

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

TALBI ELHADJ SALAH

BENMOUMENE LOUAI

Thème :

Etude, développement et contrôle des installations
photovoltaïques optimisées par les techniques MPPT
basées sur l'intelligence artificielle

Soumis au jury composé de :

Belkebir Amel

Président

UKM Ouargla

Bouhafs Ali

Examineur

UKM Ouargla

Danoune Med Bilal

Encadreur

UKM Ouargla

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Je remercie tout particulièrement Dr DANOUNE, pour son encadrement, ses conseils avisés et son soutien tout au long de ce projet.

Enfin, je remercie ma famille et mes proches pour leur soutien moral constant.

Dédicace

Je dédie ce travail à ma famille, pour son amour, son soutien et sa patience tout au long de mon parcours.

À mes parents, pour les sacrifices consentis, leur confiance et leurs encouragements constants.

À mes frères et sœurs, pour leur présence et leur motivation. Leurs mots d'encouragement et leur bienveillance, même dans les moments les plus difficiles.

Cette dédicace est aussi un hommage à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi.

À mes ami(e)s les plus proches, pour leur compréhension, leur écoute et leurs encouragements sincères.

Merci à chacun et à chacune de faire partie de mon histoire.

Résumé

Cette étude propose un modèle photovoltaïque (PV) pour la conception de systèmes PV avec des contrôleurs MPPT simples et efficaces, afin d'obtenir un rendement élevé, une réponse plus rapide et un faible coût. Un modèle de panneau PV est d'abord développé à l'aide du logiciel MATLAB. La vérification et la validation sont effectuées sur un banc d'essai expérimental. Un algorithme basé sur la logique floue est ensuite introduit. Une comparaison est effectuée avec les méthodes conventionnelles de conductance incrémentale INC et de perturbation et observation PO. L'algorithme proposé évite le nombre élevé de divisions mathématiques utilisées dans les méthodes conventionnelles INC et PO. Les résultats montrent que la méthode floue présente de bonnes performances en termes de temps de réponse (0,1 s), d'oscillation en régime permanent et de rendement (98,5 %).

الملخص

لتصميم أنظمة الطاقة الكهروضوئية باستخدام وحدات (PV) تقترح هذه الدراسة نموذجًا للطاقة الكهروضوئية أولاً، تم تطوير نموذج بسيط وفعال لتحقيق كفاءة عالية واستجابة أسرع وتكلفة منخفضة MPPT تحكم تم إجراء التحقق والتحقق من خلال منصة اختبار MATLAB لوحة للطاقة الكهروضوئية باستخدام برنامج تم إجراء مقارنة مع طريقة التوصيل. بعد ذلك، تم تقديم خوارزمية قائمة على المنطق الضبابي. تجريبية تتجنب الخوارزمية المقترحة العدد الكبير من PO وطريقة الاضطراب ومراقبة INC التراكمي التقليدية تُظهر النتائج أن الطريقة القائمة على المنطق التقليديين PO و INC التقسيمات الرياضية المستخدمة في الضبابي تقدم أداءً جيدًا فيما يتعلق بزمان الاستجابة (0.1 ثانية) وتذبذب الحالة المستقرة والكفاءة (98.5%).

Abstract

This study proposes a photovoltaic (PV) model for the design of PV systems with a simple and effective MPPT controllers to achieve high efficiency, faster response and low cost. First, a PV panel model is developed using MATLAB software. The verification and the validation are performed via an experimental test bench. Afterwards, a fuzzy logic based algorithm is introduced. A comparison is made with the conventional incremental conductance INC and perturb and observe PO method. The proposed algorithm avoids the high number of the mathematical divisions used in the conventional INC and PO. The results show that the fuzzy based method presents good performances regarding response time (0.1 s), steady-state oscillation, and efficiency (98.5 %).

Liste des Figures

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques.

Figure 1.1 : Une cellule PV	5
Figure 1.2 : Une cellule monocristalline	6
Figure 1.3 : Une cellule poly cristallin	6
Figure 1.4 : Une cellule Amorphe	7
Figure 1.5 : Un système photovoltaïque autonome	8
Figure 1.6 : Un système PV hybride	9
Figure 1.7 : Un système PV raccorde au réseau	10

Chapitre 2 : Modélisation d'un système PV.

Figure 2.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque, modelé une diode	12
Figure 2.2 : Schéma équivalent d'une cellule idéale	12
Figure 2.3 : Schéma équivalent d'une cellule réel	14
Figure 2.4 : Schéma équivalent d'une cellule modèle deux diodes	14
Figure 2.5 : Etage d'adaptation entre le GV et une charge	16
Figure 2.6 : Hacheur série	16
Figure 2.7 : Hacheur parallèle	17
Figure 2.8 : Hacheur série-parallèle	18
Figure 2.9 : Schéma équivalent d'un hacheur parallèle lorsque l'interrupteur ferme...19	
Figure 2.10 : Schéma équivalent d'un hacheur parallèle lorsque l'interrupteur ouvert.20	

Chapitre 3 : Techniques de Poursuite de puissance maximale MPPT.

Figure 3.1 : Caractéristique V-I P-V d'un panneau photovoltaïque	23
Figure 3.2 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT	23
Figure 3.3 : Recherche de PPM par P&O	24
Figure 3.4 : Organigramme d'Algorithme P&O	26
Figure 3.5 : Recherche de PPM avec INC	27
Figure 3.6 : Organigramme d'Incrémention de la conductance	28
Figure 3.7 : principe de fonctionnement d'un contrôleur flou	29
Figure 3.8 : L'organigramme de P&O amélioré par logique floue avec un pas variable	31
Figure 3.9 : Bloc du calculateur de pas variable FLC	32
Figure 3.10 : Les fonctions d'appartenance des entrées	33
Figure 3.11 : Les fonctions d'appartenance de la sortie	33

Chapitre 4 : Simulation et discussion des résultats.

Figure 4.1 : Système photovoltaïque Commande par L'algorithme P&O	35
Figure 4.2 : Système photovoltaïque Commande par L'algorithme INC	36
Figure 4.3 : Système photovoltaïque Commande par L'algorithme de logique floue	36
Figure 4.4 : Rayonnement et Température pour le cas des conditions standards	37
Figure 4.5 : Tension PV de méthode P&O dans le STC	37

Liste des Figures

Figure 4.6 : Courant PV de méthode P&O dans le STC	37
Figure 4.7 : Puissance PV de méthode P&O dans le STC	37
Figure 4.8 : Tension PV de méthode INC dans le STC	38
Figure 4.9 : Courant PV de méthode INC dans le STC	38
Figure 4.10 : Puissance PV de méthode INC dans le STC	38
Figure 4.11 : Tension PV de méthode FLC dans le STC	38
Figure 4.12 : Courant PV de méthode FLC dans le STC	38
Figure 4.13 : Puissance PV de méthode FLC dans le STC	39
Figure 4.14 : Rayonnement et Température pour T variable et E constante	39
Figure 4.15 : Caractéristique P-V de méthode P&O pour le cas de T variable et E constante	40
Figure 4.16 : Caractéristique P-V de méthode P&O pour le cas de T variable et E constante	40
Figure 4.17 : Tension PV de méthode P&O pour le cas de T variable et E constante	40
Figure 4.18 : Courant PV de méthode P&O pour le cas de T variable et E constante	40
Figure 4.19 : Puissance PV de méthode P&O pour le cas de T variable et E constante ..	40
Figure 4.20 : Caractéristique P-V de méthode INC pour le cas de T variable et E constante	40
Figure 4.21 : Caractéristique I-V de méthode INC pour le cas de T variable et E constante	40
Figure 4.22 : Tension PV de méthode INC pour le cas de T variable et E constante	41
Figure 4.23 : Courant PV de méthode INC pour le cas de T variable et E constante	41
Figure 4.24 : Puissance PV de méthode INC pour le cas de T variable et E constante ..	41
Figure 4.25 : Caractéristique P-V de méthode FLC pour le cas de T variable et E constante	41
Figure 4.26 : Caractéristique I-V de méthode FLC pour le cas de T variable et E constante	41
Figure 4.27 : Tension PV de méthode FLC pour le cas de T variable et E constante	41
Figure 4.28 : Courant PV de méthode FLC pour le cas de T variable et E constante ...	41
Figure 4.29: Puissance PV de méthode FLC pour le cas de T variable et E constante ...	42
Figure 4.30: Rayonnement et Température pour T Constante et E variable	43
Figure 4.31 : Caractéristique P-V de méthode P&O pour le cas de E variable	43
Figure 4.32 : Caractéristique I-V de méthode P&O pour le cas de T constante et E variable	43
Figure 4.33 : Tension PV de méthode P&O pour le cas de T constante et E variable	43
Figure 4.34 : Courant PV de méthode P&O pour le cas de T constante et E variable ...	43
Figure 4.35 : Puissance PV de méthode P&O pour le cas de T constante et E variable ..	44
Figure 4.36 : Caractéristique P-V de méthode INC pour le cas de T constante et E variable	44
Figure 4.37 : Caractéristique I-V de méthode INC pour le cas de T constante et E variable	44
Figure 4.38 : Tension PV de méthode INC pour le cas de T constante et E variable	44
Figure 4.39 : Courant PV de méthode INC pour le cas de T constante et E variable	44

Liste des Figures

Figure 4.40 : Puissance PV de méthode INC pour le cas de T constante et E variable ...	44
Figure 4.41 : Caractéristique P-V de méthode FLC pour le cas de T constante et E variable	45
Figure 4.42 : Caractéristique I-V de méthode FLC pour le cas de T constante et E variable	45
Figure 4.43 : Tension PV de méthode FLC pour le cas de T constante et E variable	45
Figure 4.44 : Courant PV de méthode FLC pour le cas de T constante et E variable	45
Figure 4.45 : Puissance PV de méthode FLC pour le cas de T constante et E variable ...	45
Figure 4.46 : Profil de la charge dans le cas (Rch=38, Rch=28, Rch=23)	46
Figure 4.47 : Caractéristique P-V de méthode P&O pour le cas de STC avec R variable	46
Figure 4.48 : Caractéristique I-V de méthode P&O pour le cas de STC et R variable ...	46
Figure 4.49 : Tension PV de méthode P&O pour le cas de STC avec R variable	47
Figure 4.50 : Courant PV de méthode P&O pour le cas de STC avec R variable	47
Figure 4.51 : Puissance PV de méthode P&O pour le cas de STC avec R variable	47
Figure 4.52 : Caractéristique P-V de méthode INC pour le cas de STC avec R variable	47
Figure 4.53 : Caractéristique I-V de méthode INC pour le cas de STC avec R variable	47
Figure 4.54 : Tension PV de méthode INC pour le cas de STC avec R variable	47
Figure 4.55 : Courant PV de méthode INC pour le cas de STC avec R variable	47
Figure 4.56 : Puissance PV de méthode INC pour le cas de STC avec R variable	48
Figure 4.57 : Caractéristique P-V de méthode FLC pour le cas de STC avec R variable	48
Figure 4.58 : Caractéristique I-V de méthode FLC pour le cas de STC avec R variable	48
Figure 4.59 : Tension PV de méthode FLC pour le cas de STC avec R variable	48
Figure 4.60 : Courant PV de méthode FLC pour le cas de STC avec R variable	48
Figure 4.61: Puissance PV de méthode FLC pour le cas de STC avec R variable	48

Liste des Tableaux

Chapitre 1 : Généralités sur les Systèmes Photovoltaïques.

Tableau 1.1 : Les différents types des cellules et leur rendement7

Chapitre 3 : Techniques de Poursuite de puissance maximale MPPT.

Tableau 3.1 : Différences entre les types de MPPT24

Tableau 3.2: Tableau des règles.....33

Chapitre 4 : Simulation et discussion des résultats.

Tableau 4.1 : Caractéristiques de convertisseur DC-DC Boost.....36

Tableau 4.2 : Caractéristiques des panneaux solaires.....36

Tableau 4.3 : Résultats de Méthodes MPPT de cas de STC39

Tableau 4.4 : Résultats de Méthodes MPPT de cas de T variable42

Tableau 4.5 : Résultats de Méthodes MPPT de cas de E variable45

Tableau 4.6 : Résultats de Méthodes MPPT de cas de R variable49

Liste des symboles

MPPT : Le suivi du point de puissance maximale

GPV : Générateur photovoltaïque

P&O : Perturbation et observation

INC : Incrémentation de la conductance

FLC : Logique Flou

PV : Photovoltaïque

AM : La masse d'air

I_{ph} : Le courant de phase

R_s : Résistance série

R_p : Résistance parallèle

I_d : Le courant de diode

PPM : Point de puissance maximale

V_{pv} : La tension de panneau photovoltaïque

I_{pv} : Le courant de panneau photovoltaïque

DC/DC : Continue / Continue

V_{opt} : La tension optimale

I_{opt} : Le courant optimale

P_{opt} : La puissance optimale

R_{opt} : Résistance optimale

E : Eclairement

T : La température

R_{ch} : La résistance de la charge

STC : Les conditions standards

SPV : système photovoltaïque

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des symboles

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur les Systèmes Photovoltaïques	
1.1 Introduction.....	3
1.2 L'énergie renouvelable	3
1.3 L'énergie solaire.....	3
1.4 Energie solaire photovoltaïque	4
1.4.1 Description d'un système photovoltaïque	4
1.4.2 Effet photovoltaïque.....	4
1.5 Types de rayonnement Solaire.....	4
1.5.1 Le rayonnement direct	4
1.5.2 Le rayonnement diffus	4
1.5.3 Le rayonnement solaire	4
1.5.4 Le rayonnement global	5
1.6 Cellules photovoltaïques.....	5
1.6.1 Types des cellules.....	6
1.6.1.1 Cellule monocristallin.....	6
1.6.1.2 Cellule poly cristallin.....	6
1.6.1.3 Cellule amorphe.....	7
1.6.2 Rendement de conversion des cellules photovoltaïques.....	7
1.7 Système photovoltaïque	8
1.7.1 Système photovoltaïque autonome	8
1.7.2 Système photovoltaïque hybride	9
1.7.3 Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	9
1.8 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire	10
1.8.1 Les Avantages	10
1.8.2 Les inconvénients.....	10

Sommaire

1.9 Conclusion .	11
Chapitre 2 : Modélisation d'un système PV.....	
2.1 Introduction.....	12
2.2 Modélisation des cellules photovoltaïques	12
2.2.1 Modèle d'une cellule à une diode	12
2.2.1.1 Cellule photovoltaïque idéale.....	12
2.2.1.2 Cellule photovoltaïque Réel	13
2.2.2 Modèle d'une cellule à deux diodes	14
2.3 Convertisseur DC/DC	15
2.3.1 Principe conversion photovoltaïque	15
2.3.2 Étape d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et une charge.....	15
2.3.3 Types des convertisseurs DC/DC	16
2.3.3.1 Hacheur Série (Buck)	16
2.3.3.2 Hacheur parallèle (Boost)	17
2.3.3.3 Hacheur série-parallèle (Buck-Boost).....	18
2.3.4 Modélisation mathématique de convertisseur DC/DC	19
2.3.4.1 Modélisation d'un hacheur parallèle	19
2.4 Conclusion	21
Chapitre 3 : Techniques de Poursuite de puissance maximale MPPT.....	
3.1 Introduction	22
3.2 Point de puissance maximale	22
3.3 Les Technique de MPPT (Maximum Power Point Tracking)	23
3.3.1 La méthode perturbation et observation (P&O)	24
3.3.2 La méthode incrémentation de la conductance	26
3.3.3 Méthode de Logique flou	29
3.3.3.1 Bloc de Fuzzification	30
3.3.3.2 Base de connaissances	30
3.3.3.3 Moteur d'interférence	30
3.3.3.4 Bloc de defuzzification.....	30
3.3.4 Controlleur flou (FLC) avec un pas variable	31
3.4 Conclusion	34
Chapitre 4 : Simulation et discussion des résultats.....	
4.1 Introduction.....	35

Sommaire

4.2 Simulation de système photovoltaïque par MATLAB/Simulink.....	35
4.2.1 Caractéristiques électriques d'un système PV	36
4.3 Résultats de la simulation.....	37
4.3.1 Test de conditions standards ($E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)	37
4.3.2 Variation de Température.....	39
4.3.3 Variation d'Eclairage	43
4.3.4 Variation de profile de charge :	46
4.4 Conclusion	49
Conclusion générale	50

Introduction générale

La demande énergétique mondiale est essentiellement couverte par les ressources fossiles (tels que le pétrole, gaz, et charbon) qui ont un impact négatif sur l'environnement [1]. Le réchauffement climatique, qui fait partie des gros problèmes actuelles, est dû aux émissions de gaz à effet de serre. Ces problèmes ont permis un développement remarquable des énergies renouvelables, telles que les énergies photovoltaïque (PV). Le photovoltaïque est une énergie propre, inépuisable, et a un cout raisonnable. Cependant, le PV est très susceptible aux variations climatiques qui dégradent le rendement de la source. Afin de résoudre les problèmes de faible rendement, les chercheurs ont fait un fort effort pour but de développer plusieurs techniques d'amélioration tel que la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking). La commande MPPT fonctionne à base les convertisseurs d'électronique de puissance qui servent d'adapter le point de fonctionnement de système lors un changement apparaitre à cause de conditions climatique.

Dans ces dernières années, un nombre important des méthodes MPPT ont été successivement implémenté par les chercheurs. Chomsuwan et. al [2] ont utilisée une commande basé sur la perturbation et observation. Cette technique, qui crée une perturbation dans la tension de l'installation pour définir la puissance maximale disponible, est largement adoptée dans la pratique à cause de sa simplicité et robustesse. Similairement, Wasynezuk et. al [3] ont introduit une commande appelé incrustation de la conductance qu'a pratiquement même principe de la méthode précédente.

Hart [4] a introduit une commande basée sur la mesure du courant de court-circuit (en Alglaï Fractional Short Circuit Current). Dans même contexte

Enslin [5] a utilisé une commande appelé Fractional Open Circuit Voltage, et plusieurs autres méthodes tels que la méthode de balayage de courant [6], DC-link capacitor drop control [7], PSO [8]...etc.

Dans cette étude, une enquête est menée pour maximiser la production d'énergie d'une charge résidentielle à Ouargla en utilisant certaines méthodes MPPT efficaces.

L'objectif de ce travail est de mettre en œuvre différentes techniques MPPT simples et complexes, et d'adapter ces techniques aux cas atmosphériques et aux charges, puis de présenter les résultats obtenus.

Introduction générale

Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur les énergies renouvelables avec une attention particulière sur l'énergie solaire, les systèmes PV et ses différents types.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation d'un système PV y compris de cellule PV, convertisseur DC-DC avec ces différents types.

Le troisième chapitre est consacré à la technique MPPT, à différents algorithmes P&O INC, notamment la logique floue, ainsi qu'à la construction de base pour la commande MPPT.

Le dernier chapitre présente la simulation du système PV commandé par les trois algorithmes de MPPT, ainsi que son adaptation en cas de changement atmosphérique ou de changement de charge, avec une évaluation de la meilleure technique d'extraction de puissance.

Chapitre 1 : Généralités sur les Systèmes Photovoltaïques

1.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Dans ce chapitre, une idée générale sur l'énergie solaire et des systèmes photovoltaïques a été donnée. Certains concepts et généralités ont été expliqués pour mieux comprendre le thème.

1.2 L'énergie renouvelable

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux ont autant de ressources naturelles capables de produire de l'énergie grâce aux technologies développées par l'homme, leur faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Il existe divers types d'énergies renouvelables qui sont des sources d'énergie inépuisables comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Leurs caractéristiques communes sont de ne pas produire d'émissions polluantes, et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre [9].

1.3 L'énergie solaire

Le soleil est la source d'énergie la plus répandue et la plus abondante sur Terre. Il a été établi que la quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la Terre pendant une heure pourrait être suffisante pour couvrir les besoins énergétiques mondiaux sur une période d'un an. Il est important de noter que l'astre du jour émet de manière continue une quantité considérable d'énergie radiante dans le système solaire. La Terre, elle, ne reçoit qu'une infime partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. La constante solaire, notée est une constante physique qui représente la quantité de lumière solaire reçue par unité de surface à une distance moyenne Terre-Soleil de 150 millions de kilomètres. Autrement dit, la constante solaire est égale à la moyenne de la puissance lumineuse émise par le Soleil et reçue à la surface de la Terre, exprimée en watts par mètre carré. Cette valeur de 1367 watts par mètre carré correspond à la puissance moyenne reçue à une distance de 150 millions de kilomètres du centre de l'étoile. La quantité d'énergie reçue par la surface terrestre est fonction de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Cette notion est caractérisée par le nombre de masses d'air (AM) [10].

1.4 Energie solaire photovoltaïque

1.4.1 Description d'un système photovoltaïque

Dès l'année 1839, le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre que certains matériaux produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Il faut attendre 1905 pour qu'Albert Einstein explique concrètement ce phénomène, Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [11].

