

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : **Electrotechnique**

Spécialité : **Energies Renouvelables en Electrotechnique**

Par : - **KHENTACHE Oussama**

- **BOUGHIDA Mohammed Cherif**

Sujet

Simulation de la commande MPPT à base d'une technique intelligente pour un système photovoltaïque

Soutenu publiquement, le 30 /06 /2024, devant le jury composé de :

M. CHOUDAR Adel

MCB

Univ-BBA

Président

M. AISSA Oualid

MCA

Univ-BBA

Examinateur

M. TALHAOUI Hicham

Pr

Univ-BBA

Encadrant

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Nous remercions (الله عز وجل) de nous avoir accordé la volonté, la détermination et la patience tout au long de notre parcours académique, et grâce à lui nous avons pu mener à bien cet humble travail. Nous remercions également le Pr. Talhaoui Hicham pour son suivi continu tout au long de cette période et il nous a également beaucoup aidé en nous fournissant des informations, des conseils et des orientations.

Nous tenons également à remercier tous les enseignants qui ont d'ailleurs contribué à notre enseignement, ainsi que tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier tous les amis et la famille qui nous ont soutenus.

DÉDICACES

Je dédie ce travail à mes chers parents.

KHENTACHE Oussama

Je dédie cet humble travail à mon père (رحمة الله عليه), à ma mère bien-aimée, au professeur Talhaoui Hicham, et à tous ceux qui nous ont aidés sans exception.

BOUGHIDA Mohammed Cherif

SOMMAIRE

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Liste des abréviations	
Introduction générale	01
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUE	
I.1 Introduction	02
I.2 Énergie solaire thermique	02
I.3 Énergie solaire photovoltaïque	03
I.4 Énergie photovoltaïque dans le monde	03
I.5 Conversion photovoltaïque de l'énergie solaire	04
I.6 Générateur photovoltaïque	05
I.7 Systèmes photovoltaïques	06
I.7.1 Systèmes photovoltaïques autonomes (avec stockage)	06
I.7.2 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	06
I.7.3 Systèmes photovoltaïques hybrides	07
I.8 Cellule photovoltaïque	08
I.8.1 Différents types de technologies de cellules photovoltaïque	08
I.8.2 Module photovoltaïque	10
I.8.3 Méthodes de connexion des cellules solaires	10
I.9 Modélisation d'un module photovoltaïque	12
I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	14
I.10.1 Avantages	14
I.10.2 Inconvénients	15
I.11 Conclusion	15

CHAPITRE II : COMMANDE MPPT (P&O ET LOGIQUE FLOUE)

II.1 Introduction	16
II.2 Connexion directe entre le générateur photovoltaïque et la charge	16
II.3 Convertisseurs DC/DC (Hacheur)	17
II.4 Types des convertisseurs DC-DC (Hacheur)	18
II.4.1 Convertisseur dévolteur (Buck)	18
II.4.2 Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)	18
II.4.3 Convertisseur survolteur (Boost)	19
II.5 Commande MPPT	21
II.6 Méthodes MPPT	21
II.6.1 Perturbation et observation (P&O)	21
II.6.2 Commande par logique floue (fuzzy)	23
II.7 Conclusion	26

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Introduction	27
III.2 Caractéristiques du module PV	27
III.3 Résultats de simulation	27
III.3.1 Simulation du panneau PV	27
III.3.2 Commandes MPPT	30
III.3.2.1 Commande P&O	31
III.3.2.2 Commande MPPT par logique floue	36
III.3.2.3 Étude comparative	40
III.4 Conclusion	43
Conclusion générale	44
Références Bibliographiques	
Résumé	

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

Figure I.1 Schéma de principe de l'énergie solaire thermique	03
Figure I.2 Évolution de la capacité installée d'énergie solaire photovoltaïque dans le monde de 2000 à 2022	04
Figure I.3 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque	05
Figure I.4 Générateur photovoltaïque	05
Figure I.5 Schéma d'un système PV autonome avec stockage	06
Figure I.6 Schéma d'un système PV connecté au réseau	07
Figure I.7 Schéma d'un système PV hybride	07
Figure I.8 Cellules en silicium monocristallin	08
Figure I.9 Cellules en silicium poly-cristallin	09
Figure I.10 Cellule au silicium amorphe (couche mince)	09
Figure I.11 Association des cellules pour obtenir un module photovoltaïque	10
Figure I.12 Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série	11
Figure I.13 Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle	12
Figure I.14 Modèle équivalent d'une cellule PV	13

CHAPITRE II : COMMANDE MPPT (P&O ET LOGIQUE FLOUE)

Figure II.1 Couplage direct générateur PV-charge	17
Figure II.2 Convertisseur DC/DC	17
Figure II.3 Convertisseur Buck	18
Figure II.4 Convertisseur Buck-Boost	18
Figure II.5 Schéma de base du convertisseur Boost a) structure globale, b) structure avec interrupteur fermé, c) structure avec interrupteur ouvert	19
Figure II.6 Description du système photovoltaïque	21
Figure II.7 Algorithme de P&O classique	22
Figure II.8 Recherche du PPM par la méthode (P&O)	23
Figure II.9 Structure de base d'une commande utilisant la logique floue	24
Figure II.10 Fonctions d'appartenance : l'entrée $E(K)$ et $\Delta E(K)$, la sortie $\alpha(K)$	25

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Figure III.1 Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V	28
Figure III.2 Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V	28
Figure III.3 Effet de la température sur la caractéristique P-V	29
Figure III.4 Effet de la température sur la caractéristique I-V	29
Figure III.5 Schéma du système PV avec commande MPPT	30
Figure III.6 Résultats de simulation de la commande MPPT (P&O) lorsque l'éclairement est variable : (a) sortie du panneau PV, (b) sortie du convertisseur, (c) rapport cyclique	32
Figure III.7 Résultats de simulation de la commande MPPT (P&O) à des températures variables : (a) sortie du panneau PV, (b) sortie du convertisseur, (c) rapport cyclique	34
Figure III.8 Résultats de simulation de la commande MPPT (P&O) lors d'un changement de charge : (a) puissance du panneau PV, (b) rapport cyclique	35
Figure III.9 Résultats de simulation de la commande MPPT (logique floue) lorsque l'éclairement est variable : (a) sortie du panneau PV, (b) sortie du convertisseur, (c) rapport cyclique	37
Figure III.10 Résultats de simulation de la commande MPPT (logique floue) à des températures variables : (a) sortie du panneau PV, (b) sortie du convertisseur, (c) rapport cyclique	38
Figure III.11 Résultats de simulation de la commande MPPT (logique floue) lors d'un changement de charge : (a) puissance du panneau PV, (b) rapport cyclique	39
Figure III.12 Évaluation de l'efficacité de la commande P&O et de la commande par logique floue	41
Figure III.13 Évaluation de l'efficacité de la commande P&O et de la commande par logique floue lorsque l'éclairement est variable	41
Figure III.14 Évaluation de l'efficacité de la commande P&O et de la commande par logique floue à des températures variables	42
Figure III.15 Évaluation de l'efficacité de la commande P&O et de la commande par logique floue lors d'un changement de charge	42

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

Tableau I.1 Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques	9
--	---

CHAPITRE II : COMMANDE MPPT (P&O ET LOGIQUE FLOUE)

Tableau II.1 Table de vérité (Base de règles)	26
---	----

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau III.1 Caractéristiques du module PWX 500 (49W)	27
--	----

LISTE DES SYMBOLES

V_{sco}	Tension de circuit ouvert du générateur
V_{co}	Tension de circuit ouvert d'une cellule
I_{sc}	Courant de court-circuit du générateur
I_{cc}	Courant de court- circuit d'une cellule
I_{ph}	Courant généré par le photo-courant
I_p	Courant qui circule dans la résistance parallèle
I_0	Courant circulant dans la diode
I_s	Courant de saturation de la diode en ampère (A)
q	Charge d'électrons (1.6×10^{-19} C)
k	Constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J / K)
T_c	Température de cellule en Kelvin (K)
A	Facteur d'idéalité de la jonction
R_s	Résistance série (Ω)
R_p	Résistance parallèle (Ω)
I_{sc}	Courant de court-circuit de la cellule à 25 ° C et 1000W / m ²
K_i	Coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule
T_{ref}	Température de référence de la cellule, en Kelvin (K) (= 25C ° + 273)
G	Irradiation sur la surface de la cellule (W / m ²)
α	Rapport cyclique
T_d	Période de découpage
L	Inductance
C_1	Condensateur d'entrée
C_2	Condensateur de sortie
V_{pv}	Tension du panneau photovoltaïque
P_{pv}	Puissance du panneau photovoltaïque
I_{pv}	Courant du panneau photovoltaïque
P_0	Puissance de charge
V_0	Tension de charge

LISTE DES ABRÉVIATIONS

GPV	Générateur photovoltaïque
DC/AC	Courant continu/Courant alternatif
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	Perturbation et Observation
DC-DC	Courant continu-Courant continu
PPM	Point de puissance maximale
LF	Logique floue
FLC	Fuzzy logic control
T	Température
Ir	Éclairement
R	Charge (résistance)

Introduction Générale

Introduction générale

Actuellement, les ressources fossiles fournissent une part importante de la demande énergétique mondiale. Ces ressources fossiles sont toutefois limitées et leur utilisation entraîne une dégradation de l'environnement. Certains pays développés se sont orientés vers l'énergie nucléaire, mais celle-ci reste dangereuse à utiliser, comme l'indique la référence [1]. En effet, la croissance de la demande énergétique mondiale, l'épuisement inévitable des ressources fossiles et pour assurer la durabilité et de protéger l'environnement, les chercheurs se sont intéressés au développement et à la recherche de nouvelles sources d'énergie renouvelable [1].

