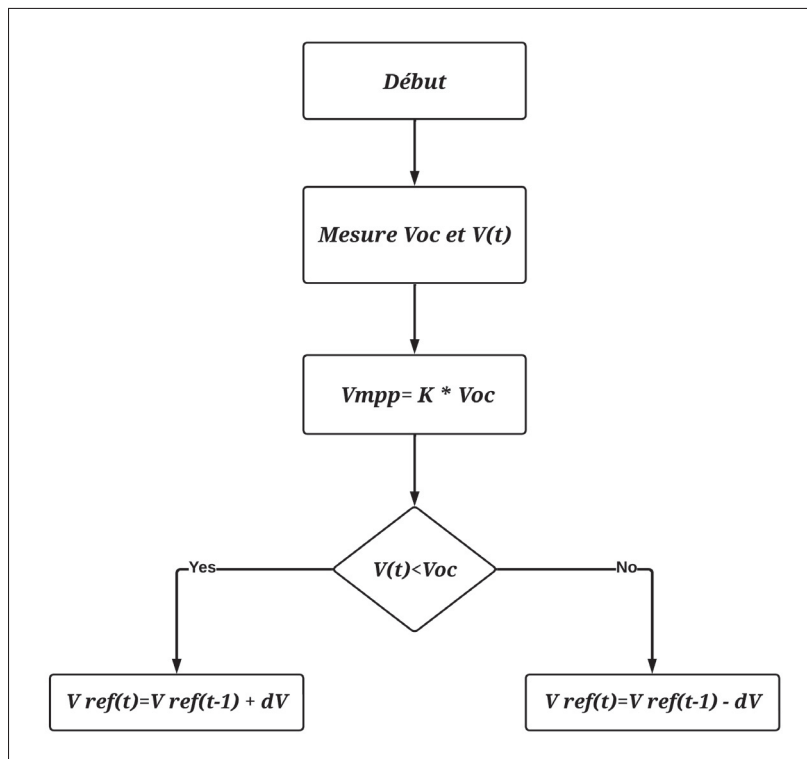


Figure 1.21 Organigramme de l'algorithme du tension en circuit ouvert (FOCV)

- V_{mpp} : Il s'agit de la tension au maximum de puissance. Faire fonctionner un panneau solaire à V_{mpp} est idéal pour une efficacité maximale.
- K : C'est un coefficient qui varie entre 0,71 et 0,9. La valeur exacte dépend des caractéristiques du panneau solaire et est déterminée par des tests.

- **Voc** : C'est la tension en circuit ouvert (Voc) du panneau solaire. C'est la tension mesurée aux bornes du panneau lorsqu'il n'y a pas de charge connectée. (Voc) peut être mesurée directement avec un voltmètre et varie avec l'irradiance et la température.

1.12.2 Technique du courant de court-circuit (FSCC)

La méthode de courant court-circuit est une autre méthode utilisée dans les systèmes photovoltaïques (PV) pour approcher le point de puissance maximale (MPP) pour une génération de puissance efficace. Elle utilise une constante de proportionnalité mais se concentre sur le courant de court-circuit du système PV (Bollipo *et al.*, 2020). L'équation pour estimer le courant au MPP (I_{mpp}) est basée sur le courant de court-circuit (I_{sc}) et un facteur multiplicateur. La relation est exprimée comme suit (Kumar *et al.*, 2023) :

$$I_{mpp} = K * I_{sc} \quad (1.7)$$

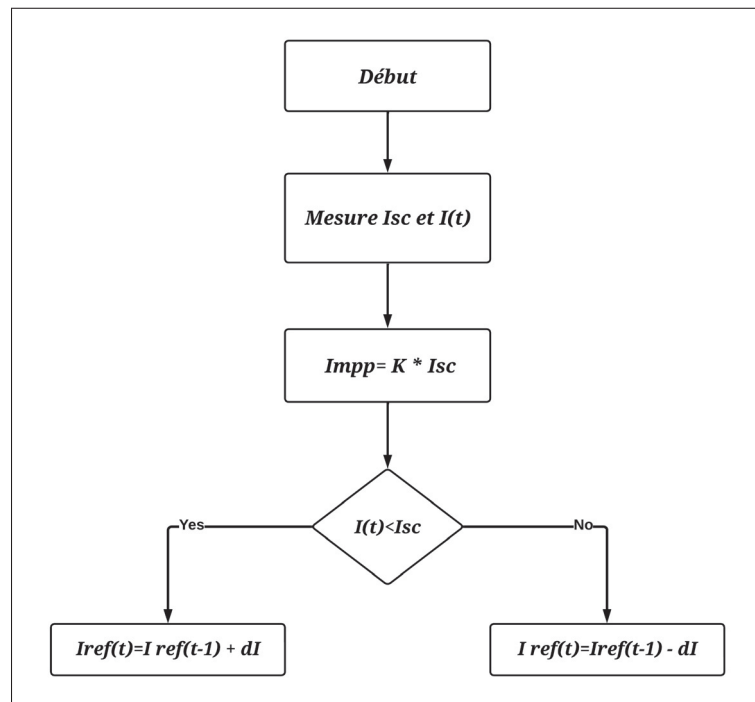


Figure 1.22 Organigramme de l'algorithme courant de court-circuit (FSCC)

La valeur de K varie généralement de 0,64 à 0,85 et varie en fonction de facteurs tels que les caractéristiques du système PV et les conditions environnementales, La figure 1.22 présente Organigramme de l'algorithme (FSCC).

1.13 Les méthodes en ligne (direct)

Les méthodes directes mesurent directement la puissance (ou le courant et la tension, qui sont utilisés pour calculer la puissance) du panneau solaire et ajustent le point de fonctionnement pour trouver le point de puissance maximale (Reza Reisi *et al.*, 2013). Elles se caractérisent par une perturbation active du système et l'observation des changements résultants dans la puissance.

1.13.1 Technique de la perturbation et observation (P&O)

La méthode de perturbation et d'observation (P&O) est un algorithme couramment employé dans les systèmes photovoltaïques (PV) pour suivre le point de puissance maximale (MPPT), car il est relativement simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas de matériel ou de logiciel complexe (Elgendy, Zahawi & Atkinson, 2012). L'algorithme P&O se concentre sur la recherche du Point de Puissance Maximale (MPP) d'un système PV. Le MPP est le point auquel le module PV délivre la puissance maximale possible.

Mécanisme opérationnel :

- Mesure initiale : L'algorithme commence par mesurer la puissance actuelle (P) produite par le panneau PV.
- Comparaison et Décision : Après chaque perturbation, la puissance de sortie est mesurée et comparée avec la puissance du point d'échantillonnage précédent, En utilisant l'équation suivante (Saravanan & Babu, 2016) :

$$\frac{dP(k)}{dV(k)} = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (1.8)$$

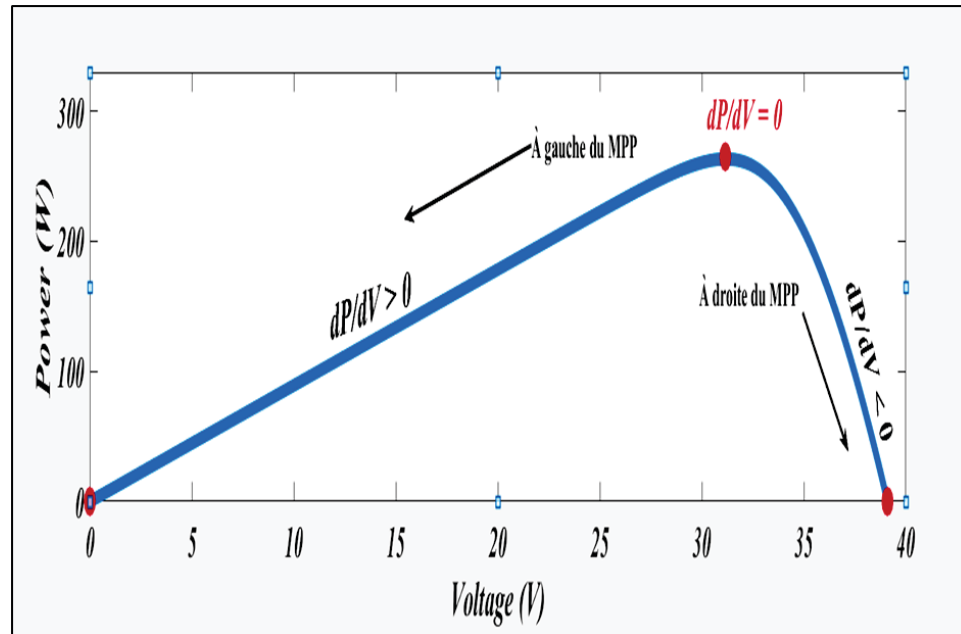


Figure 1.23 Principe de fonctionnement de L'algorithme P&O

L'objectif est d'atteindre une condition où le changement de puissance (dP) par rapport au changement de tension (dV) est nul, indiquant le MPP (Lyden & Haque, 2015).

Direction de la Perturbation :

- **Pente Positive ($dP/dV > 0$) :** Lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension est positive, la perturbation déplace le point de fonctionnement vers le Point de Puissance Maximale (MPP). La tension de l'ensemble PV continue d'être perturbée dans la même direction.
- **Pente Négative ($dP/dV < 0$) :** Inversement, si dP/dV est négatif, indiquant que le point de fonctionnement s'éloigne du MPP, la direction de la perturbation est inversée.

La Figure 1.24 représente la logique de l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) Perturb and Observe (P&O) utilisé dans les systèmes photovoltaïques (PV).

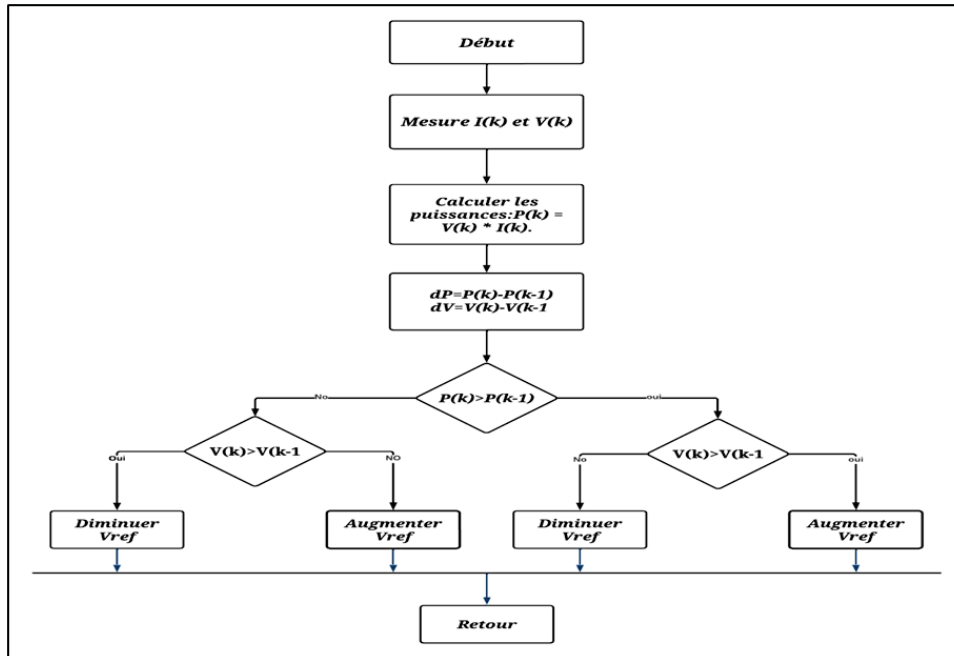


Figure 1.24 Organigramme de l’algorithme perturbation et observation

1.13.2 Technique de la conductance incrémentale (INC)

La méthode de la conductance incrémentale est une approche sophistiquée et dynamique pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques, en particulier dans des conditions environnementales fluctuantes. Mais l’algorithme (INC) est plus complexe par rapport à d’autres méthodes de MPPT telles que la méthode Perturbation et Observation (P&O). La mise en œuvre peut nécessiter un matériel plus sophistiqué et coûteux, la méthode de la conductance incrémentale est basée sur le principe selon lequel la dérivée de la puissance par rapport à la tension (dP/dV) est nulle au point de puissance maximale (MPP), comme le montre l’Équation (1.9) (Subudhi & Pradhan, 2012) :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (1.9)$$

Cette méthode modifie la tension du module photovoltaïque en fonction de la conductance instantanée et incrémentielle (dI/dV) du module PV, Voici l'exemple de l'organigramme utilisé pour l'algorithme INC :

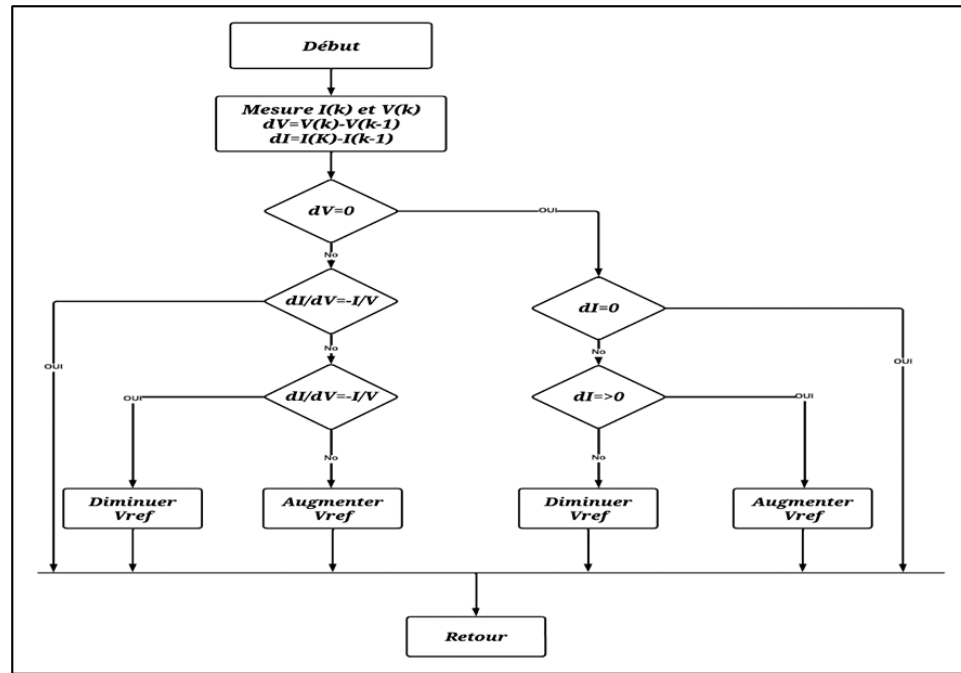


Figure 1.25 Organigramme de l'algorithme (INC)

Prise de décision : L'algorithme prend des décisions en se basant sur la comparaison de (dV) et (dI) par rapport à la conductance instantanée (I/V) (Abdelwahab, Hamada, Abdellatif *et al.*, 2020) :

- Si (dV) est nul, l'algorithme vérifie si (dI) l'est également. Lorsque les deux valeurs sont nulles, cela indique que le Point de Puissance Maximale (MPP) est atteint.
- Si (dV) n'est pas nul, l'algorithme évalue si (dI/dV) est supérieur ou inférieur à ($-I/V$).

Ajustements de sortie : En fonction des résultats de ces comparaisons, la tension de référence (V_{ref}) est ajustée soit vers le haut (augmentée) soit vers le bas (diminuée) afin de se rapprocher du MPP.

1.14 Problématiques

Dans le contexte du suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques (PV), le choix d'un algorithme nécessite de prendre en compte les conditions environnementales, la complexité et les contraintes budgétaires.

Tableau 1.1 Revue sur les méthodes MPPT

Méthode MPPT	Catégorie	Complexité	Environnement	Vitesse de suivi	Application	Efficacité
P&O	Directe	Simple	changeantes et conditions stables	Varier	Connecté au réseau et autonome	Très bon
INC	Directe	compliqué	changeantes et conditions stables	Varier	Connecté au réseau et autonome	Très bon
Tension du circuit ouvert (FVCO)	Indirecte	Simple	Conditions stables	Faible	Autonome	Faible
Courant de court-circuit (FSCC)	Indirecte	Simple	Conditions stables	Faible	Autonome	Faible

Le Tableau 1.1 représente un revue manière exhaustive quatre méthodes courantes de MPPT : le Courant de Court-Circuit(FSCC), la Tension de Circuit Ouvert(FOVC), la Perturbation et Observation(P&O)et la Conductance Incrémentielle(INC).

Cependant, cette dernière méthode (Perturbation et Observation) présente de nombreux problèmes et limitations,suivants doivent être traités de manière appropriée.

1.14.1 Problème d'équilibrer la vitesse et la stabilité

Le compromis entre la vitesse et la stabilité dans l'algorithme de Perturbation et Observation (P&O) concerne la taille de pas de perturbation qui appliquée au l'algorithme (P&O) pour suivre le Point de Puissance Maximale (MPP).

Taille de pas de Perturbation Grandes :

- Suivi plus rapide : lorsque la taille de la perturbation est grande, les variations de tension ou de courant sont significatives. Cela permet au système de se rapprocher plus rapidement du MPP lorsqu'il est loin du point optimal.
- Oscillations : une fois que le système se rapproche du MPP, des perturbations (la taille de la perturbation grande) peuvent provoquer un dépassement. En conséquence, l'algorithme P&O changera la direction de la perturbation, cela peut entraîner des oscillations autour du MPP plutôt qu'une stabilisation précise sur celui-ci.
- Inefficacité : les oscillations font que le système fonctionne plus fréquemment des deux côtés du point de puissance maximal (MPP), plutôt que seulement sur ce point, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité.

Taille de pas de Perturbation Petites :

- Fonctionnement stable : les perturbations petites entraînent moins de fluctuations de tension ou de courant, ce qui permet au système de régler plus précisément sa stratégie du point de puissance maximal (MPP) et de réduire les chances de dépassement.
- Oscillation minimization : lorsque le système se rapproche du point de puissance maximal (MPP), prendre des pas plus petits réduit les oscillations, ce qui conduit à un fonctionnement plus stable et efficace à ou près du MPP.
- Répondre plus lentement : L'inconvénient est que des perturbations (la taille de la perturbation) petites peuvent rendre l'algorithme P&O plus lent. Si les conditions environnementales changent rapidement, le système peut mettre du temps à trouver et à s'ajuster au nouveau MPP.

1.14.2 Problèmes de précision et de dérive (drift) lors des fluctuations rapides d'irradiance.

Le P&O peut confondre une variation de la température ou de l'irradiance solaire avec une fluctuation autour du point de puissance maximale (MPP). Il peut donc faire des ajustements de tension ou de courant inutiles, cherchant continuellement le MPP alors qu'il devrait rester stable. Cela peut réduire l'efficacité globale du système en raison de ces ajustements constants. Avec le temps, même une petite dérive (drift) peut entraîner des pertes de puissance significatives.

1.15 Objectifs de la recherche

L'efficacité de l'extraction de puissance électrique dans les systèmes photovoltaïques (PV) dépend du point de fonctionnement sur leur caractéristique non linéaire, qui est déterminé par les conditions ambiantes d'irradiance et de température. Ces dernières années, de nombreuses techniques ont été proposées afin de suivre le point de puissance maximale (MPP). En pratique, la méthode Perturbation et Observation (P&O) est la technique la plus couramment utilisée en raison de son faible coût, de sa facilité de mise en œuvre, et de sa performance de suivi relativement bonne par rapport à d'autres techniques.

Cependant, dans le P&O conventionnel, le contrôleur MPPT applique une taille de pas fixe (taille de pas de perturbation). Lorsqu'une taille de pas plus grande est utilisée, le contrôleur atteint plus rapidement le MPP, mais des oscillations à l'état stable élevées existent. En revanche, de plus faibles oscillations à l'état stable existent pour les applications de taille de pas plus petite. Cependant, cela prend plus de temps pour atteindre le MPP, ce qui entraîne une perte de puissance plus élevée. De plus, le P&O conventionnel perd facilement le MPP en cas de variations rapides de l'irradiance (problème de dérive). La dérive (drift) peut entraîner un suivi inexact et une réduction de l'efficacité du système PV.

Diverses modifications ont été proposées dans la littérature pour améliorer la robustesse de l'algorithme P&O contre la dérive (drift), mais celles-ci présentent certaines limitations. L'objectif principal de cette étude consiste à présenter un contrôleur MPPT P&O adaptatif et

modifié, avec des performances améliorées, en utilisant un contrôleur logique flou. Les objectifs principaux de cette étude sont les suivants :

1. Étudier de l'efficacité du système photovoltaïque aux conditions de variations rapides de l'irradiance
2. Analyse d'un problème de dérive (drift) dans un algorithme Perturbation et Observation (P&O)
3. Simulation de l'algorithme P&O modifié et comparaison avec le P&O conventionnel l'aide de l'outil MATLAB/Simulink.
4. Proposer un nouvel algorithme P&O (Perturbation et Observation) adaptatif et modifié utilisant la logique floue.
5. Valider l'efficacité de l'algorithme MP&O adaptatif en le mettant en œuvre en temps réel dans un environnement de laboratoire.