1.4.2 Effet photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » vient des mots grecs « phos » (lumière) et « voltaïque » (du physicien italien Alessandro Volta, expert en électricité). Ce terme est lié à la production de tension à partir de la lumière. On le désigne souvent par l'abréviation « PV ». Les cellules photovoltaïques sont aussi appelées « piles solaires » Ces cellules fonctionnent avec n'importe quelle source de lumière, pas seulement le soleil. Elles créent de l'électricité quand on les expose à la lumière. La tension peut varier entre 0,3 V et 0,7 V selon le matériau, sa position, la température et le vieillissement de la cellule [12].

1.5 Types de rayonnement Solaire

Il y'a Quatre types de rayonnement :

1.5.1 Le rayonnement direct : Il est reçu directement du soleil, sans passer par l'air. Ces rayons sont parallèles. Il fait des ombres et peut être concentré par des miroirs. Un pyranomètre peut le mesurer [13].

1.5.2 Le rayonnement diffus : Il est formé par la lumière de l'air, des nuages et des aérosols. La diffusion, c'est quand un faisceau parallèle se divise en beaucoup de faisceaux qui partent dans toutes les directions. Dans le ciel, les rayons du soleil se divisent en raison de la présence de molécules d'air, de gouttelettes d'eau (nuages) et de poussières. Le temps le permet ou pas [13].

1.5.3 Le rayonnement solaire : Même s'il y a une très grande distance entre le Soleil et la Terre (15×10^7 km), la couche terrestre reçoit beaucoup d'énergie (18×10^7 GW) Cette énergie quitte la surface du Soleil sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur est

comprise entre 0,22 et 10 μm . L'énergie de ce rayonnement solaire se décompose environ ainsi [14].

- 9% dans la bande des ultraviolets ($< 0.4\mu\text{m}$).
- 47% dans la bande visible ($0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$)
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$).

1.5.4 Le rayonnement global : C'est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris ceux réfléchis par le sol et les objets dessus. On le mesure avec un appareil pyranomètre sans écran [13]

1.6 Cellules photovoltaïques

Une cellule PV est faite de deux couches de silicium. Ces couches sont dopées pour être polarisées : une des couches est positive (« couche P ») et l'autre est négative (« couche N »). Une barrière de potentiel est créée. Quand un photon a assez d'énergie, il absorbe le semi-conducteur. Cela rompt une liaison de valence et libère un électron. L'effet photovoltaïque est la cause de la création d'un « trou » positif. En effet, il s'agit de la différence de potentiel entre les deux couches. La mise en relation de deux couches permet la création d'un mouvement d'électrons entre ces dernières, induisant par là même la formation d'un courant électrique [15].

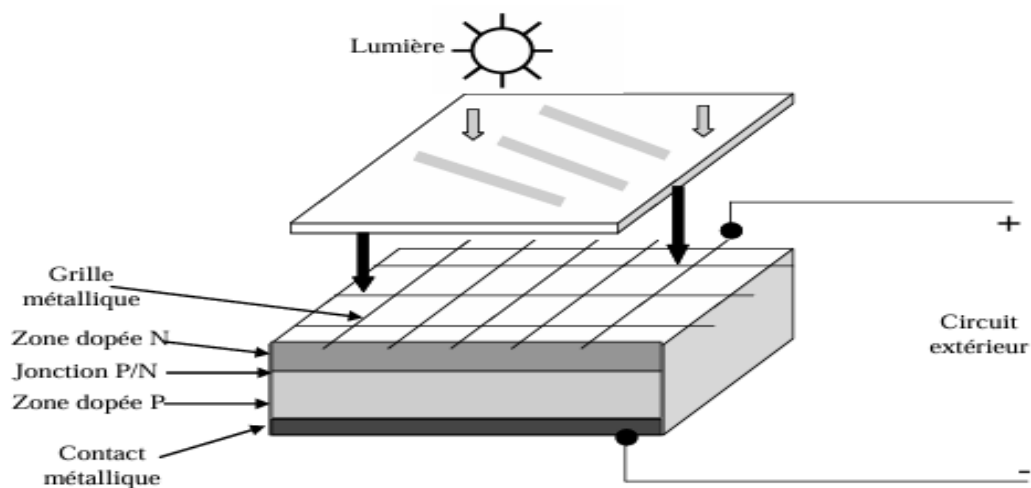


Figure 1.1 : Une cellule PV

1.6.1 Types des cellules

1.6.1.1 Cellule monocristallin

Le silicium cristallin est actuellement le matériau le plus populaire pour les cellules commerciales, bien que de nombreux autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin » indique que tous les atomes du matériau PV actif sont inclus dans une structure cristalline simple, où les arrangements ordonnés des atomes sont préservés [15].



Figure 1.2 : Une cellule monocristalline [15]

1.6.1.2 Cellule poly cristallin

Il est composé des petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule[15].

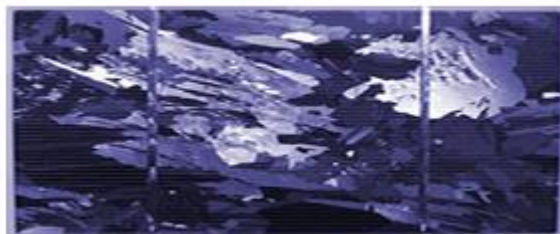


Figure 1.3 : Une cellule poly cristallin [15]

1.6.1.3 Cellule amorphe

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron [15].



Figure 1.4 : une cellule amorphe [15]

1.6.2 Rendement de conversion des cellules photovoltaïques : Le tableau suivant (1-1) présente les différents types des cellules avec leur rendement [15]

Tableau 1.1 : Les différents types des cellules et leur rendement [15]

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Cellule Multi jonction	Environ 40%	Pas d'application commerciale
Cellule en silicium monocristallin	Environ 25%	12 à 20%
Cellule en silicium poly cristallin	Environ 20 %	11 à 15%
Cellule sans silicium en couche mince CIS	Environ 19.3 %	9 à 11%
Cellule silicium amorphe en couche mince	Environ 13.4 %	5 à 11%

1.7 Système photovoltaïque

Dans les années 50, les cellules PV alimentaient seulement les satellites. Les premières applications terrestres sont apparues au début des années 70. Aujourd'hui, le PV est très fiable. Il existe trois types de panneaux solaires en fonction des besoins [16].

1.7.1 Système photovoltaïque autonome

Les panneaux solaires photovoltaïques ont été créés à l'origine dans ce but précis : fournir de l'électricité dans des endroits où aucune autre source d'énergie n'est disponible, pour ça le système photovoltaïque autonome était l'installation la plus populaire durant les deux décennies.

Les systèmes autonomes fonctionnent tous de la même manière. Le panneau solaire produit de l'électricité, l'énergie est stockée dans une batterie et utilisée en cas de besoin. Ce système fonctionne bien pendant l'été mais ne fonctionne bien dans l'hiver et n'est pas d'une grande utilité [17].

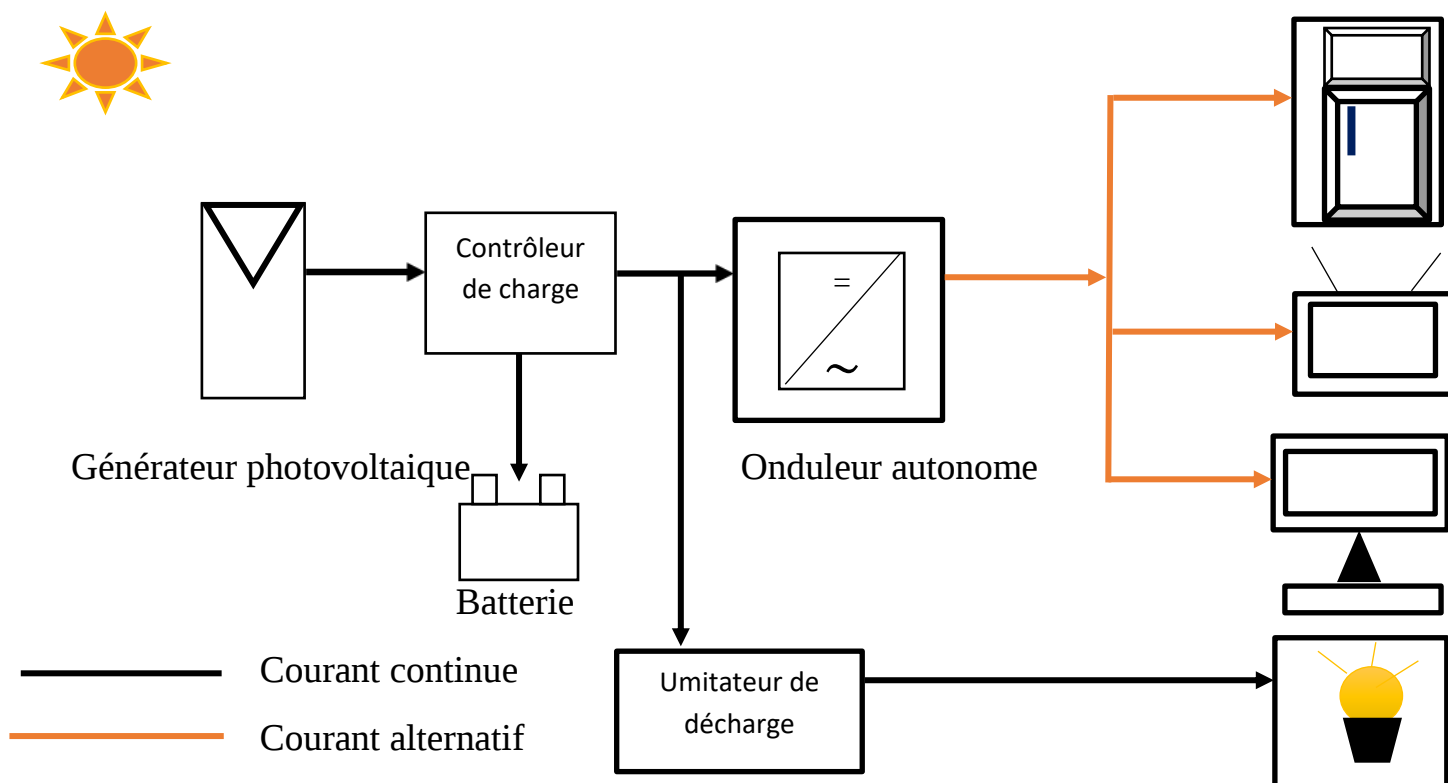


Figure 1.5 : Un système photovoltaïque autonome

1.7.2 Système photovoltaïque hybride

Le système hybride est le type plus installé dans les maisons des pays développée comme CANADA ce system contienne deux sources : les panneaux et le réseau principale. Les panneaux solaires sont connectés à l'onduleur, qui alimente le réseau principal en énergie. L'électricité peut être utilisée par les appareils dans le bâtiment ou renvoyée sur le réseau, en fonction de la demande. L'onduleur surveille l'alimentation du réseau. il coupe également l'alimentation des panneaux solaires pour s'assurer qu'aucune énergie n'est renvoyée sur le réseau, S'il détecte une coupure de courant sur le site [18].

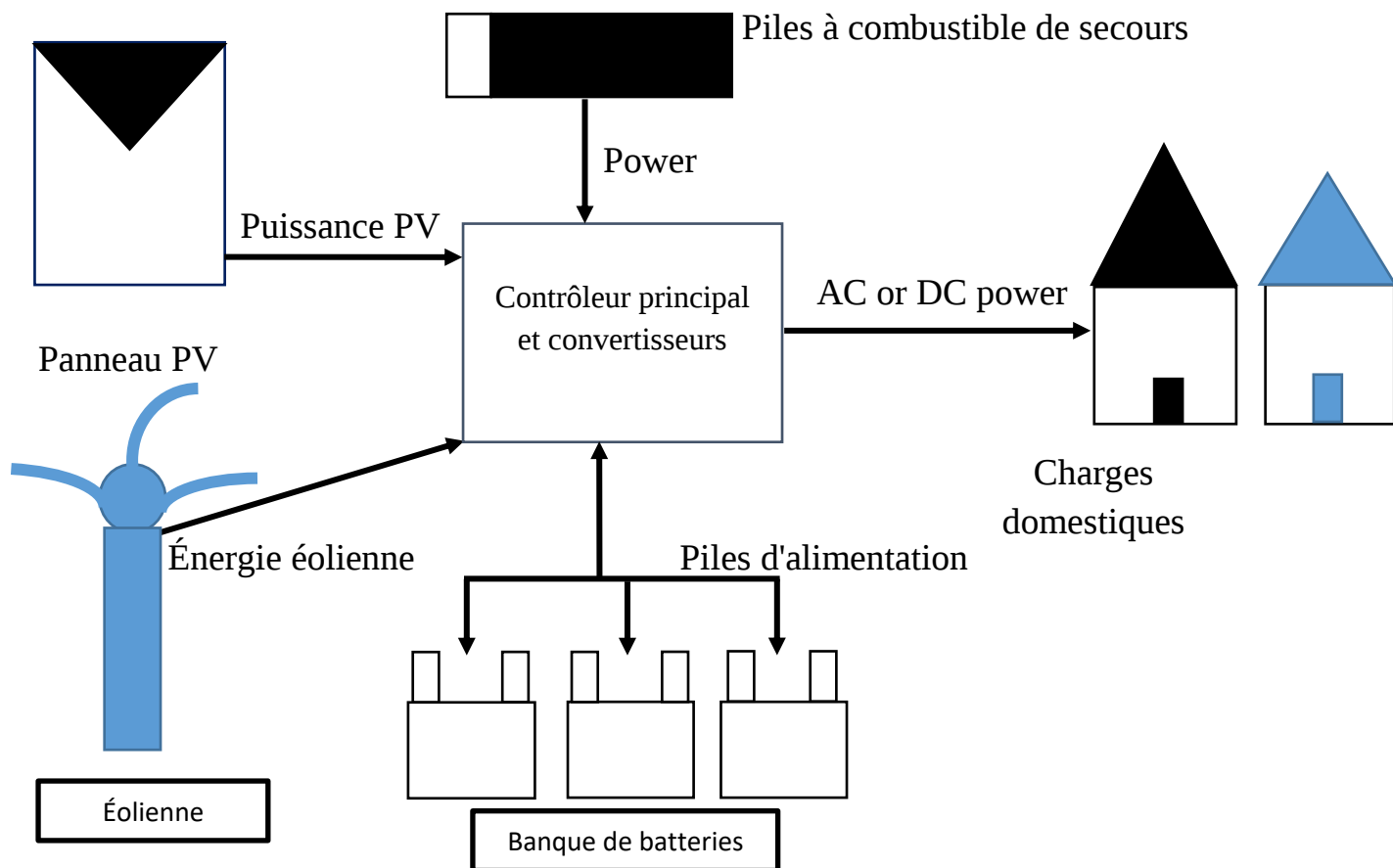


Figure 1.6: Un système PV hybride

1.7.3 Système photovoltaïque raccordé au réseau

Le system raccorde au réseau qui est installer en parallèle avec le réseau général et ne doit pas un système de stockage, ce system réduit les émissions de gaz à effet de serre par lle déplacement d'énergie nécessite a la charge locale et en fournissant de l'électricité supplémentaire au réseau, par conséquent pendant les heures d'ensoleillement maximal

(irradiation solaire maximale), moins de centrales conventionnelles sont nécessaires [19].

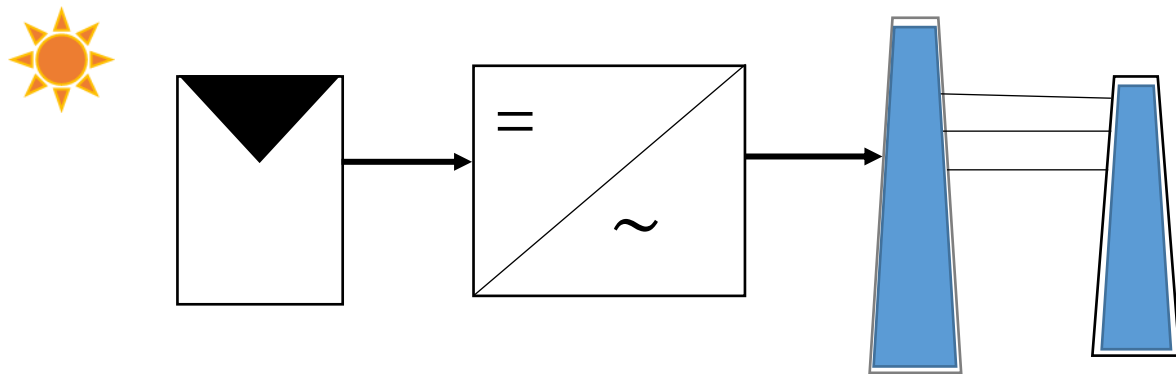


Figure 1.7 : Un système PV raccordé au réseau

1.8 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

1.8.1 Les Avantages

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans [20].

1.8.2 Les inconvénients

- Production d'énergie dépend à l'ensoleillement et toujours variable (n'est pas constant).
- Le coût est élevé.
- Le rendement de conversion est Faible.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries.

-Il y'a une Pollution dans la fabrication [20].

1.9 Conclusion : Dans le présent chapitre, nous avons procédé à la présentation des différentes notions fondamentales qui sont à la base de la constitution d'un système photovoltaïque. Nous avons également abordé l'effet photovoltaïque lui-même, ainsi que la cellule PV et ses paramètres.

Chapitre 2 : Modélisation

D'un système PV

2.1 Introduction : Un système photovoltaïque (PV) est un ensemble conçu pour convertir l'énergie solaire en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Il est constitué de divers composants, tels que des panneaux solaires et des onduleurs, et peut inclure d'autres dispositifs destinés à optimiser ses performances. Dans ce chapitre, nous aborderons une étude relative à la mise en place d'un système photovoltaïque intégrant la gestion MPPT

2.2 Modélisation des cellules photovoltaïques

2.2.1 Modèle d'une cellule à une diode

Dans le modèle à diode unique, la cellule photovoltaïque est une source de courant photoélectrique I_{ph} en parallèle avec une diode à jonction P-N. C'est l'équation de SHOCKLEY qui s'applique à la jonction semi-conductrice P-N. Sous lumière. La cellule PV a des pertes. La cellule PV a deux résistances : la résistance parallèle R_p . C'est la même chose que le courant de fuite dans la jonction P-N et la résistance en série R_s , qui correspond aux pertes dues au courant de fuite dans la jonction P-N [21].

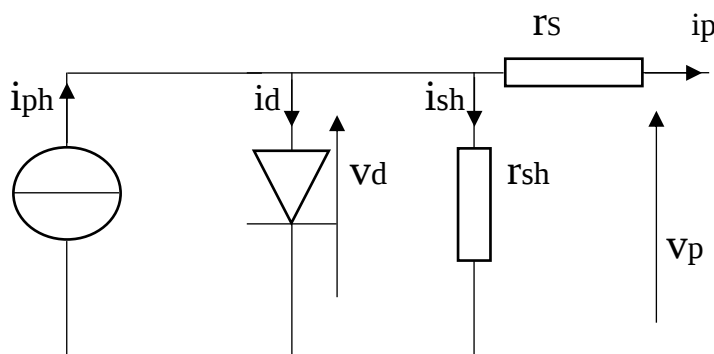


Figure 2.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque, modèle une diode [22]

2.2.1.1 Cellule photovoltaïque idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN sous lumière solaire et reliée à une charge peut être représentée par un générateur de courant photodiode I_{ph} en parallèle avec une diode qui fournit un courant I_d [23].

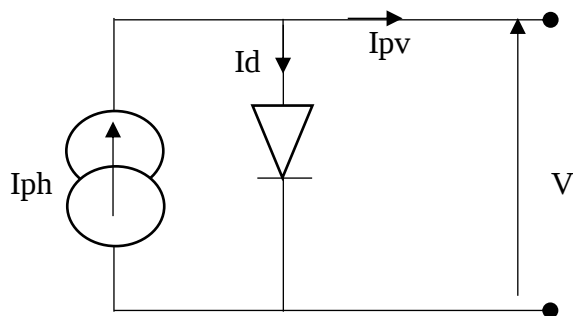


Figure 2.2 : Schéma équivalent d'une cellule idéale [23]

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (2.1)$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant de court-circuit obtenu en court ci cuitant la charge I_{sc} avec $V_{pv} = 0$.

AVEC :

$$I_{ph} = \frac{E}{E_{ref}} \quad (2.2)$$

E : L'éclairement absorbé par la cellule

E_{ref} : L'éclairement de référence

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{vd}{vt}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

I_o : Courant de saturation inverse de la diode [A]

$$V_t = \frac{NKT}{q} \quad (2.4)$$

V_t : Tension thermique [V]

N : Facteur d'idéalité de la photopile

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

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

2.2.1.2 Cellule photovoltaïque Réel

Le modèle photovoltaïque précédent ne montrait pas tous les phénomènes de la conversion d'énergie lumineuse. On voit une baisse de tension et des courants de fuite. Pour modéliser cette perte de tension, on utilise une résistance en série (R_s) et pour les courants de fuite, une résistance en parallèle (R_p) [24].