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie propres qui ne nuisent pas à l'environnement et ne s'épuisent pas avec le temps. Ces sources d'énergie renouvelable les plus courantes sont le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et l'énergie géothermique. L'énergie solaire est considérée comme la plus utilisée. En raison des caractéristiques électriques non linéaires des cellules photovoltaïques (PVs) (servent à produire de l'énergie), des techniques de poursuite du point de puissance maximale (en anglais : Maximum Power Point Tracking (MPPT)) ont été proposées pour améliorer leur efficacité [2].

Un grand nombre d'algorithmes des commandes MPPT ont été développés ces dernières années, ce qui permet aux panneaux photovoltaïques de fonctionner à leur capacité maximale malgré les changements climatiques. Chaque technique MPPT présente ses propres avantages et inconvénients. Elles peuvent être divisées en deux types : les techniques des commandes traditionnelles telles que P&O et les techniques intelligentes telles que la logique floue [3].

Dans ce mémoire, notre travail s'articule principalement autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des informations générales sur l'énergie solaire et se concentrera plus particulièrement sur l'énergie PV et la modélisation des panneaux PVs.

Le deuxième chapitre traite du MPPT dans la catégorie classique (P&O) et intelligente (logique floue) associé à un convertisseur DC/DC (Boost), où des informations sur ces algorithmes, les convertisseurs DC/DC et leur principe de fonctionnement seront présentés.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation d'un système PV utilisant les commandes MPPTs (P&O et de logique floue) en fonction des changements climatiques et des variations de charge. Une comparaison entre ces deux commandes sera présentée afin de déterminer laquelle est la meilleure.

À la fin, une conclusion générale sera présentée avec des perspectives.

Chapitre I

Généralités sur les panneaux
photovoltaïques

I.1 Introduction

L'électricité est considérée comme l'une des meilleures, ou plutôt la meilleure source d'énergie actuelle. Aujourd'hui, environ 80 % de l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz, etc.) ou des combustibles de fission (nucléaire), qui sont des ressources épuisables et polluantes. Par ailleurs, pour le développement durable, les énergies renouvelables sont des ressources propres et inépuisables, et elles sont donc en mesure de répondre à la plupart de nos besoins à long terme [4].

Les énergies renouvelables ont plusieurs sources, notamment :

- énergie solaire ;
- énergie éolienne ;
- hydroélectricité ;
- énergie géothermique ;
- biomasse énergie.

L'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées et les plus courantes en raison de la disponibilité de la lumière du soleil et de sa facilité d'utilisation par rapport à d'autres énergies. Dans ce chapitre, nous allons donc nous consacrer à l'énergie solaire, et plus particulièrement à l'énergie photovoltaïque, en expliquant ses composants et son fonctionnement. À la fin de ce chapitre, nous modéliserons un panneau solaire et nous mentionnerons les avantages et les inconvénients de l'utilisation de ce type d'énergie.

I.2 Énergie solaire thermique

L'énergie thermique est produite à l'aide de panneaux sombres. La chaleur du soleil peut également être transformée en vapeur, qui à son tour est convertie en électricité [5].

L'énergie solaire thermique est l'énergie idéale pour répondre aux besoins thermiques à des températures moyennes (inférieures à 80°C), notamment pour faire fonctionner les réseaux de chauffage et d'eau chaude des habitations, des usines et de divers autres bâtiments pour répondre aux besoins des processus industriels [6].

La figure (I.1) représente un diagramme schématique de l'utilisation de l'énergie solaire thermique à la maison.

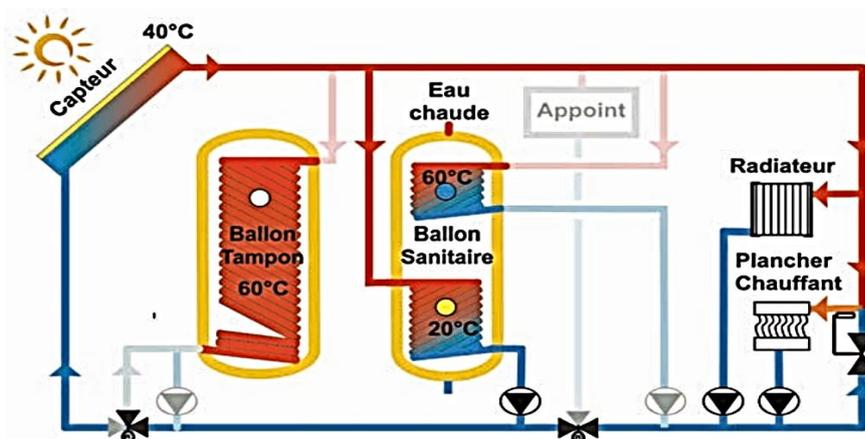


Figure I.1 Schéma de principe de l'énergie solaire thermique [6]

I.3 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est produite en convertissant directement une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cela est dû à une cellule photovoltaïque qui produit de l'électricité lorsque sa surface est exposée à la lumière [7].

La tension de sortie peut varier en fonction du matériau utilisé pour fabriquer la cellule. La combinaison de plusieurs systèmes PV en série/parallèle crée un groupe photovoltaïque [7].

I.4 Énergie photovoltaïque dans le monde

En 2007, les installations photovoltaïques mondiales ont atteint le niveau record de 5,95 GW, et l'année suivante a connu une croissance de 110 %. La Chine est devenue le plus utilisant de l'énergie solaire photovoltaïque au monde avec 48 %. De même l'Inde et les États-Unis ont atteint le même pourcentage. Le pourcentage est d'environ (12,5 % pour l'Amérique et 10 % pour l'Inde). Selon l'Agence internationale de l'énergie (En anglais : International Energy Agency (IEA)), l'énergie solaire représentera 11 % de la production mondiale d'électricité d'ici à 2050, et l'électricité solaire contribuera à environ 20 % de l'approvisionnement énergétique mondial d'ici à 2050, et à 60 % d'ici à 2100 [8].

La figure (I.2) représente la capacité d'énergie solaire photovoltaïque installée dans le monde entre 2000 et 2022.

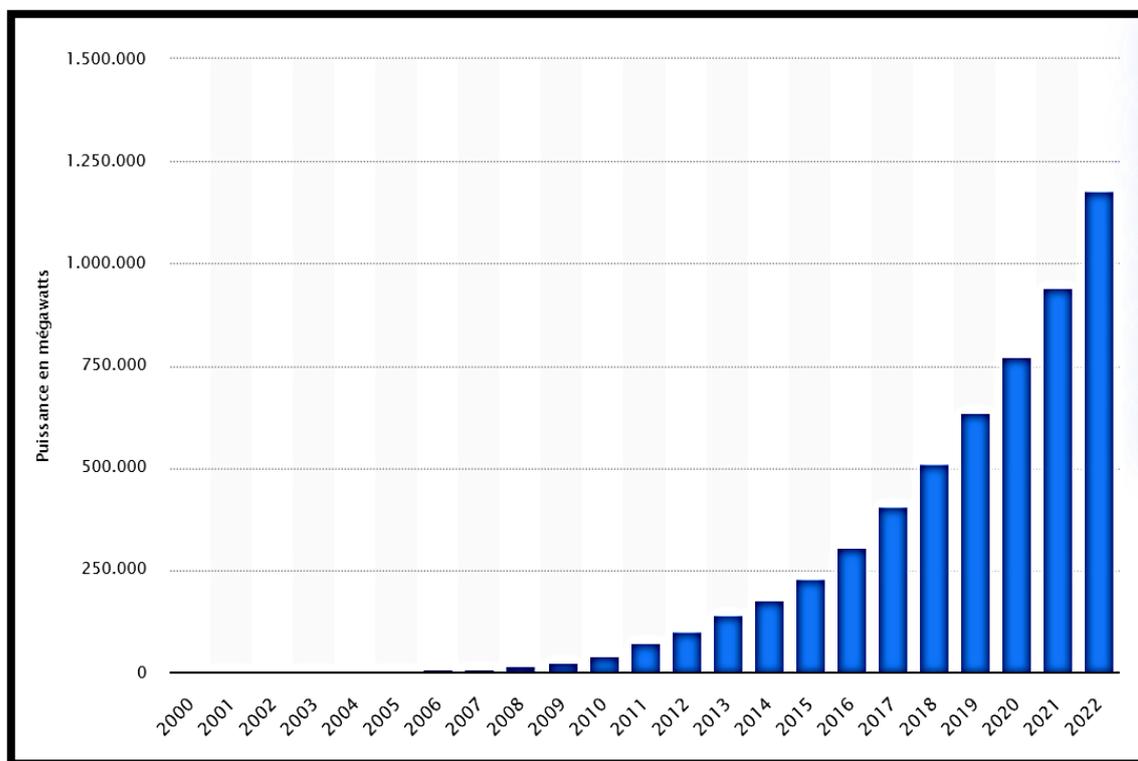


Figure I.2 Évolution de la capacité installée d'énergie solaire photovoltaïque dans le monde de 2000 à 2022 [9]