1.16 Méthodologie

Pour atteindre nos objectifs, nous créerons un nouvel algorithme P&O adaptatif et modifié utilisant la logique floue. Dans un premier temps, nous présenterons une revue de la littérature sur les algorithmes MPPT, l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques, incluant l'analyse des réponses des systèmes PV aux variations rapides d'irradiance et de température, ainsi que les progrès récents de l'énergie solaire. Ensuite, nous comparerons l'algorithme P&O modifié au P&O conventionnel à l'aide de MATLAB Simulink et analyserons le problème de dérive dans l'algorithme conventionnel. Par la suite, nous implémenterons et simulerons le nouvel algorithme P&O modifié et adaptable, en utilisant la logique floue pour améliorer la réactivité du système. Toutes les méthodes seront testées et évaluées avec MATLAB/Simulink. Enfin, nous nous concentrerons sur l'implémentation en temps réel de l'algorithme dans notre laboratoire GRÉPCI, détaillant la configuration matérielle et logicielle, les étapes expérimentales et l'analyse des résultats. La figure 1.26 suivante résume le travail que nous prévoyons de réaliser.

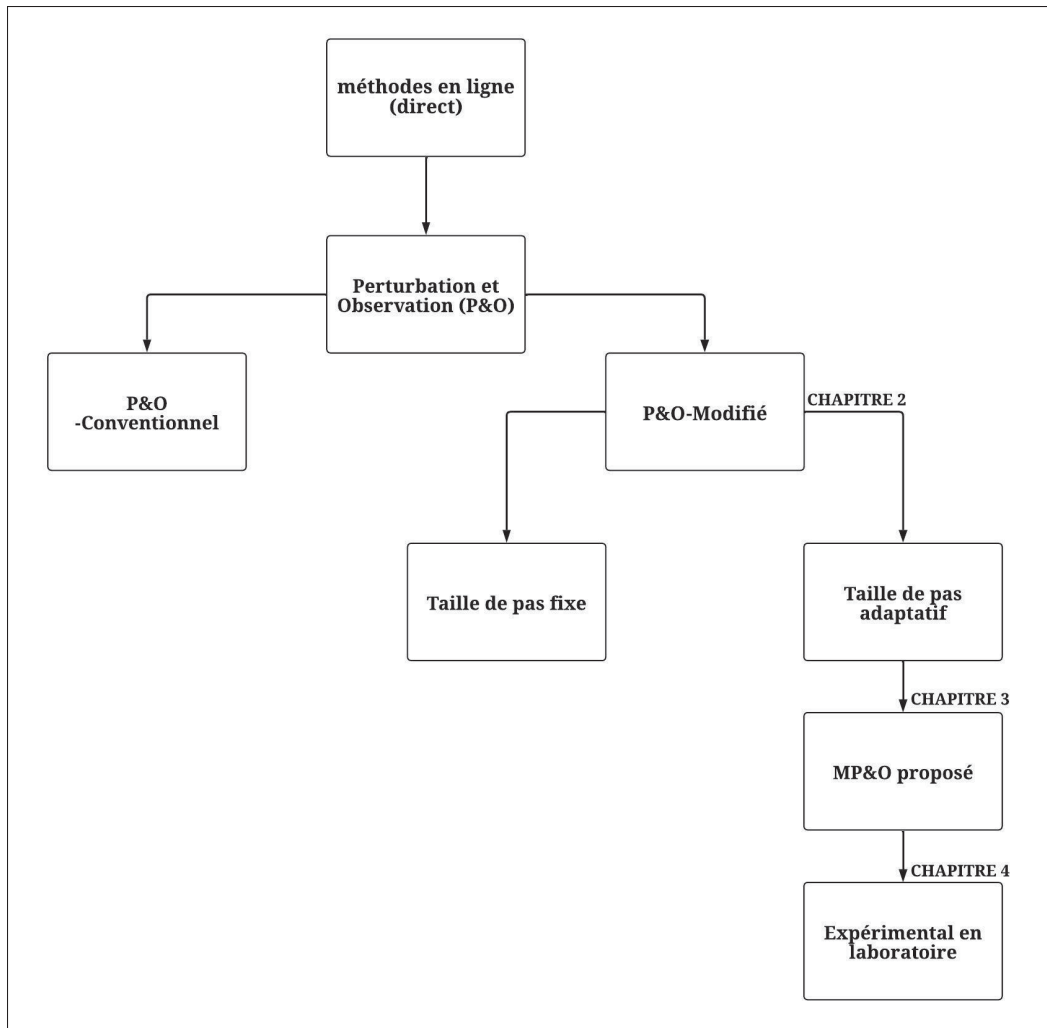


Figure 1.26 Organigramme de notre Méthodologie

1.17 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté des statistiques sur les développements de l'énergie solaire dans le monde et également au Canada. Ensuite, nous avons discuté en détail des systèmes photovoltaïques, de leurs composants, types, avantages et inconvénients. Enfin, nous avons présenté des méthodes pour extraire le maximum de la puissance, de leurs types, et avons également discuté de leur importance.

Problème de dérive(drift) dans un algorithme Perturbation et Observation (P&O) sera traité dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 2

IMPACT DU PROBLÈME DE DÉRIVE (DRIFT) SUR L'ALGORITHME MODIFIÉ ET CONVENTIONNEL PERTURBATION ET OBSERVATION (P&O)

2.1 Introduction

Dans des conditions d'irradiance changeant rapidement, l'algorithme P&O rencontre des défis. Lorsque l'irradiance change, cela modifie les caractéristiques puissance-tension (P-V) des cellules PV. L'algorithme P&O pourrait mal interpréter ces changements comme étant dus à ses propres perturbations, conduisant à des décisions de suivi incorrectes. Ce problème est connu sous le nom de 'dérive' (drift) (Gouabi, Hazzab, Habbab, Rezkallah & Chandra, 2021). La dérive (drift) se produit lorsque l'algorithme ne peut pas distinguer entre les changements de puissance causés par les fluctuations d'irradiance et ceux causés par ses propres perturbations. Cela peut l'éloigner du point de puissance maximal (MPP), réduisant l'efficacité des panneaux PV.

Diverses améliorations ont été proposées pour s'attaquer à la question de la dérive (drift). M. Killi et S. Samanta ont proposé une modification de l'algorithme P&O comme l'une des solutions les plus efficaces pour résoudre le problème de la dérive (drift). Leur proposition consiste à ajouter un paramètre supplémentaire, le courant (I), basé sur la courbe caractéristique I-V du système photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous étudierons un problème de dérive (drift) et simulerons également l'algorithme P&O conventionnel ainsi que sa version modifiée, puis analyserons les résultats obtenus.

2.2 Recherches antérieures sur les p&o modifié avec une perturbation fixe :

D. Sera, R. Teodorescu et al. ont présenté une solution pour résoudre le problème de la dérive (drift). L'idée consiste à définir des limites seuils supérieures et inférieures pour le changement de la production de puissance (dP) résultant des perturbations. Lorsqu'une perturbation provoque un changement de puissance, ce changement est comparé aux seuils établis. Si le changement

dépasse ces seuils, cela indique un écart significatif par rapport au point de puissance maximale (MPP), et le système s'ajuste en conséquence. L'objectif principal est de s'assurer que le système reste proche du MPP, particulièrement dans des conditions environnementales changeant rapidement. Les seuils insuffisamment définis entraînent un risque d'ajustement excessif en cas de variations insignifiantes, ce qui entraîne une instabilité opérationnelle et une diminution potentielle de l'efficacité. L'introduction d'un système qui suit et réagit avec précision aux changements de dP peut augmenter la complexité et les coûts du système MPPT.

D. Sera & T. Kerekes et al. ont modifié la méthode de perturbation et d'observation (P&O) pour les systèmes de suivi des points de puissance maximale (MPPT) en mesurant la puissance au milieu de l'intervalle d'échantillonnage. Cela signifie qu'un cycle de perturbation comprend maintenant deux mesures de puissance, mais l'exactitude au point de mi-chemin est critique. Des mesures inexactes peuvent conduire à des conclusions incorrectes sur la cause des changements de puissance, ce qui réduit l'efficacité du processus MPPT. L'intégration d'une mesure de puissance supplémentaire pendant la période d'échantillonnage complique l'algorithme MPPT. Cela peut nécessiter une logique de contrôle plus sophistiquée et des capacités de traitement accrues.

Kollimalla et Mishra ont été proposés d'introduire une taille de pas variable dans l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT), particulièrement dans des conditions de rayonnement solaire variable. La taille de la perturbation (taille de pas) est ajustée dynamiquement en fonction de l'ampleur du changement de puissance. Cela implique probablement d'augmenter la taille du pas lorsque de grandes variations de puissance sont observées (indiquant un écart significatif par rapport au MPP) et de la diminuer lorsque les variations sont petites. En essayant de répondre aux changements de rayonnement, l'algorithme pourrait les corriger, conduisant à des tailles de pas plus grandes que nécessaire, ce qui pourrait entraîner des oscillations ou une instabilité.

Gerardo Escobar, Sami Pettersson et al. ont amélioré la méthode P&O conventionnelle. Cette méthode modifiée, connue sous le nom multi-échantillonnage (MS-MPPT), représente une

avancée significative dans la technologie de suivi du point de puissance maximale (MPPT). La caractéristique principale de la méthode MS-MPPT est l'utilisation de plusieurs échantillons des variables impliquées (telles que la tension, le courant, la puissance) avant de décider de la prochaine direction d'incrément pour l'algorithme P&O. La méthode aborde le problème de dérive qui est courant dans les algorithmes P&O conventionnels, où le point de fonctionnement peut s'éloigner du MPP en raison de changements environnementaux. Lorsqu'il s'agit de conditions environnementales dynamiques, la méthode multi-échantillonnage permet un suivi plus précis et plus rapide du point de puissance maximal.

2.3 Analyse du problème de dérive et l'algorithme P&O modifié

2.3.1 Problème de dérive

Le problème de dérive(drift) survient lorsque l'algorithme P&O ne peut pas déterminer avec précision la cause d'un changement de puissance de sortie (dP). En particulier, l'algorithme a du mal à discerner si une augmentation de la puissance est due à ses propres actions de perturbation ou à une augmentation de l'irradiance(Zhang, Song & Chen, 2022; ?). La dérive peut survenir à partir de l'un des trois points d'état stable, comme illustré dans la figure 2.1 (a) et (b), en fonction de l'instant de changement de l'irradiance entre l'intervalle de temps de perturbation (T_a).

Les points 1, 2 et 3 représentent des points de fonctionnement en état stable sur la courbe P-V où le système peut fonctionner avant un changement d'irradiance. Lorsque l'irradiance augmente alors que le système fonctionne à l'un de ces points, le MPP réel se déplace vers puissance de sortie plus élevée sur la courbe. Cependant, l'algorithme pourrait ne pas reconnaître que ce déplacement est dû à un changement de l'irradiance plutôt qu'à ses perturbations. En conséquence, lorsque l'algorithme calcule dP et dV (changement de tension) comme positifs pendant l'intervalle suivant (kT_a), maintenant au point 4 où $dP = P_4(kT_a) - P_2((k-1)T_a) > 0$ et $dV = V_4(kT_a) - V_2((k-1)T_a) > 0$, l'algorithme diminue le rapport cyclique et se déplace

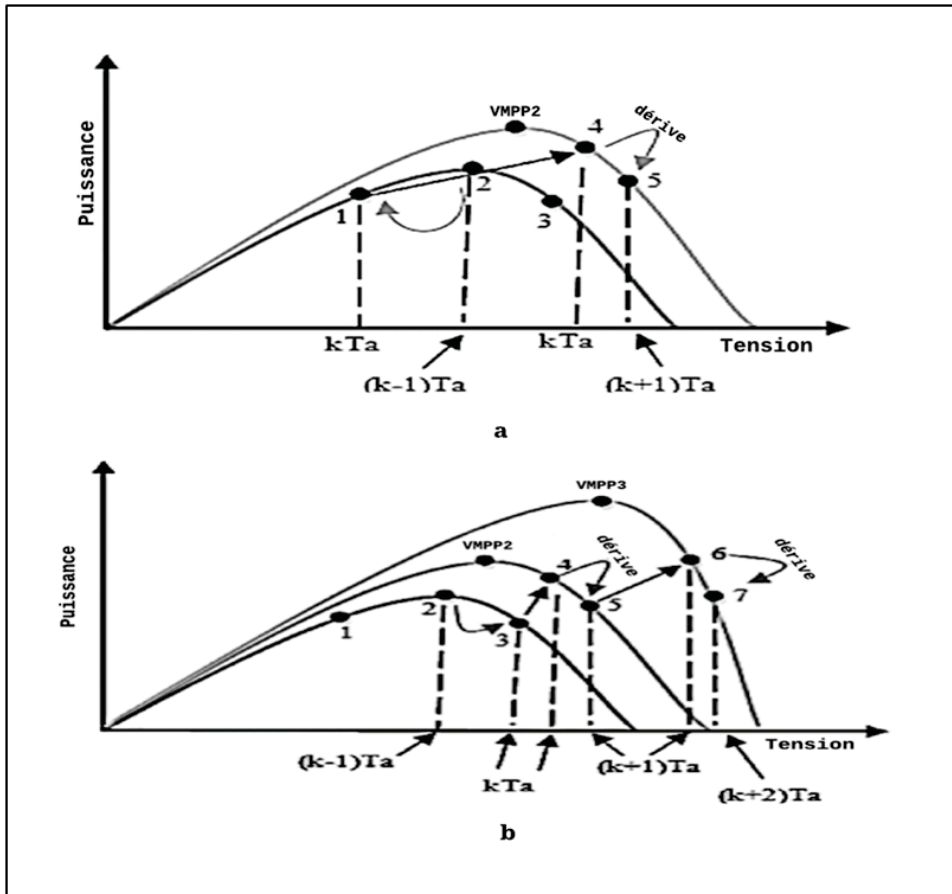


Figure 2.1 Analyse de dérive, (a) dérive en cas d'augmentation normale et (b) dérive en cas l'augmentation rapide de l'irradiance

ainsi vers le point 5 (Killi & Samanta, 2015), il continue par erreur de déplacer le point de fonctionnement dans la même. Cela conduit à la dérive (drift).

Avec l'augmentation rapide de l'irradiance, le problème de dérive (drift) deviendra plus accentué et plus complexe à contrôler comme l'illustre la figure 2.1 (b).

La figure 2.2 montre l'algorithme P&O conventionnel dans le cas du problème de dérive. Si les deux changements de la puissance (dP) et de la tension (dV) sont positifs, cela suggère la possibilité d'une dérive. Lorsque dV est positif, l'algorithme a récemment augmenté la tension. Si dP est également positif, la conclusion attendue est que l'augmentation de la tension a conduit à une augmentation de la puissance, ce qui serait normalement correct. Néanmoins, à mesure

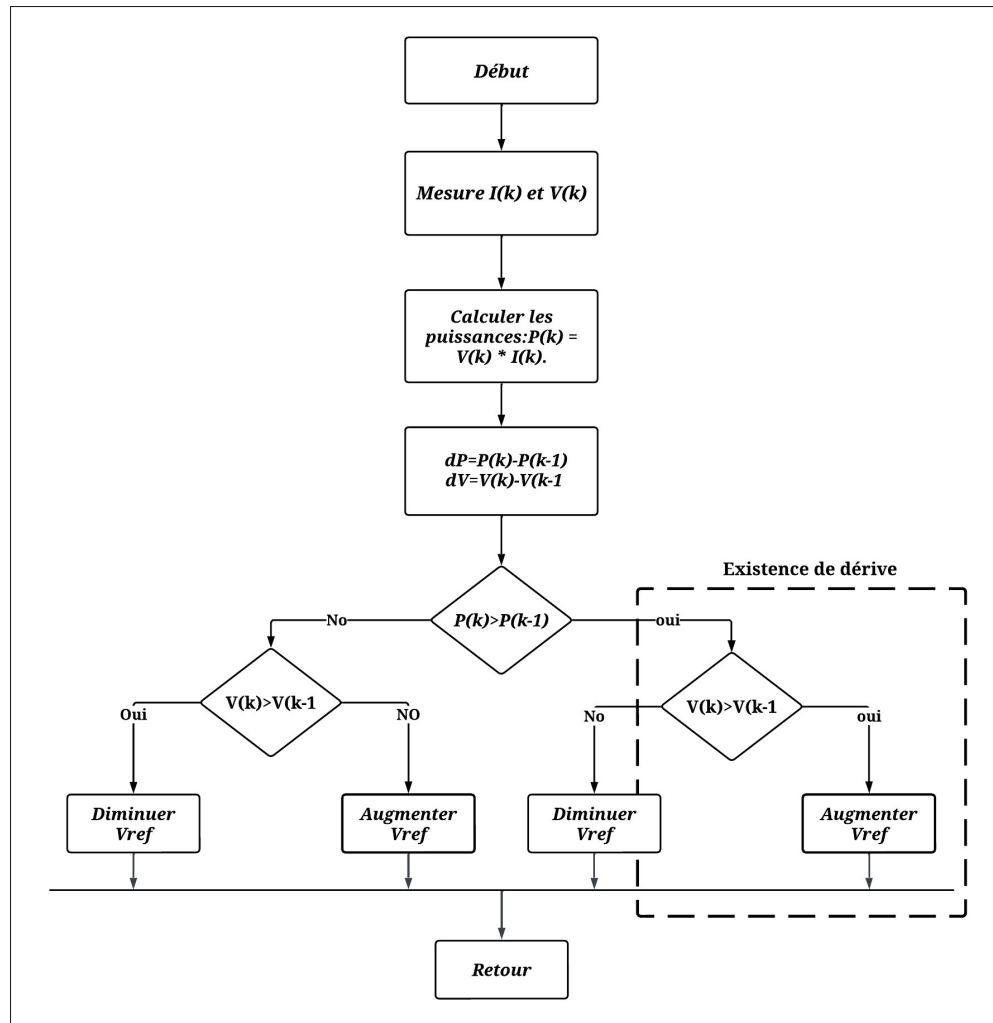


Figure 2.2 Organigramme de l'algorithme P&O conventionnel avec dérive

que les niveaux d'irradiance augmentent rapidement, la puissance peut augmenter en raison du facteur externe d'irradiance plus élevé, plutôt que parce que le système est plus proche du point de puissance maximal (MPP).

2.3.2 Algorithme P&O modifié

L'algorithme P&O conventionnel manque de mécanisme pour distinguer de manière fiable entre une progression authentique vers le MPP et la dérive causée par des changements rapides dans l'irradiance. Dans l'algorithme P&O modifié, l'inclusion de dI (changement

de courant) aide à résoudre cette limitation. Les changements rapides d'irradiance affectant significativement le courant, l'observation de dI en plus de dP et dV permet à l'algorithme de mieux déterminer si l'augmentation de la puissance est due à une véritable approche du MPP ou à des changements environnementaux. Les équations suivantes expliquent la relation entre le courant et le changement de irradiance : (Killi & Samanta, 2015) :

$$I_{pv} = \frac{D^2}{\eta R_L (1 - D)^2} V_{pv} \quad (2.1)$$

$$I_{pv} = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv}}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

$$V_{pv} \frac{D^2}{\eta R_L (1 - D)^2} = I_{sc} - I_0 \frac{V_{pv}}{aV_t} - \frac{V_{pv}}{R_{sh}} - \frac{R_s}{R_{sh}} \frac{D^2}{\eta R_L (1 - D)^2} V_{pv} \quad (2.3)$$

$$V_{pv}|G = \frac{I_{sc}|G}{\frac{D^2}{\eta R_L (1-D)^2} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + \frac{I_0}{aV_t} + \frac{1}{R_{sh}}} \quad (2.4)$$

$$I_{pv}|G = \frac{D^2}{\eta R_L (1 - D)^2} \frac{I_{sc}|G}{\frac{D^2}{\eta R_L (1-D)^2} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + \frac{I_0}{aV_t} + \frac{1}{R_{sh}}} \quad (2.5)$$

$$I_{sc}|G = (I_{sc,n} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (2.6)$$

Les dérivés (2.7) et (2.8) représentent les taux auxquels la tension et le courant, respectivement, varient en réponse aux changements dans l'irradiance (dG). Elles confirment que tant (VPV) que (IPV) augmentent avec une augmentation de l'irradiance, ce qui est un aspect clé de la compréhension et de l'adressage de la dérive dans les algorithmes P&O.

$$\frac{dI_{pv}}{dG} = \frac{D^2}{\eta R_L (1 - D)^2} \frac{(I_{sc,n} + K_i \Delta T) \frac{1}{G_n} + K_i \frac{G}{G_n} \frac{dT}{dG}}{\frac{D^2}{\eta R_L (1-D)^2} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + \frac{I_0}{aV_t} + \frac{1}{R_{sh}}} > 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{dV_{pv}}{dG} = \frac{(I_{sc,n} + K_i \Delta T) \frac{1}{G_n} + K_i \frac{G}{G_n} \frac{dT}{dG}}{\frac{D^2}{\eta R_L (1-D)^2} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) + \frac{I_0}{aV_t} + \frac{1}{R_{sh}}} > 0 \quad (2.8)$$

- IPV : Courant du panneau PV (A)
- D : Rapport Cyclique
- RL : Résistance de charge (Ω)
- n : Efficacité d'une cellule PV
- VPV : Tension du panneau PV (V)
- Io : Courant de saturation inverse (A)
- a : Écart de la cellule par rapport aux caractéristiques idéales de la jonction p-n
- Vt : (KT/q) Tension thermique (V)
- Ki : Coefficient de température du courant de court-circuit
- G : irradiance absolue (W/m²)
- Gn : irradiance nominale (W/m²)

En détectant un dI significatif, l'algorithme peut déduire que l'augmentation de la puissance peut ne pas être uniquement due à la perturbation de la tension déplaçant le point de fonctionnement vers le MPP, mais peut également être due à une augmentation de l'irradiance, ce qui peut être observé sur la courbe I-V du module PV, comme décrit dans la figure 2.3. Si dP est positif (la puissance a augmenté) et dV est positif (la tension a augmenté), mais dI n'est pas significativement positif, cela peut indiquer que l'augmentation de la puissance est due à un rapprochement du MPP plutôt qu'à une augmentation de l'irradiance. Lorsque dV et dI sont tous deux observés comme positifs, cela indique qu'un facteur externe a modifié les caractéristiques I-V, comme une augmentation de l'irradiance. Cela est dû au fait qu'une augmentation d'irradiance déplace l'ensemble de la courbe I-V vers le haut (résultant en un courant plus élevé pour la même tension) (Isknan *et al.*, 2022).