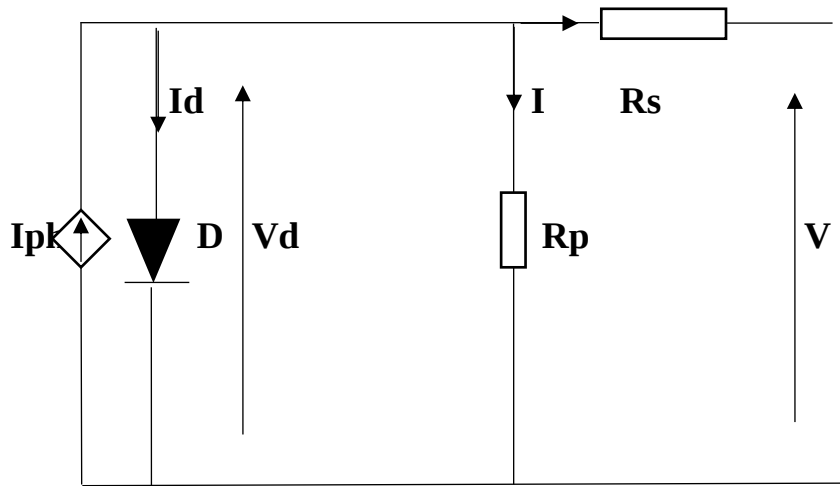


Figure 2.3 : Schéma équivalent d'une cellule Réel [24]

ET :

$$I_p = \left(\frac{V + R_s I}{V_s} \right) \quad (2.5)$$

$$I_d = I_o * \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_s} \right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

Où $I_{ph} = I_{cc} * \left(\frac{G}{G_{ref}} \right)$ Est le photo-courant dépendant de l'éclairement G et G_{ref} est l'éclairement de référence ($1000 \text{ W} / \text{m}^2$).

En remplacer les équations (5) et (6) donc la courant I écrit par la forme suivant :

$$I = I_{ph} - I_o * \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{AKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2.7)$$

2.2.2 Modèle d'une cellule à deux diodes

Nous présenterons un modèle avec deux diodes. Ce modèle montre comment l'ombre partielle peut affecter la production d'énergie des panneaux solaires. Une étude de toutes les options de modules PV est disponible. Le modèle est présenté comme suit [25] :

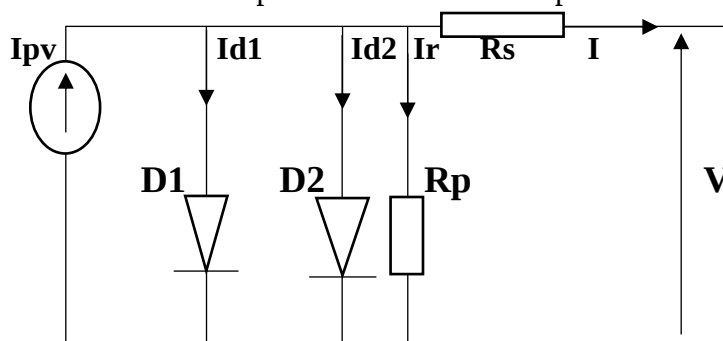


Figure 2.4: Schéma équivalent d'une cellule modèle deux diodes [25]

Voici l'équation du courant de sortie de la cellule photovoltaïque d'un modèle à deux diodes :

$$I = I_{pv} - I_{01} \left[-1 + \exp\left(\frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{A_1 V_{t1}}\right) \right] - I_{02} \left[-1 + \exp\left(\frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{A_1 V_{t2}}\right) \right] - \frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{R_p} \quad (2.8)$$

I_{d1} : Courant de saturation inverse de la diode D1.

I_{d2} : Courant de saturation inverse de la diode D2.

V_{r1} : Potentielle thermodynamique de la diode D1.

V_{r2} : Potentielle thermodynamique de la diode D2. .

A_1 : Le facteur d'idéalité de la jonction de la diode D1.

A_2 : Le facteur d'idéalité de la jonction de la diode D2

2.3 Convertisseur DC/DC

2.3.1 Principe conversion photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque (PV) constitue l'élément central d'un système PV. Cependant, afin d'assurer une mise en œuvre efficace, il est impératif de prendre en compte d'autres éléments essentiels, tels que le stockage de l'énergie, la régulation de la circulation du flux énergétique ou l'alimentation du réseau alternatif. Il convient de noter que ces composants Supplémentaires, bien que nécessaires, représentent une part substantielle du coût total du système, entraînant une diminution du rendement et une altération significative du comportement et des performances du système dans son ensemble [26].

2.3.2 Étage d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et une charge

Un GPV a des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des PPM. Ces caractéristiques dépendent de la lumière et de la température de la cellule. En plus, selon la charge, il y a un gros écart entre la puissance du générateur et la puissance qui est transférée à la charge en mode connexion directe. Pour utiliser au mieux l'électricité disponible sur les bornes du GPV et la transmettre à la charge, on utilise un dispositif qui s'appelle un étage d'adaptation [27].

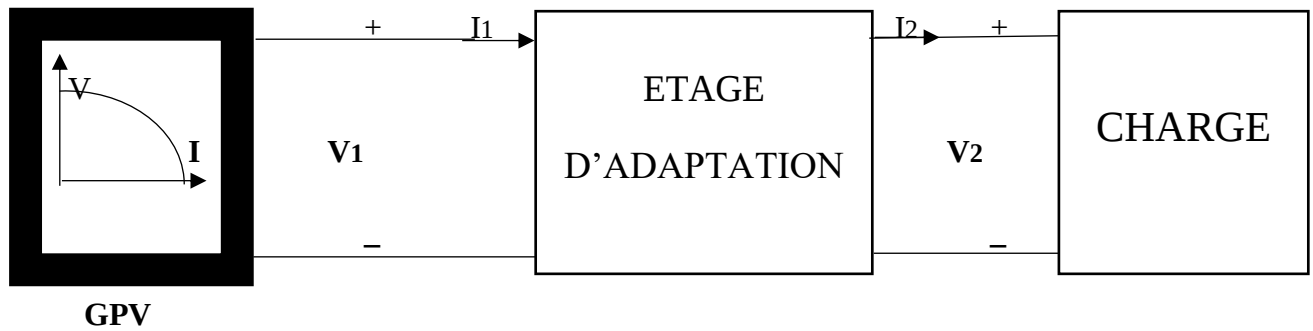


Figure 2.5 : Etage d'adaptation entre le GV et une charge [27]

2.3.3 Types des convertisseurs DC/DC

Les convertisseurs DC/DC servent à générer les tensions et les courants souhaités dans un système photovoltaïque. Ils permettent aussi d'adapter les panneaux PV (source continue) à différentes charges pour transférer la puissance maximale. La source et la charge peut être capacitive (tension) ou inductive (courant) [28].

2.3.3.1 Hacheur Série (Buck)

Ce hacheur fait passer une partie de la tension d'une source à une charge de courant .Il permet de transformer une tension élevée en une tension plus faible. Le fonctionnement dure T périodes. Il y a deux étapes :

Au début, on ferme l'interrupteur et la diode est bloquée. La source V_s fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Cette phase dure de 0 à αT , avec α compris entre 0 et 1 (aussi appelé rapport cyclique). Ensuite, on ouvre l'interrupteur. La diode devient passante, car l'énergie stockée dans l'inductance fait circuler le courant dans la diode de roue libre D . Cette phase dure de αT à T [28].

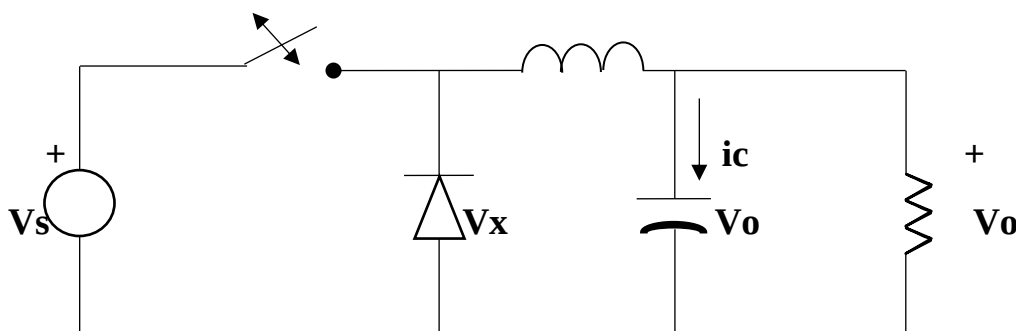


Figure 2.6 : Hacheur série [29]

$$\text{L'expression de l'inductance } L : L \geq \frac{V_s \cdot (1-D)}{f \cdot \Delta i_L} \quad (2.9)$$

V_s : La tension d'entrée

D : Rapport cyclique

f : fréquence de découpage

Δi_L : Ondulation maximale du courant dans l'inductance

$$\text{L'expression de la capacité } C : C \geq \frac{\Delta i_L}{8 \cdot f \cdot \Delta V_o} \quad (2.10)$$

i_L : Le courant qui traverse l'inductance

D : Rapport cyclique

f : fréquence de découpage

ΔV_o : Ondulation maximale de la tension de sortie

2.3.3.2 Hacheur parallèle (Boost)

Le hacheur parallèle, dispositif électronique assure la modulation du débit d'une source de courant dans une charge de tension. Il en résulte une tension moyenne de sortie supérieure à la tension d'entrée initiale. Dans la phase dure de 0 à αT , l'interrupteur est fermé et il n'y a pas de tension. La source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée et le courant dans l'inductance augmente linéairement. Dans la deuxième phase, de αT à T , on ouvre l'interrupteur et l'énergie stockée dans l'inductance fait circuler le courant dans la diode [28].

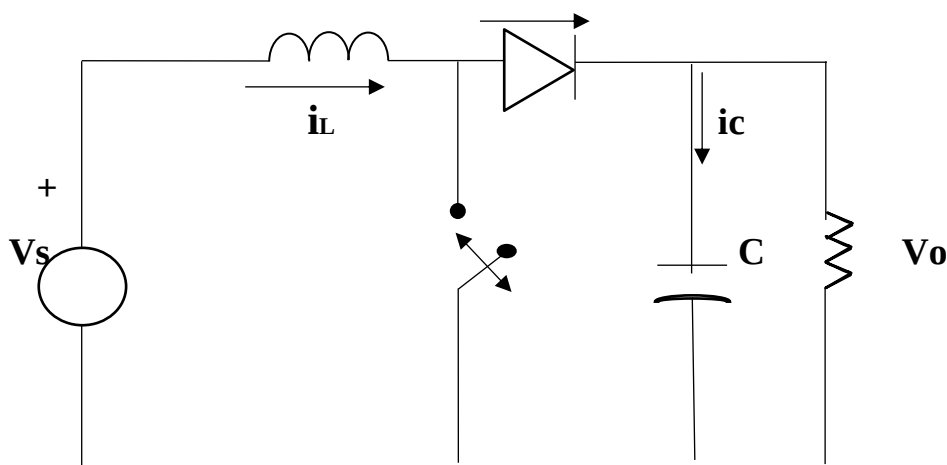


Figure 2.7 : Hacheur parallèle [21]

L'expression de l'inductance L :
$$L \geq \frac{V_s . D}{f . \Delta i_L} \quad (2.11)$$

V_s : La tension d'entrée

D : Rapport cyclique

f : fréquence de découpage

Δi_L : Ondulation maximale du courant dans l'inductance

L'expression de la capacité C :
$$C \geq \frac{I_o . D}{f . \Delta V_o} \quad (2.12)$$

I_o : courant moyen à la sortie

D : Rapport cyclique

f : fréquence de découpage

ΔV_o : Ondulation maximale de la tension de sortie

2.3.3.3 Hacheur série-parallèle (Buck-Boost)

Ce convertisseur statique permet d'obtenir une tension continue variable, supérieure ou inférieure à la tension d'entrée, qui est fixe. Durant la première phase de conduction, comprise entre 0 et αT , l'interrupteur commandé est fermé. La diode demeure non conductrice, et l'inductance accumule l'énergie délivrée par le générateur d'entrée. Lors de la seconde phase, de αT à T , l'interrupteur commandé est ouvert et la diode devient passante. L'inductance, quant à elle, restitue son énergie à la charge. En outre, il est important de noter que, dans le cadre d'une conduction continue, la valeur moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [28].

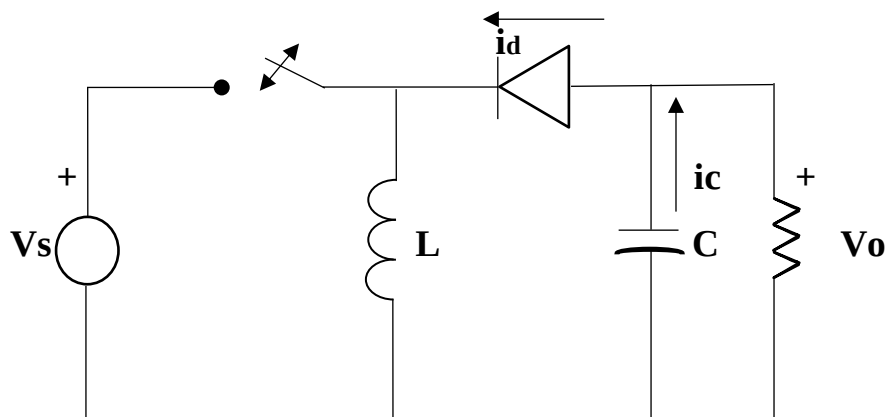


Figure 2.8 : Hacheur Série- parallèle [29]

$$L'expression de l'inductance L : $L \geq \frac{V_s \cdot D}{f \cdot \Delta i_L}$ (2.13)$$

V_s : La tension d'entrée

D : Rapport cyclique

f : fréquence de découpage

Δi_L : Ondulation maximale du courant dans l'inductance

$$L'expression de la capacité C : $C \geq \frac{I_o \cdot (1-D)}{f \cdot \Delta V_o}$ (2.14)$$

I_o : courant moyen à la sortie

D : Rapport cyclique

f : fréquence de découpage

ΔV_o : Ondulation maximale de la tension de sortie

2.3.4 Modélisation mathématique de convertisseur DC/DC

2.3.4.1 Modélisation d'un hacheur parallèle

Cas01 « lorsque l'interrupteur fermé »

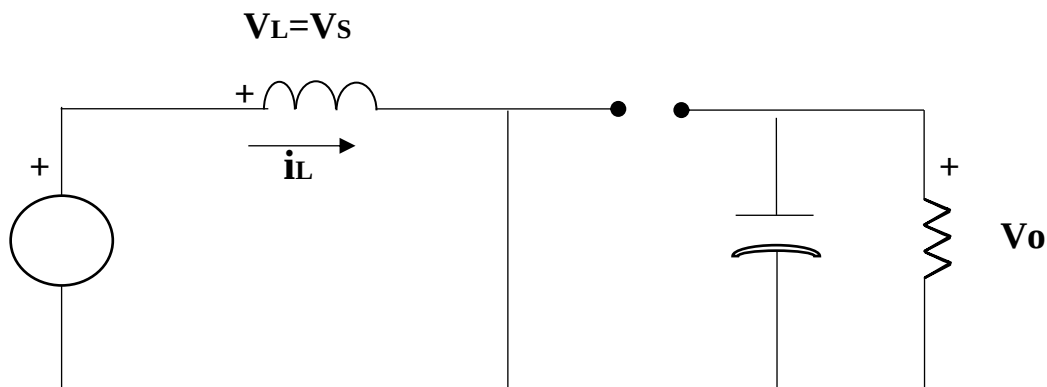


Figure 2.11 : Schéma équivalent d'un hacheur parallèle Lorsque l'interrupteur fermé [29]

$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.25)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2.26)$$

$$C \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R} = 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{RC} \quad (2.28)$$

La matrice d'état écrit par la forme suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_o \\ i_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_o \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V_s \quad (2.29)$$

Cas02 « lorsque l'interrupteur Ouvert »

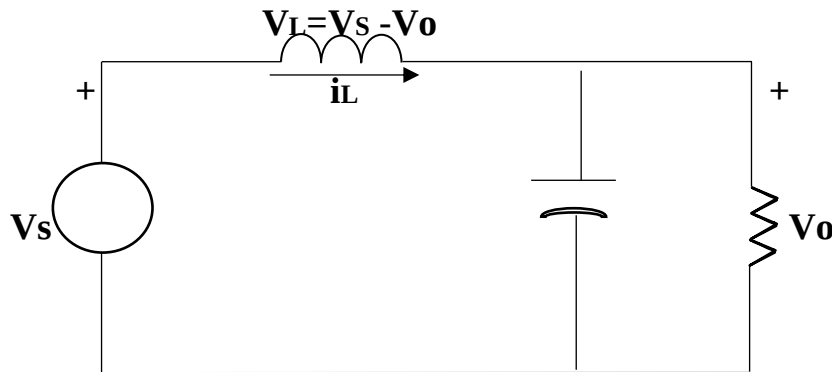


Figure 2.12 : Schéma équivalent d'un hacheur parallèle Lorsque l'interrupteur ouvert

[29]

$$V_s = V_L + V_o \quad (2.30)$$

$$V_L = V_s - V_o \quad (2.31)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_s - V_o \quad (2.32)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.33)$$

$$i_L = C \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R} \quad (2.34)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{1}{C} i_L - \frac{V_o}{RC} \quad (2.35)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_o \\ i_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_o \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V_s \quad (2.36)$$

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et du générateur photovoltaïque. Nous avons utilisé deux modèles PV (modèle à une seule diode et modèle à deux diodes) et leurs équations respectives. Nous avons expliqué sur les trois types de convertisseur DC-DC (Série, Parallèle et Série-parallèle) et les équations de chacun d'eux.

Chapitre 3 : Techniques de Poursuite de puissance maximale MPPT

3.1 Introduction

Les générateurs photovoltaïques ont des caractéristiques non linéaires (P-V) et peuvent atteindre un point de fonctionnement optimal unique lors des conditions d'éclairage et température uniformes. Le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque dépend de la charge à laquelle il est connecté. En effet, pour que le GPV fonctionne à puissance maximale, une poursuite et contrôle de puissance de générateur photovoltaïque est insérer pour le fonctionnement optimal du système PV. Dans ce chapitre sont représentés la méthode de MPPT et ses différentes technologies des commandes pour les convertisseurs DC-DC (Hacheurs élévateurs), permettant au GPV de fonctionner à sa puissance maximale.

3.2 Point de puissance maximale

Les panneaux solaires le panneau peuvent produire un voltage V_{pv} et un courant maximal I_{pv} pour une puissance maximale de panneau.

Pour des conditions de température et Irradiation données, les caractéristiques **I-V** de générateur PV connecte avec une charge sont illustres dans la figure suivent.

Le générateur PV fonctionne à une puissance maximale lorsque

$$V_{pv} = V_{opt} , I_{pv} = I_{opt}$$

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

La production de V_{opt} et I_{opt} constitue la puissance maximale qui on peut extraire du générateur PV dans les conditions actuelle. Ce point est appelé Le Point du Puissance Maximale MPP pour une température et Irradiation donne, on peut le caractérise par une résistance R_{opt}

Lorsque la valeur de charge est Inférieur ou supérieur à la valeur de résistance optimale de PV la puissance fournie est inferieur a la puissance optimale (P_{opt}) de générateur PV dans les conditions actuelle

- $R_{ch} < R_{opt} \Rightarrow I_{ch} > I_{opt} , V_{ch} < V_{opt} \Rightarrow P_{ch} < P_{opt}$
- $R_{ch} > R_{opt} \Rightarrow I_{ch} < I_{opt} , V_{ch} > V_{opt} \Rightarrow P_{ch} < P_{opt}$

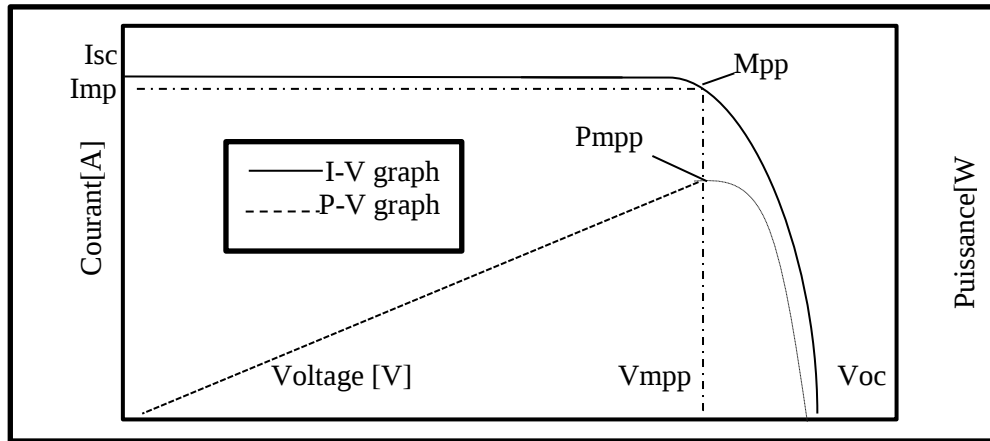


Figure 3.1 : Caractéristique V-I P-V d'un panneau photovoltaïque [34]

3.3 Les Technique de MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Dans un system PV elle est nécessaire de maximiser la puissance de panneau PV. Pour cette raison doit améliorer le rendement du système à partir de commande de convertisseur DC-DC qui faire le rôle d'un variateur pour le point de production optimale pour une puissance maximale de générateur PV [31].