I.5 Conversion photovoltaïque de l'énergie solaire

Un panneau solaire est un groupe de cellules photovoltaïques connectées en parallèle ou en série, et la cellule photovoltaïque est constituée de matériaux semi-conducteurs dopés P (manque d'électrons) et (N) (excès d'électrons) dont la jonction de type (P-N) permet aux électrons excédentaires de la zone N de traverser la jonction et d'occuper les trous de la zone (P). Ainsi, lorsque la lumière frappe la surface (dopée N) d'une cellule photovoltaïque, les photons constituant cette lumière communiquent leur énergie aux atomes du matériau en libérant les électrons des atomes qui génèrent ainsi des charges (N) (les électrons) et des charges (P) (les trous). Or le déplacement d'électrons (créé par l'énergie des photons) est synonyme de production d'électricité. Pour une photopile, la production d'électricité est liée à la production d'électrons (et de trous) par les photons de la lumière qui éclaire le dispositif. Plus de photons frappent la cellule, plus la quantité d'électricité produite est importante. Pour un éclairage donné, cette quantité dépend du rendement de conversion de la photopile (énergie produite/énergie reçue) [10].

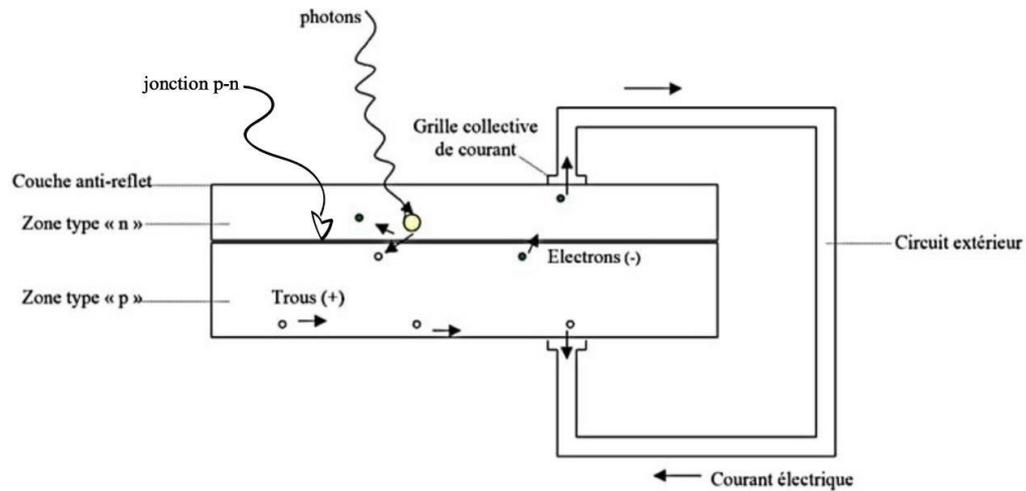


Figure I.3 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque [10]

I.6 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque (GPV) produit de l'électricité en convertissant la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules solaires photovoltaïques. Ces cellules sont généralement constituées de silicium. Elles sont reliées entre elles pour former un panneau solaire. Les panneaux solaires peuvent également être connectés en série ou en parallèle, selon les besoins de l'utilisateur (Figure I.4).

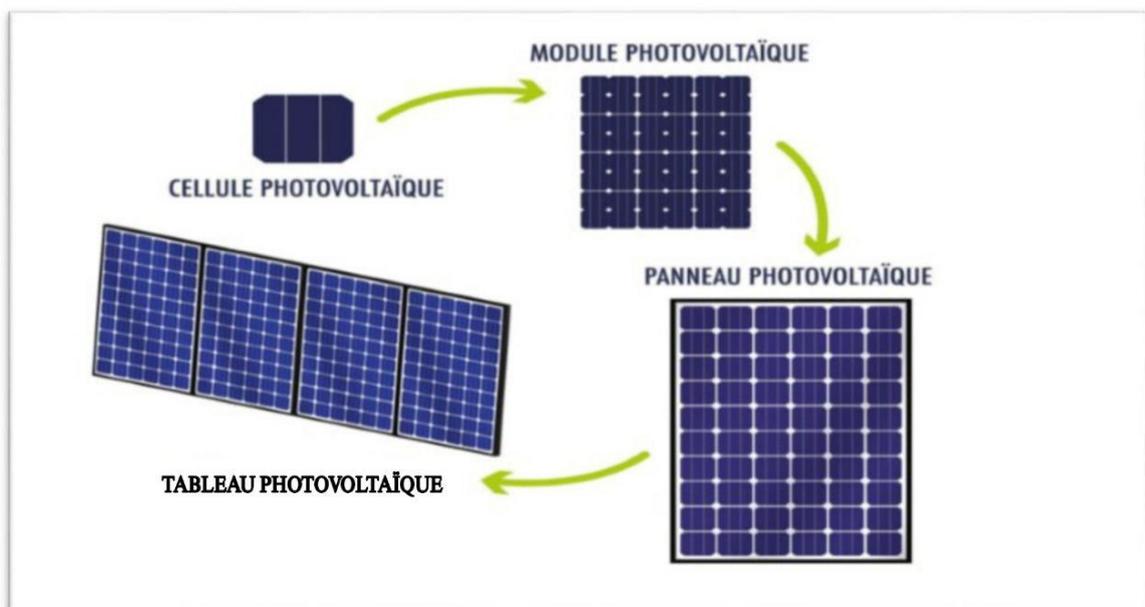


Figure I.4 Générateur photovoltaïque [11]

I.7 Systèmes photovoltaïques

I.7.1 Systèmes photovoltaïques autonomes (avec stockage)

Ce système est généralement utilisé dans les zones isolées où le réseau électrique n'est pas disponible, où il stocke l'énergie produite et la réutilise ultérieurement [12].

Ces systèmes consistent généralement en des panneaux photovoltaïques connectés à des systèmes de stockage (batteries). Si la charge est en courant alternatif, un onduleur est ajouté au système. La figure (I.5) montre un système photovoltaïque autonome avec stockage [12].

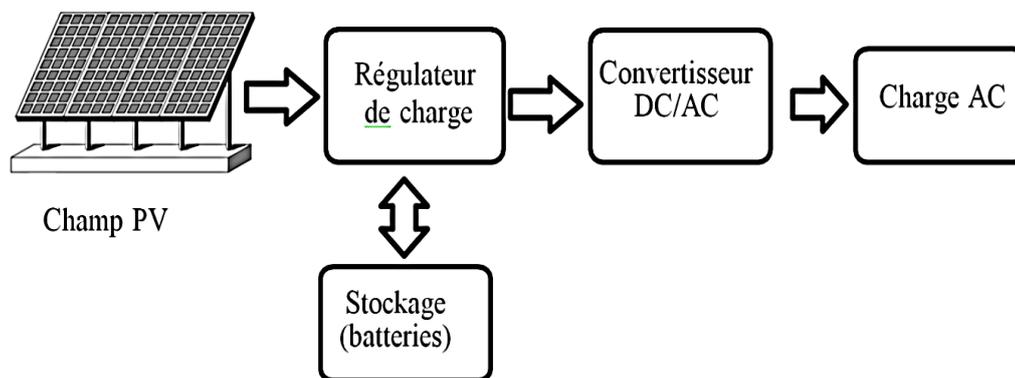


Figure I.5 Schéma d'un système PV autonome avec stockage [12]

I.7.2 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Ces systèmes sont connectés au réseau électrique public. L'électricité produite peut être utilisée localement ou injectée dans le réseau ; généralement en échange d'une compensation financière pour le propriétaire.