La figure 2.4 présente les caractéristiques puissance-tension (P-V) avec un algorithme perturbation et observation (P&O) modifié exempt de dérive, cela, sous divers niveaux d'irradiance et à

travers le temps, comme le montrent les intervalles de temps $((k-1)T_a)$, (kT_a) , et $((k+1)T_a)$. La courbe en pointillés illustre les caractéristiques P-V à un niveau d'irradiance accru. Les points numérotés indiquent les points de fonctionnement sur la courbe P-V à différents instants :

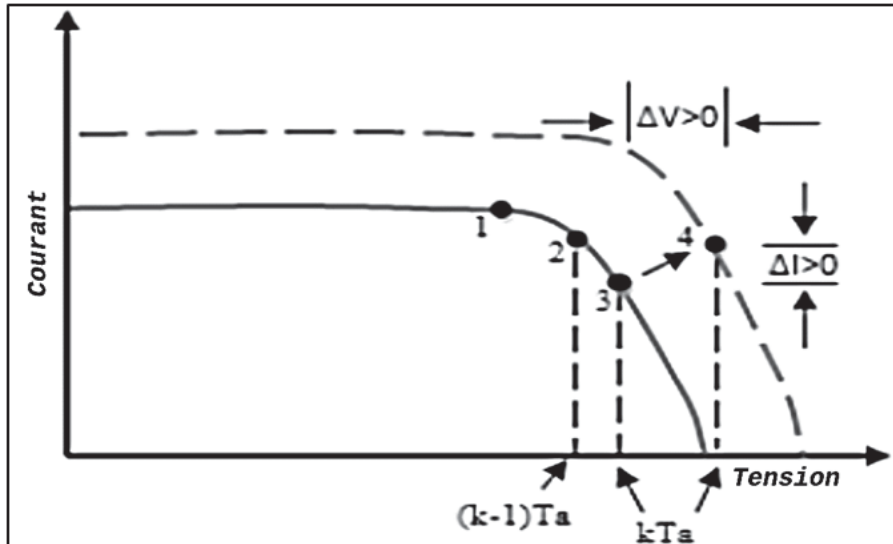


Figure 2.3 Caractéristiques I-V pour analyser le changement de courant avec l'augmentation d'irradiance

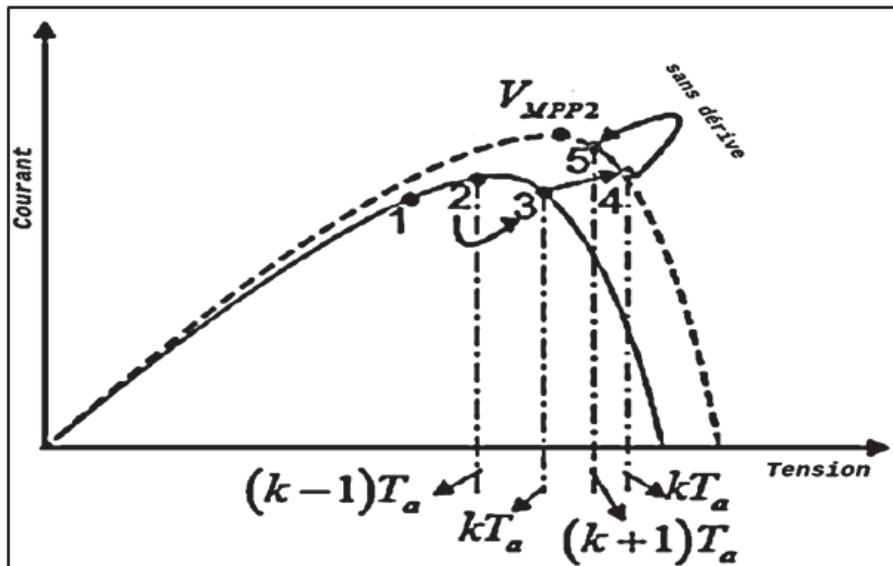


Figure 2.4 Caractéristiques P-V avec un algorithme Perturbation et Observation (P&O) modifié

- Point 1 : Le point de fonctionnement initial sous le premier niveau d'irradiance.
- Points 2 et 3 : Les points de fonctionnement successifs après les perturbations réalisées par l'algorithme (P&O) modifié au même niveau d'irradiance.
- Point 4 : Le nouveau point de fonctionnement consécutif à une augmentation de l'irradiance (indépendante de toute perturbation).
- Point 5 : Le point de fonctionnement que l'algorithme cherche à atteindre après avoir correctement identifié la dérive (drift) due à une augmentation de l'irradiance et après avoir ajusté la tension pour atteindre le nouveau point de puissance maximale (V_{mpp2}) correspondant au niveau d'irradiance plus élevé.

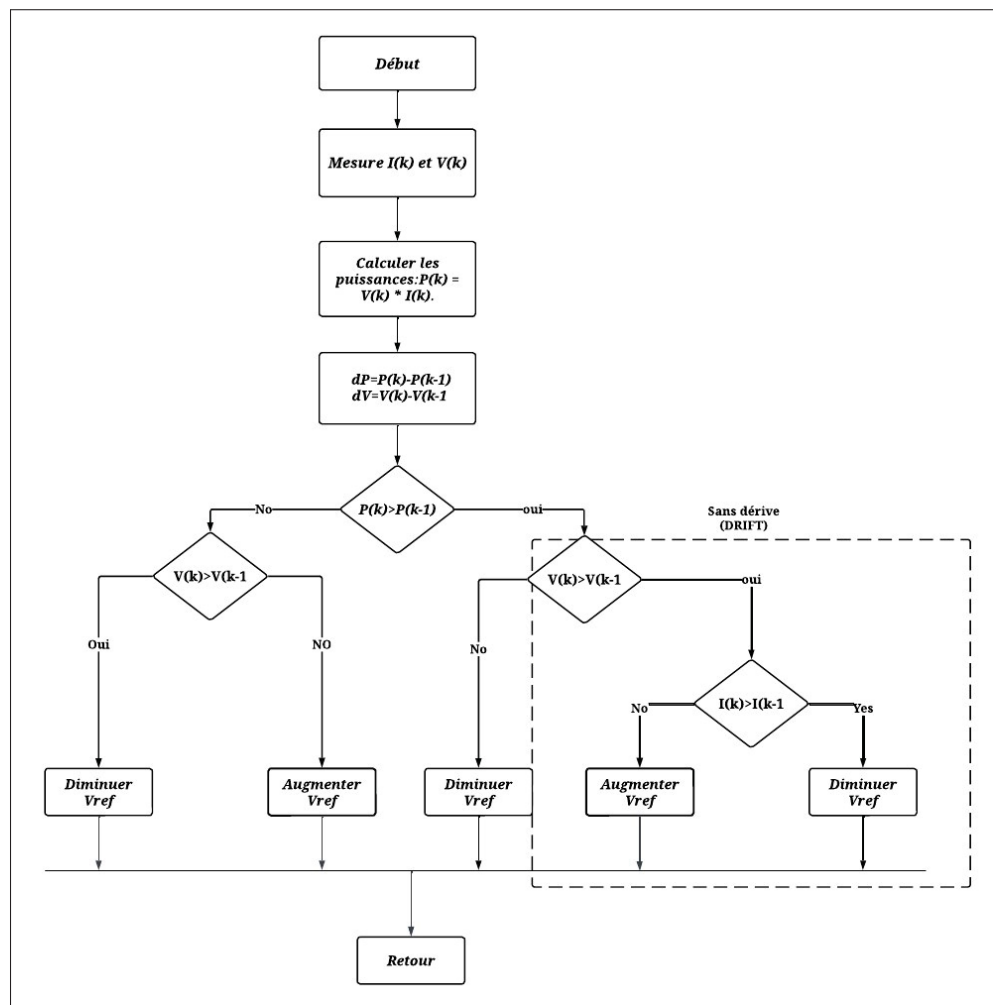


Figure 2.5 Organigramme de l'algorithme (P&O) modifié

Un organigramme, présenté dans la figure 2.5 (Killi & Samanta, 2015), détaille les étapes du processus de l'algorithme Perturb and Observe (P&O) modifié. « Sans dérive » signifie que l'algorithme MPPT a efficacement adapté le point de fonctionnement du module PV en réaction aux variations d'irradiance.

2.4 Simulation

2.4.1 Structure de simulation

Les éléments et la structure de notre système photovoltaïque (PV) avec un algorithme P&O modifié sont montrés dans la figure 2.6. Dans ce système, l'irradiance varie tandis que la température reste constante.. La tension (V_{pv}) et le courant (I_{pv}) du panneau déterminent sa sortie. Le rapport cyclique indique la durée de fermeture de l'interrupteur pendant le cycle total. La modulation de largeur d'impulsion (PWM) régule la puissance fournie à la charge en ajustant le rapport cyclique des interrupteurs dans le convertisseur élévateur.

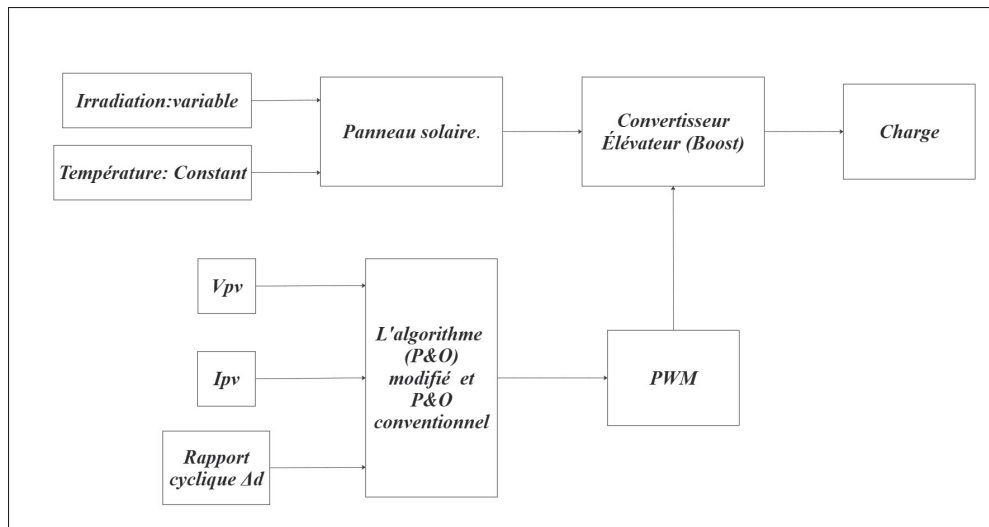


Figure 2.6 Structure de simulation

2.4.2 Méthodologie de simulations

Pour évaluer l'efficacité d'un algorithme MPPT de type (P&O) modifié, particulièrement sa capacité à surmonter le problème de dérive prévalent dans l'algorithme P&O conventionnel, nous proposons une étude comparative utilisant Matlab/Simulink, comme illustré dans la Figure 2.7. En simulant la performance des algorithmes P&O conventionnel et modifié dans des conditions environnementales identiques, L'étude vise à évaluer les améliorations dans le suivi du point de puissance maximale (MPP), ce qui améliore la fiabilité et l'efficacité globales des systèmes photovoltaïques.

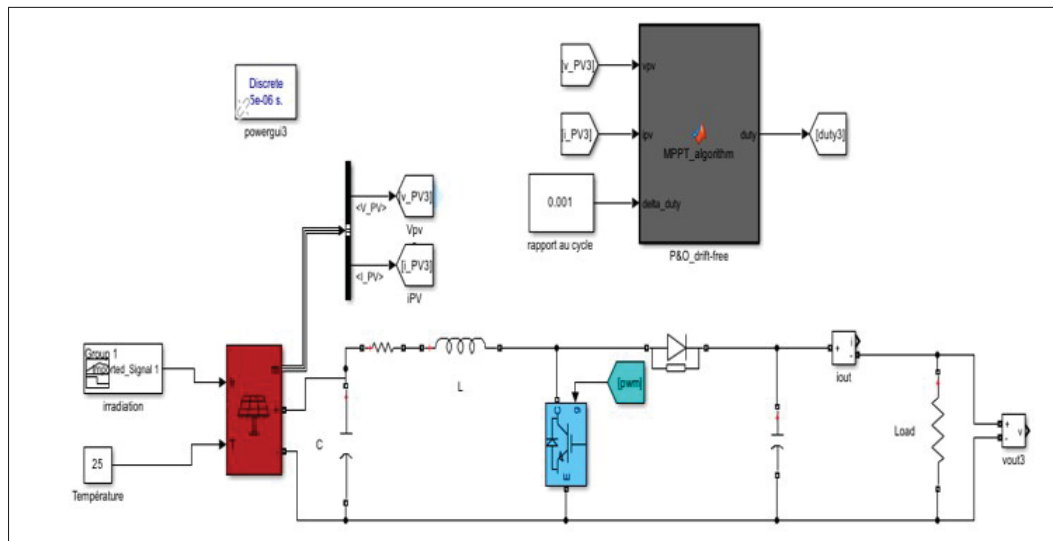


Figure 2.7 Bloc Simulink de l'algorithme (P&O) modifié

Dans le cadre de notre recherche, les spécifications détaillées des panneaux solaires photovoltaïques sont décrites dans le tableau 2.1. Ces informations sont essentielles pour comprendre le comportement et l'efficacité des panneaux sous différentes conditions. Les valeurs précises des composants sélectionnés pour le convertisseur élévateur sont présentées dans le tableau 2.2. Cette préparation pose les bases pour une analyse approfondie de la performance de l'algorithme P&O modifié dans l'optimisation des PV solaires.

Afin d'évaluer leur capacité à réagir aux variations rapides des conditions solaires, notre étude testera à la fois un algorithme P&O modifié et P&O conventionnel dans le cadre de deux scénarios

Tableau 2.1 Paramètres de panneaux solaires

Panneaux solaires	
Cellules par module	Ncell 60
Tension de circuit ouvert	36.3 V
Tension maximale à la MPP	29 V
Courant de court-circuit	7.84 A
Courant maximal à la MPP	7.35 A
Puissance maximale (pmax)	213.15 W
Coefficient de température du courant de court-circuit	0.102 %/deg.C
Champ solaire	
Chaines parallèles	2
Chaines série	2

Tableau 2.2 Paramètres de convertisseur élévateur

Paramètres de convertisseur	
Fréquence de commutation	5 kHz
Inductance	1.1478e-4 H
Capacité	3227e-6 F
Résistance de charge	150 Ohms
Rapport cyclique (Duty cycle)	0.001

opérationnels différents, chacun caractérisé par des profils d'irradiance spécifiques. Cette analyse comparative vise à démontrer la robustesse de l'algorithme modifié en se concentrant sur son aptitude à éviter les problèmes de dérive (drift), qui affectent généralement les algorithmes conventionnels lors de changements rapides d'irradiance solaire.

Scénario 1 : Nous simulons un changement rapide de l’irradiance, où le niveau d’irradiance augmente rapidement de 400 W/m^2 à 800 W/m^2 en un court laps de temps de 1,5 seconde, atteignant le pic d’irradiance précisément à mi-chemin, soit à 0,75 seconde.

Scénario 2 : Il introduit un modèle d’irradiance plus complexe et imprévisible, fluctuant de manière aléatoire entre 250 et 1000 W/m^2 , comme illustré dans la Figure 2.8. Dans cette configuration, les niveaux d’irradiance sont modifiés toutes les 0,1 seconde sur une durée de 1,5 seconde. Il vise à évaluer l’impact des changements rapides d’irradiance sur l’algorithme conventionnel et comment l’algorithme modifié gère ces changements.

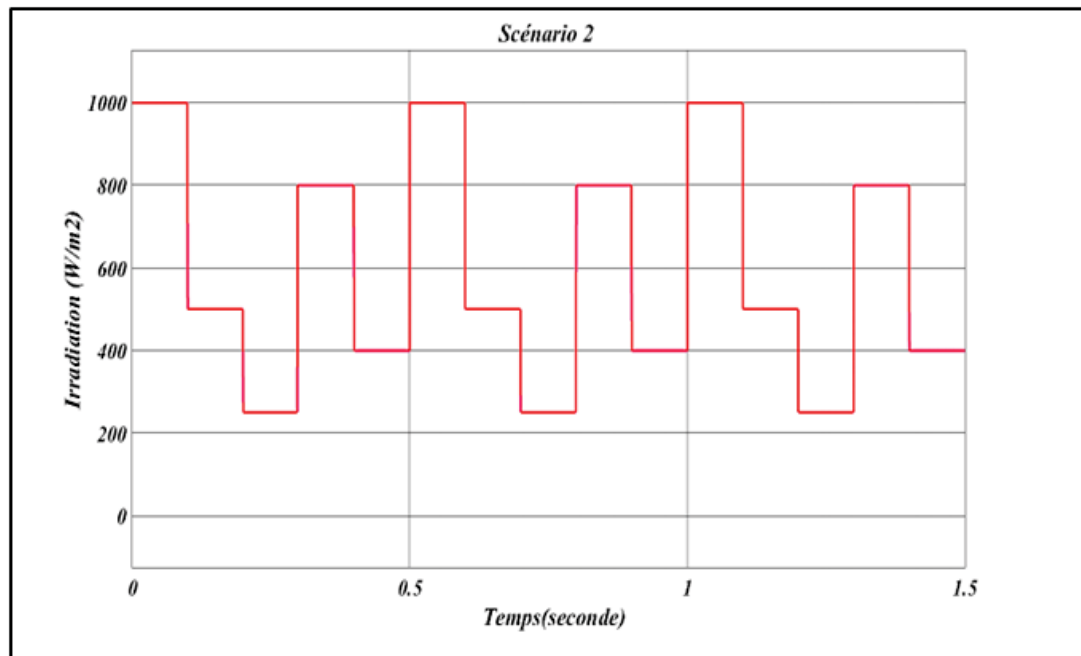


Figure 2.8 Courbe d’irradiance pour scénario 2

2.5 Résultats

Afin de montrer les performances des algorithmes MPPT de type Perturb and Observe (P&O) modifiés et conventionnels face à un changement brusque de l’irradiance solaire, les graphiques 2.9 et 2.10 présentent les courbes de puissance pour le Scénario 1 ainsi que la tension. Trois courbes représentent l’évolution de la puissance dans le temps sur le graphique de la figure

2.9 : l'une représente la puissance idéale (P-Idéal), l'autre représente l'algorithme P&O modifié (P-P&O modifié) et la dernière représente l'algorithme P&O conventionnel.