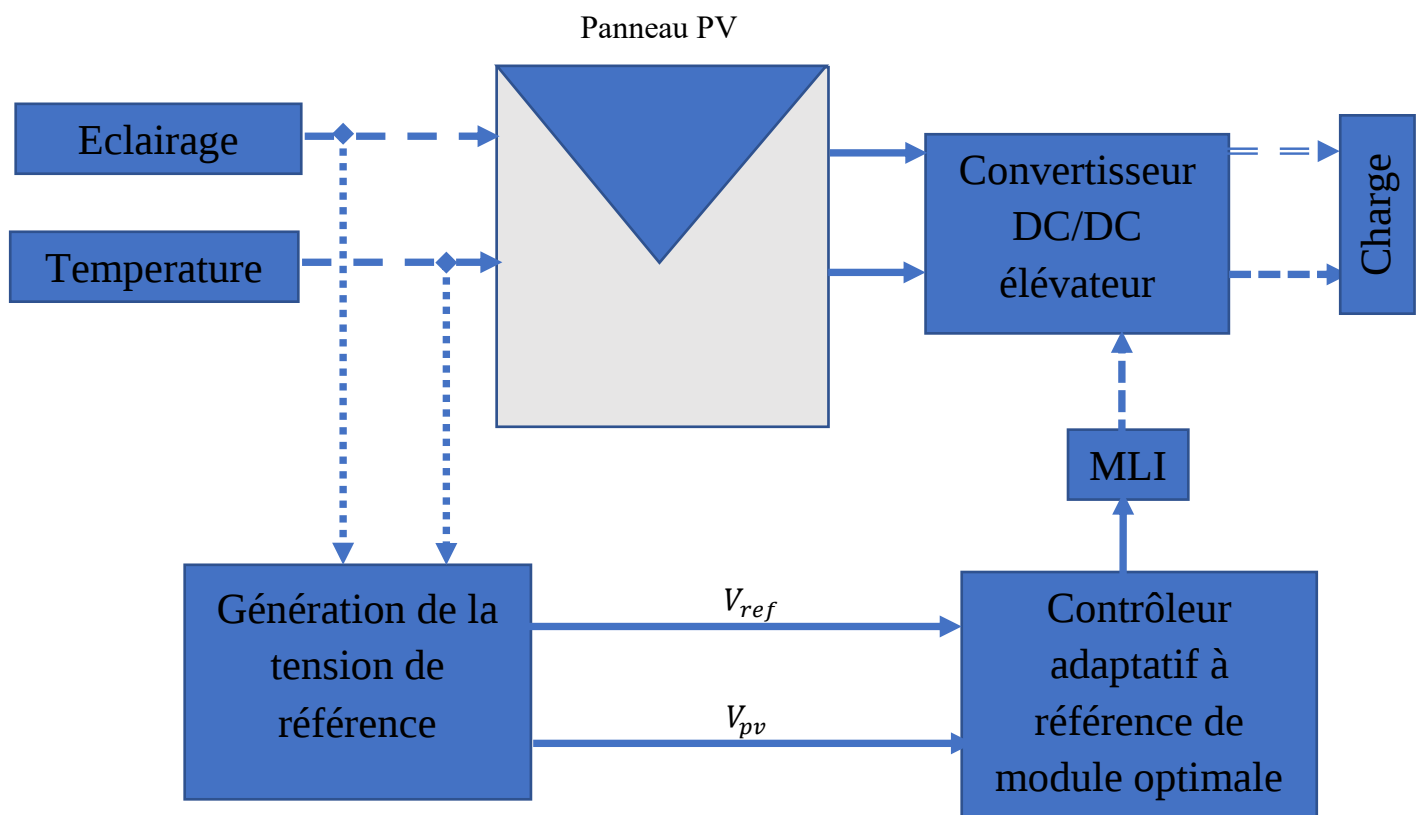


Figure 3.2 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT [32]

Pour l'extraction de puissance maximale de panneau PV plusieurs techniques sont utilisées, la technique la plus tendance et développée est le MPPT, nommée suiveur de point de puissance maximale. Les méthodes de MPPT sont basées sur des algorithmes qui mesurent et surveillent le courant et la tension du générateur photovoltaïque qui cherche le point de puissance maximale ce qui améliore le rendement du système. Plusieurs méthodes sont utilisées pour cela comme l'algorithme de perturbation et observation, algorithme d'incrémentation et la logique floue [33].

MPPT	Catégorie	Efficacité	Vitesse de suivance	Analog/digital	Complexité	Cout
P&O	Direct	Moyen	Lente	Les deux	Simple	Moyen
INC	Direct	Bien	Moyen	Digital	Moyen	Moyen
Logic flou	Indirect	Très bien	Rapide	Digital	Complexe	Très cher

Tableau 3.1 : Différences entre les types de MPPT [33]

3.3.1 La méthode perturbation et observation (P&O)

La méthode P&O est une approche largement répandue pour la poursuite de PPM, parce qu'elle est simple. Elle exige seulement des mesures sur la tension de sortie du panneau et son courant de sortie et elle peut donc toute la suite dépister le point de puissance maximum en générant à sa sortie une tension. La méthode est basée sur le changement de puissance de panneau dans le courbe PV comme la figure [34].

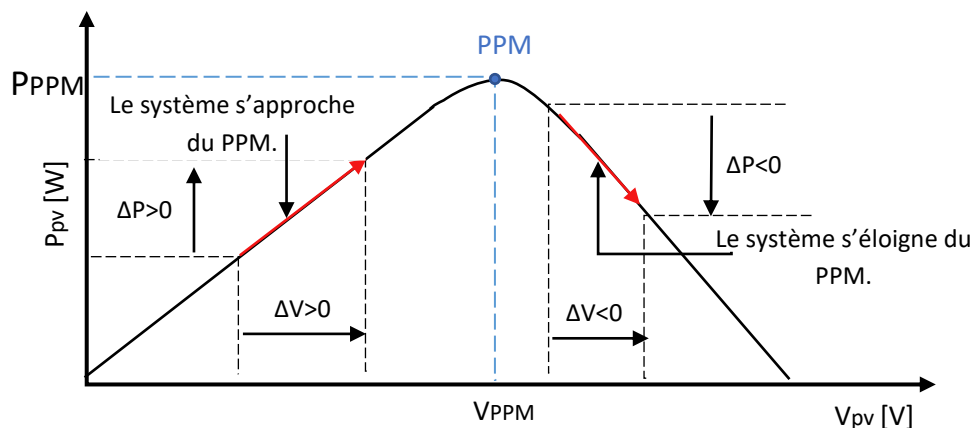


Figure 3.3 : Recherche de PPM par P&O [35]

Cet algorithme fonctionne à principe de perturbation périodique par incrémentation ou décrémentation de tension du panneau et en comportant la puissance sortie correspondant le panneau à partir de la perturbation précède comme illustre dans la figure (3.3).

On peut exprimer l'algorithme de P&O comme suit :

$$P = V \times I \quad (3.1)$$

$$\Delta P = P(k) - P(k - 1) \quad (3.2)$$

$$\Delta V = V(k) - V(k - 1) \quad (3.3)$$

- Si $\Delta P > 0$ le système augment la tension de panneaux, tan que la perturbation entraine une augmentation de puissance le système maintien son chemin jusqu'à la dérive est nulle ($\Delta P = 0$)
- Si $\Delta P < 0$ le système diminue la tension de panneaux, tan que la perturbation entraine une augmentation de puissance le système maintien son chemin jusqu'à la dérive est nulle ($\Delta P = 0$)

Cette cycle est répéter jusqu'à atteindre la puissance maximale de générateur PV. Cette cycle est présenté par l'organigramme P&O monte sur la figure 3.

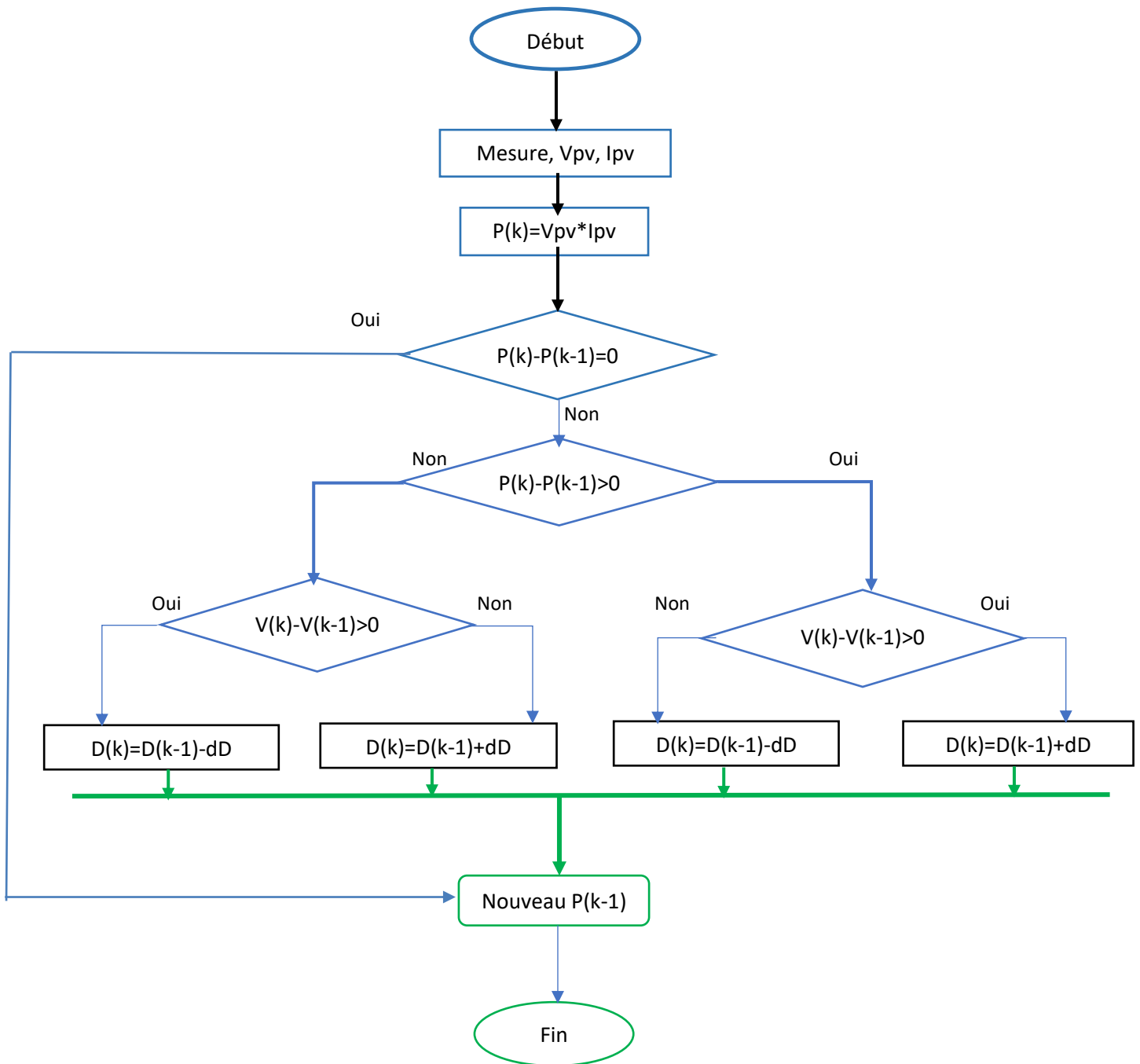


Figure 3.4 : Organigramme d'Algorithme P&O [36]

3.3.2 La méthode incrémentation de la conductance

La commande Incrément de conductance est un algorithme propose En 1993 par *Hussein, Muta, HOSHINO, et OSAKADA* de l'Université de Saga Japon pour l'objectif d'améliorer et résoudre des problèmes de commande P&O de variation dans les conditions atmosphériques [37]. Cette méthode est basée sur la comparaison entre la conductance instantanée et la conductance incrémente pour déterminer le point de puissance maximale

Quand ces deux valeurs sont égales, la tension de sortie égale la tension de PPM. Jusque 'on a un changement d'irradiation ou la température ou les deux le contrôleur réagit pour fixe la tension dans le PPM.

L'algorithme INC peut exprimer mathématiquement comme suit, la puissance de sortie est écrite :

$$P = V \times I \quad (3.4)$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} V_{pv})}{dx} \quad (3.5)$$

$$V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} - I_{pv} = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} - \frac{I_{pv}}{V_{pv}} = 0 \quad (3.7)$$

Pour éviter le cas de nulle en change les variables On a :

$$\frac{I(k) - I(K - 1)}{V(K) - V(K - 1)} \quad (3.8)$$

En conséquent on a :

$$\Delta I \times V + \Delta V \times I = 0 \quad (3.9)$$

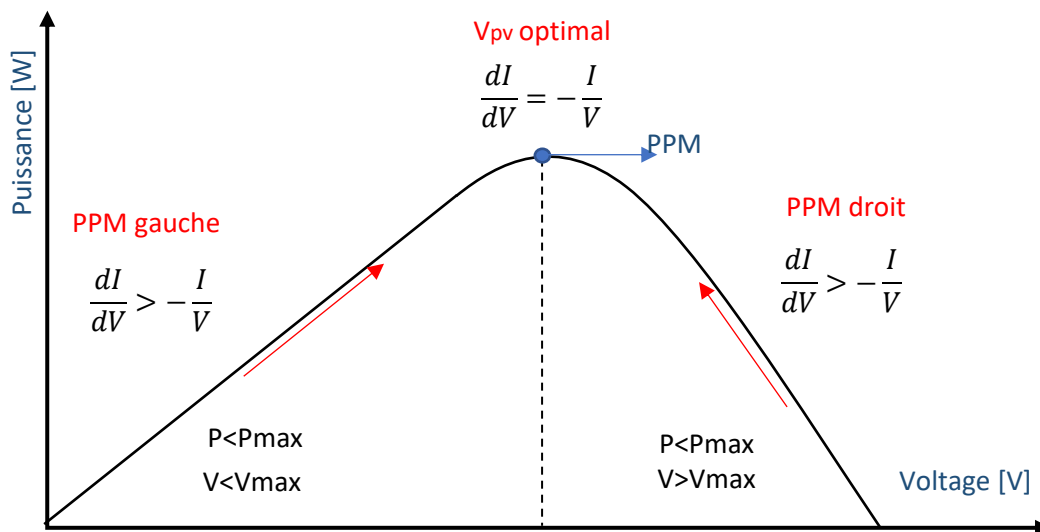


Figure 3.5 : Recherche de PPM avec INC [38]

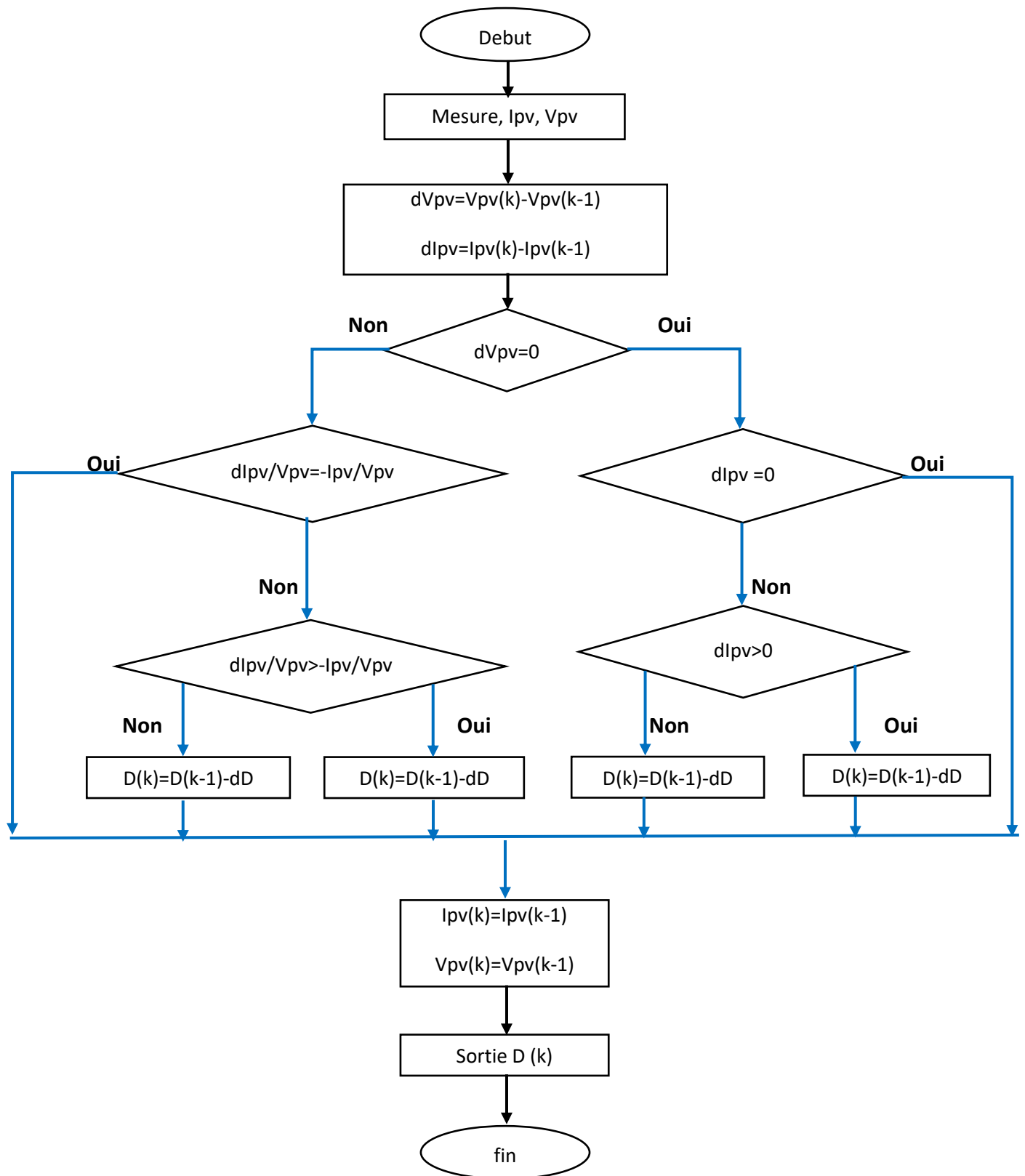


Figure 3.6 : Organigramme d'Incrémention de la conductance [39]

3.3.3 Méthode de Logique flou

Avec l'évolution des microcontrôleurs plusieurs méthodes d'intelligence artificielle sont utilisées comme la logique floue. Cette méthode est appliquée dans les domaines publique et industriel (commande de processus complexe liés à l'énergie, robotique, machines-outils).

La logique floue est créée par Lotfi A. Zadeh en 1965. Cette méthode est une substitue de la logique binaire fondée sur des variables pouvant prendre, outre les valeurs (vrai 1) ou (faux 0), les valeurs intermédiaires « vrai » ou « faux » avec une certaine probabilité (un certain degré d'appartenance). Les Performances que la commande floue peut apporter par comparaison avec les commandes classiques, sont essentiellement dues à la méthode de conception de ces régulateurs. En effet, ces derniers ne nécessitent pas la connaissance des modèles mathématiques du système. Par contre ils ont besoin d'un ensemble de règles basées essentiellement sur les connaissances d'un opérateur qualifié manipulant le système [40].

La logique floue est appelée aussi logique linguistique en raison de traitement des grandeurs physiques sur des termes linguistiques comme des expressions relatives ou floues à savoir (grand, petit, positif, négatif, etc. ...) ces classes d'expressions floues sont nommées ensembles flous formants des variables linguistiques [41].