Ce système est considéré comme une solution fiable et durable dans le secteur des énergies renouvelables, aujourd'hui et à l'avenir. Ce système se compose généralement de panneaux solaires, d'un régulateur de charge (hacheur), d'un tableau de distribution, d'un convertisseur DC/AC (onduleur), d'un compteur électrique et d'un réseau. La figure (I.6) montre les composants d'un système photovoltaïque connecté au réseau [12].

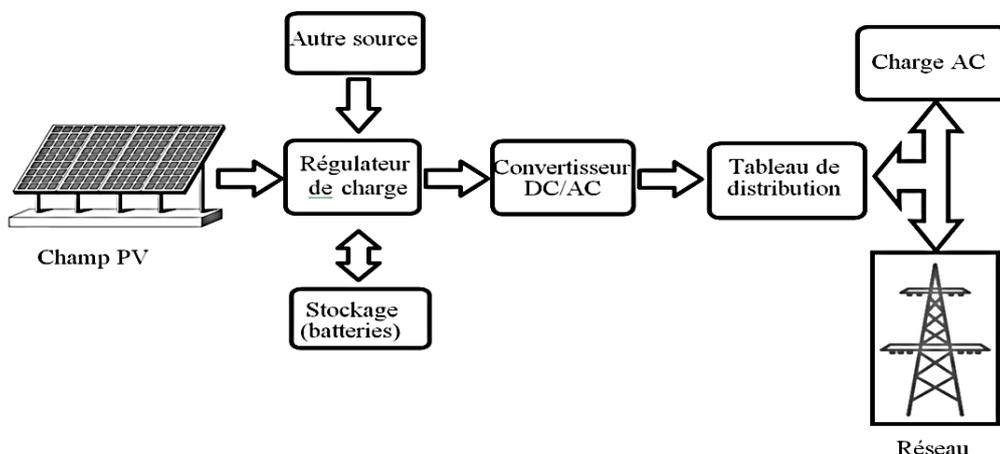


Figure I.6 Schéma d'un système PV connecté au réseau [12]

I.7.3 Systèmes photovoltaïques hybrides

Les systèmes hybrides désignent la combinaison de deux sources quelconques d'énergie. Le panneau solaire peut être combiné avec un générateur diesel, une turbine éolienne, la biomasse ou toute autre source d'énergie renouvelable ou non. L'objectif de l'utilisation de plusieurs technologies est de combiner les avantages et les meilleures caractéristiques opérationnelles de chaque système [12].

Le générateur photovoltaïque est généralement dimensionné pour répondre à la demande de charge de base, s'il s'arrête ou ne fournit pas l'énergie nécessaire, il est secouru par une autre source d'énergie. Ce montage offre tous les avantages de la photovoltaïque en termes de faibles coûts d'exploitation et de maintenance, tout en garantissant la sécurité de l'approvisionnement [12].

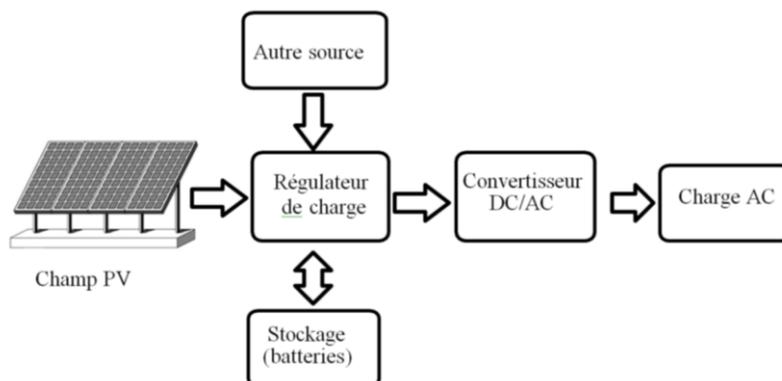


Figure I.7 Schéma d'un système PV hybride [12]

I.8 Cellule photovoltaïque

Une cellule PV est un composant électronique qui, une fois exposé à la lumière du soleil, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La tension de sortie dépend de la lumière incidente. La cellule photovoltaïque fournit une tension continue. Les cellules photovoltaïques les plus courantes sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et d'indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$ ou $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$), tellure de cadmium (CdTe), etc [13].

Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques, d'une dizaine de centimètres de long de chaque côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, et d'une épaisseur d'environ un millimètre [13].

I.8.1 Différents types de technologies de cellules photovoltaïque

1. **Silicium monocristallin** : Le silicium pur est extrait à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le rendement électrique et la durée de vie du silicium sont considérés comme deux fois plus élevés que ceux du silicium amorphe, mais son seul inconvénient est qu'il est beaucoup plus cher [14].



Figure I.8 Cellules en silicium monocristallin [14]

2. **Silicium poly-cristallin** : Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le monocristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser [14].

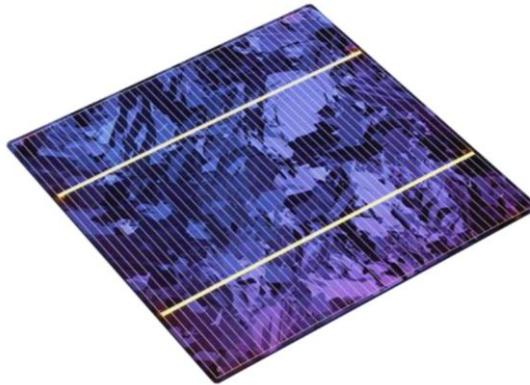


Figure I.9 Cellules en silicium poly-cristallin [14]

3. **Silicium amorphe** : Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux que l'état cristallin, et les cellules sont constituées de couches très fines [14].



Figure I.10 Cellule au silicium amorphe (couche mince) [14]

Le tableau (I.1) représente le rendement, les avantages et les inconvénients de chaque type de cellule :

Tableau I.1 Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques [15]

Type de cellule	Rendement	Avantages	Inconvénients
Silicium Monocristalline	13-17%	<ul style="list-style-type: none"> Bon rendement pour une cellule. 	<ul style="list-style-type: none"> Coût de fabrication élevé. Perte de matière en cours de fabrication.

Silicium Poly-cristallin	11-15%	<ul style="list-style-type: none"> Bon rendement pour un module. 	<ul style="list-style-type: none"> Coût de fabrication élevé. Perte de matière en cours de fabrication.
Silicium Amorphe	5-9%	<ul style="list-style-type: none"> Facile à fabriquer. 	<ul style="list-style-type: none"> Mauvais rendement.

I.8.2 Module photovoltaïque

Une cellule PV est un capteur d'une surface d'environ 100 cm^2 qui génère une tension de 0,5 à 1 V et un courant de court-circuit de quelques dizaines de mA. Ces niveaux de tension et de courant ne sont pas d'une grande importance dans les applications pratiques. C'est pourquoi des cellules photovoltaïques sont intégrées pour générer les tensions et les courants nécessaires à de nombreuses applications [16].

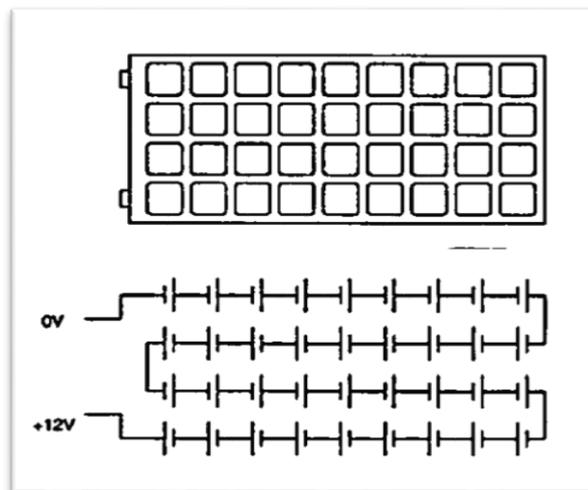


Figure I.11 Association des cellules pour obtenir un module photovoltaïque [16]

I.8.3 Méthodes de connexion des cellules solaires

Les cellules solaires peuvent être connectées de plusieurs manières, notamment :

- a) **Mise en série** : Lorsque N_s cellules sont connectées en série, la tension du générateur photovoltaïque (GPV) augmente en fonction du nombre de cellules. Quant au courant, le même courant traverse toutes les cellules. La caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule (Figure I.12). Les équations (I.1) et (I.2) nous permettent de résumer les propriétés électriques d'une association série de N_s cellules [17].

$$V_{sco} = N_s \times V_{co} \quad (I.1)$$

et :

$$I_{scc} = I_{cc} \quad (I.2)$$

Avec :

- V_{sco} : représente la tension de circuit ouvert du générateur ;
- V_{co} : est la tension de circuit ouvert d'une cellule ;
- I_{scc} : courant de court-circuit du générateur ;
- I_{cc} : courant de court-circuit d'une cellule.