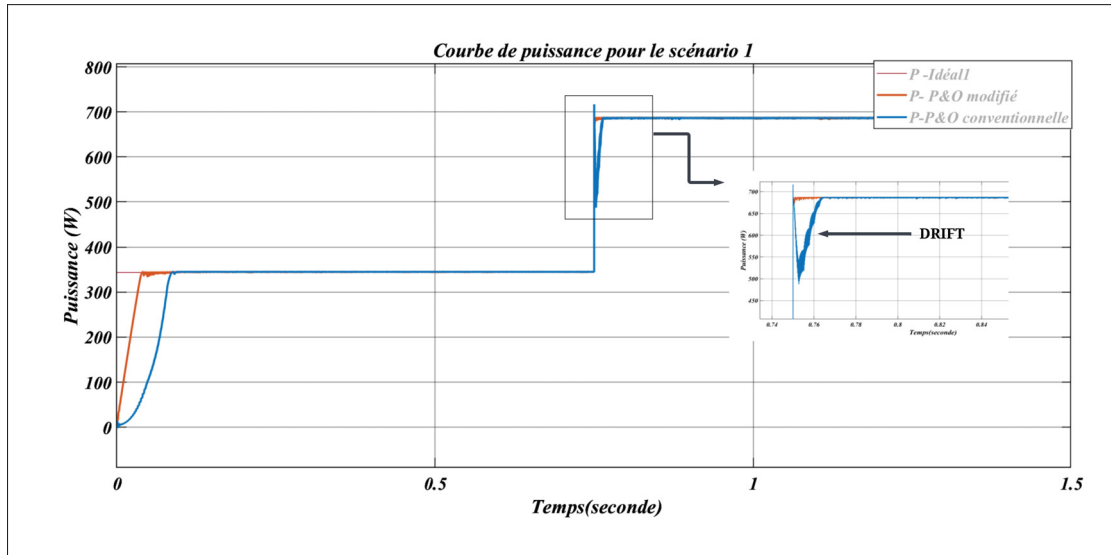


Figure 2.9 Suivi de puissance Avec algorithme P&O conventionnel et modifié du scénario 1

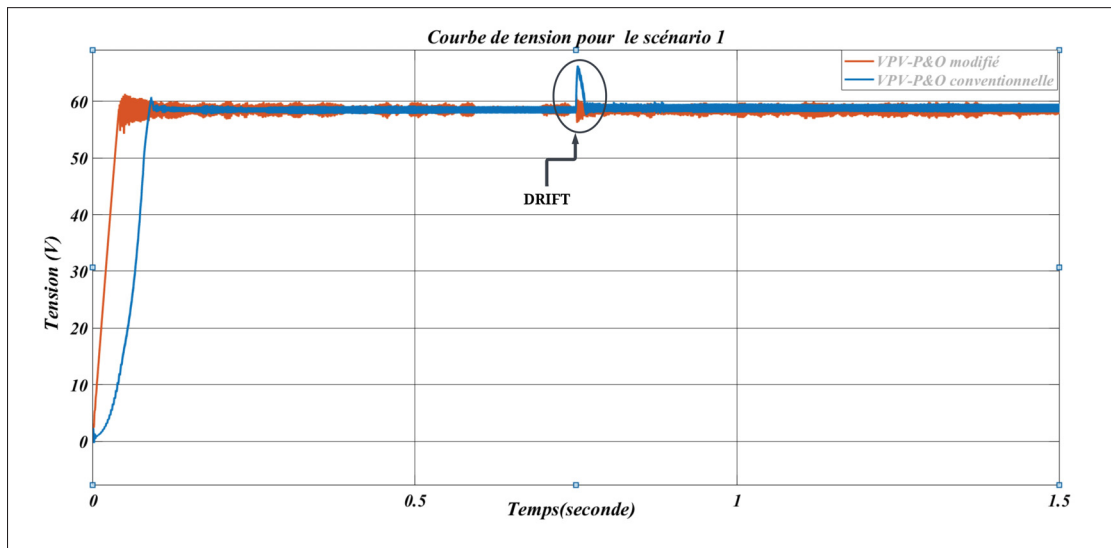


Figure 2.10 Suivi de tension Avec algorithme P&O conventionnel et modifié du scénario 1

Les courbes révèlent qu'à 0,75 seconde, moment où l'irradiance augmente de 400 W/m^2 à 800 W/m^2 , la courbe pour l'algorithme P&O conventionnel montre un écart notable par rapport à la réponse idéale, un phénomène désigné comme 'DRIFT', caractérisé par une baisse temporaire

de la puissance avant qu'elle ne se rétablisse et se stabilise au nouveau niveau de puissance supérieur. Cela indique un retard ou une erreur dans le suivi du MPP en raison du changement soudain de l'irradiance.

La courbe de l'algorithme P&O modifié affiche une réponse plus conforme à l'idéal, indiquant qu'il parvient efficacement à contourner le problème de dérive et à suivre de près la production de puissance idéale lors des variations du niveau d'irradiance.

Un encart dans le graphique offre une vue agrandie sur l'instant du changement d'irradiance. Cette vue détaillée met en évidence la performance supérieure de l'algorithme modifié par rapport à l'algorithme conventionnel.

Des courbes de puissance et de tension correspondant au Scénario 2, qui implique des changements aléatoires d'irradiance, sont présentées aux figures 2.11 et 2.12. La sortie de puissance et la tension sont évaluées dans ce scénario dans des conditions où les valeurs d'irradiance varient de 250 à 1000 W/m².

Des instances de « DRIFT » sont indiquées sur les courbes créées par l'algorithme P&O conventionnel sur le graphique. Ces points montrent où l'algorithme conventionnel échoue à s'adapter rapidement au nouveau niveau d'irradiance, ce qui entraîne une baisse temporaire de puissance avant qu'elle ne se rétablisse au niveau de puissance idéal. Cependant, la courbe du P&O modifié est beaucoup plus proche de la courbe de puissance idéale, ce qui indique qu'elle gère mieux les changements d'irradiance rapides. Cela suggère que l'algorithme modifié est plus efficace.

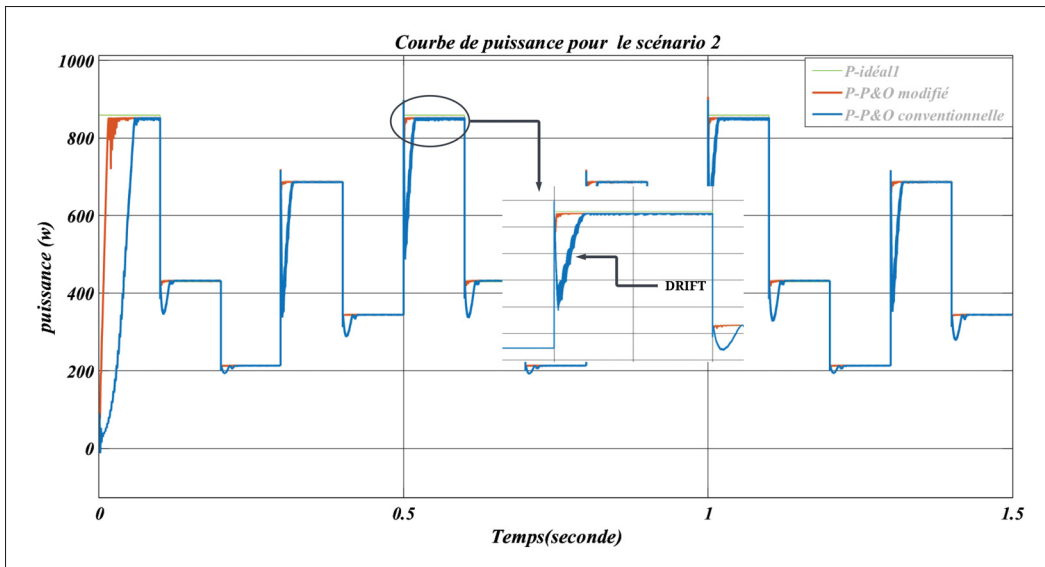


Figure 2.11 Suivi de puissance Avec algorithme P&O conventionnel et modifié du scénario 2

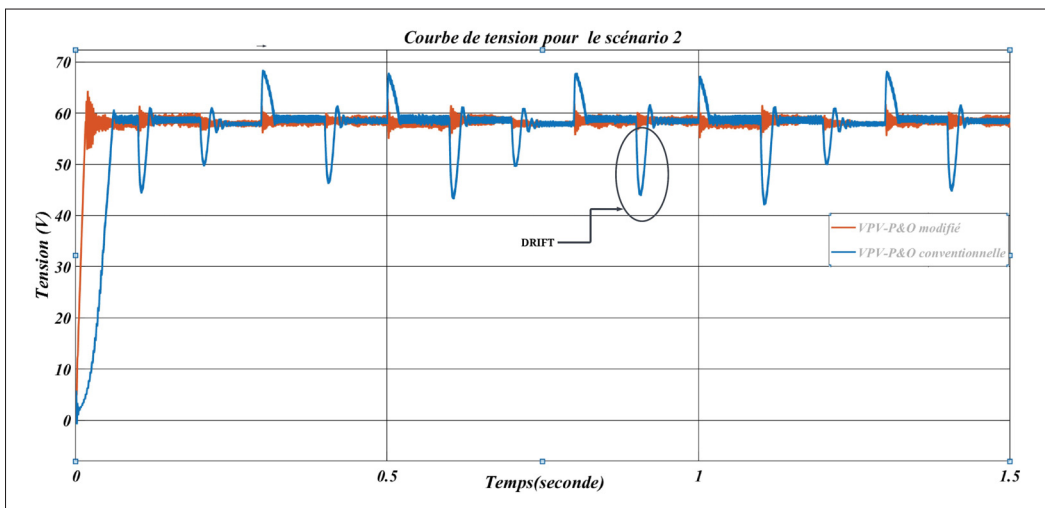


Figure 2.12 Suivi de tension Avec algorithme P&O conventionnel et modifié du scénario 2

En effet, l'intégration de dI (changement de courant), dans l'algorithme (P&O) représente une amélioration significative de l'efficacité des systèmes photovoltaïques (PV). Cette amélioration permet de distinguer entre les variations de la puissance qui découlent de changements naturels

dans l'algorithme (P&O), et celles qui résultent de changements dans l'irradiance solaire. En conséquence, cela empêche le système de faire face au problème de dérive(drift) fréquent.

2.6 Conclusion

L'intégration précise du changement de courant (dI) dans l'algorithme MPPT de type P&O a été mise en évidence par des analyses comparatives réalisées avec Matlab/Simulink. Ces analyses révèlent que notre algorithme MPPT P&O modifié constitue une solution robuste, même en conditions environnementales changeantes et en présence de défis tels qu'une irradiance solaire fortement variable, entraînant une nette amélioration de l'efficacité des systèmes photovoltaïques (PV). L'augmentation de la réactivité de l'algorithme P&O modifié a été clairement démontrée à travers différents scénarios de test.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons un algorithme innovant et proposé qui tire parti de l'intelligence artificielle, en utilisant spécifiquement un contrôleur logique flou.

CHAPITRE 3

NOUVEL ALGORITHME P&O MODIFIÉ ET ADAPTATIF BASÉ SUR LA LOGIQUE FLOUE POUR SUIVI DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

3.1 Introduction

les techniques d'IA sont particulièrement efficaces pour gérer des systèmes non linéaires comme les systèmes photovoltaïques. Les Réseaux de Neurones Artificiels (ANN) et la Logique Floue (FLC) sont les méthodes d'IA les plus remarquables utilisées pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans le domaine de l'énergie solaire.. Ces méthodes améliorent l'efficacité et l'adaptabilité des algorithmes MPPT(Bollipo *et al.*, 2020).

Dans le contexte en évolution des systèmes d'énergie photovoltaïque. S'attaquer aux limitations des algorithmes conventionnels de perturbation et d'observation (P&O) est devenu un point central de la recherche. Bien que certaines études aient tenté de modifier ces approches conventionnelles, ces adaptations font encore face à certains défis.

Dans ce chapitre, nous présentons un algorithme innovant qui combine la logique floue avec une technique MPPT de perturbation et observation (P&O) modifiée, Nous l'appellerons MP&O adaptative.Cette fusion crée une taille de pas adaptative, améliorant considérablement la réactivité de l'algorithme aux changements d'irradiance solaire. Le nouveau contrôleur MPPT répond efficacement à trois limitations auxquelles sont souvent confrontés les algorithmes conventionnels et modifiés de perturbation et l'observation (P&O) une taille de pas fixe : Les oscillations autour du Point de Puissance Maximale (MPP), le temps nécessaire pour atteindre le MPP et la perte de la direction de suivi.

3.2 Méthodologie de la logique floue

Lotfi A. Zadeh a introduit le concept de logique floue en 1965, qui est une extension de la logique booléenne traditionnelle et a révolutionné la façon dont nous abordons la prise de décision et la résolution de problèmes dans des systèmes caractérisés par l'imprécision et l'incertitude. La

logique floue permet aux éléments d'avoir des degrés d'appartenance à un ensemble, n'importe où entre 0 et 1, contrairement à la logique booléenne traditionnelle, où les éléments ont des états binaires (0 ou 1)(Ansari, 1998). La configuration de base d'un système de logique floue est illustrée à la figure 3.1.

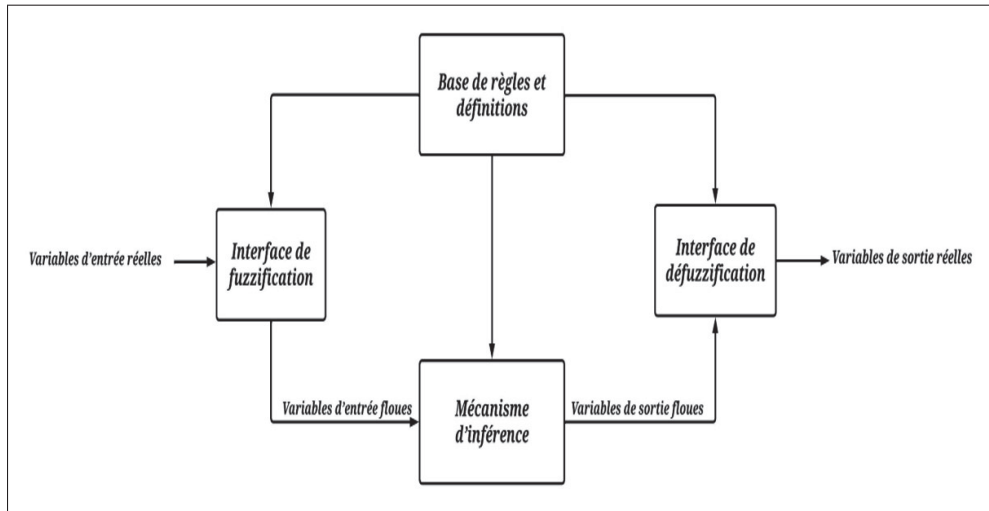


Figure 3.1 Configuration de base d'un contrôleur à logique floue

Les composants fondamentaux d'un système de logique floue :

- Variables d'entrée réelles : Ce sont les quantités mesurables ou les entrées de l'environnement du système qui fournissent le point de départ du traitement.
- Interface de fuzzification : ce module transforme les entrées numériques en ensembles flous. La fuzzification implique de convertir des nombres nets en degrés d'appartenance par rapport à des termes linguistiques tels que « faible », « moyen » ou « élevé ».
- Variables d'entrée floues : Après la fuzzification, ce sont les variables d'entrée exprimées en termes de leur appartenance à des ensembles flous, prêtes pour l'étape suivante du traitement.
- Base de règles et définitions : C'est le centre du système de logique floue, contenant un ensemble de règles floues qui définissent le comportement du système. Les règles sont formulées en utilisant les principes de la logique floue pour relier les variables d'entrée floues aux variables de sortie floues.

- Mécanisme d'inférence : Il applique la base de règles aux variables d'entrée floues pour dériver des variables de sortie floues. Le mécanisme d'inférence utilise des opérations de logique floue comme AND, OR et NOT pour inférer le résultat.
- Variables de sortie floues : Ce sont les valeurs floues résultant du processus d'inférence, qui doivent encore être traduites en actions ou valeurs réelles.
- Interface de défuzzification : L'étape finale du processus, où les variables de sortie floues sont reconverties en variables de sortie réelles. La défuzzification implique de mapper un ensemble flou ou plusieurs ensembles flous en une seule sortie nette.

3.2.1 La Fuzzification

L'interface de fuzzification transforme des valeurs numériques précises en degrés d'appartenance à des ensembles flous. Ces ensembles sont définis par des termes linguistiques tels que « faible », « moyen » ou « élevé ». Par exemple, si la variable d'entrée est l'irradiance solaire, l'interface de fuzzification convertit une valeur numérique d'irradiance en un terme flou. Une irradiance de 500 W/m^2 pourrait être « moyenne » et 800 W/m^2 « élevée ». Dans le contexte du MPPT, le courant et la tension d'un panneau solaire sont mesurés comme des valeurs numériques précises. L'interface de fuzzification interprète ces valeurs selon des catégories prédéfinies. Une tension peut être « moyenne » dans une certaine plage et « élevée » au-delà de cette plage.

3.2.2 Base de règles et définitions

La "Base de règles et définitions" dans un système de logique floue dicte sa logique opérationnelle. Ce composant comprend une collection de déclarations SI-ALORS, connues sous le nom de règles floues, qui relient les variables d'entrée floues aux variables de sortie floues selon les principes de la logique floue. Ces règles ne sont pas fixes comme dans la logique binaire, mais sont exprimées en degrés, reflétant le comportement du système sous diverses conditions floues. Par exemple, dans un système MPPT utilisant la logique floue, la base de règles pourrait contenir des règles telles que "SI l'irradiance solaire est 'élevée' et la température est 'basse', ALORS réglez le rapport cyclique sur 'moyen'." Chaque ensemble flou est défini par une fonction

d'appartenance qui attribue un niveau d'appartenance entre 0 et 1 aux valeurs d'entrée. Ce concept est central dans la logique floue, permettant au système de gérer les incertitudes et les gradations dans les données plutôt que les évaluations binaires vrai/faux trouvées dans la logique booléenne traditionnelle. La forme de la fonction d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale, gaussienne, etc.) reflète la manière dont les valeurs d'entrée sont réparties dans l'ensemble, influençant la façon dont le système interprète et répond aux entrées variables (Chevrie & Guély, 1998). La figure 3.2. montre les diverses fonctions d'appartenance.

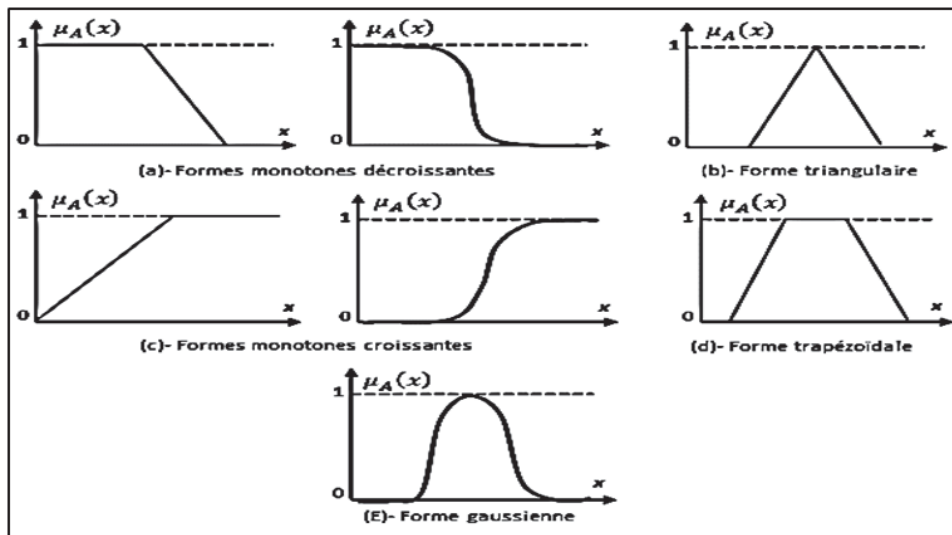


Figure 3.2 Différentes les configurations des fonctions d'appartenance d'un ensemble flou

3.2.3 Défuzzification

L'interface de défuzzification dans un système de logique floue est la dernière étape où les variables de sortie floues, qui ont des degrés d'appartenance à divers ensembles flous, sont converties en valeurs de sortie réelles et nettes (Rajesh & Mabel, 2015). Ce processus est nécessaire car la logique floue fonctionne avec des degrés d'appartenance.

3.2.4 Système d'inférence floue Mamdani

Le système d'inférence floue de Mamdani, développé par le professeur Ebrahim Mamdani en 1975, est l'un des systèmes d'inférence floue les plus utilisés. Il est principalement utilisé

pour les systèmes de contrôle et les processus de prise de décision. La méthode de Mamdani est significative pour sa simplicité et son application généralisée dans la logique floue. Une règle floue d'un FIS de Mamdani a le format : « si x est A alors y est B », où x et y sont des variables floues et A et B sont des valeurs floues. Le système d'inférence floue de Mamdani se présente comme une approche robuste et polyvalente pour gérer des informations complexes, imprécises et incertaines d'une manière qui imite le raisonnement et la prise de décision humains (Putri & Saputro, 2021). Son utilisation répandue et son adaptabilité en font un outil fondamental dans la boîte à outils des applications de logique floue.