Le contrôleur flou est l'application plus utilisée de la logique floue. Ce contrôleur comporte quatre parties essentielles : le bloc de Fuzzification, la base de connaissances, moteur d'inférence et le bloc de Défuzzification comme représenté dans la figure suivante :

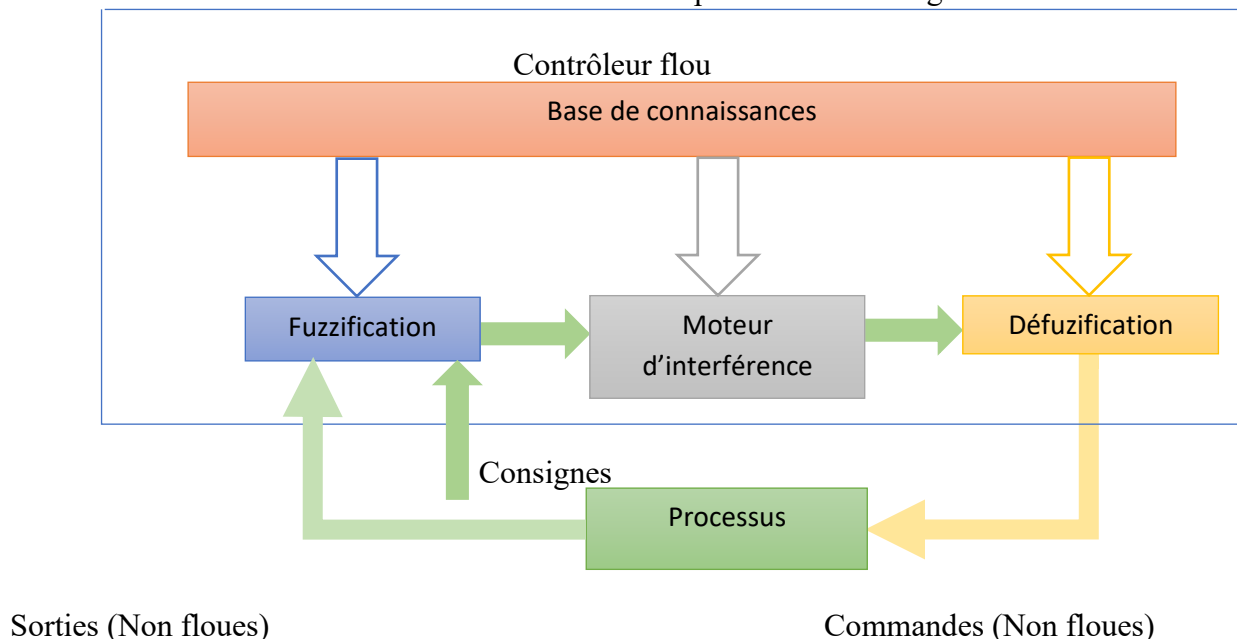


Figure 3.7 : principe de fonctionnement d'un contrôleur flou [42]

3.3.3.1 Bloc de Fuzzification

Ce bloc transforme les variables numérique (entres non floues) provenant des entres en variables linguistiques floues, la fuzzification consiste à définir des fonctions d'appartenance pour diverses variables d'entre et de sortie. Dans le cas d'une modification par logique flou en utilise généralement les formes trapèze ou triangulaires pour les fonctions organiques [42].

3.3.3.2 Base de connaissances

Ce bloc est compose d'un ensemble de relations liants les variables d'entrées aux variables de sorties du système à régler. Chaque relation est composée d'une condition précédée du symbole **Si** appelle prémisse, et d'une conclusion précédée du symbole **Alors** [42].

3.3.3.3 Moteur d'inférence

Le but de ce bloc est la réalisation du traitement numérique des bases de connaissances, décrites par des opérateurs flous, pour obtenir la sortie linguistique ou floue Du régulateur cette opération est faite par différentes méthodes comme la méthode **max-min**, **max-produit**, **somme-produit** [42].

3.3.3.4 Bloc de defuzzification

La defuzzification consiste à transformer la décision floue de forme linguistique a une valeur numérique (physique), le defuzzification doit choisir une méthode appropriée (méthode de maximas, moyen de maximas, centre de gravité) pour l'évolution dynamique de la commande, pour ça la méthode plus connais est la méthode de centre de gravité. Après ça tous les règles de logique floues de la commande du système et notée dans un tableau nommé le tableau de décision ou Tableau des règles [42].

Pour notre simulation on choisit la méthode de MAMDANI

3.3.3.4.1 Méthode MAMDANI

La méthode Mamdani s'impose comme la stratégie d'interface floue la plus répandue. Comme l'indiquent des recherches récentes, la proposition a été faite en 1975 sur le site. Le professeur Ebrahim Mamdani de l'université de Londres est l'auteur d'un des systèmes flous élaborés pour réguler conjointement un moteur à vapeur et une chaudière. Sur le site, la méthode de Mamdani applique un ensemble de règles floues de type « si-alors », qui sont fournies par des opérateurs humains expérimentés.

La logique floue de Mamdani utilise les variables linguistiques pour décrire les états du processus et utilise ces variables comme entrées pour les règles de contrôle. Les termes des variables linguistiques sont des ensembles flous ayant une certaine forme. La logique floue de Mamdani utilise généralement l'ensemble flou trapézoïdal ou triangulaire, mais d'autres formes sont possibles [43].

3.3.4 Contrôleur floue (FLC) avec un pas variable :

Le contrôleur flou FLC est un outil essentiel pour ajuster avec précision et continuité le pas d'incrémentement ou toute autre valeur pertinente. Il s'agit d'un processus de réduction. Le contrôleur flou proposé est basé sur la connaissance préalable du système par un expert dans ce domaine. La figure (3.8) montre L'organigramme de P&O amélioré par logique floue avec un pas variable [36].

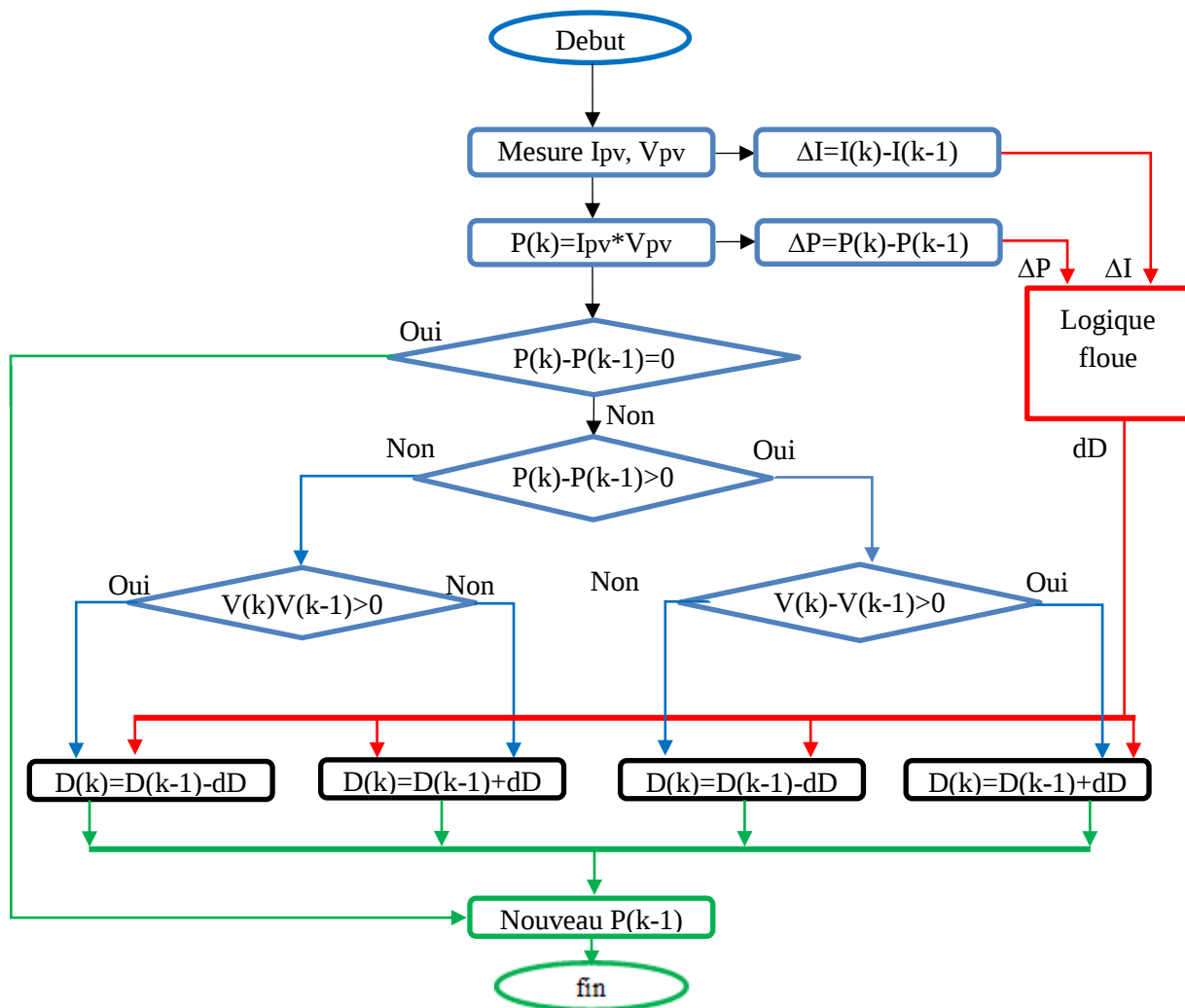


Figure 3.8 : L'organigramme de P&O amélioré par logique floue avec un pas variable

[36]

Il se compose de quatre parties, Fuzzification, l'inférence, Defuzzification et les Bases de connaissances. Dans notre mémoire, le FLC construit avec deux variables d'entrée et une sortie. Les variables d'entrée du FLC sont la variation de la puissance du générateur PV, ΔP_{pv} et la variation du courant du GPV, I_{pv} tandis que la variable de sortie du FLC est la variation du pas Δd , comme illustres dans la figure ci-dessous :

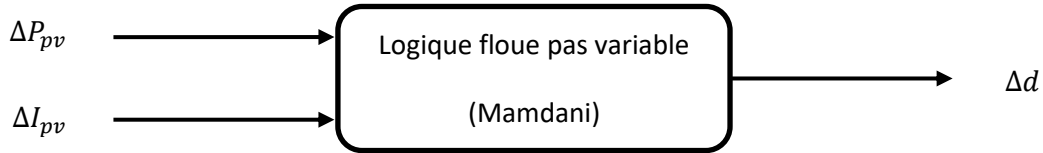


Figure 3.9 : Bloc du calculateur de pas variable FLC [36]

Les entrées de ce bloc peuvent être calculées à partir des données fournies par le capteur de courant et de tension. Les variables d'entrée ΔP_{pv} et ΔI_{pv} du bloc FLC proposé peuvent être calculées à l'aide des équations suivantes, dans lesquelles $P_{pv}(k)$ et $I_{pv}(k)$ sont respectivement la puissance et le courant du générateur PV. $V_{pv}(k)$ est la tension du générateur PV.

$$P_{pv}(k) = V_{pv}(k) \times I_{pv}(k) \quad (3.10)$$

$$\Delta P_{pv}(k) = P_{pv}(k) - P_{pv}(k - 1) \quad (3.11)$$

$$\Delta I_{pv}(k) = I_{pv}(k) - I_{pv}(k - 1) \quad (3.12)$$

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sorties utilisées dans ce modèle est illustrée dans la Figure (3.10) et (3.11). Toutes les fonctions d'appartenance sont exprimées avec une fonction triangulaire et se composent de cinq sous-ensembles flous qui sont notés NB (Négative Grande), NS (Négative Petite), ZE (zéro), PS (Positive Petite) et PB (Positive Grande). (exemple **Si** dI_{pv} = NB et dP_{pv} = ZE **Alors** dV_{ref} = NS)

		DI_{pv}				
		NB	NS	ZE	PS	PB
DP_{pv}	NB	NB	NS	ZE	ZE	PS
	NS	NS	ZE	ZE	PS	PS
	ZE	NS	ZE	ZE	PS	PB
	PS	ZE	ZE	PS	PS	PS
	PB	ZE	PS	PS	PB	PB

Tableau 2.2: Tableau des règles

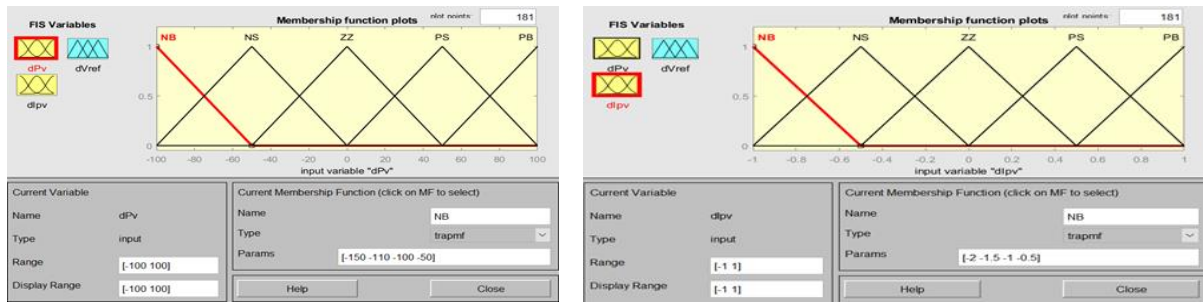


Figure 3.10 : Les fonctions d'appartenance des entrées

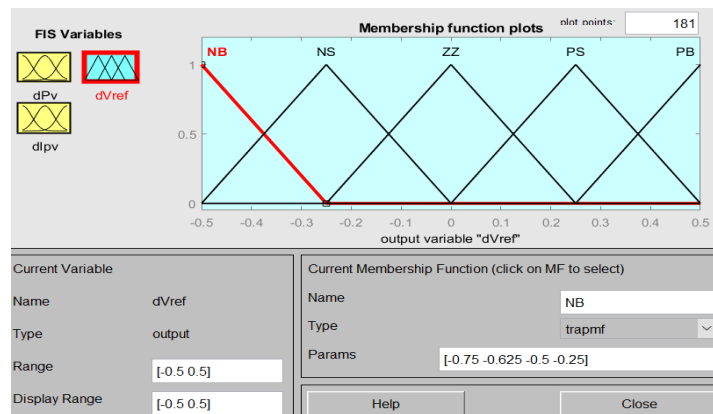


Figure 3.11 : Les fonctions d'appartenance de la sortie

La base des règles floues est un ensemble des règles si-alors que toutes les informations sont disponibles pour les paramètres commandés. Puisque le nombre de fonctions d'appartenance de chaque entrée est 5, alors les règles d'inférence floue du FLC consistent en 25 règles représentées dans le tableau (3.2). Ces règles sont utilisées pour déterminer la sortie du contrôleur floue afin de suivre le point de puissance maximale [36].

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, est consacrée à l'explication de principe de recherche du MPP après la technique MPPT et sa structure et les différents algorithmes MPPT utilisés dans notre travail, la méthode de perturbation et observation, l'algorithme Incrémentation du conductance, enfin l'algorithme MPPT basé sur la logique floue est une explication sur la structure de contrôleur floue, nous sommes particulièrement intéressés par l'algorithme basé sur la logique floue qui est un algorithme robuste et efficace

Chapitre 4 : Simulation et discussion des résultats

4.1 Introduction

Dans ce chapitre on présentera notre étude sur la simulation du système photovoltaïque à l'aide de logiciel MATLAB/Simulink. De plus, la modélisation de la commande MPPT en utilisant les trois algorithmes présenter dans le chapitre précédent, L'algorithme Perturbation et Observation (P&O), Incrément de Conductance (INC) et l'intelligence artificielle (FLC) de base du logique floue. Nous évaluerons les performances de chaque algorithme dans des conditions idéales et discuterons de l'effet des variations de température, d'éclairage et la charge sur la puissance produite par le générateur photovoltaïque. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre l'influence de ces facteurs sur les performances du système et de choisir la méthode MPPT le plus adapté à différentes situations.

4.2 Simulation de système photovoltaïque par MATLAB/Simulink

MATLAB/Simulink est une interface de programmation visuelle qui permet la simulation et la modélisation multi-domaines de systèmes dynamiques pour simplifier et faciliter la manipulation en fournissant un espace graphique qui contient un ensemble de bibliothèques qui sont des blocs de modélisation qui assurent la précision de la conception, de la simulation, la mise en œuvre et contrôle des systèmes de communication et de traitement du signal [44].

Les schémas de système photovoltaïque dans les différents algorithmes de MPPT sont présents dans le figure 4.1, figure 4.2, figure 4.3.

Ce système de simulation consiste à un panneau Solaire de puissance 10 Watts, un hacheur Boost, un bloc de rayonnement et température réaffichèrent les conditions climatiques, et un bloc de commandes MPPT. Le bloc de commande regroupe le commande MPPT P&O, INC et logique floue

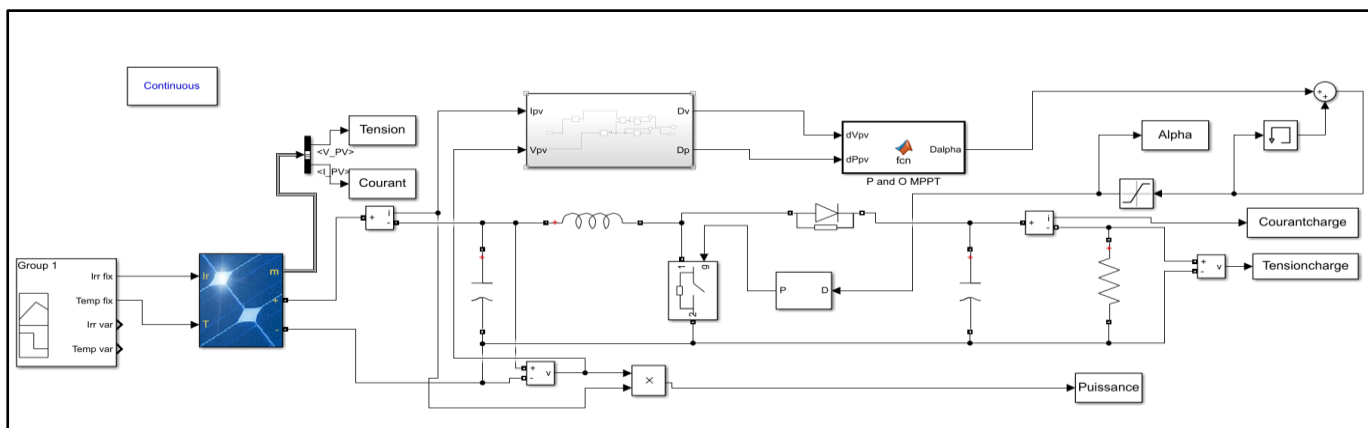


Figure 4.1 : système photovoltaïque Commande par L'algorithme P&O

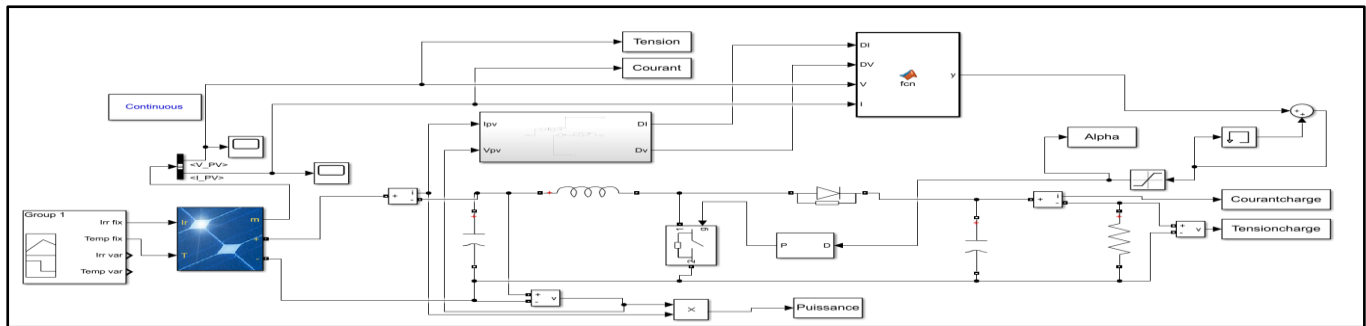


Figure 4.2 : système photovoltaïque Commande par L'algorithme INC

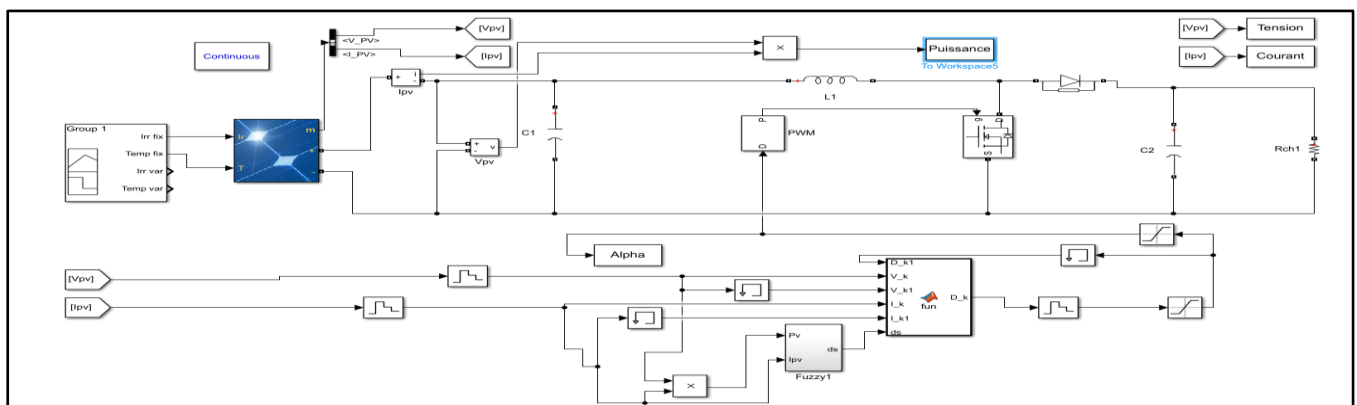


Figure 4.3 : système photovoltaïque Commande par L'algorithme de logique floue

4.2.1 Caractéristiques électriques de système PV

Les caractéristiques électriques du convertisseur DC-DC Boost sont données dans le tableau 4-1 suivant :

Caractéristiques DC-DC Boost	Inductance L	Capacite C1	Capacite C2
Valeurs	$3.1 \cdot 10^{-3}$ H	$3.3864 \cdot 10^{-4}$ F	$3.3864 \cdot 10^{-5}$ F

Tableau 3.1 : Caractéristiques de convertisseur DC-DC Boost.