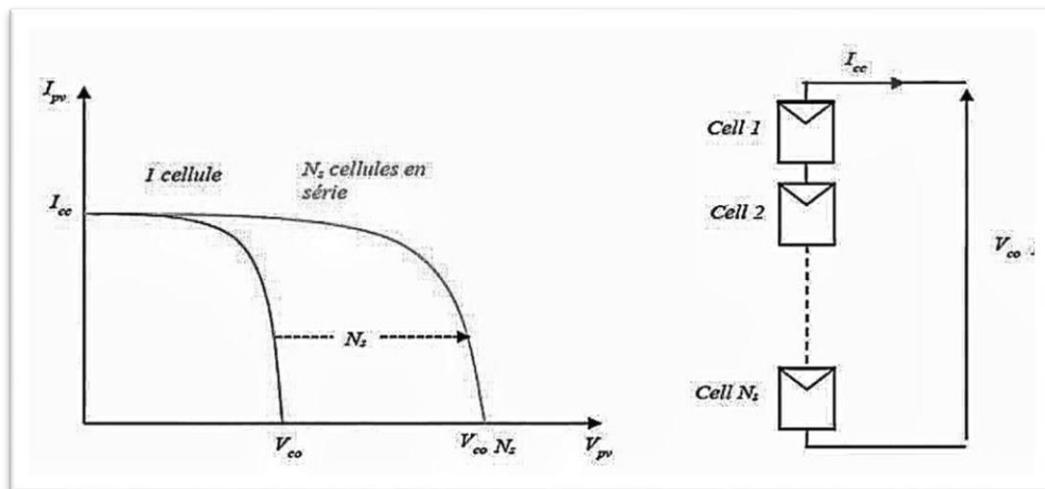


Figure I.12 Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série [17]

- b) **Mise en parallèle** : Lorsque N_p cellules sont connectées en parallèle (figure I.13), le courant de sortie du générateur augmente. Dans un groupe de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules ont la même tension. Les équations (I.3) et (I.4)

nous permettent de résumer les propriétés électriques d'une association parallèle de N_p cellules [17].

$$I_{sc} = N_p \times I_{cc} \quad (I.3)$$

et :

$$V_{sco} = V_{co} \quad (I.4)$$

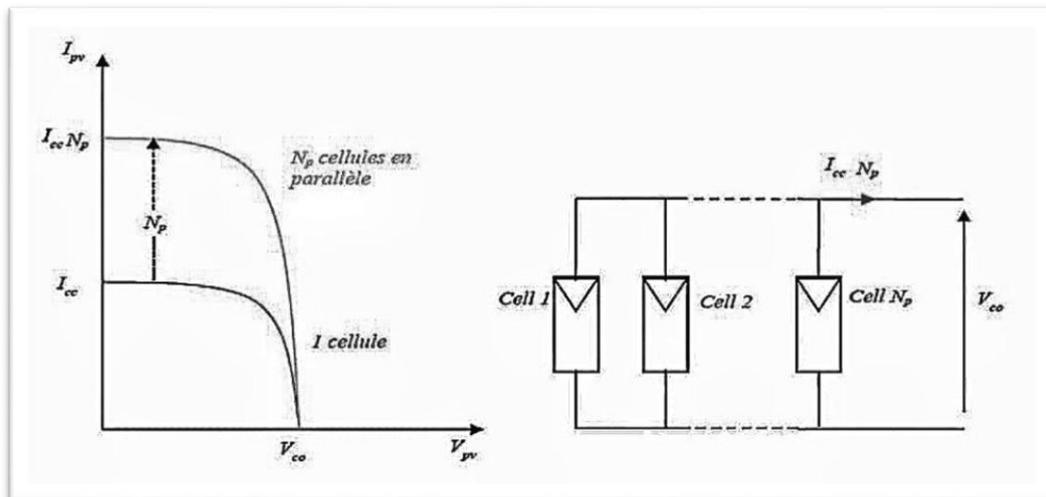


Figure I.13 Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle [17]

I.9 Modélisation d'un module photovoltaïque

Le module photovoltaïque comprend un ensemble de cellules solaires connectées en série et en parallèle, selon les besoins en tension et en courant. Une cellule de panneau solaire est essentiellement une jonction semi-conductrice p-n. Lorsqu'un panneau solaire est exposé à la lumière, il produit un courant continu. Comme le montre la figure (I.14), le modèle à une seule diode est utilisé [18].

Ce modèle représente un bon compromis entre simplicité et précision avec une architecture de base. Le circuit équivalent du modèle général comprend : un photo-courant (I_{ph}), une diode, une résistance parallèle (R_p) exprimée en courant de fuite et une résistance série (R_s), comme le montre la figure I.14 [18].

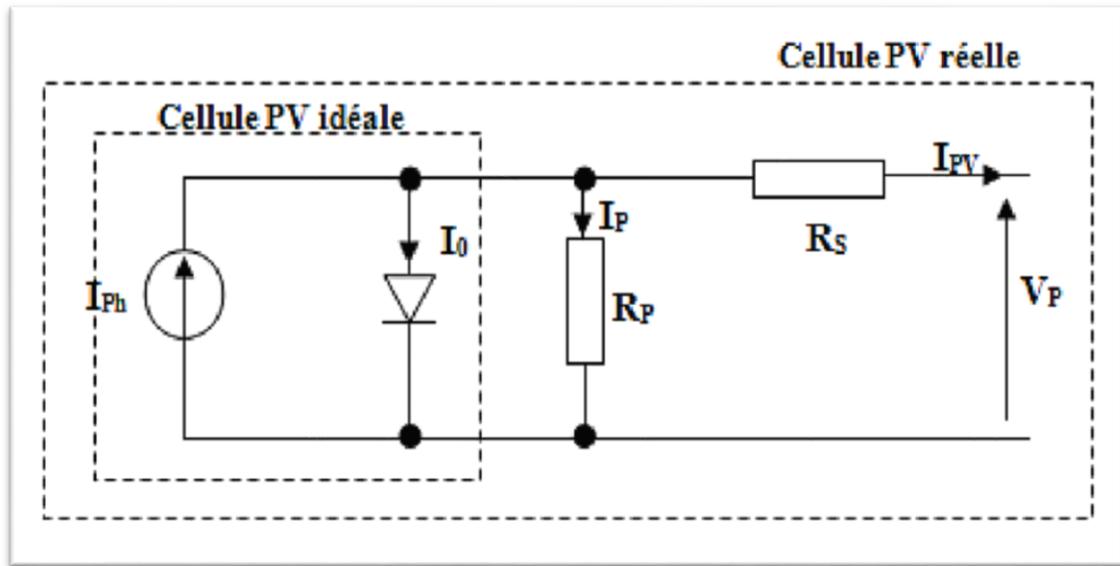


Figure I.14 Modèle équivalent d'une cellule PV [18]

Grâce à la figure (I.14), et en appliquant la loi de Kirchhoff, on obtient le courant selon l'équation suivante [18] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 - I_p \quad (I.5)$$

- I_{ph} : courant généré par le photo-courant ;
- I_p : courant qui circule dans la résistance parallèle ;
- I_0 : courant circulant dans la diode.

Avec :

$$I_p = \frac{V_p + I_{pv} \times R_s}{R_p} \quad (I.6)$$

et :

$$I_0 = I_s \left[\exp\left(\frac{q \times (V_p + I_{pv} \times R_s)}{K \times T_c \times A}\right) - 1 \right] \quad (I.7)$$

où :

- I_s : courant de saturation de la diode en ampère (A) ;
- q : charge d'électrons (1.6×10^{-19} C) ;

- k : constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J / K) ;
- T_c : température de cellule en Kelvin (K) ;
- A : facteur d'idéalité de la jonction ;
- R_s : résistance série (Ω).

Grâce à l'équation (I.5), le courant I_{pv} peut être écrit sous la forme suivante [18] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q \times (V_p + I_{pv} \times R_s)}{K \times T_c \times A}\right) - 1 \right] - \frac{V_p + I_{pv} \times R_s}{R_p} \quad (I.8)$$

La photo courant dépend principalement de l'ensoleillement et de la température de fonctionnement de la cellule, qui est décrite par l'équation suivante [18] :

$$I_{pv} = \left[I_{sc} + K_i \times (T_c - T_{ref}) \right] \times \frac{G}{1000} \quad (I.9)$$

- I_{sc} : courant de court-circuit de la cellule à 25°C et $1000 \text{W} / \text{m}^2$;
- K_i : coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule ;
- T_{ref} : est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) ($= 25^\circ \text{C} + 273$) ;
- G : Irradiation sur la surface de la cellule (W / m^2).

I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les panneaux solaires photovoltaïques présentent de nombreux avantages et inconvénients, notamment [19] :

I.10.1 Avantages

- énergie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit ;
- énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets ;
- génère l'énergie requise ;
- réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité ;
- l'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge ;

- la revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus ;
- entretien minimal ;
- aucun bruit.