3.3 Recherches antérieures sur les p&o basées sur la logique floue (FLC)

Avec l'intégration de méthodes avancées d'intelligence artificielle (IA), la technologie de suivi du point de puissance maximale (MPPT) connaît actuellement une phase de développement. Les algorithmes génétiques, la logique floue, les réseaux de neurones et les interfaces neuro-floues sont des exemples de techniques de plus en plus courantes. En offrant des temps de réponse plus rapides et une plus grande stabilité dans diverses conditions de fonctionnement. Le contrôle par logique floue (FLC), en particulier, se distingue par son efficacité et sa mise en œuvre facile. (Muhammad Ammirul et al., 2013).

Ouahib Guenounou , & Boutaib et al., 2013 Dans cette recherche, l'idée s'articule autour d'une approche MPPT novatrice utilisant un contrôleur flou adaptatif pour les systèmes photovoltaïques. Ce contrôleur se distingue en incorporant deux bases de règles distinctes. La première base de règles fonctionne de manière traditionnelle, ajustant le rapport cyclique du convertisseur élévateur. La seconde, plus innovante, ajuste dynamiquement le gain du contrôleur en temps réel. Billel Talbi et Fateh et al., 2017, ont développé un nouvel algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) amélioré pour optimiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques dans des conditions climatiques variables. Cet algorithme associe une technique de perturbation et d'observation modifiée (MPO) utilisant un contrôleur logique flou, à un contrôleur de courant prédictif selon un modèle. Cette méthode a été validée par des tests matériels réalisés en temps réel à l'aide d'une carte DSPACE DS 1104. H. Afghoul, & H. Chabana et al., 2021,

ont mené une étude comparative approfondie entre l'algorithme conventionnel de perturbation et d'observation (P&O) et des algorithmes MPPT avancés. Cette étude s'est particulièrement intéressée aux algorithmes utilisant le contrôle logique flou (FLC) et le système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS). La véracité de ces affirmations est corroborée par des résultats de simulation obtenus à l'aide Matlab/Simulink. John Macaulay, & Zhongfu Zhou 2018, ont développé une version améliorée de l'algorithme MPPT de perturbation et d'observation (P&O) en intégrant la logique floue pour ajuster dynamiquement les tailles de pas. L'objectif de cette innovation est d'accélérer les temps de réponse et de réduire les fluctuations de tension en régime permanent. Cet algorithme avancé a été testé grâce à une émulation intérieure unique d'une source photovoltaïque (PV), qui associe un panneau solaire standard, une alimentation en courant continu (CC) et un convertisseur élévateur CC-CC, l'ensemble étant contrôlé par un contrôleur MPPT basé sur dSPACE.

3.4 Problématique

L'utilisation d'une taille de pas fixe dans les algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques entraîne des effets distincts. Une grande taille de pas fixe peut conduire à un suivi rapide du MPP lorsque l'irradiance solaire change. Cependant, cela peut également amener le système à dépasser le MPP, entraînant des oscillations de puissance significatives et des inefficacités (Yadav, Jha & Kumar, 2020). Inversement, si la taille du pas est petite, le système bénéficie de réductions d'oscillations et d'une opération plus stable au MPP, mais souffre d'une réponse plus lente aux changements d'irradiance solaire (Hamza *et al.*, 2021) (Gouabi *et al.*, 2021). Cela crée un besoin d'équilibre pour atteindre à la fois la stabilité et la réactivité dans des conditions environnementales variables, nécessitant une méthode capable de s'ajuster à diverses conditions opérationnelles. Pour répondre aux limitations de la taille de pas fixe dans les systèmes MPPT, une approche de taille de pas adaptative est essentielle. Elle harmonise la réponse rapide nécessaire lors des changements rapides d'irradiance solaire et les oscillations de puissance minimisées requises pour les opérations en état stable (Hazzab *et al.*, 2023), comme l'illustre la figure 3.3.

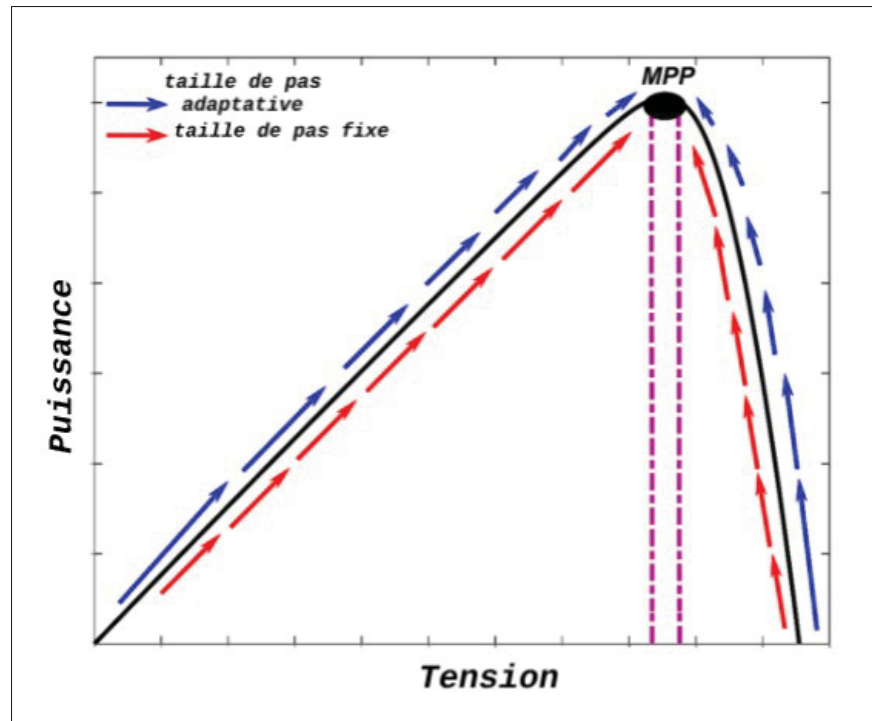


Figure 3.3 Les flèches représentent le pas de la perturbation (la taille du pas fixes et adaptatives) utilisé pour suivre le MPP

Pour améliorer l'efficacité et la réactivité des systèmes photovoltaïques (PV), nous proposons un nouvel algorithme utilisant la logique floue pour optimiser le suivi du point de puissance maximale (MPPT). Grâce à la logique floue, le système peut ajuster dynamiquement la taille du pas pour le MPPT, assurant une convergence plus rapide vers le MPP avec moins d'oscillations, même sous des conditions d'irradiance changeantes (Gouabi *et al.*, 2021). Nous appelons cet algorithme MP&O adaptatif. La figure 3.4 montre l'organigramme de l'algorithme proposé.

L'algorithme que nous avons développé pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilise une analyse détaillée des variations de puissance et de tension pour ajuster dynamiquement la taille de pas. Cet algorithme peut calculer la taille de pas adaptatif (taille de perturbation adaptative), notée C , permettant au contrôleur d'ajuster les perturbations du rapport cyclique en fonction des variables d'erreur (E) et de variation d'erreur (DE), comme décrit dans les équations mathématiques (3.1) et (3.2) (Adly, El-Sherif & Ibrahim, 2011). Cette adaptation permet de naviguer plus précisément et rapidement vers le point de puissance maximale.

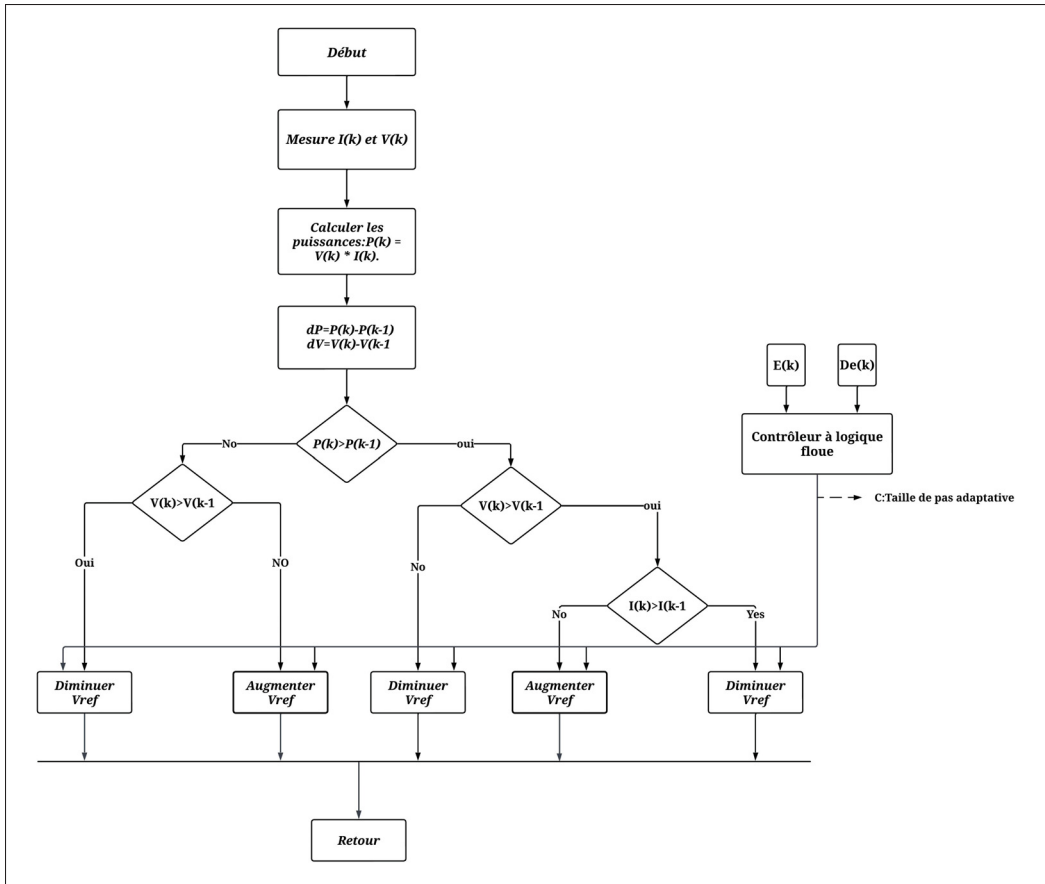


Figure 3.4 Organigramme de l'algorithme MP&O adaptatif proposé

$$E(k) = \frac{P(K) - P(K-1)}{V(K) - V(K-1)} \quad (3.1)$$

$$DE(k) = E(K) - E(K-1) \quad (3.2)$$

Utiliser les variables d'erreur (E) et de variation d'erreur (DE) comme entrées pour un contrôleur logique flou dans les systèmes MPPT offre un avantage stratégique. L'erreur (E) est calculée comme la différence de puissance par unité de changement de tension. Ces entrées permettent au contrôleur logique flou de faire des ajustements plus adaptatifs et précis au rapport cyclique.

3.5 Simulation

3.5.1 Structure de simulation

La figure 3.5 montre un système photovoltaïque amélioré par un contrôleur logique flou pour une meilleure efficacité du suivi du point de puissance maximale (MPPT). Le système s'ajuste dynamiquement aux niveaux variables d'irradiance solaire tout en maintenant une température constante. La tension (V_{pv}) et le courant (I_{pv}) du panneau sont les entrées de l'algorithme P&O modifié. Le contrôleur logique flou traite la tension et le courant du panneau solaire, ainsi que le changement de l'erreur (DE) pour moduler le rapport cyclique d'un convertisseur élévateur.

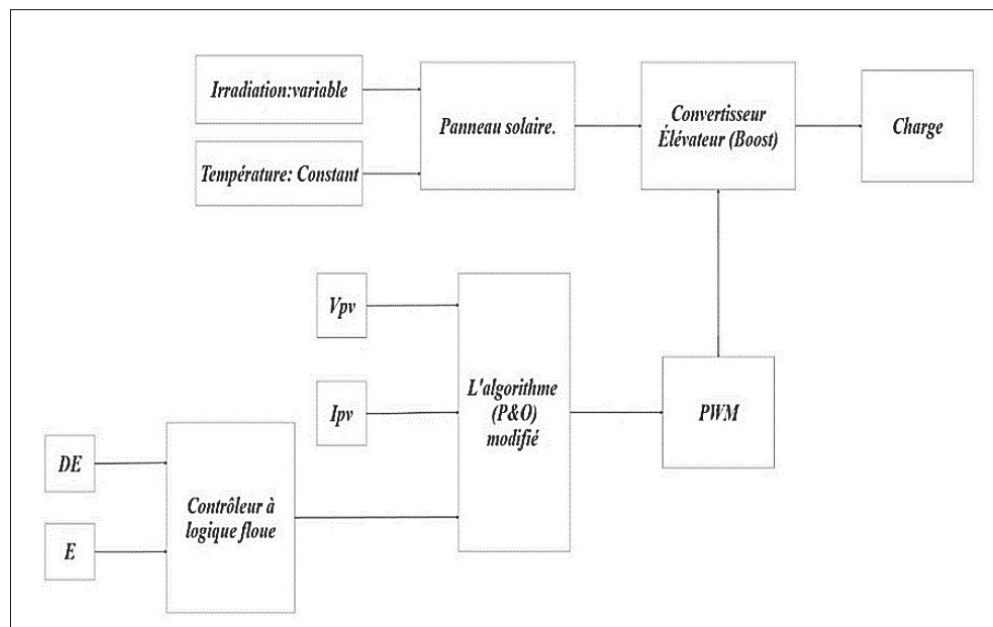


Figure 3.5 Structure du modèle de l'algorithme MP&O adaptatif proposé

3.5.2 La configuration du contrôleur à logique floue proposée

L'organigramme du processus contrôleur à logique floue proposé est présenté à la figure 3.6. Il commence par les variables $De(K)$ et $E(K)$, qui représentent la variation de l'erreur et l'erreur respectivement. Les fonctions d'appartenance prédéfinies sont utilisées pour convertir ces entrées en valeurs floues. Le processus d'inférence, qui applique un ensemble de règles floues aux

entrées fuzzifiées pour en déduire une sortie en termes floues, est l'étape suivante. Enfin, la sortie floue est défuzzée, ce qui la transforme en une valeur spécifique, qui dans ce cas est la taille de pas adaptative C .

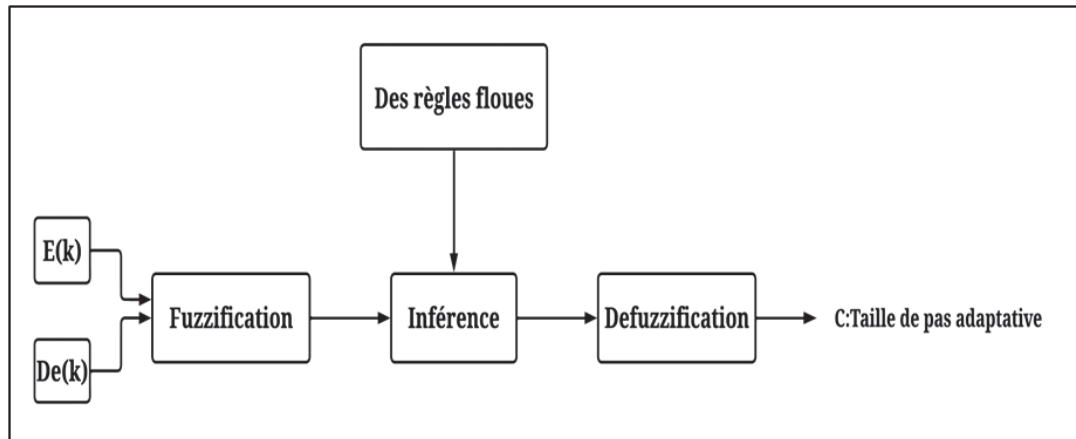


Figure 3.6 Organigramme du contrôleur à logique floue proposé

Les figures détaillées 3.7, 3.8 et 3.9 fournissent un aperçu approfondi du fonctionnement interne du contrôleur logique flou pour l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT). La figure 3.7 montre les fonctions d'appartenance pour le paramètre (E), qui sont Zéro (Z), Grand positif (BP), Petit positif (PS), Grand négatif (NB) et Petit négatif (NS). Concernant le paramètre (DE), les fonctions d'appartenance englobent négatif (N), zéro (Z) et positif (P), comme illustré dans la Figure 3.8. La sortie (C) est associée à des fonctions d'appartenance qui la classifient comme grande, moyenne ou petite, et celles-ci sont démontrées dans la Figure 3.9.

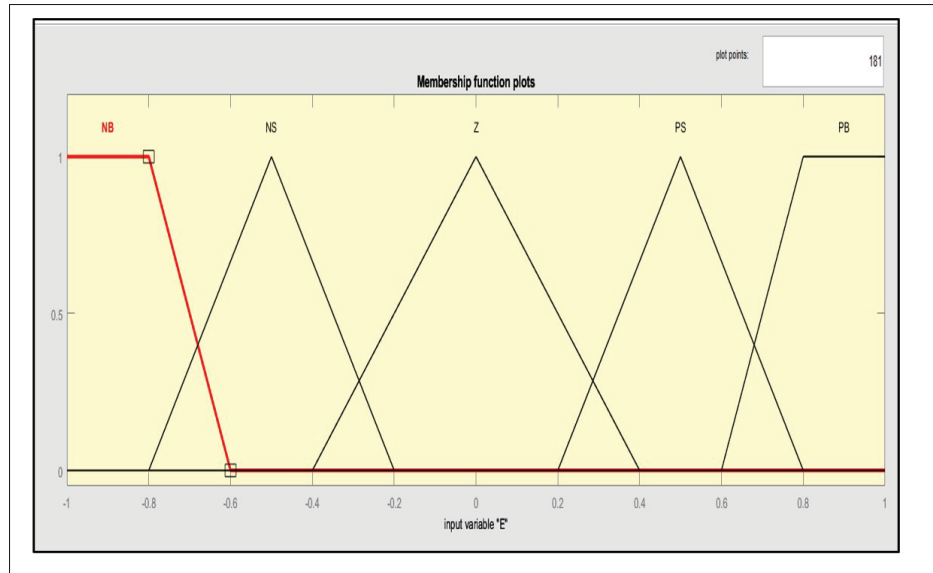


Figure 3.7 Fonctions d'appartenance pour le paramètre (E)

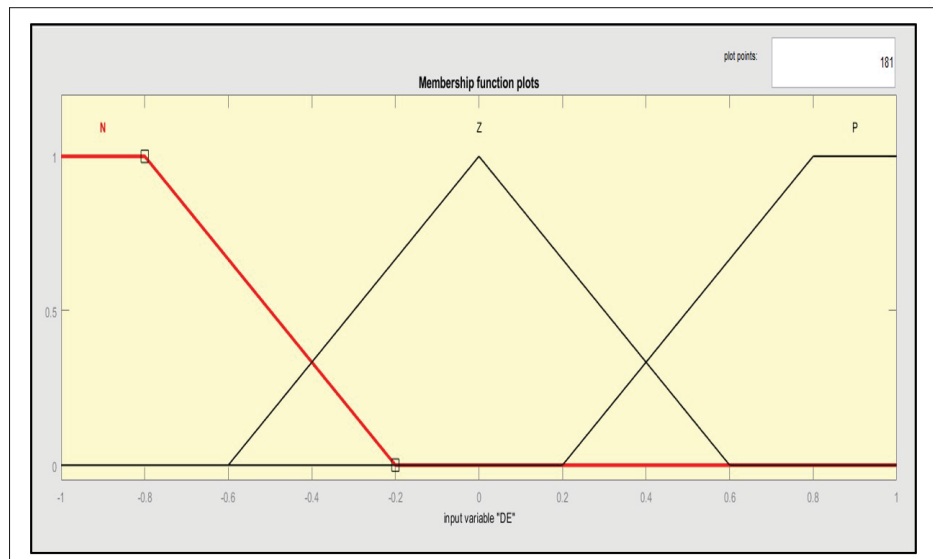


Figure 3.8 Fonctions d'appartenance pour le paramètre (DE)

Tableau 3.1 présente une matrice de règles pour un contrôleur logique flou, qui est utilisée pour définir la réponse en sortie en fonction de la combinaison de l'erreur (E) et du changement d'erreur (DE). À noter que les variables E et DE ont été normalisées pour garantir une échelle uniforme des entrées dans le système.