Les caractéristiques de panneaux solaire utilise est données dans le tableau 4-2 suivant :

Puissance maximale	10.296 W
Cellule per module	36 Ncell
Tension de circuit ouvert (Voc)	21.5 V
Courant de court circuit (Isc)	0.69 A
Tension au point de puissance maximale	15.6 V
Courant au point de puissance maximale	0.66 A
Coefficient de température de Voc	-0.32 %/deg.C
Coefficient de température de Ioc	0.0017 %/deg.C

Tableau 4.2 : Caractéristiques des panneaux solaires

4.3 Résultats de la simulation :

4.3.1 Test de conditions standards ($E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

On effectue la simulation du système photovoltaïque dans les conditions standards ($E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$) pour les trois algorithmes de MPPT pour extraire la puissance de notre système ($R_{ch}=38\Omega$).

Les profils de rayonnement et de Températures sont donnés dans la figure ci-dessous :

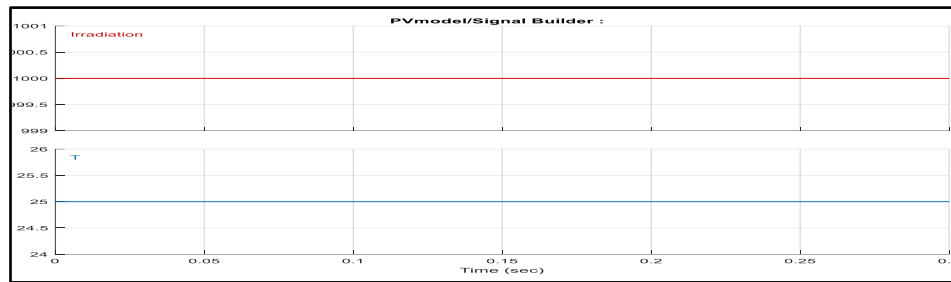


Figure 4.4 : Rayonnement et Température pour le cas des conditions standards.

A. Algorithme P&O :

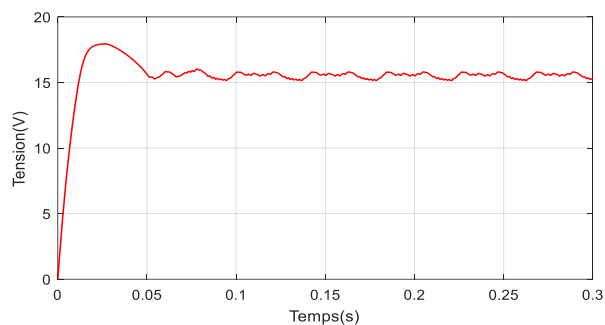


Figure 4.5 : Tension PV de méthode P&O dans le STC

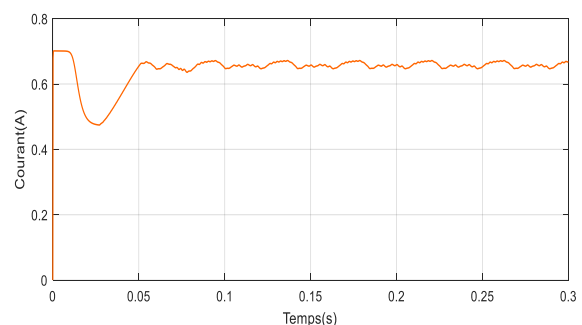


Figure 4.6 : Courant PV de méthode P&O dans le STC

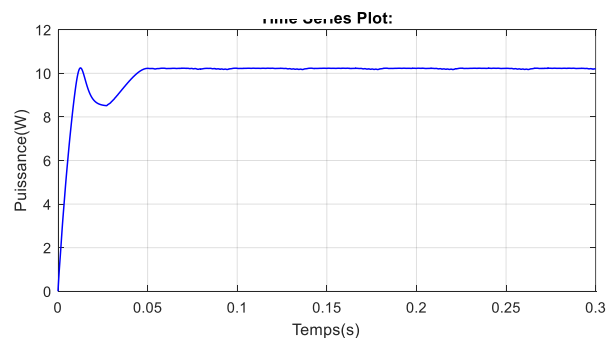


Figure 4.7: Puissance PV de méthode P&O dans le STC

B. Algorithme INC :

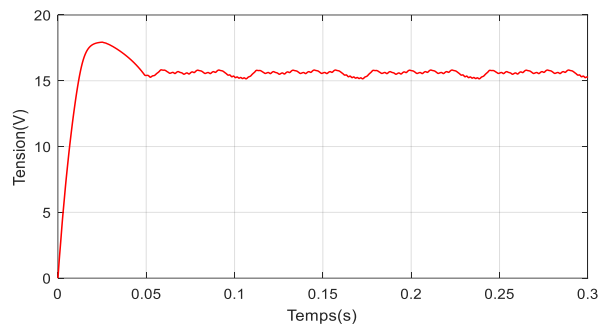


Figure 4.8 : Tension PV de méthode INC dans le STC

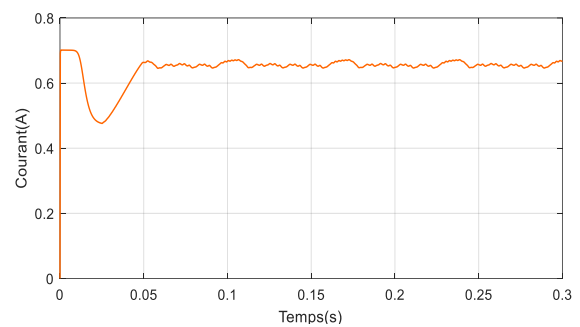


Figure 4.9 : Courant PV de méthode INC dans le STC

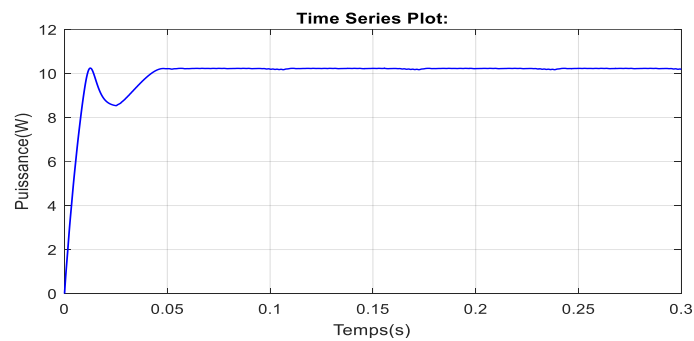


Figure 4.10 : Puissance PV de méthode INC dans le STC

C. Algorithme Logique floue :

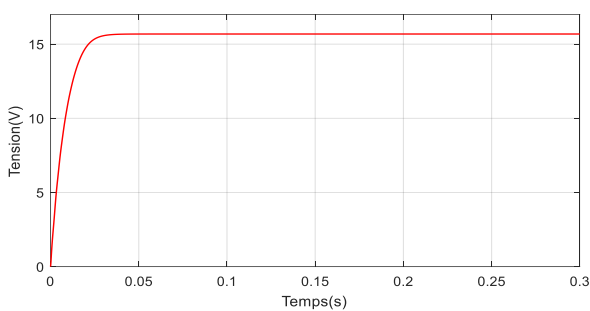


Figure 4.11 : Tension PV de méthode FLC dans le STC

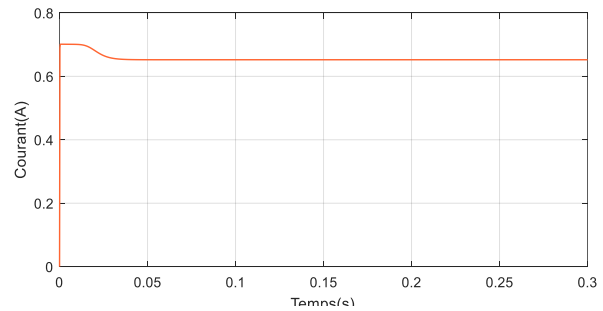


Figure 4.12 : Courant PV de méthode FLC dans le STC

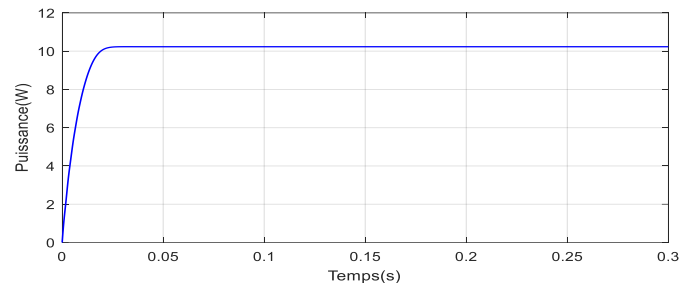


Figure 4.13 : Puissance PV de méthode FLC dans le STC

	P&O			INC			FLC		
	V _{pv} (V)	I _{pv} (I)	P _{pv} (W)	V _{pv} (V)	I _{pv} (I)	P _{pv} (W)	V _{pv} (V)	I _{pv} (I)	P _{pv} (W)
Déplacement au démarrage	17.95	0.7	10.248	17.93	0.7	10.248	0	0.7	0
Valeur minimale au régime permanent	15.16	0.635	10.185	15.15	0.646	10.175	15.684	0.652	10.232
Valeur maximale au régime permanent	16.02	0.671	10.234	15.83	0.671	10.234	15.684	0.652	10.232
Temps de réponse	0.0494			0.046			0.0305		

Tableau 4.3 : Résultats de Méthodes MPPT de cas de STC

4.3.2 Variation de Température :

Nous avons testé le fonctionnement de système étudié sous un éclairage fixe ($E=1000\text{W}/\text{m}^2$) et une température Variable comme illustrer dans la figure 4.14

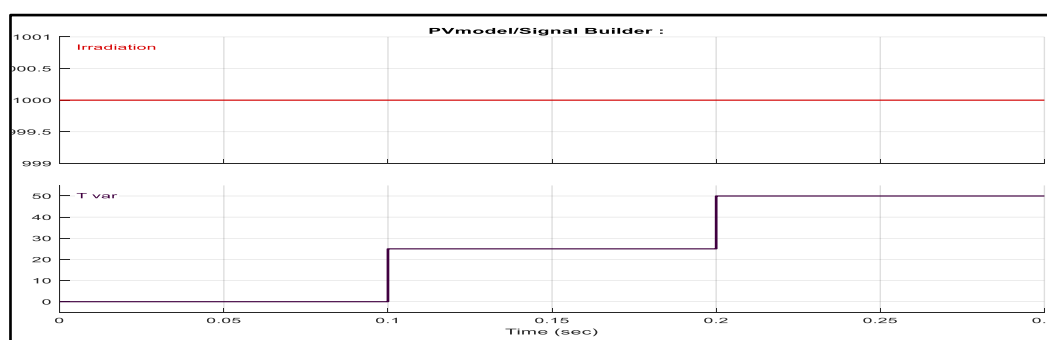


Figure 4.14 : Rayonnement et Température pour T variable et E constante

A. Algorithme P&O :

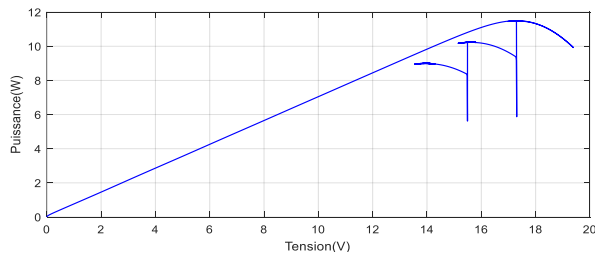


Figure 4.15 : Caractéristique P-V de méthode P&O pour le cas de T variable et E constante

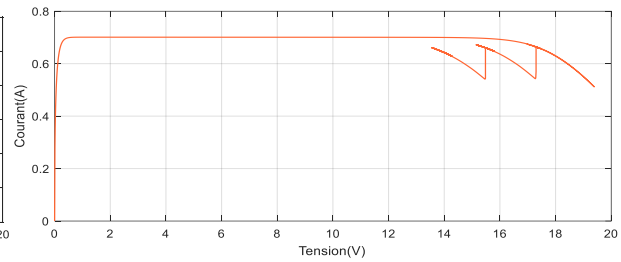


Figure 4.16 : Caractéristique I-V de méthode P&O pour le cas de T variable et E constante

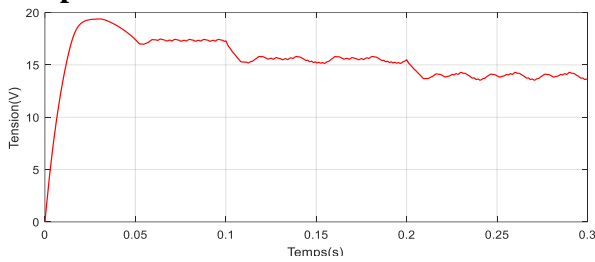


Figure 4.17 : Tension PV de méthode P&O pour le cas de T variable et E constante

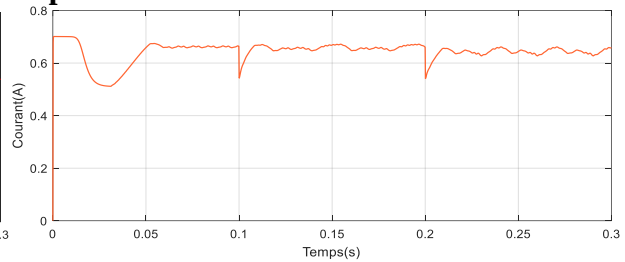


Figure 4.18 : Courant PV de méthode P&O pour le cas de T variable et E constante

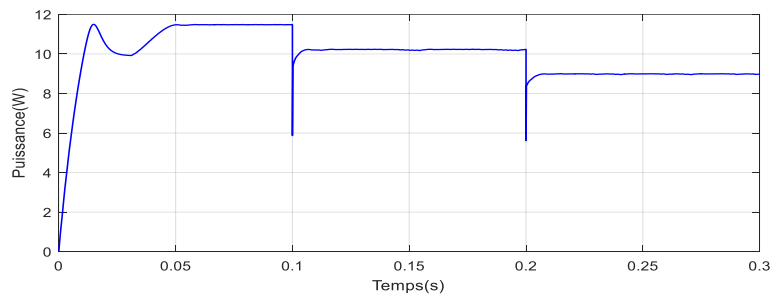


Figure 4.19 : Puissance PV de méthode P&O pour le cas de T variable et E constante

B. Algorithme INC :

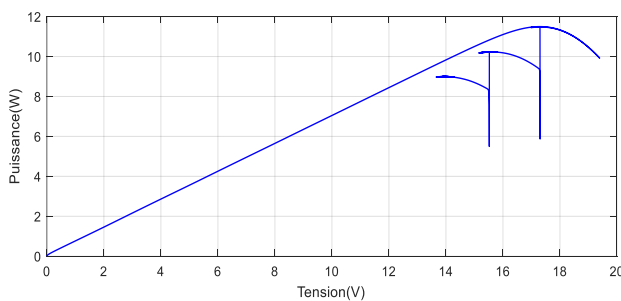


Figure 4.20 : Caractéristique P-V de méthode INC pour le cas de T variable et E constante

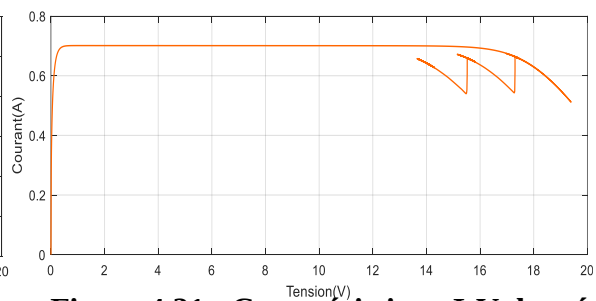


Figure 4.21 : Caractéristique I-V de méthode INC pour le cas de T variable et E constante

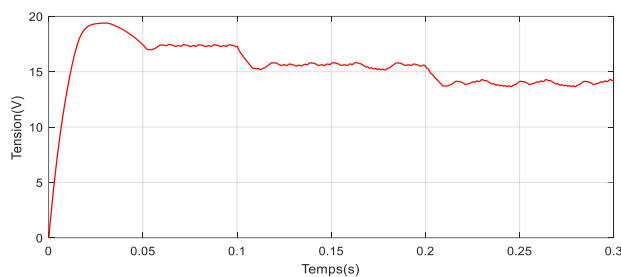


Figure 4.22 : Tension PV de méthode INC pour le cas de T variable et E constante

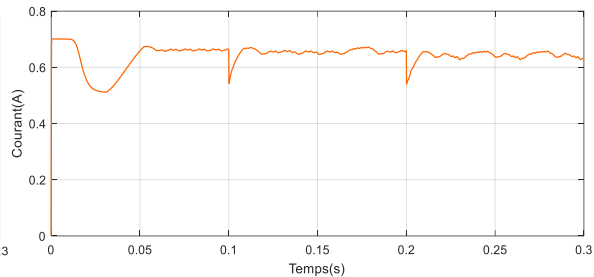


Figure 4.23 : Courant PV de méthode INC pour le cas de T variable et E constante

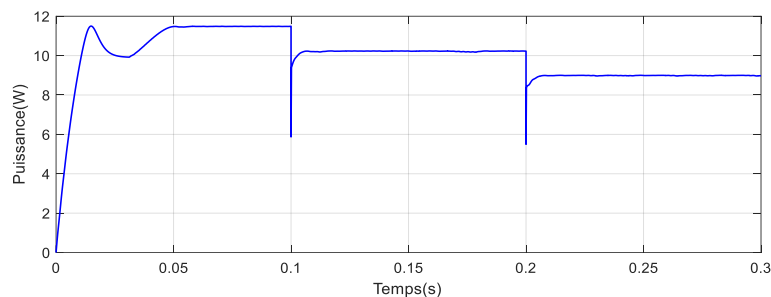


Figure 4.24 : Puissance PV de méthode INC pour le cas de T variable et E constante

C. Algorithme Logique floue :

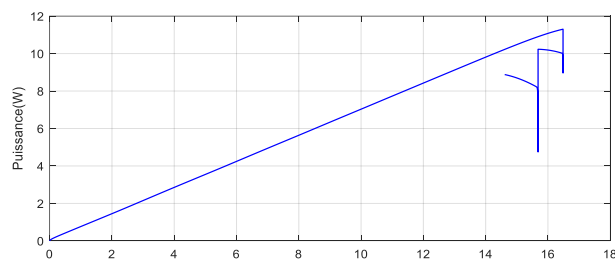


Figure 4.25 : Caractéristique P-V de méthode FLC pour le cas de T variable et E constante

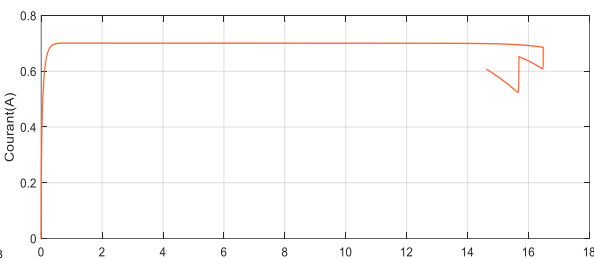


Figure 4.26 : Caractéristique I-V de méthode FLC pour le cas de T variable et E constante