I.10.2 Inconvénients

- la fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux ;
- les systèmes photovoltaïques ont besoin d'une grande surface pour générer la quantité d'énergie requise ;
- les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles ;
- nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques ;
- le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher ;
- l'énergie produite n'est pas constante en raison des changements climatiques.

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, des informations sur l'énergie solaire, en particulier l'énergie photovoltaïque, ont été présentées, notamment ses composants et son principe de fonctionnement. À la fin de ce chapitre, certains avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque ont été mentionnés.

La quantité d'énergie photovoltaïque produite est limitée par plusieurs facteurs tels que l'éclairement, la température et la charge utilisée, c'est-à-dire la quantité d'énergie consommée. Ces facteurs ont un impact direct sur la quantité d'énergie produite, et pour résoudre ces problèmes, nous nous concentrons dans le deuxième chapitre, sur deux algorithmes pour la poursuite du point de puissance maximale (Maximum power point Tracking, en anglais (MPPT)) :

- P&O (perturbation et observation) ;
- Logique floue (fuzzy logic, en anglais).

Chapitre II

Commande MPPT
(P&O et logique floue)

II.1 Introduction

La tension et le courant de sortie d'un générateur PV peuvent être variables, mais la valeur de puissance maximale n'est possible qu'à des valeurs de courant et de tension spécifiques. En effet, le courant et la tension générés sont liés à ces deux facteurs qui sont l'éclairement solaire et la température. Les changements climatiques font fluctuer le point de puissance maximale et, souvent, un ou plusieurs convertisseurs commandés sont insérés entre le générateur photovoltaïque et le récepteur, ce qui permet de suivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont appelées MPPT et associées au hacheur, qui assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à fournir une puissance maximale [20].

Il existe plusieurs types de techniques de suivi du point de puissance maximale utilisées dans les systèmes photovoltaïques, notamment :

- Perturbation et Observation (P&O) ;
- Incrémentation Conductance ;
- Logique floue ; etc.

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques et nous étudierons également quelques méthodes de la commande MPPT (algorithmes P&O et logique floue).

II.2 Connexion directe entre le générateur photovoltaïque et la charge

La consommation directe de l'énergie produite par le générateur PV est le système le plus simple à concevoir. Il est totalement soumis aux changements climatiques (éclairage, température et charge). La connexion directe est principalement utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son faible coût. Cependant, il n'est pas considéré comme un système idéal pour transférer l'énergie du générateur PV vers la charge ou la consommation. La figure (II.1) illustre la conception et la méthode de couplage de ce système [21].

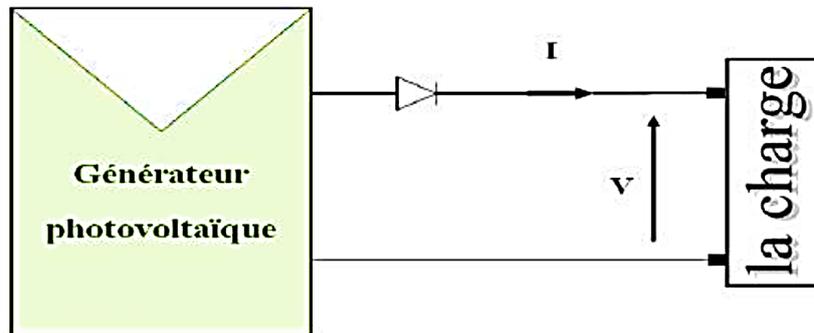


Figure II.1 Couplage direct générateur PV-charge [21]

II.3 Convertisseurs DC/DC (Hacheur)

La figure (II.2) montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [22].

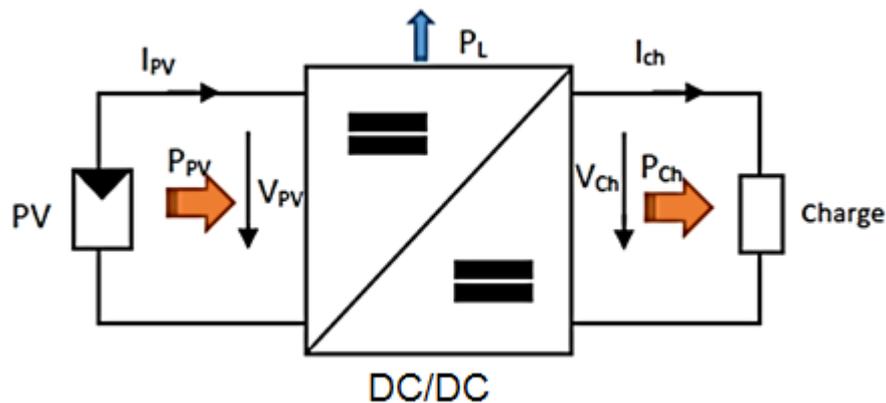


Figure II.2 Convertisseur DC/DC [22]

Les hacheurs sont des convertisseurs DC-DC utilisés pour générer une tension DC variable à partir d'une source de tension fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Ces composants ne consomment pas d'énergie dans le cas idéal, c'est pourquoi les hacheurs ont un bon et un haut rendement. En général, le commutateur est un transistor MOSFET qui travaille en mode bloqué-saturé [22].

Si le commutateur est bloqué, son courant est nul, il ne dissipe donc aucune puissance, s'il est saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très petite [22].

II.4 Types des convertisseurs DC-DC (Hacheur)

II.4.1 Convertisseur dévolteur (Buck)

Le convertisseur buck est un type de convertisseur DC-DC, également appelé convertisseur abaisseur de tension, utilisé pour convertir une tension d'entrée DC en une tension de sortie DC de valeur inférieure.

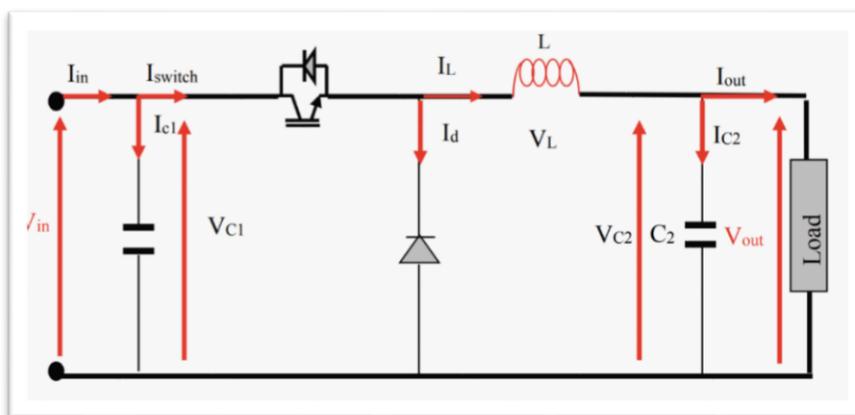


Figure II.3 Convertisseur Buck [23]

II.4.2 Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

Le convertisseur buck-boost est un convertisseur DC-DC qui combine les fonctions des convertisseurs buck et boost. Ce type de convertisseur permet à la tension de sortie d'être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée.

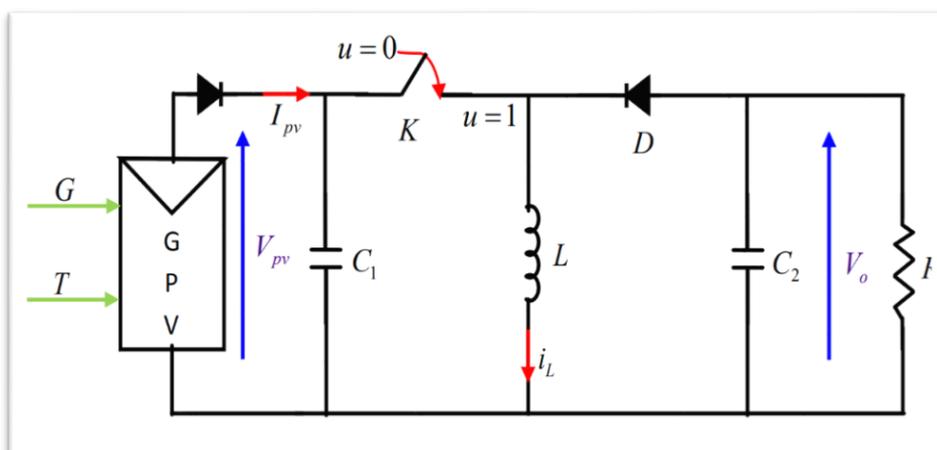


Figure II.4 Convertisseur Buck-Boost [24]

II.4.3 Convertisseur survolteur (Boost)

Le convertisseur boost, ou convertisseur élévateur, est un type de convertisseur DC-DC utilisé pour convertir une tension continue en une autre tension continue d'une valeur supérieure.