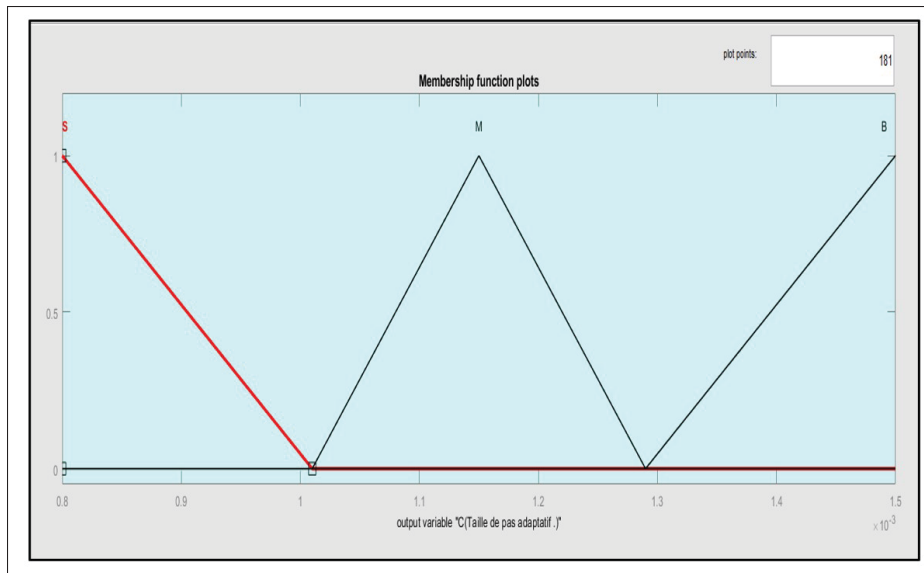


Figure 3.9 Fonctions d'appartenance pour C(Taille de pas adaptative)

Tableau 3.1 Des règles floues pour MP&O adaptatif

<i>E</i> <i>DE</i>	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>
<i>N</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>B</i>	<i>B</i>
<i>Z</i>	<i>S</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>B</i>
<i>P</i>	<i>B</i>	<i>S</i>	<i>M</i>	<i>S</i>	<i>S</i>

La figure 3.10 présente les surfaces de ces règles floues, La matrice décrit comment le système doit réagir à divers scénarios :

- Lorsque l'erreur et le changement d'erreur sont négatifs ou positifs mais petits, la taille de pas de sortie (C) est moyenne.
- Une erreur nulle ou un changement d'erreur nul entraînent généralement un ajustement de sortie faible, impliquant que le système est proche de l'état souhaité et nécessite un réglage mineur.
- Des erreurs ou des changements d'erreur largement positifs ou négatifs conduisent à des ajustements plus importants, indiquant que le système est éloigné de l'état cible et que la taille de pas de sortie (C) est grande.

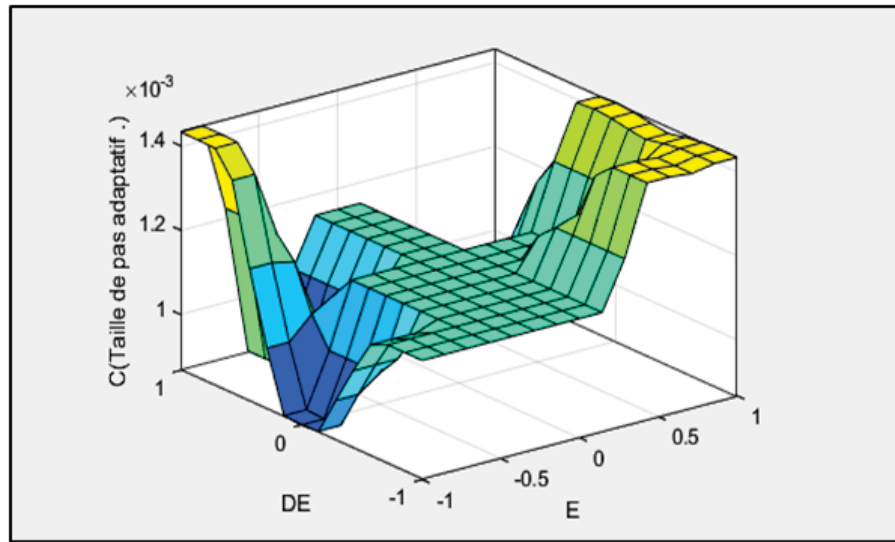


Figure 3.10 Surfaces des règles floues pour MP&O adaptative

3.5.3 Méthodologie de simulations

Pour évaluer la performance de l'algorithme MP&O adaptatif proposé, nous avons recours à MATLAB Simulink pour simuler un modèle détaillé de système photovoltaïque. La configuration comprend 8 panneaux Trina Solar TSM organisés en une connexion série-parallèle (4 chaînes parallèles et 2 panneaux en série), avec des caractéristiques électriques spécifiques : $V_{oc} = 37.9$ V, $I_{sc} = 8.67$ A, $V_{mp} = 31.7$ V, $I_{mp} = 8.2$ A. Le système intègre un convertisseur boost DC/DC avec des valeurs d'inductance et de capacité de $L_1 = 0.085e-3$ H, $C_i = 200e-5$ F, $C_{out} = 10e-6$ F. Il fonctionne sous une résistance de charge (R_L) de 150 ohms, avec une fréquence de commutation (FS) de 5 kHz. La Figure 3.11 présente le modèle détaillé du système PV dans MATLAB/Simulink, et la Figure 3.12 montre le schéma Simulink des blocs du contrôleur logique flou (FLC) proposé.

L'évaluation de la performance de l'algorithme MP&O adaptatif et sa comparaison avec l'algorithme P&O modifié sous des conditions d'irradiance variables entre 250 et 1000 W/m² sont illustrées dans la figure 3.13. Les niveaux d'irradiance changent toutes les 0,1 secondes sur une période de 1,5 seconde. Pour l'algorithme P&O modifié, nous utilisons deux tailles de pas,

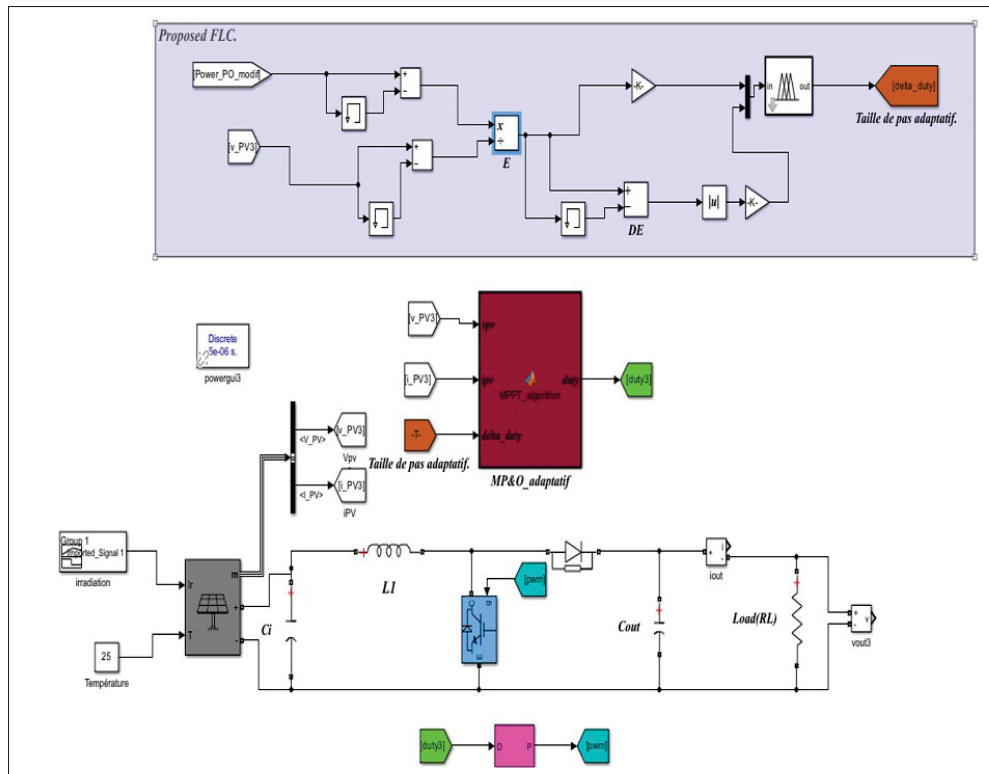


Figure 3.11 Modèle Simulink de l'algorithme MP&O adaptatif

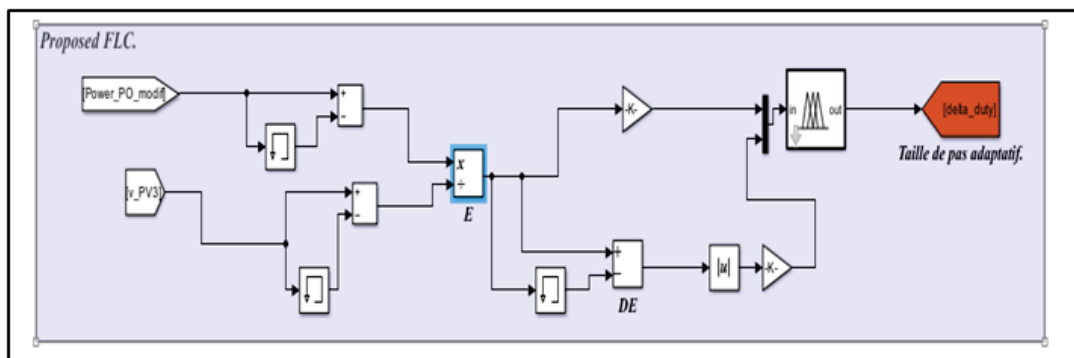


Figure 3.12 Modèle SIMULINK du contrôleur logique flou (FLC) proposé

$C=0.0001$ et $C=0.00015$. L'étude examine l'impact d'une taille de pas fixe sur l'efficacité et la performance du système.

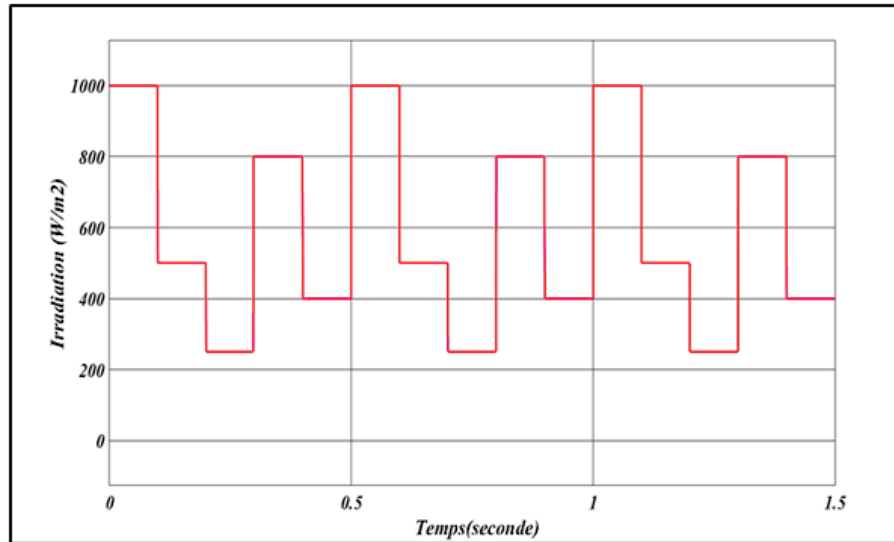


Figure 3.13 Courbe de l'irradiance

L'équation 3.3 (Gaied Chortane, 2022) est utilisée pour calculer l'efficacité de l'algorithme proposé sur une période (T). Elle intègre l'erreur relative au fil du temps entre la puissance réelle produite par le système photovoltaïque ($P_{PV}(t)$) et le point de puissance maximale ($P_{MPP}(t)$). La proportion de puissance réelle est divisée par la puissance optimale qui pourrait être obtenue si le système fonctionnait toujours à son efficacité maximale.

$$Efficiency = \frac{1}{T} \int_0^T \left(1 - \left| \frac{P_{MPP}(t) - P_{PV}(t)}{P_{MPP}(t)} \right| \right) dt \quad (3.3)$$

3.6 Résultats

La performance de différents algorithmes MPPT sous des conditions d'irradiance variables est illustrée aux figures 3.14 et 3.15. La figure 3.14 montre comment chaque algorithme suit la puissance idéale ($P_{idéal}$), en comparant le MP&O adaptatif avec le P&O modifié utilisant deux tailles de pas fixes. La figure 3.15 présente une vue agrandie de la réponse des algorithmes à un

changement rapide d'irradiance autour de la marque de 0,5 seconde. Le graphique illustre la rapidité et l'efficacité avec lesquelles chaque algorithme s'adapte au changement, s'efforçant de maintenir la puissance proche de l'idéal. Il montre les dépassements et les temps de stabilisation pour chaque approche, qui sont cruciaux pour évaluer l'efficacité et la réactivité des algorithmes MPPT. Avec moins d'oscillation et un temps de stabilisation plus rapide, le MP&O adaptatif semble suivre de plus près la puissance idéale, suggérant une meilleure performance par rapport au P&O modifié avec deux versions de tailles de pas fixes.

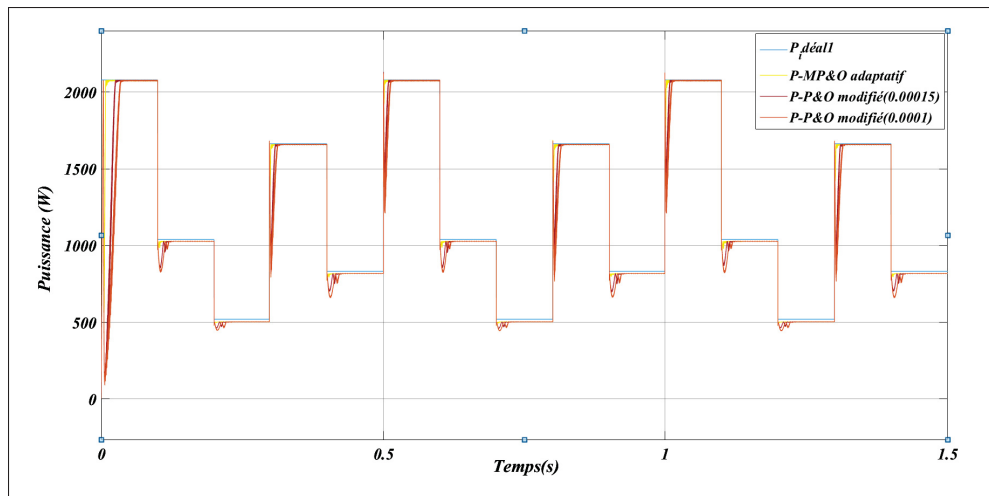


Figure 3.14 Suivi de la puissance avec l'algorithme MP&O adaptatif proposé et P&O modifié

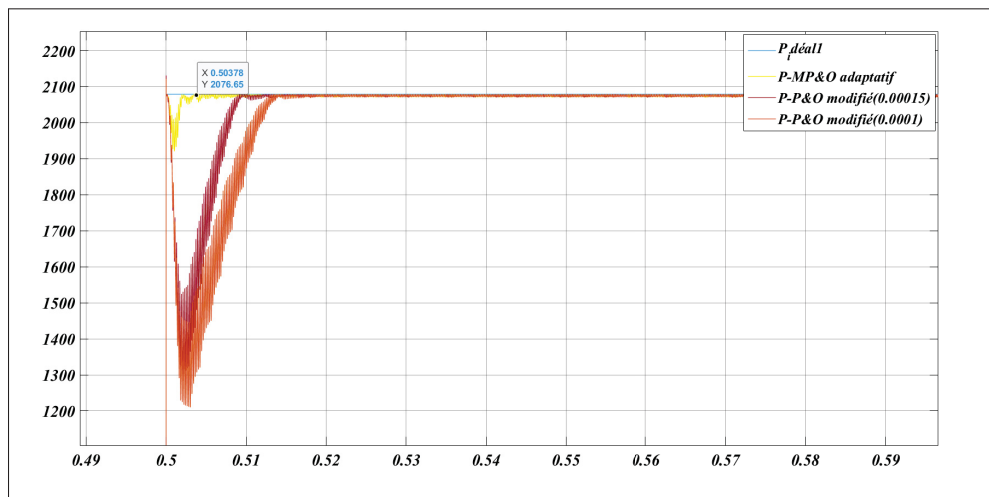


Figure 3.15 Vue agrandie à 0,5 seconde

Dans le cadre de l'évaluation de l'algorithme MP&O adaptatif proposé, nous réalisons une nouvelle simulation. Cette simulation vise à étudier et analyser la fiabilité des algorithmes MP&O adaptatif et P&O modifié en fonction des changements des configurations des panneaux solaires. Pour ce faire, nous remplaçons un module de panneau solaire (ET Solar New Energy ET-M672330WB) par une connexion série-parallèle(22 chaînes parallèles et 7 panneaux en série) tout en conservant les mêmes paramètres de simulation précédents. Les résultats de cette simulation sont présentés en figures 3.17,3.18.

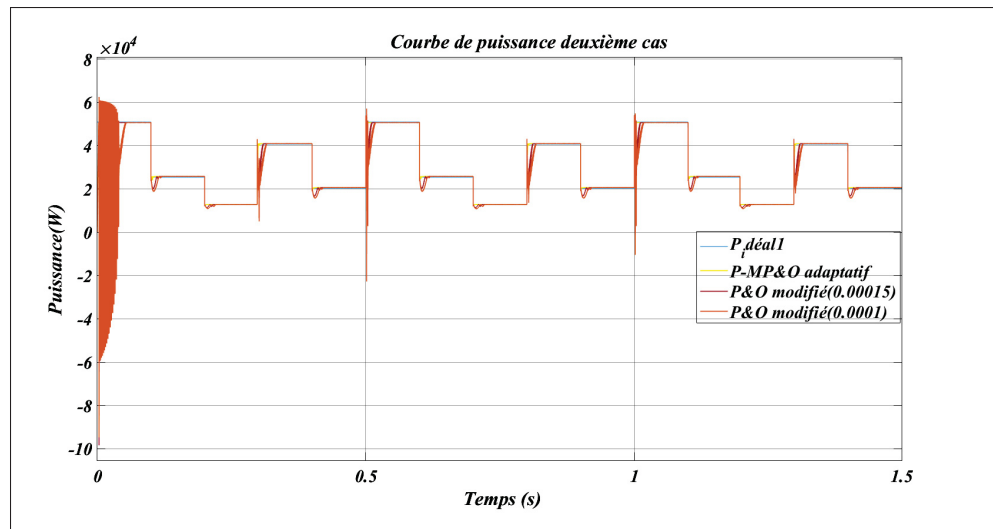


Figure 3.16 Suivi de la puissance avec l'algorithme MP&O adaptatif proposé et P&O modifié

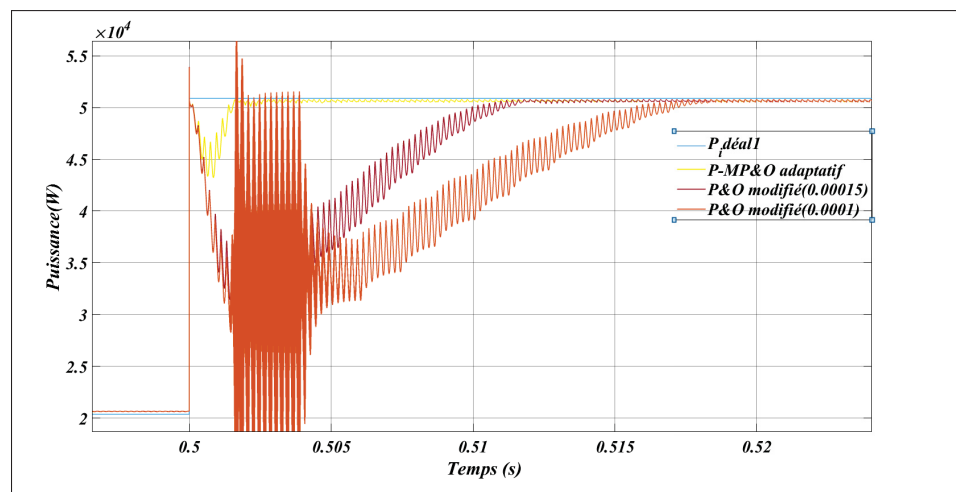


Figure 3.17 Vue agrandie à 0,5 seconde

L'algorithme MP&O adaptatif est très stable, avec peu d'oscillations même après avoir changé un module de panneau solaire. Il réagit rapidement et atteint efficacement le point de puissance maximale (MPP). En revanche, l'algorithme P&O modifié est plus sensible aux perturbations, montre des oscillations importantes et met plus de temps à se stabiliser, ce qui réduit son efficacité globale.

À partir des résultats détaillés et du tableau 3.2, nous pouvons analyser plusieurs aspects de performance :

Algorithme P&O modifié (Contrôleur à taille de pas fixe) :

- Il prend 0,012 secondes pour atteindre le MPP avec une taille de pas fixe $C = 0,0001$.
- Le temps nécessaire pour atteindre le MPP diminue à 0,01 secondes lorsque la taille de pas fixe est augmentée $C = 0,00015$.
- Pour $C = 0,0001$ et $C = 0,00015$, le contrôleur à taille de pas fixe présente une efficacité de 94,64% et 95,67% respectivement.

Algorithme MP&O adaptatif (algorithme proposé) :

- Avec le contrôleur adaptatif, le temps de suivi maximal est considérablement réduit à 0,002 secondes, ce qui indique un suivi plus rapide et plus efficace du MPP.
- Le contrôleur adaptatif atteint une efficacité de 97,21 %, bien plus élevée que celle du contrôleur à taille de pas fixe. Cela montre que le contrôleur adaptatif est plus efficace pour extraire la puissance et réduire les oscillations.