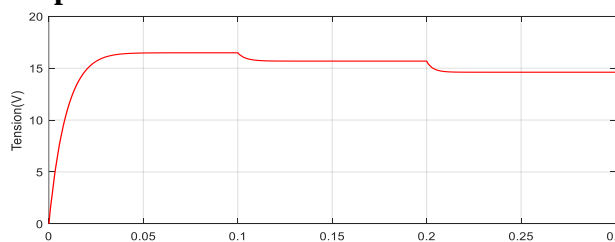


Figure 4.27 : Tension PV de méthode FLC pour le cas de T variable et E constante

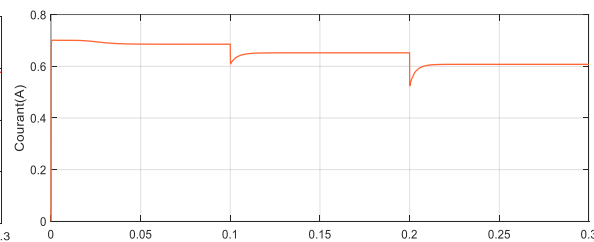
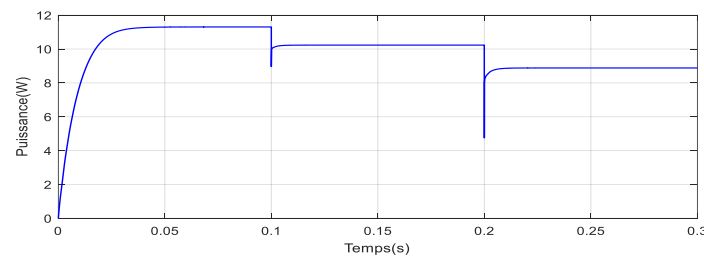


Figure 4.28 : Courant PV de méthode FLC pour le cas de T variable et E constante



**Figure 4.29 : Puissance PV de méthode FLC
pour le cas de T variable et E constante**

Temps (s)	T(°C)		Valeur maximale au régime permanent			Valeur minimale au régime permanent			Temps de réponse(s)		
			P&O	INC	FLC	P&O	INC	FLC	P&O	INC	FLC
0s - 0.1s	0°C	V(V)	17.5	17.49	16.482	17.3	17.28	16.482	0.05	0.049	0.045
		I(A)	0.655	0.665	0.686	0.658	0.656	0.686			
		P(W)	11.484	10.235	11.3	11.48	10.185	11.3			
0.1s - 0.2s	25°C	V(V)	16.02	15.83	15.684	15.16	15.15	15.684	0.008	0.007	0.006
		I(A)	0.671	0.671	0.652	0.635	0.646	0.652			
		P(W)	10.234	10.234	10.232	10.185	10.175	10.232			
0.2s – 0.3s	50°C	V(V)	14.14	14.29	14.62	13.37	13.65	14.62	0.007	0.007	0.006
		I(A)	0.662	0.658	0.607	0.628	0.626	0.607			
		P(W)	9	9	8.88	8.95	8.96	8.88			

Tableau 4.4 : Résultats de Méthodes MPPT de cas de T variable

Commentaire :

On remarque que dans les graphes de tension et de courant des techniques P&O et INC le système présente une augmentation de la tension et une diminution du courant lors du démarrage. Il montre également un temps de réponse lent avec une perturbation dans le régime transitoire et le régime permanent. En revanche, il est important de noter que le modèle logique flou, qui ne présente aucun décalage ni perturbation, offre une réponse rapide en cas de variation de température. À partir de ces courbes, il a été constaté que la puissance PV dans INC est plus stable que la puissance de P&O. En outre, la puissance de logique floue s'adapte mieux aux variations, car elle ne contient pas de dépassements ou de chutes de démarrage. Par ailleurs, elle est plus stable que la puissance de P&O et d'INC.

Interprétation :

On remarque que la température a un effet réversible sur la puissance, si la température est faible la puissance augment est sens inverse, Et le courant diminue légèrement et la tension largement tan que la température augmente, A partir de ça le panneau solaire produire une puissance élevée dans les environnements froids.

4.3.3 Variation d'Eclairage :

Nous avons testé le fonctionnement de système étudié dans les trois algorithmes sous un éclairage Variable et une température fixe comme illustrer dans la figure (4.30)

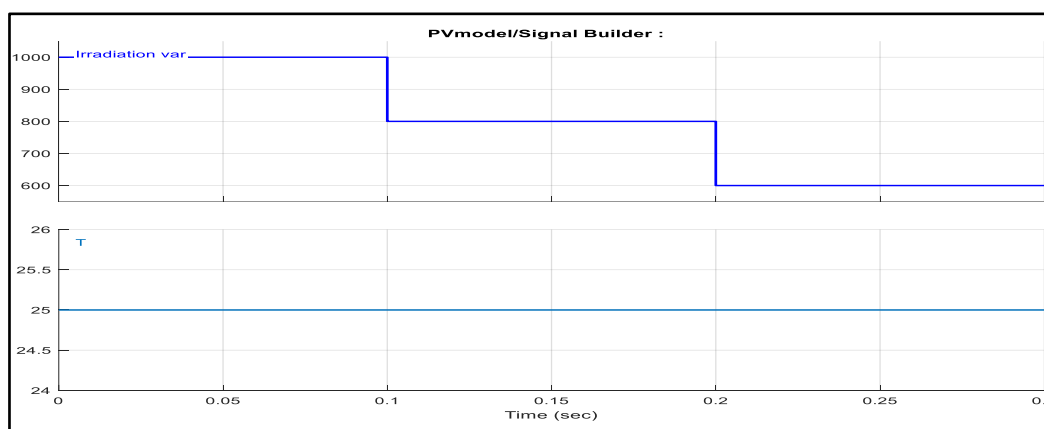


Figure 4.30 : Rayonnement et Température pour T constante et E variable

A. Algorithme P&O :

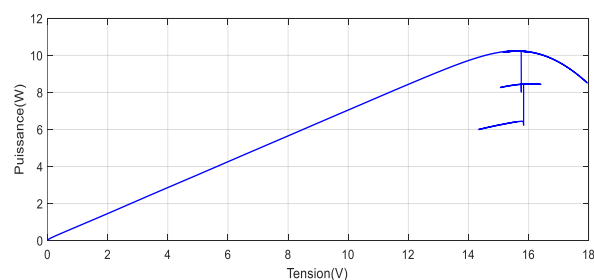


Figure 4.31 : Caractéristique P-V de méthode P&O pour le cas de T constante et E variable

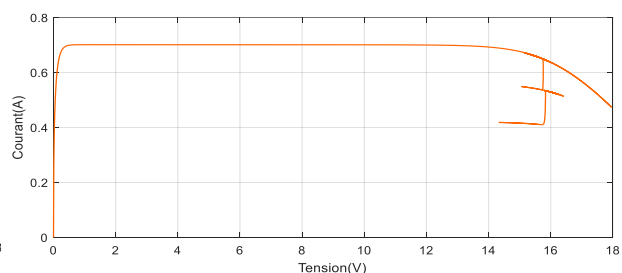


Figure 4.32 : Caractéristique I-V de méthode P&O pour le cas de T constante et E variable

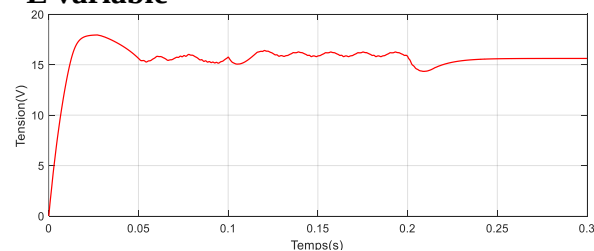


Figure 4.33 : Tension PV de méthode P&O pour le cas de T constante et E variable

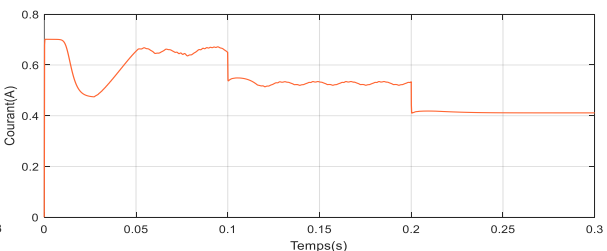


Figure 4.34 : Courant PV de méthode P&O pour le cas de T constante et E variable

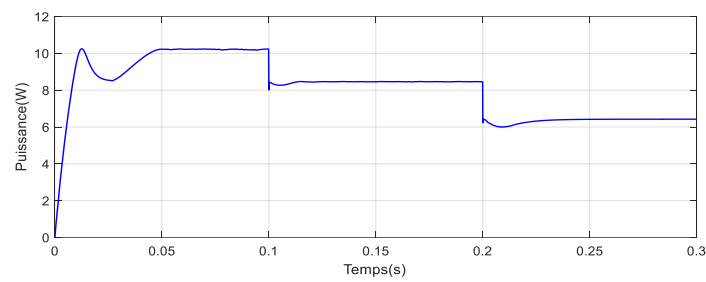


Figure 4.35 : Puissance PV de méthode P&O pour le cas de T constante et E variable

B. Algorithme INC :

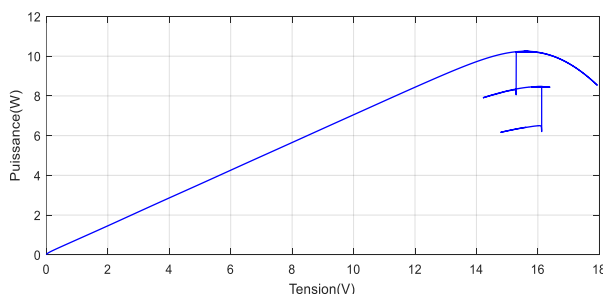


Figure 4.36 : Caractéristique P-V de méthode INC pour le cas de T constante et E variable

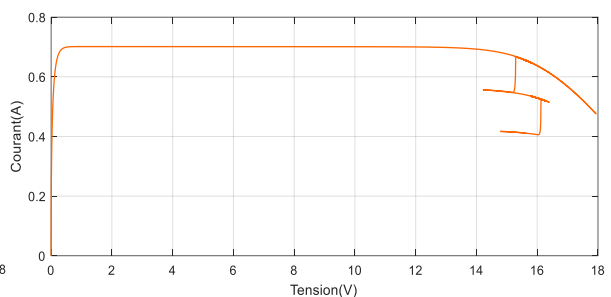


Figure 4.37 : Caractéristique I-V de méthode INC pour le cas de T constante et E variable

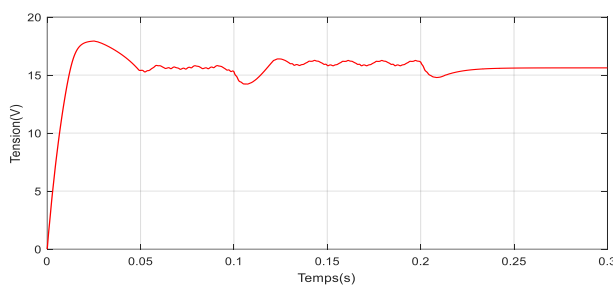


Figure 4.38 : Tension PV de méthode INC pour le cas de T constante et E variable

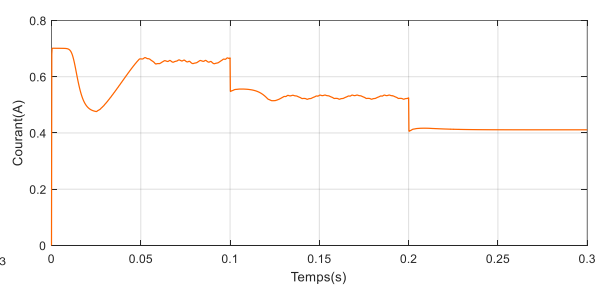


Figure 4.39 : Courant PV de méthode INC pour le cas de T constante et E variable

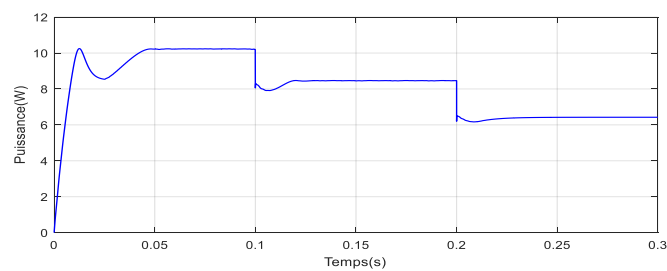


Figure 4.40 : Puissance PV de méthode INC pour le cas de T constante et E variable

C. Algorithme Logique floue :

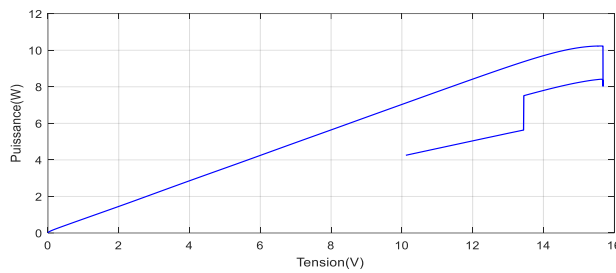


Figure 4.41 : Caractéristique P-V de méthode FLC pour le cas de T constante et E variable

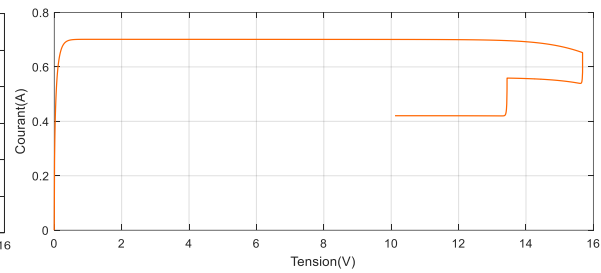


Figure 4.42 : Caractéristique I-V de méthode FLC pour le cas de T constante et E variable

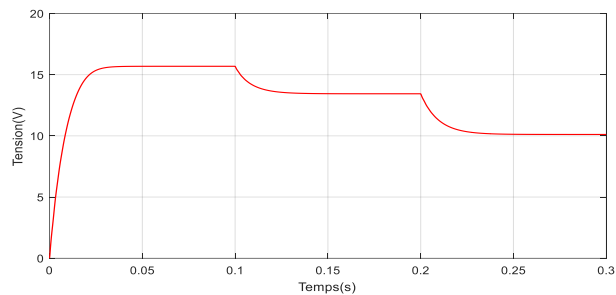


Figure 4.43 : Tension PV de méthode FLC pour le cas de T constante et E variable

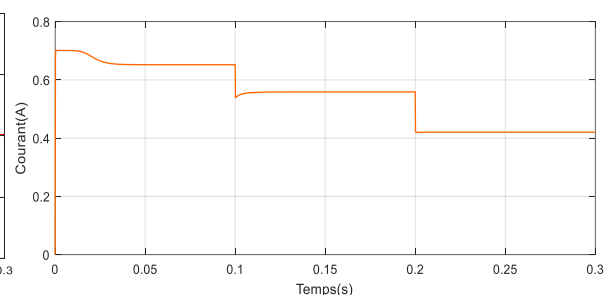


Figure 4.44 : Courant PV de méthode FLC pour le cas de T constante et E variable

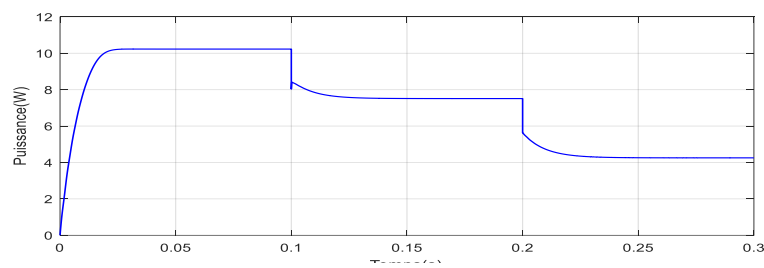


Figure 4.45: Puissance PV de méthode FLC pour le cas de T constante et E variable

Temps (s)	E(W/m ²)		Valeur maximale au régime permanent			Valeur minimale au régime permanent			Temps de réponse(s)		
			P&O	INC	FLC	P&O	INC	FLC	P&O	INC	FLC
0s – 0.1s	E=1000	V(V)	16.02	15.83	15.684	15.16	15.15	15.684	0.048	0.048	0.032
		I(A)	0.671	0.671	0.652	0.635	0.646	0.652			
		P(W)	10.234	10.234	10.232	10.185	10.175	10.232			
0.1s – 0.2s	E=800	V(V)	16.4	16.4	13.51	15.8	15.8	13.51	0.015	0.02	0.15
		I(A)	0.534	0.535	0.56	0.515	0.52	0.558			
		P(W)	8.468	8.46	7.5	8.434	8.43	7.5			
0.2s – 0.3s	T=600	V(V)	15.48	15.62	10.18	15.44	15.59	10.18	0.028	0.018	0.02
		I(A)	0.418	0.426	0.421	0.413	0.425	0.42			
		P(W)	4.62	6.42	4.26	4.57	6.4	4.26			

Tableau 4.5 : Résultats de Méthodes MPPT de cas de E variable

Commentaire :

On remarque que dans la tension et le courant les courbes de P&O est INC expérimente des oscillations dans le régime transitoire et des déplacements de tension et chute de courant dans le démarrage qui est plus noter dans P&O que INC, Avec un stabilité et réponse rapide dans les graphs de logique floue et par conséquent un Puissance plus stable sans oscillations dans le graph logique floue suivi par le graph de INC qui contienne des oscillations est un peu lente suivi par le graph P&O.

Interprétation :

On remarque que la puissance est proportionnelle avec l'éclairage qui si on diminue l'éclairage la puissance et la tension diminuent, Tandis que le courant diminue largement, A partir des résultats le panneau fonction bien dans les environnements avec un bon éclairage.

4.3.4 Variation de profile de charge :

Nous avons teste le fonctionnement de système étudié sous un éclairage et température fixe ($E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$) et un charge Variable comme illustrer dans la figure 4.46

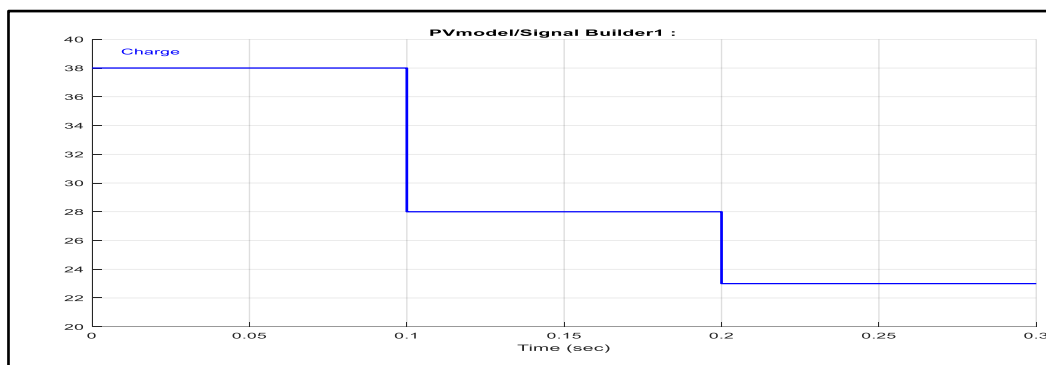


Figure 4.46 : Profil de la charge dans le cas (Rch=38, Rch=28, Rch=23)

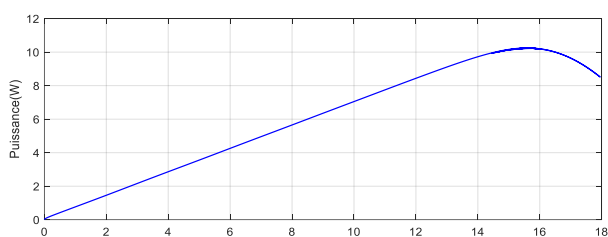
A. Algorithme P&O :

Figure 4.47 : Caractéristique P-V de méthode P&O pour le cas de STC avec R variable

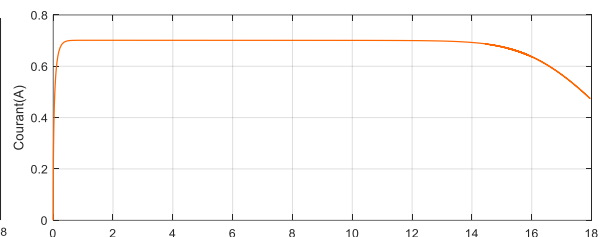


Figure 4.48 : Caractéristique I-V de méthode P&O pour le cas de STC et R variable