Le hacheur boost possède deux modes de fonctionnement, selon l'état de l'interrupteur commandable, soit ouvert, soit fermé. La figure (II.5) représente le circuit équivalent à travers les deux états de commutation [24, 25] :

- la figure (II.5.a) montré la structure globale du convertisseur survolteur.
- les figures (II.5.b) et c présentent les circuits équivalents dans les deux cas d'opération : l'interrupteur fermé pendant $\alpha \cdot T_d$ et l'interrupteur ouvert pendant $(1-\alpha) \cdot T_d$.

Avec :

α : rapport cyclique du convertisseur ;

T_d : période de découpage.

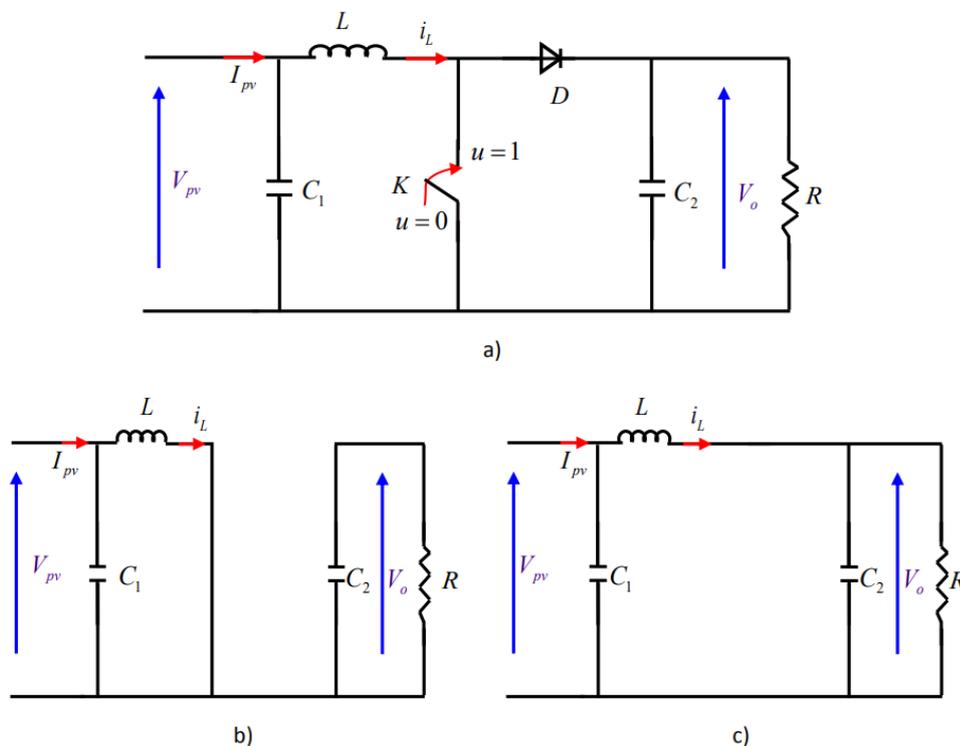


Figure II.5 Schéma de base du convertisseur Boost a) structure globale, b) structure avec interrupteur fermé, c) structure avec interrupteur ouvert [24, 25]

avec :

L : inductance ;

C_1 : condensateur d'entrée ;

C_2 : condensateur de sortie.

- Dans le cas où le K est fermé ($0 < t < \alpha Td$) , le circuit du convertisseur devient celui de la figure (II.5.b) et les équations qui régissent son fonctionnement sont [24, 25] :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} \\ \frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{RC_2} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

- Dans le cas où le K est ouvert ($\alpha Td < t < Td$) , le circuit du convertisseur devient celui de la figure (II.5.c) et les équations qui régissent son fonctionnement sont [24, 25] :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} - \frac{V_0}{L} \\ \frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{RC_2} + \frac{i_L}{C_2} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

- En combinant (1) et (2), les équations dynamiques de ce convertisseur peuvent s'écrire [24, 25] :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv}-V_0}{L} + \frac{V_0}{L} \cdot u \\ \frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{RC_2} + \frac{i_L}{C_2} - \frac{i_L}{C_2} \cdot u \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Où :

V_0 et i_L et sont respectivement la tension du condensateur de sortie et le courant d'inductance ;

V_{pv} : tension du panneau photovoltaïque ;

Le paramètre u est la position du commutateur.

II.5 Commande MPPT

La commande MPPT est l'élément de base et le plus important des systèmes photovoltaïques car elle joue un rôle majeur dans la quantité d'énergie produite. Le principe de cette commande est basé sur le changement automatique du rapport cyclique (α) pour atteindre la valeur optimale où l'énergie extraite des panneaux solaires est toujours maximale [26].

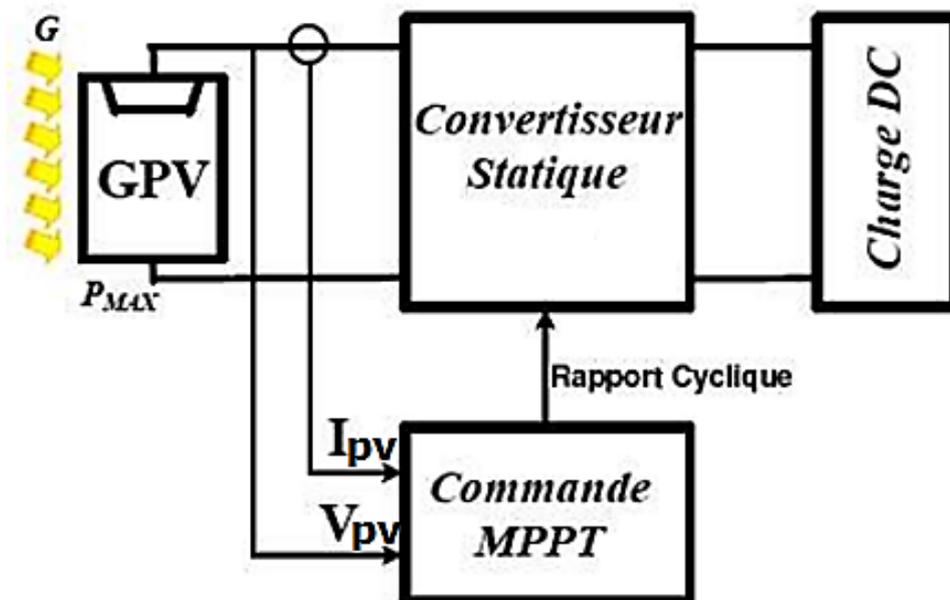


Figure II.6 Description du système photovoltaïque [20]

II.6 Méthodes MPPT

II.6.1 Perturbation et observation (P&O)

En raison de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre, l'algorithme P&O est la méthode la plus utilisée dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. Cet algorithme repose sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension, qui agit directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. Si la valeur actuelle de la puissance $P_{pv}(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P_{pv}(k-1)$, on conserve alors

la même direction que la perturbation précédente ou on inverse la perturbation du cycle précédent [27]. La figure (II.7) montre un diagramme du fonctionnement de cet algorithme.