Tableau 3.2 Comparaison des résultats entre l'algorithme MP&O proposé et l'algorithme P&O modifié

	<i>P&O modifié (C=0.0001)</i>	<i>P&O modifié (C=0.00015)</i>	<i>MP&O adaptatif proposé</i>
<i>Efficacité (%)</i>	94.64	95.67	97.21
<i>Temps de réponse(s)</i>	0.012	0.01	0.002
<i>Oscillation</i>	Moyenne	Moyenne	Faible
<i>Convergence de vitesse</i>	Moyenne	Moyenne	Rapide

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un nouvel algorithme nommé MP&O adaptatif basé sur la logique floue. L'objectif de l'étude est de surmonter les limitations de la méthode P&O modifiée, qui repose sur une taille de pas fixe. La logique floue aide à prendre des décisions en temps réel basées sur les variables d'entrée, tandis que la taille de pas adaptative ajuste dynamiquement la stratégie de contrôle. L'algorithme proposé démontre des réponses plus rapides aux changements de irradiance et moins d'oscillations en régime permanent. Son efficacité a été confirmée par des simulations utilisant MATLAB Simulink.

CHAPITRE 4

VALIDATION DE L'ALGORITHME MP&O ADAPTATIF PROPOSÉ EN TEMPS RÉEL DANS LE LABORATOIRE

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux de la validation en temps réel de l'algorithme MP&O adaptatif proposé, basé sur la logique floue, dans notre laboratoire GREPCI, ÉTS. L'objectif est de prouver l'efficacité de l'algorithme dans des conditions réelles et de comparer ses performances avec l'algorithme P&O modifié.

4.2 Schéma de la configuration expérimentale du système PV et spécifications techniques

Dans cette section, nous présentons la configuration expérimentale du système photovoltaïque (PV) ainsi que les spécifications techniques des différents composants utilisés. Nous réalisons également des simulations dans différentes conditions pour vérifier les performances du système.

La figure 4.1 présente la configuration expérimentale de notre système photovoltaïque. Les principaux éléments sont :

- Panneau photovoltaïque (PV).
- Convertisseur élévateur (boost converter).
- Commande MPPT avec l'algorithme MP&O adaptatif.
- Charge.

Le tableau 4.1 présente les spécifications techniques des principaux composants de notre système PV.

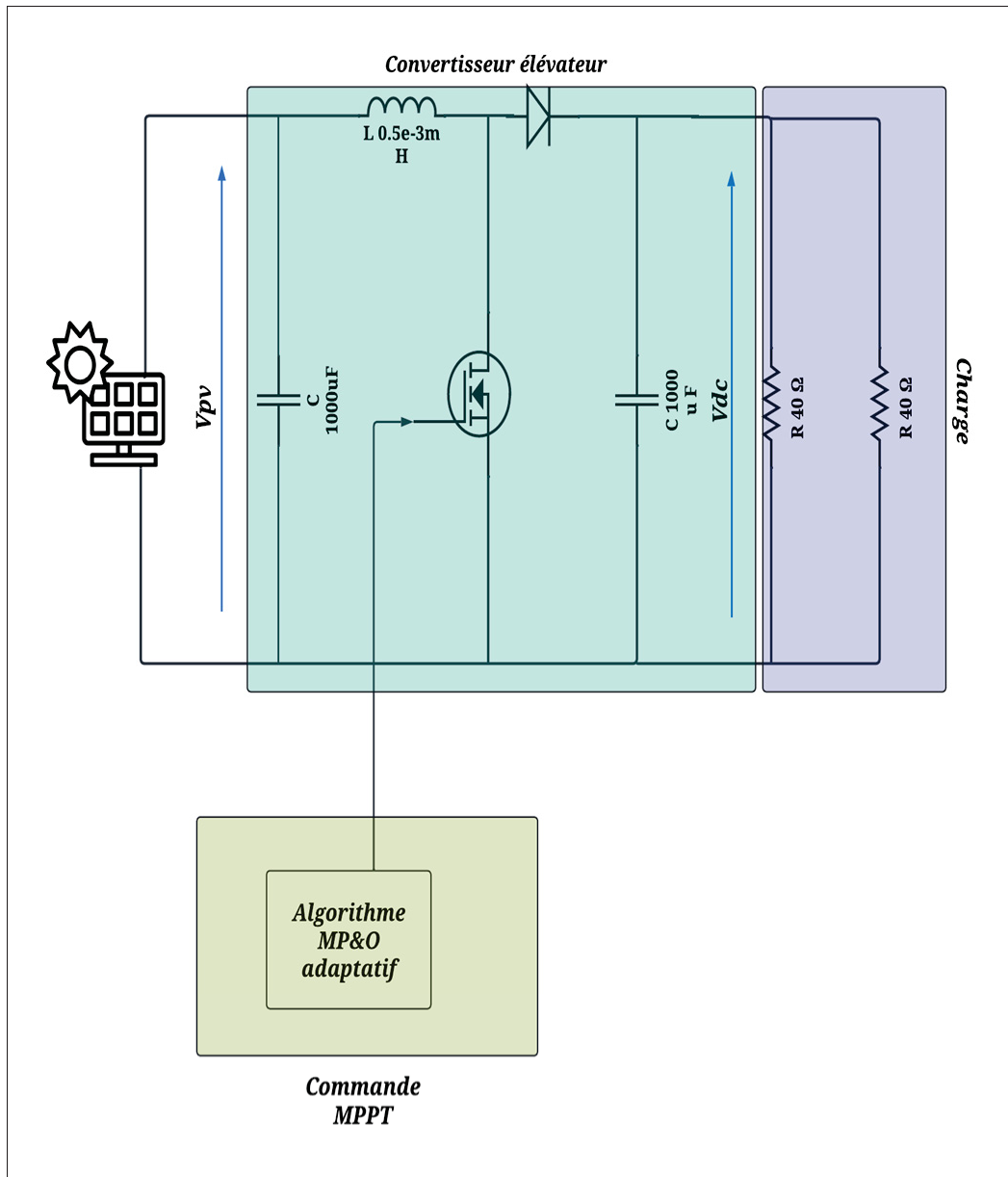


Figure 4.1 Schéma de l'architecture électrique expérimentale d'un système photovoltaïque

Tableau 4.1 Spécifications techniques des composants principaux du système PV

<i>Panneaux solaires</i>	
Puissance maximale (W)	162.05
Courant maximal à la MPP(A)	4.63
Courant de court-circuit(A)	5.1
Tension maximale à la MPP(V)	35
Tension du circuit ouvert(V)	43.5
<i>Convertisseur CC-CC élévateur (Boost)</i>	
Inductance(mH)	0.5e-3
Capacité(uF)	1000
Fréquenc de commutation(kHz)	20
Tension Vdc(V)	35
<i>Charge</i>	
Charge(Ohms)	R1=R2=40

4.3 Description du Prototype et Validation expérimentale

Un prototype est utilisé pour les tests et la validation expérimentale de notre système photovoltaïque (PV) avec l'algorithme MP&O adaptatif. La figure 4.2 montre l'installation expérimentale en laboratoire, qui comprend plusieurs composants clés :

- Oscilloscope(1).
- Les capteurs de tension et de courant(2).
- Convertisseur élévateur (boost converter)(3).
- dSPACE CP1104(4).
- Émulateur photovoltaïque TerraSAS(5).

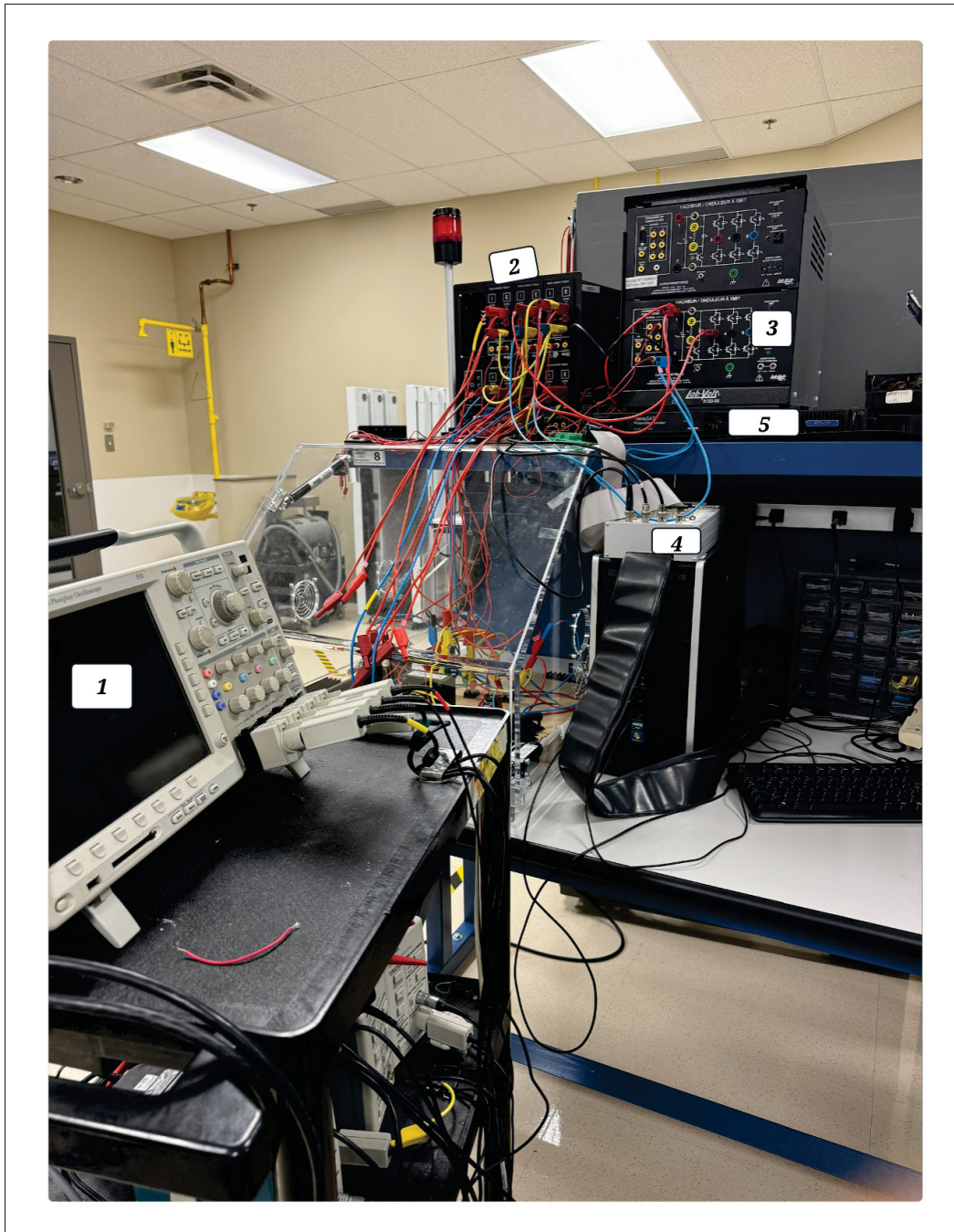


Figure 4.2 Installation Expérimentale en Laboratoire pour Tester le Système PV avec Algorithme MP&O Adaptatif

Les figures 4.3 et 4.4 montrent deux composants clés de notre prototype pour tester l'algorithme MP&O adaptatif. L'émulateur de panneau solaire TerraSAS simule un panneau solaire réel

avec une sortie de 150 V et 5.6 A, permettant des tests sous différentes conditions, comme les variations d'irradiance et de température. Le module DSPACE CP1104 contrôle le système PV en temps réel et assure une communication rapide et fiable. Nous collectons les données des panneaux solaires et des capteurs via le CP1104. Ces données sont ensuite transmises à la carte DS1104 pour un traitement en temps réel.



Figure 4.3 Simulateur Photovoltaïque TerraSAS



Figure 4.4 Module dSPACE CP1104

4.4 Résultats Expérimentaux

Afin de comparer les performances des algorithmes MP&O adaptatif et P&O modifié, nous avons réalisé plusieurs tests expérimentaux sous des conditions d'irradiance variables. Une

augmentation en marche de 400 W/m^2 à 1000 W/m^2 à $t = 0,5\text{s}$, suivie d'une diminution en marche à 600 W/m^2 à $t = 1,5\text{s}$. Les figures 4.4, 4.5 et 4.6 montrent les courbes de puissance, de courant et de tension obtenues lors de ces tests. Ces courbes nous aident à analyser la réponse et la stabilité des deux algorithmes dans différentes conditions de fonctionnement.

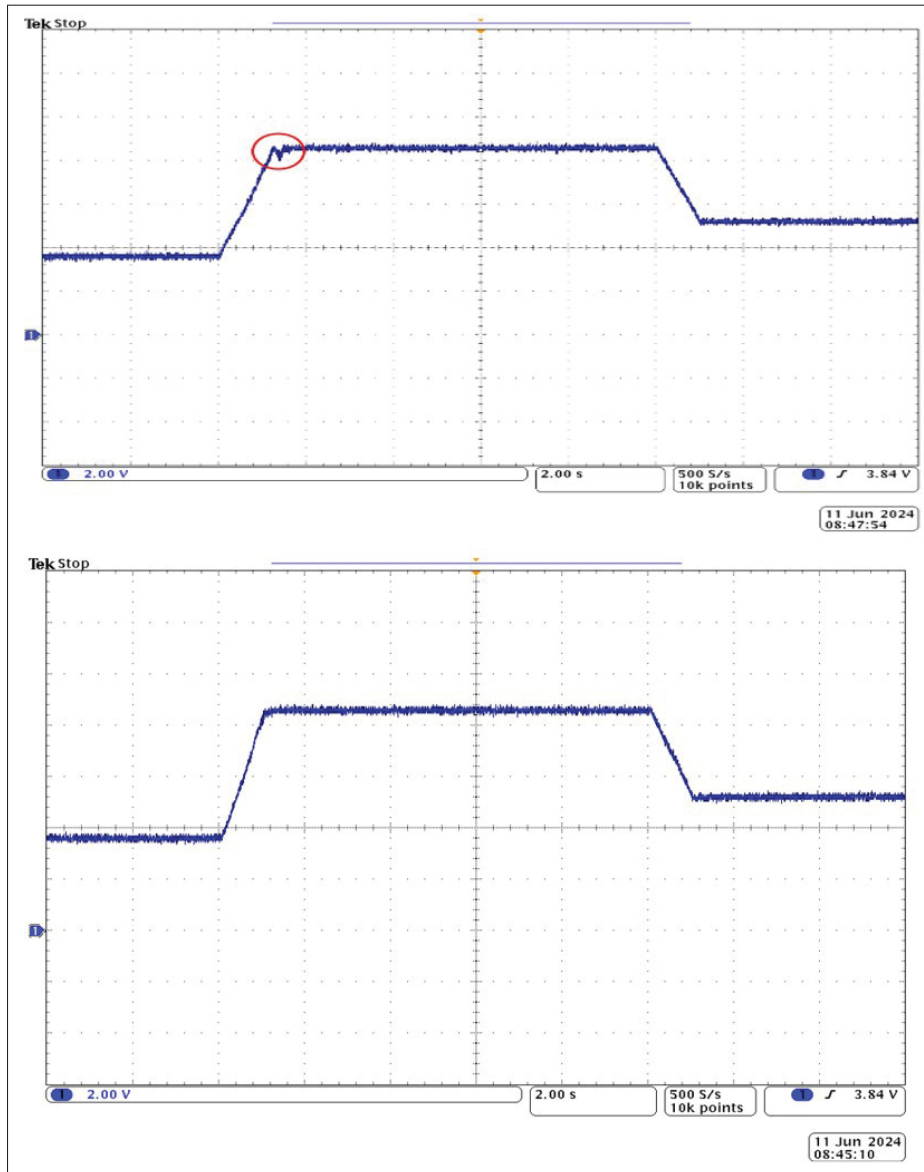


Figure 4.5 Courbes de Puissance pour MP&O Adaptatif (en bas) et P&O modifié (en haut)

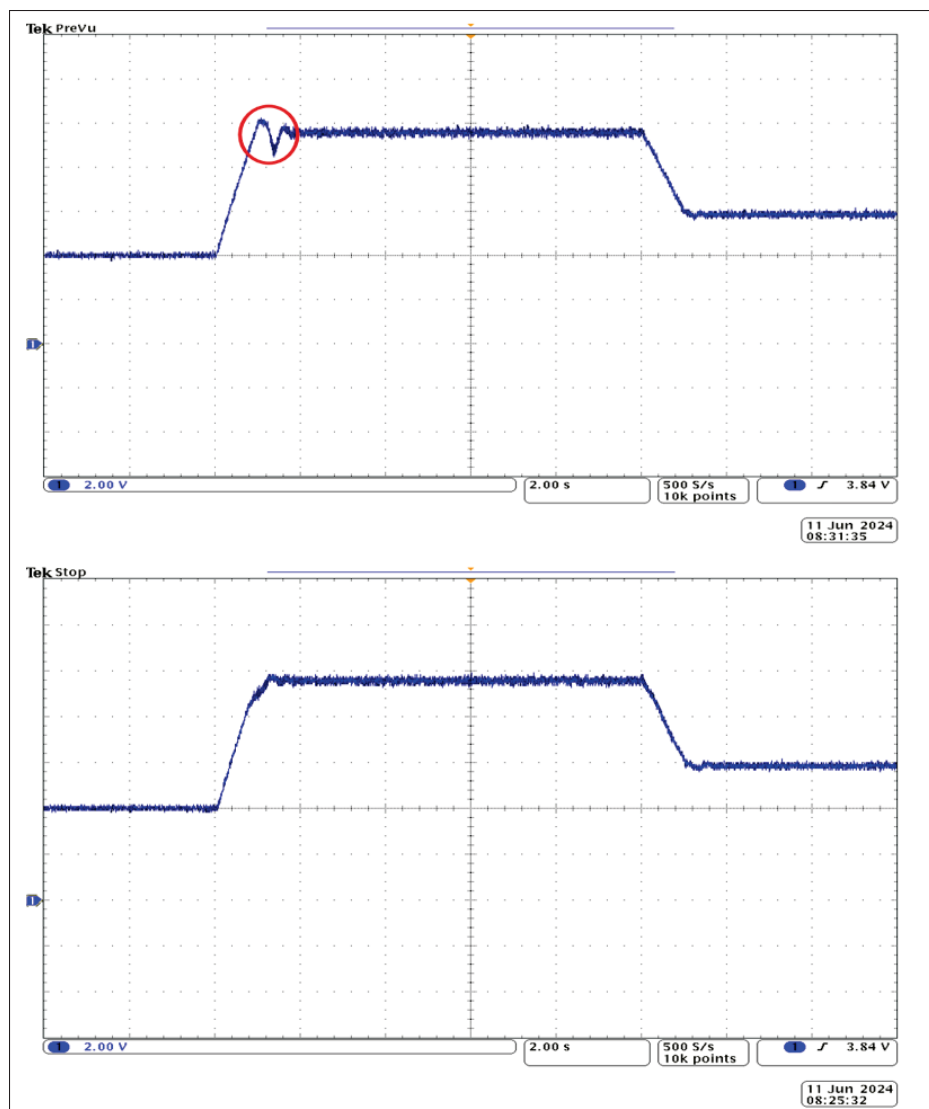


Figure 4.6 Courbes de Courant pour MP&O Adaptatif (en bas) et P&O modifié (en haut)

Les résultats expérimentaux des courbes de puissance, de courant et de tension montrent des différences significatives entre les deux algorithmes.

- Courbes de Puissance : L'algorithme MP&O adaptatif atteint rapidement le point de puissance maximale sans oscillations initiales, contrairement à l'algorithme P&O modifié qui montre des fluctuations au début.