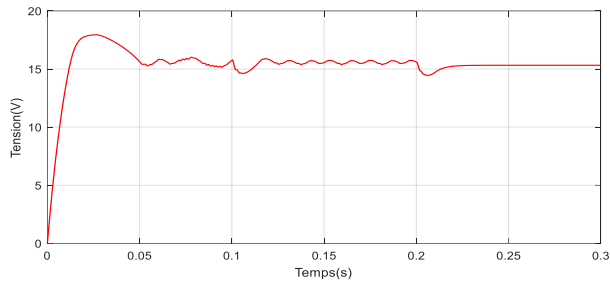


Figure 4.49 : Tension PV de méthode P&O pour le cas de STC avec R variable

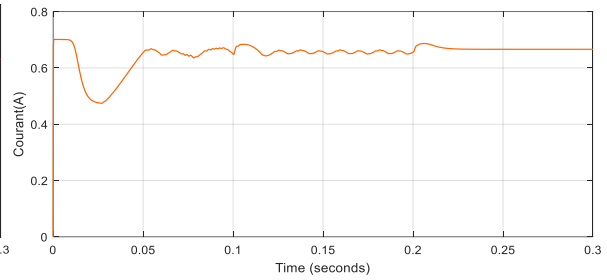


Figure 4.50 : Courant PV de méthode P&O pour le cas de STC avec R variable

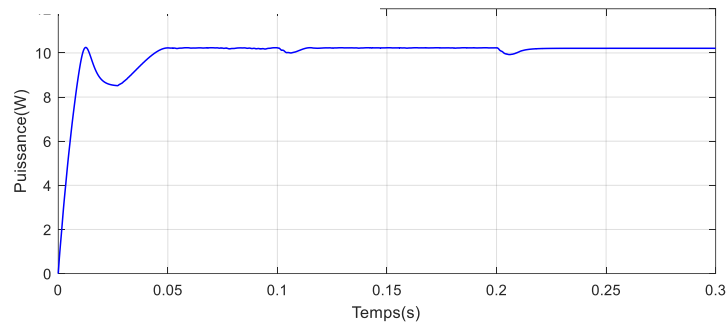


Figure 4.51 : Puissance PV de méthode P&O pour le cas de STC avec R variable

B. Algorithme INC :

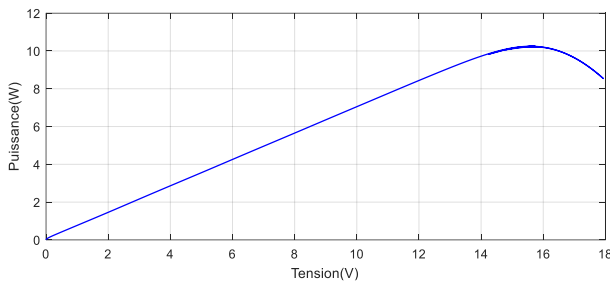


Figure 4.52 : Caractéristique P-V de méthode INC pour le cas de STC avec R variable

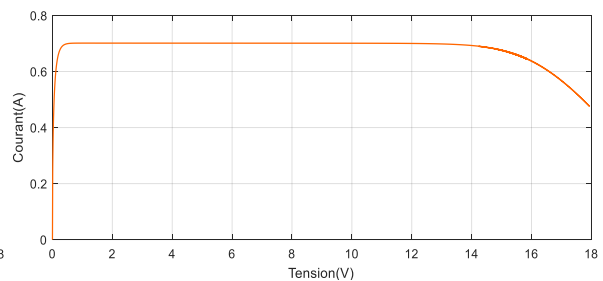


Figure 4.53 : Caractéristique I-V de méthode INC pour le cas de STC avec R variable

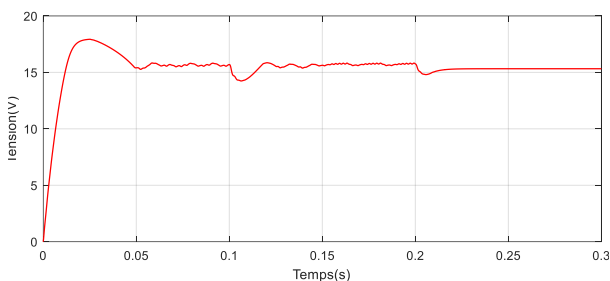


Figure 4.54 : Tension PV de méthode INC pour le cas de STC avec R variable

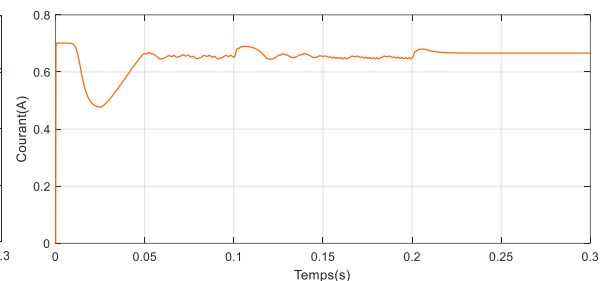
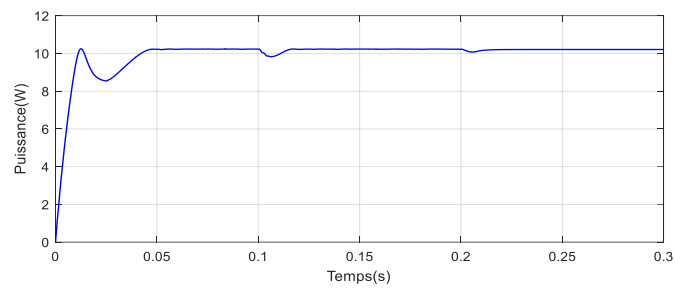
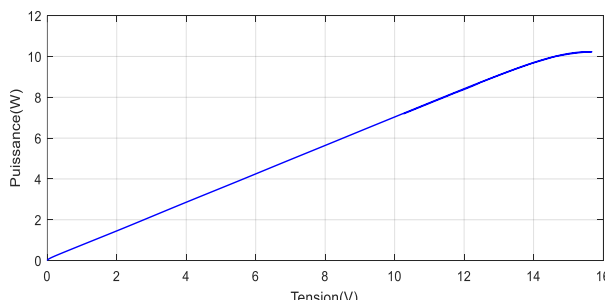


Figure 4.55 : Courant PV de méthode INC pour le cas de STC avec R variable

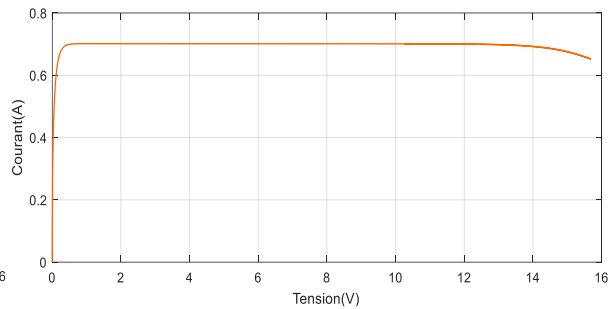


**Figure 4.56 : Puissance PV de méthode INC
pour le cas de STC avec R variable**

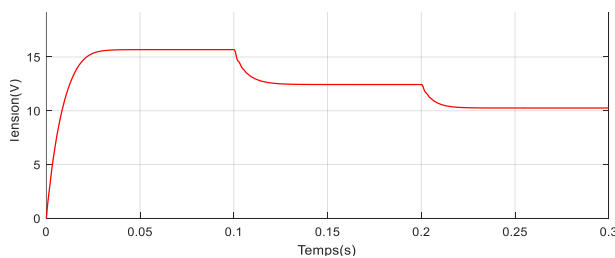
C. Algorithme Logique floue :



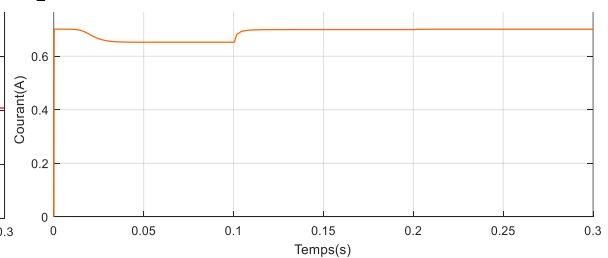
**Figure 4.57 : Caractéristique P-V de méthode
FLC pour le cas de STC avec R variable**



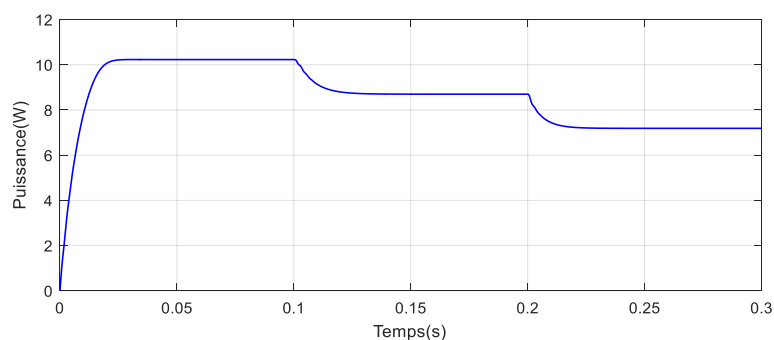
**Figure 4.58 : Caractéristique I-V de méthode FLC
pour le cas de STC avec R variable**



**Figure 4.59 : Tension PV de méthode FLC
pour le cas de STC avec R variable**



**Figure 4.60 : Courant PV de méthode FLC
pour le cas de STC avec R variable**



**Figure 4.61: Puissance PV de méthode FLC
pour le cas de STC avec R variable**

Temps (s)	Rch(Ω)		Valeur maximale au régime permanent			Valeur minimale au régime permanent			Temps de réponse(s)		
			P&O	INC	FLC	P&O	INC	FLC	P&O	INC	FLC
0s – 0.1s	Rch=38	V(V)	16.01	15.83	15.684	15.16	15.15	15.684	0.049	0.048	0.032
		I(A)	0.671	0.671	0.652	0.635	0.646	0.652			
		P(W)	10.234	10.234	10.232	10.185	10.175	10.232			
0.1s – 0.2s	Rch=25	V (V)	15.89	15,72	12.436	15.38	15.4	12.436	0.015	0.016	0.12
		I(A)	0.664	0.6634	0.699	0.65	0.646	0.699			
		P(W)	10.231	10.239	8.7	10.216	10.219	8.7			
0.2s – 0.3s	Rch=23	V(V)	15.75	15.3	10.18	15.38	15.25	10.18	0.003	0.012	0.025
		I(A)	0.418	0.668	0.699	0.413	0.667	0.699			
		P(W)	10.216	10.23	7.19	10.234	10.26	7.19			

Tableau 4.6 : Résultats de Méthodes MPPT de cas de R variable

Commentaire :

On remarque que dans les cas de INC et P&O le courant est la tension ne varier pas si on change la valeur de la charge par rapport dans la logique floue qui expièrent une augmentation légère de courant et un diminuait de tension qui par résultats donner un courbe de puissance fixe dans les algorithmes P&O et INC et une courbe de puissance qui diminue à partir de charge dans l'algorithme logique floue.

Interprétation :

On remarque que la charge a un effet proportionnel avec la puissance, qui la diminution de valeur de la charge résulté une augmentation de courant et une diminution de la tension qui par conséquent diminue la puissance de sortie de PV tan que on n'a pas dépassera la valeur de la charge supporter par le panneau PV.

4.4 Conclusion :

Ce chapitre présent la simulation de technique de contrôle MPPT avec Trois différents algorithmes : perturbation et observation, Incrémentation de conductance, logique floue pour un système photovoltaïque implémenté sur MATLAB/Simulink.

Ces algorithmes permettent de suivre le point de puissance maximale en ajustant les performances d'un système PV en fonction des variations des conditions atmosphériques et variation de la charge

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie solaire est l'une des énergies qui intéressent de nombreux pays en raison des changements climatiques et naturels à travers le monde. Chaque pays peut exploiter cette énergie grâce à ses propres équipements. Elle est désormais considérée comme l'une des énergies. Celle qui peut répondre à la demande mondiale est l'énergie solaire photovoltaïque. Il s'agit d'une énergie propre, silencieuse et renouvelable car la source est disponible et gratuite.

Le but de ce travail est l'étude et comparaison de la modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adaptatif au moyen de technique de suiveur de puissance (commande MPPT) et l'efficacité, stabilité dans les variations des conditions atmosphériques est conditions de récepteur utilisant la technique de perturbation et observation, Incrémentation de la conductance et le logique floue qui est le bas de notre recherche.

Pour ce faire nous avons commencé par une généralité sur les énergies renouvelables est une introduction sur l'énergie solaire et système PV en présentant l'effet photovoltaïque et les différents types des cellules et panneaux photovoltaïques avec ses caractéristiques, enfin les différents types de système PV avec ces avantages ces inconvénients.

Dans un second temps, nous avons réalisé une modélisation de module d'un système panneau solaire et d'un convertisseur DC-DC pour la création d'un système PV utilisable dans Simulink sous forme de schémas blocks.

La modélisation de panneau est réalisée en utilisant des équations mathématiques qui décrivent le comportement électrique de panneau PV à partir des modules de cellule photovoltaïque et des diodes, concernant le Hacheur Boost nous avons effectué une modélisation mathématique en utilisant des équations mathématiques qui décrivent les caractéristiques électriques de convertisseur.

Après la modélisation on a présenté le principe de technique MPPT basé sur les caractéristiques I-V et P-V qui aidera à identifier le Point de puissance maximale, après on donne des principes des algorithmes P&O et INC avec ses organigrammes de fonctionnement, au dernier on présente une base sur la logique floue et sa base de fonctionnement est la structure de le contrôleur floue et les règles utilisées pour la commande MPPT.

Dernièrement, on simule le système PV au base commande MPPT dans les trois Algorithmes et on analyse et compare les résultats de simulation dans les cas de variation de la température, variation d'éclairement et variation de charge pour réaliser le meilleur technique MPPT.

On conclut, selon les résultats obtenus on réalise que dans les cas standards et cas varier l'algorithme de la logique floue donner des résultats efficaces robuste et rapide que les algorithmes de P&O et INC qui contiennent des oscillations et déplacement qui effectuent la puissance maximale extraite par le PV, par conséquent ont conclu que pour un système PV la technique MPPT améliorera considérablement la puissance de Générateur photovoltaïque notamment lors de l'utilisation de l'algorithme de logique floue.

Références et bibliographiques

- [1] Université d'Ouargla. (n.d.). Dspace repository.
[https://dspace.univouargla.dz/jspui/handle/123456789/30861.\(05/05/2025\)](https://dspace.univouargla.dz/jspui/handle/123456789/30861.(05/05/2025))
- [2] Chomsuwan, K., Prisuwanna, P., & Monyakul, V. Photovoltaic grid-connected inverter using two-switch buck-boost converter. In Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 1527–1530). IEEE. (2002).
- [3] Waszynek, O. Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-102*, 3031–3037. (1983).
- [4] Hart, G. W., Branz, H. M., & Cox, C. H. Experimental tests of open-loop maximum power-point tracking techniques for photovoltaic arrays. Solar Cells, 13, 185–195. (1984).
- [5] Enslin, J. H. R., & Snyman, D. B. Simplified feed-forward control of the maximum power point in PV installations. In Proceedings of the 1992 International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation (Vol. 541, pp. 548–553). IEEE. (1992).
- [6] Bodur, M., & Ermis, M. Maximum power point tracking for low power photovoltaic solar panels. In Proceedings of the 7th Mediterranean Electrotechnical Conference (Vol. 752, pp. 758–761). IEEE. (1994).
- [7] Matsui, M., Kitano, T., De-hong, X., & Zhong-qing, Y. A new maximum photovoltaic power tracking control scheme based on power equilibrium at DC link. In *Conference Record of the 1999 IEEE Thirty-Fourth IAS Annual Meeting* (Vol. 802, pp. 804–809). IEEE. (1999).
- [8] Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H., & Shamsudin, A. Maximum power point tracking for PV system under partial shading condition via particle swarm optimization. In 2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (pp. 5–9). IEEE. (2011).
- [9] Bessemoulin, P., & Olivieri, J. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. La Météorologie, 8(31). (2000).
- [10] Alayat, M., & Boucetta, I. Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents [Master's thesis, Université Badji Mokhtar Annaba]. (2017).
- [11] Chouikhi, W. F. Réalisation d'une commande buck-boost PV [Master's thesis, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen]. (2017).
- [12] Lasnier, F & Ang, T. G Photovoltaic engineering handbook. IOP Publishing (1980).
- [13] Ketfi, N., & Dahmani, R. Commande non linéaire d'un système d'énergie renouvelable [Master's thesis, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arréridj]. (2020).

- [14] Zaoui, I., & Bedjag, T. Etude des différentes commandes MPPT pour générateur photovoltaïque [Master's thesis, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued]. (2022).
- [15] Tayebi, N. Implémentation des algorithmes de poursuite appliqués au système photovoltaïque par Arduino [Master's thesis, Université de Ghardaïa]. (2019).
- [16] Zaoui, I., & Bedjag, T. Etude des différentes commandes MPPT pour générateur photovoltaïque [Master's thesis, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued]. (2022).
- [17] Boxwell, M.. Solar electricity handbook (2019 ed.). Greenstream Publishing. (2019)
- [18] Boxwell, M. Solar electricity handbook (2021 ed.). Greenstream Publishing. (2021).
- [19] U.S. Energy Information Agency. United States electricity profile: Summary statistics for supply and disposition of electricity, 1990–2012. (2012).
- [20] Helali, K. Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative [Master's thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou]. (2012).
- [21] Danoune, M. B., Djafour, A., & Gougui, A. Characterization of photovoltaic panel using single diode and double diode models: A comparative study with experimental validation. The 5th International Seminar of New and Renewable Energies, Ghardaïa. (2018).
- [22] Gergaud, O. Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur [Doctoral thesis, École Normale Supérieure de Cachan]. (2009)
- [23] Boucerredj, L. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque par la commande MPPT. Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism. (2021).
- [24] Jiang, X. Étude comparative de structures de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique moyenne tension [Master's thesis, Université du Québec à Trois-Rivières]. (2019).
- [25] Sahour, G. Etude et modélisation d'un panneau photovoltaïque [Master's thesis, Université 8 Mai 1945 – Guelma]. (2021).
- [26] Benadel, F. Etude et simulation d'une commande MPPT pour système PV [Master's thesis, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila]. (2015).
- [27] Bilbao, A. Réalisation de commandes MPPT numériques [Diplôme d'ingénieur technique industriel]. (2006).
- [28] Chouikhi, W. F. Réalisation d'une commande Buck-Boost PV [Master's thesis, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen]. (2017).
- [29] Hart, D. W. (2010). Power electronics. McGraw-Hill.
- [30] Hashim, E. T., & Abbood, A. A. Temperature effect on photovoltaic modules power drop. *Al-Khawarizmi Engineering Journal, 11*, 62–73. (2015).

- [31] Esram, T., & Chapman, P. L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439–449. (2007).
- [32] Deghfel, S., Badoud, A. E., Merahi, F., Bajaj, M., & Zaitsev, I. A new intelligently optimized model reference adaptive controller using GA and WOA based MPPT techniques for photovoltaic systems. *Nature Reports*. (2024).
- [33] Motahhir, S., El Hammoumi, A., & El Ghzizal, A. The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118983. (2020).
- [34] Issaadi, S. Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de neurones [Magister thesis, Université Abderrahmane Mira - Béjaia]. (2006).
- [35] Guisser, M. (n.d.). Stratégies de commande pour l'optimisation des systèmes photovoltaïques autonomes et connectés au réseau [Report]. École Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique (ENSEM) de Casablanca. 2015.
- [36] Tati, F., & Lamoudi, O. (n.d.). Etude et réalisation d'un système photovoltaïque optimisé par logique floue [Master's thesis, Université Kasdi Merbah Ouargla]. 2018.
- [37] Atchoum, S. Réalisation d'un convertisseur Buck-MPPT [Master's thesis, Université Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi]. (2017).
- [38] Das, S. K., Islam, M. R., & Xu, W. Advances in control techniques for smart grid applications (pp. 201–266). (2022).
- [39] Abouzeid, A. F., Eleraky, H., Kalas, A., Rizk, R., Elsakka, M. M., & Refaat, A. (n.d.). Experimental validation of a low-cost maximum power point tracking technique based on artificial neural network for photovoltaic systems. *Scientific Reports*. (2024).
- [40] Sadouni, R. Commande intelligente [Course notes]. Université de Ghardaïa. (2019).
- [41] Gaied, B. Amélioration de l'algorithme MPPT pour un système PV par l'intégration des nouvelles techniques basées sur l'intelligence artificielle [Doctoral thesis, École de Technologie Supérieure, Université du Québec]. (2022).
- [42] Benmoussa, A., Abada, A., & Kara, F. Commande adaptative floue décentralisée pour une classe des systèmes non linéaires incertains [Master's thesis, Université Kasdi Merbah Ouargla] (2019).
- [43] Aashoor, F. A. O. (2015). Maximum power point tracking techniques for photovoltaic water pumping system [Doctoral thesis, University of Bath].
- [44] Soria, Z., & Cheymaa, M. (n.d.). Etude et simulation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique [Master's thesis, Université Mohamed Boudiaf – M'Sila] (2017).