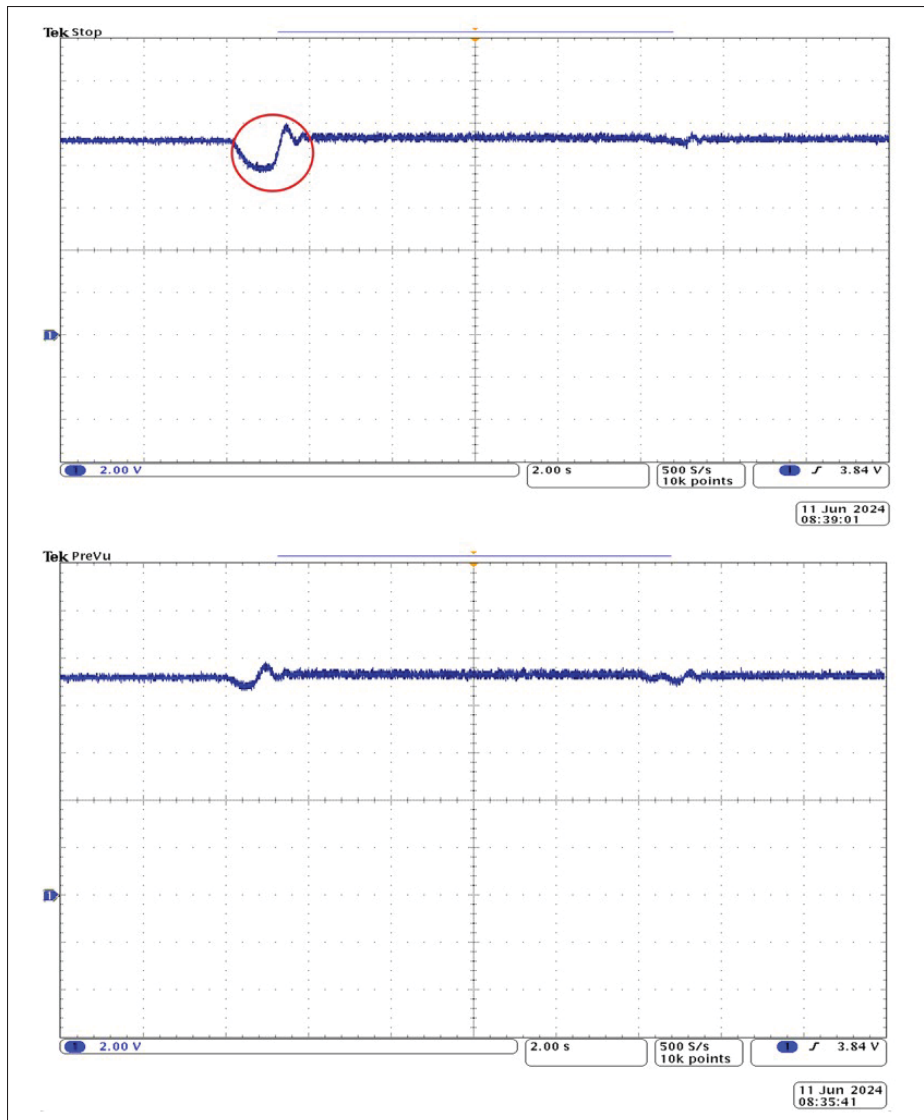


Figure 4.7 Courbes de Tension pour MP&O Adaptatif (en bas) et P&O modifié (en haut)

- Courbes de Courant : Le courant sous l'algorithme MP&O adaptatif est stable et atteint rapidement sa valeur maximale, tandis que le courant avec le P&O modifié présente des oscillations initiales.
- Courbes de Tension : La tension avec l'algorithme MP&O adaptatif se stabilise rapidement sans oscillations, contrairement à la tension avec le P&O modifié qui montre des oscillations au début.

Ces résultats montrent que l'algorithme MP&O adaptatif est plus efficace et stable que l'algorithme P&O modifié. Grâce à la logique floue, Nous avons pu ajuster la taille des pas de manière dynamique selon les conditions de fonctionnement du système. Cela signifie que l'algorithme peut augmenter ou diminuer la taille des pas de manière intelligente, atteignant rapidement et de manière stable le point de puissance maximale tout en minimisant les oscillations et les erreurs.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une série de tests au laboratoire GRÉPCI pour comparer les performances des algorithmes MP&O adaptatif et P&O modifié dans un système photovoltaïque (PV). Nous avons également validé en temps réel que l'algorithme MP&O adaptatif est plus efficace et stable. Cette validation souligne l'importance de l'adaptation dynamique et de la régulation précise pour améliorer les performances des systèmes photovoltaïques.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le suivi du point de puissance maximale (MPP) est essentiel dans les systèmes photovoltaïques (PV) pour optimiser l'extraction de puissance électrique. Il permet de s'adapter aux différentes conditions environnementales afin de maintenir une efficacité optimale. Cette recherche vise à rendre l'énergie solaire plus viable en améliorant le rendement et la fiabilité des systèmes PV grâce à des techniques avancées de suivi du MPP. L'algorithme P&O, bien que populaire pour sa simplicité, présente certains inconvénients. Cette étude cherche à corriger ces limitations pour améliorer la précision et la rapidité de l'algorithme dans des conditions fluctuantes, ce qui pourrait conduire à une utilisation de l'énergie solaire plus durable et efficace.

Premièrement, Nous avons commencé notre recherche par une revue de la littérature détaillée des algorithmes MPPT, des avancées en énergie solaire dans le monde et particulièrement au Canada au cours de la dernière décennie, et des systèmes photovoltaïques (PV). Nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques, Les configurations variées des systèmes solaires, les différents types de convertisseurs et la réaction des panneaux PV aux changements de l'irradiance solaire et de la température. Nous avons également examiné les algorithmes MPPT courants (P&O, INC, VOC, CC), leurs catégories et le principe de fonctionnement de chaque algorithme.

Deuxièmement, en abordant les limitations de l'algorithme P&O conventionnel, en particulier le problème de « dérive ». Ce problème survient dans des conditions environnementales qui changent rapidement, où l'algorithme a du mal à suivre précisément le point de puissance maximale (MPP). Aborder ce problème est vital pour l'efficacité des systèmes d'énergie solaire. Notre étude introduit une version modifiée de l'algorithme P&O. Cette version modifiée offre des solutions pour éviter le problème de dérive. Nous avons simulé l'algorithme P&O modifié avec MATLAB Simulink et l'avons comparé à l'algorithme P&O conventionnel. Les résultats montrent que l'algorithme modifié est plus efficace pour éviter le problème de dérive.

Troisièmement, l'algorithme MP&O adaptatif proposé, amélioré avec la logique floue, corrige les limites des méthodes P&O conventionnelles et modifiées qui utilisent une taille de pas fixe. Ce nouvel algorithme équilibre la vitesse de réponse et les oscillations de puissance autour du MPP. Les tailles de pas fixes plus grandes, bien que rapides, entraînent des fluctuations de puissance réduisant l'efficacité autour du MPP, tandis que les pas plus petits sont stables, mais lents. La logique floue dans MP&O adaptatif aide à la prise de décision en temps réel, ajustant dynamiquement la taille du pas. De plus, cet algorithme offre une adaptation plus rapide aux changements d'irradiance, des oscillations en régime permanent réduites, et atteint une efficacité impressionnante de 97,21 %. La performance de cet algorithme est validée par des simulations MATLAB Simulink.

Enfin, nous avons effectué plusieurs tests expérimentaux au laboratoire GRÉPCI pour valider les performances de l'algorithme MP&O adaptatif en conditions réelles. Ces expériences ont confirmé l'efficacité de l'algorithme dans un environnement contrôlé, démontrant sa capacité à s'adapter rapidement aux variations de conditions environnementales. Les tests en laboratoire ont également mis en évidence la robustesse de l'algorithme face aux fluctuations rapides d'irradiance.

Malgré l'efficacité validée de l'algorithme proposé et la réalisation de nos objectifs de recherche, il existe un potentiel important pour faire progresser ce domaine par le biais d'enquêtes futures. Les recommandations décrites ici sont destinées à servir de guide pour les études à venir visant à accroître les performances et la fiabilité des systèmes PV et MPPT.

- Exploration d'autres techniques d'intelligence artificielle .
- Intégration avec des Systèmes de Stockage :Intégration avec des systèmes de stockage d'énergie, comme des batteries, pour optimiser la gestion de l'énergie dans des systèmes PV autonomes.

- Évaluation des performances à long terme : évaluation de la performance et de la fiabilité sur le long terme de l'algorithme proposé à travers des périodes d'exploitation prolongées.
- Différents changements environnementaux : l'efficacité de l'algorithme proposé peut être vérifiée en le testant dans divers changements d'environnement, y compris les ombres des nuages et les conditions d'ombrage partiel, qui sont des défis courants dans les systèmes photovoltaïques.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdelwahab, S. A. M., Hamada, A. M., Abdellatif, W. S. et al. (2020). Comparative analysis of the modified perturb & observe with different MPPT techniques for PV grid connected systems. *International journal of renewable energy Research*, 10(1), 55–164.
- Adly, M., El-Sherif, H. & Ibrahim, M. (2011). Maximum power point tracker for a PV cell using a fuzzy agent adapted by the fractional open circuit voltage technique. *2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2011)*, pp. 1918-1922. doi : 10.1109/FUZZY.2011.6007697.
- Ahmad, R., Murtaza, A. F. & Sher, H. A. (2019). Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 82-102. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.015>.
- Ahmed, J. & Salam, Z. (2016). A Modified P&O Maximum Power Point Tracking Method With Reduced Steady-State Oscillation and Improved Tracking Efficiency. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7, 1506-1515. Repéré à <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:11281737>.
- Al-Ezzi, A. S. & Ansari, M. N. M. (2022). Photovoltaic solar cells : a review. *Applied System Innovation*, 5(4), 67.
- Anduła, A. & Heim, D. (2020). Photovoltaic systems–types of installations, materials, monitoring and modeling-review. *Acta Innovations*, 34, 40–49.
- Ansari, A. Q. (1998). The Basics of Fuzzy Logic : A Tutorial Review. *Computer Education -Stafford- Computer Education Group*, 88, 5-9.
- Bollipo, R. B., Mikkili, S. & Bonthagorla, P. K. (2020). Critical Review on PV MPPT Techniques : Classical, Intelligent and Optimisation. *IET Renewable Power Generation*, 14(9), 1433-1452. doi : <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1163>.
- Chellakhi, A., El Beid, S. & Abouelmahjoub, Y. (2022). An improved adaptable step-size PO MPPT approach for standalone photovoltaic systems with battery station. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 121, 102655. doi : <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102655>.
- Chevrie, F. & Guély, F. (1998). La logique floue. *Cahier technique*, 191, 1–28.
- Chewale, M. A., A.Wanjari, R., B.Savakhande, V. & R.Sonawane, P. (2018). A Review on Isolated and Non-isolated DC-DC Converter for PV Application. *2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT)*, pp. 399-404. doi : 10.1109/ICCPCT.2018.8574312.

- Coelho, R. F., Concer, F. M. & Martins, D. C. (2009). A study of the basic DC-DC converters applied in maximum power point tracking. *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, 673-678. Repéré à <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:45460994>.
- Elbaset, A. A., Ali, H., Abd-El Sattar, M. & Khaled, M. Implementation of a modified perturb and observe maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system using an embedded microcontroller. *IET Renewable Power Generation*, 10(4), 551-560. doi : <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0309>.
- Elgendy, M. A., Zahawi, B. & Atkinson, D. J. (2012). Evaluation of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques. *6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012)*, pp. 1-6. doi : [10.1049/cp.2012.0156](https://doi.org/10.1049/cp.2012.0156).
- Escobar, G., Pettersson, S., Ho, C. N. M. & Rico-Camacho, R. (2017). Multisampling Maximum Power Point Tracker (MS-MPPT) to Compensate Irradiance and Temperature Changes. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(3), 1096-1105. doi : [10.1109/TSTE.2017.2654965](https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2654965).
- Gaied Chortane, B. (2022). *Amélioration de l'algorithme MPPT pour un système PV par l'intégration des nouvelles techniques basées sur l'intelligence artificielle*. (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure). Repéré à <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/3049/>.
- Ghislain, D. & Li, X. (2021). Combination Result of Two MPPT Techniques (Fuzzy Logic and Perturb and Observe Method) : Comparison with The Conventional Perturb and Observe Method. *2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, pp. 4323-4327. doi : [10.1109/EI252483.2021.9712951](https://doi.org/10.1109/EI252483.2021.9712951).
- Gil-Antonio, L., Belem Saldivar-Marquez, M. & Portillo-Rodriguez, O. (2016). Maximum power point tracking techniques in photovoltaic systems : A brief review. *2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, pp. 317-322. doi : [10.1109/CIEP.2016.7530777](https://doi.org/10.1109/CIEP.2016.7530777).
- Gopahanal Manjunath, M., Vyjayanthi, C. & Modi, C. N. (2021). Adaptive step size based drift-free P&O algorithm with power optimiser and load protection for maximum power extraction from PV panels in stand-alone applications. *IET Renewable Power Generation*, 15(6), 1270–1285.
- Gotekar, P. S., Muley, S. P. & Kothari, D. P. (2019). Comparison of Maximum Power Point Tracking—Perturb and Observe and Fuzzy Logic Controllers for Single Phase Photovoltaic Systems. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Repéré à <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:149801743>.

- GOUABI, H. *Contribution à la commande non linéaire d'un générateur éolien*. (Thèse de doctorat, Université de Béchar-Mohamed Tahri).
- Gouabi, H., Hazzab, A., Habbab, M., Rezkallah, M. & Chandra, A. (2021). Experimental implementation of a novel scheduling algorithm for adaptive and modified P&O MPPT controller using fuzzy logic for WECS. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 35(9), 1732–1753.
- Gouabi, H., Hazzab, A., Habbab, M., Rezkallah, M., Chandra, A. & Ibrahim, H. (2023). Fuzzy adaptive dP-perturb and observe maximum power point tracking controller for wind energy conversion systems : Design and real-time implementation. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 36, 101230.
- Guenounou, O., Dahhou, B. & Chabour, F. (2014). Adaptive fuzzy controller based MPPT for photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*, 78, 843-850. doi : <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.093>.
- Guiza, D., Ounnas, D., Soufi, Y., Bouden, A. & Maamri, M. (2019). Implementation of Modified Perturb and Observe Based MPPT Algorithm for Photovoltaic System. *2019 1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications (ICSRESA)*, pp. 1-6. doi : 10.1109/ICSRESA49121.2019.9182483.
- Hamza, A., Chanaba, H., Merah, S., Krim, F. & Harrag, A. (2021, 05). Comparison Study between conventional and Artificial Neural Networks MPPT techniques for standalone PV system.
- Hazzab, A., Gouabi, H., Habbab, M., Rezkallah, M., Chandra, A. & Ibrahim, H. (2023). Fuzzy logic scheduling of the duty cycle perturbation of an optimized MPPT for WECS's energy quality improvement. *2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT)*, pp. 1–9.
- Isknan, I., Asbayou, A., Aamoume, A., Ihlal, A. & Bouhouch, L. (2022). A comparison of various PO algorithm in order to track the MPPT of solar panel. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 13, 2450. doi : 10.11591/ijped.v13.i4.pp2450-2459.
- Kamala Devi, V., Premkumar, K., Bisharathu Beevi, A. & Ramaiyer, S. (2017). A modified Perturb Observe MPPT technique to tackle steady state and rapidly varying atmospheric conditions. *Solar Energy*, 157, 419-426. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.059>.

- Karthikeyan, V., Rajasekar, S., Das, V., Karuppanan, P. & Singh, A. K. (2017). Grid-connected and off-grid solar photovoltaic system. *Smart Energy Grid Design for Island Countries : Challenges and Opportunities*, 125–157.
- Katche, M. L., Makokha, A. B., Zachary, S. O. & Adaramola, M. S. (2023). A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems. *Energies*, 16(5). doi : 10.3390/en16052206.
- Khabou, H., Souissi, M. & Aitouche, A. (2020). MPPT implementation on boost converter by using T–S fuzzy method. *Mathematics and Computers in Simulation*, 167, 119-134. doi : <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.05.010>. INTERNATIONAL CONFERENCE on Emerging and Renewable Energy : Generation and Automation, held in Belfort, France on 4-6 July, 2017.
- Killi, M. & Samanta, S. (2015). Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9), 5549-5559. doi : 10.1109/TIE.2015.2407854.
- Kollimalla, S. K. & Mishra, M. K. (2014). Variable Perturbation Size Adaptive PO MPPT Algorithm for Sudden Changes in Irradiance. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(3), 718-728. doi : 10.1109/TSTE.2014.2300162.
- Kumar, M., Panda, K. P., Rosas-Caro, J. C., Valderrabano-Gonzalez, A. & Panda, G. (2023). Comprehensive Review of Conventional and Emerging Maximum Power Point Tracking Algorithms for Uniformly and Partially Shaded Solar Photovoltaic Systems. *IEEE Access*, 11, 31778-31812. doi : 10.1109/ACCESS.2023.3262502.
- Liu, H., Khan, M. Y. A. & Yuan, X. (2023). Hybrid Maximum Power Extraction Methods for Photovoltaic Systems : A Comprehensive Review. *Energies*, 16(15). doi : 10.3390/en16155665.
- Lyden, S. & Haque, M. (2015). Maximum Power Point Tracking techniques for photovoltaic systems : A comprehensive review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1504-1518. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.172>.
- Macaulay, J. & Zhou, Z. (2018). A Fuzzy Logical-Based Variable Step Size Pamp;O MPPT Algorithm for Photovoltaic System. *Energies*, 11(6). doi : 10.3390/en11061340.
- Mohammed, A. Y., Mohammed, F. I. & Ibrahim, M. Y. (2017). Grid connected Photovoltaic system. *2017 international conference on communication, control, computing and electronics engineering (ICCCCEE)*, pp. 1–5.

- Motahhir, S., El Hammoumi, A. & El Ghzizal, A. (2020). The most used MPPT algorithms : Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118983. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118983>.
- Podder, A. K., Roy, N. K. & Pota, H. R. MPPT methods for solar PV systems : a critical review based on tracking nature. *IET Renewable Power Generation*, 13(10), 1615-1632. doi : <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5946>.
- Putri, S. N. & Saputro, D. (2021). Construction fuzzy logic with curve shoulder in inference system mamdani. *Journal of Physics : Conference Series*, 1776(1), 012060.
- Pvps, I., Masson, G., Kaizuka, I., Bosch, E., Detollenaere, A., Neubourg, G. & Van Wetter, J. (2019, 01). Trends in photovoltaic applications.
- Rajesh, R. & Mabel, M. C. (2015). A comprehensive review of photovoltaic systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 51, 231–248.
- Reza Reisi, A., Hassan Moradi, M. & Jamasb, S. (2013). Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 433-443. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.052>.
- Saharia, B. J. & Sarmah, N. (2022). A comparison of DC-DC converters for power point tracking in Photovoltaic Applications. *2022 IEEE 2nd International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (iSSSC)*, pp. 1-6. doi : [10.1109/iSSSC56467.2022.10051489](https://doi.org/10.1109/iSSSC56467.2022.10051489).
- Sakti, I. (2014). Methodology of fuzzy logic with mamdani fuzzy models applied to the microcontroller. *2014 The 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering*, pp. 93–98.
- Salas, V., Olias, E., Barrado, A. & Lazaro, A. (2006). Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar energy materials and solar cells*, 90(11), 1555–1578.
- Saravanan, S. & Babu, N. R. (2016). Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 192–204.
- Selvan, S., Nair, P. et al. (2016). A Review on Photo Voltaic MPPT Algorithms. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 6(2).

- Sera, D., Kerekes, T., Teodorescu, R. & Blaabjerg, F. (2006). Improved MPPT method for rapidly changing environmental conditions. *2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2, 1420-1425. doi : 10.1109/ISIE.2006.295680.
- Sera, D., Teodorescu, R., Hantschel, J. & Knoll, M. (2008). Optimized Maximum Power Point Tracker for fast changing environmental conditions. *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 2401-2407. doi : 10.1109/ISIE.2008.4677275.
- Subudhi, B. & Pradhan, R. (2012). A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems. *IEEE transactions on Sustainable Energy*, 4(1), 89–98.
- Sun, L., Zhengdandan & Han, F. (2013). Study on MPPT approach in photovoltaic system based on fuzzy control. *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 1259-1263. doi : 10.1109/ICIEA.2013.6566560.
- Talbi, B., Krim, F., Rekioua, T., Laib, A. & Feroura, H. (2017). Design and hardware validation of modified P and O algorithm by fuzzy logic approach based on model predictive control for MPPT of PV systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(4), 043503. doi : 10.1063/1.4999961.
- Tawiah-Mensah, P. N., Addison, J., Oppong, S. D. & Effah, F. B. (2022). An improved Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Algorithm with the capability of drift avoidance in PV systems. *2022 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, pp. 1-5. doi : 10.1109/PowerAfrica53997.2022.9905377.
- Yadav, J., Yadav, S. & Shah, M. T. (2021). Variable Step Perturb and Observe Algorithm for Standalone Solar Photovoltaic (PV) System. *2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, pp. 1-6. doi : 10.1109/GUCON50781.2021.9573936.
- Yadav, V. K., Jha, S. K. & Kumar, B. (2020). Comparative Study of Different Variable Step Size Perturb and Observe based MPPT. *2020 International Conference on Advances in Computing, Communication Materials (ICACCM)*, pp. 272-277. doi : 10.1109/ICACCM50413.2020.9212944.
- Yildirim, M. A. (2020). *MAXIMUM POWER POINT TRACKING TECHNIQUES FOR SOLAR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS*. (Thèse de doctorat).
- Zainuri, M. A. A. M., Radzi, M. A. M., Che Soh, A. & Rahim, N. A. Development of adaptive perturb and observe-fuzzy control maximum power point tracking for photovoltaic boost dc-dc converter. *IET Renewable Power Generation*, 8(2), 183-194.

Zhang, X., Song, J. & Chen, Z. (2022). Self-Optimized Drift-Avoidance MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems. *2022 IEEE 4th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)*, pp. 739-743. doi : 10.1109/ICCASIT55263.2022.9986947.