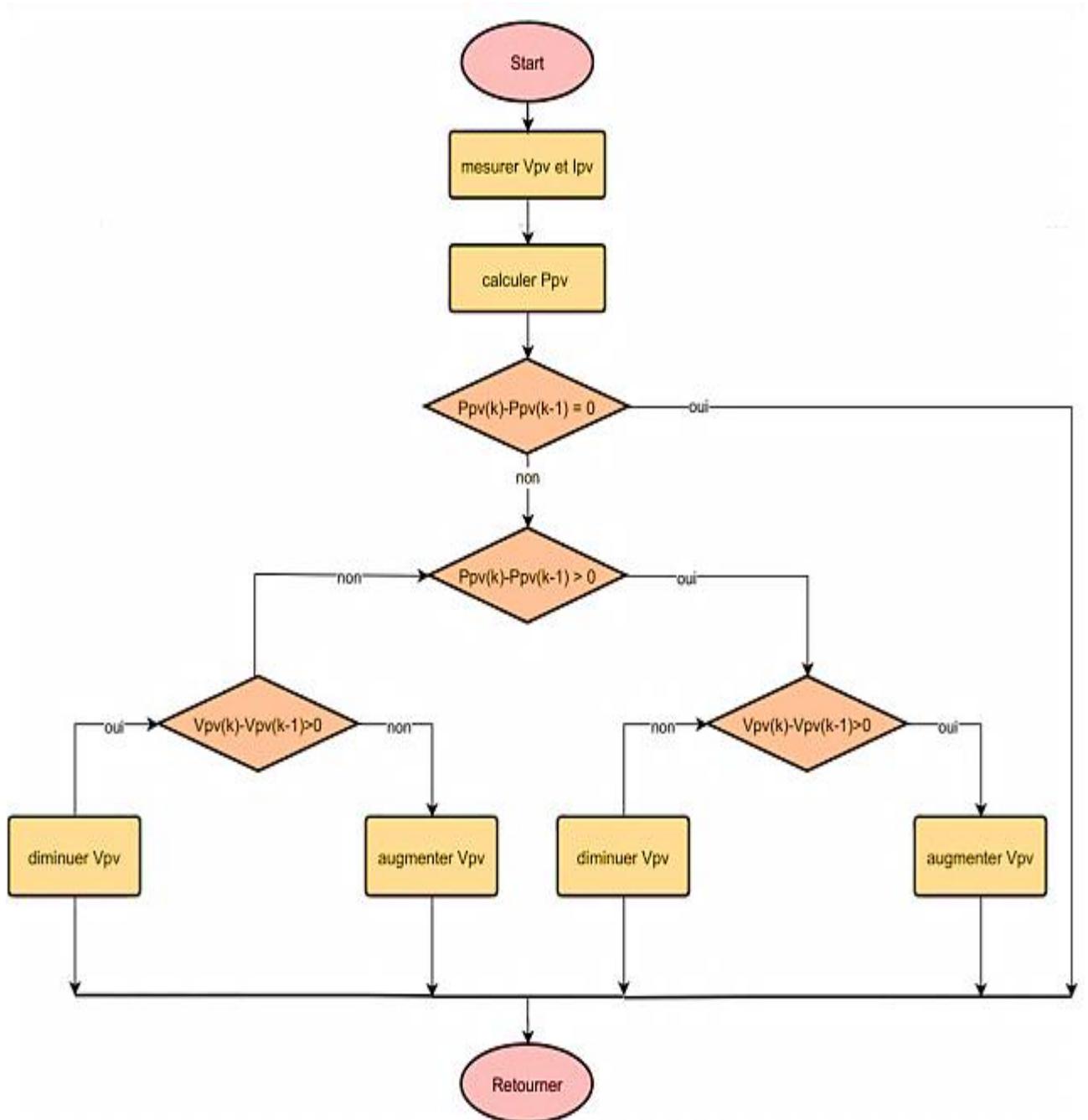


Figure II.7 Algorithme de P&O classique [28]

La méthode P&O consiste à provoquer une légère perturbation de la valeur de la tension V_{pv} , ce qui entraîne une modification de la valeur de la puissance P_{pv} figure (II.8), et

l'on peut conclure qu'une augmentation positive de la tension V_{pv} entraîne une augmentation de la puissance P_{pv} , ce qui signifie que le point de fonctionnement est situé à gauche du point PPM (point de puissance maximale). À l'inverse, si la puissance diminue, cela signifie que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces différentes analyses des conséquences de la variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors aisé de déterminer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et la convergence de ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [29].

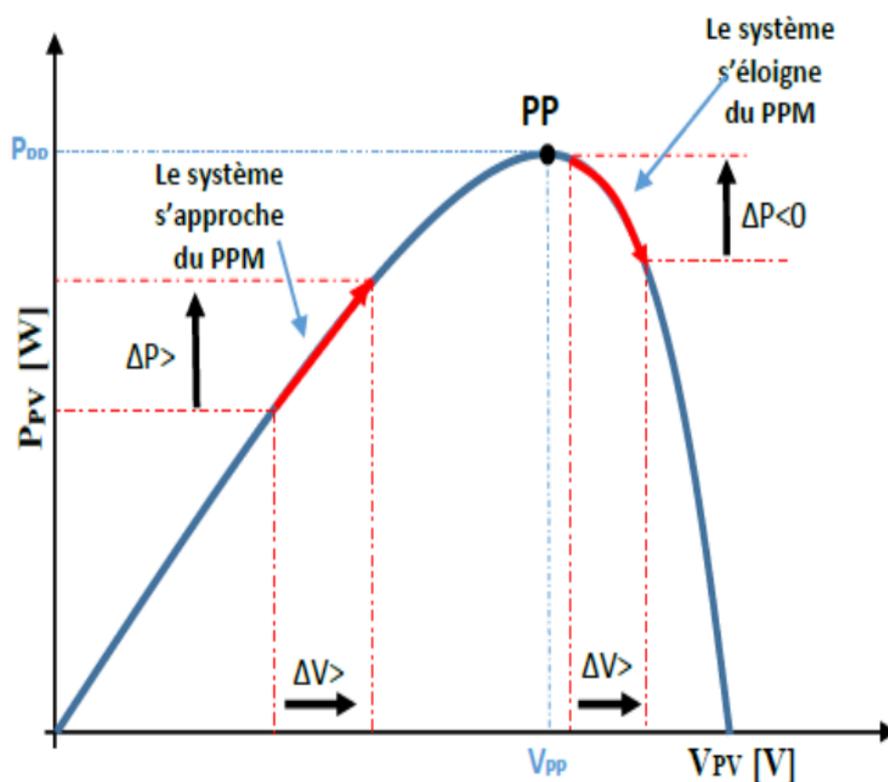


Figure II.8 Recherche du PPM par la méthode (P&O) [29]

II.6.2 Commande par logique floue (fuzzy)

La commande MPPT basée sur la logique floue (LF) (en anglais : fuzzy logic control (FLC)) est devenue populaire ces dernières années grâce au développement des microcontrôleurs. L'un de ses principaux avantages est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrée imprécises et qu'elle ne nécessite pas de modèle mathématique de haute précision. De plus, elle peut traiter la non-linéarité [29].

Le principe de contrôle par logique floue dépend de deux variables d'entrée, l'erreur E et la variation de l'erreur (ΔE), ainsi que de la variable de sortie ($\Delta\alpha$) (variation du rapport cyclique). Une fois la valeur de la variable de sortie déterminée, le convertisseur statique est piloté pour trouver le PPM, est déterminée à l'aide la table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée [29].

La figure (II.9) montre la structure de base d'une commande par logique floue, qui passe généralement par trois étapes [29] :

- Fuzzification ;
- lecture de la table de vérité ;
- défuzzification.

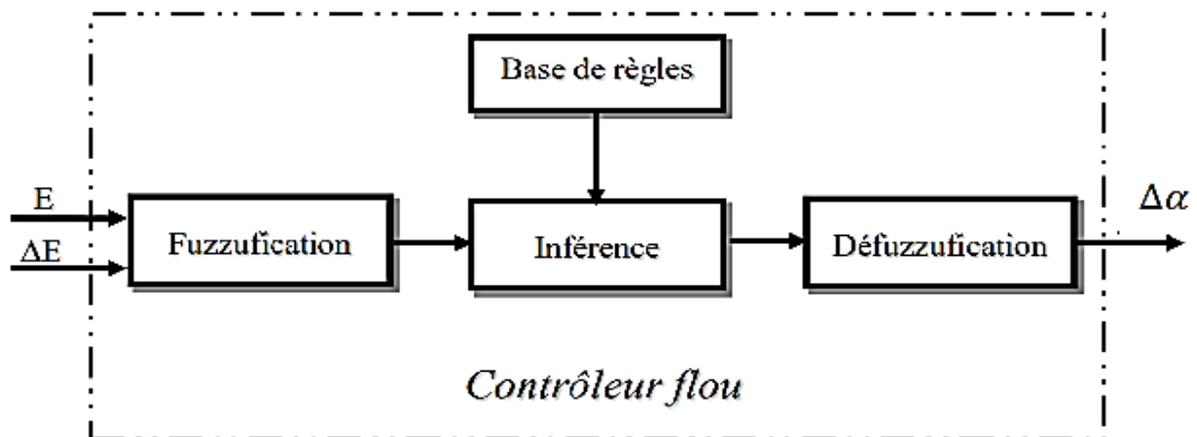


Figure II.9 Structure de base d'une commande utilisant la logique floue [30]

La fuzzification permet de passer de variables réelles à des variables floues. La tension (V) et le courant (I) réels du générateur photovoltaïque peuvent être mesurés en temps continu et la puissance peut être calculée ($P = V \times I$). Le contrôle est déterminé sur la base de la satisfaction de deux critères relatifs à deux variables d'entrée du contrôleur proposé, à savoir l'erreur E et la variation de cette erreur (ΔE) à un instant d'échantillonnage K . Les variables (E) et (ΔE) sont exprimées comme suit [31] :

$$E(K) = \frac{P(K) - P(K-1)}{I(K) - I(K-1)} \quad (\text{II.4})$$

et :

$$\Delta E(K) = E(K) - E(K - 1) \quad (\text{II.5})$$

Durant la fuzzification, les variables numériques d'entrée sont converties en variables linguistiques. En appliquant le système d'inférence aux entrées, les sorties sont déterminées. La valeur de sortie dépend également de la table de vérité (base de règles) [31]. Dans ce travail, nous sommes basés sur la référence [31] pour utiliser les fonctions d'appartenance (Figure II.10) et les tables de vérité (Tableau II.1), et les appliquer dans nos simulations.

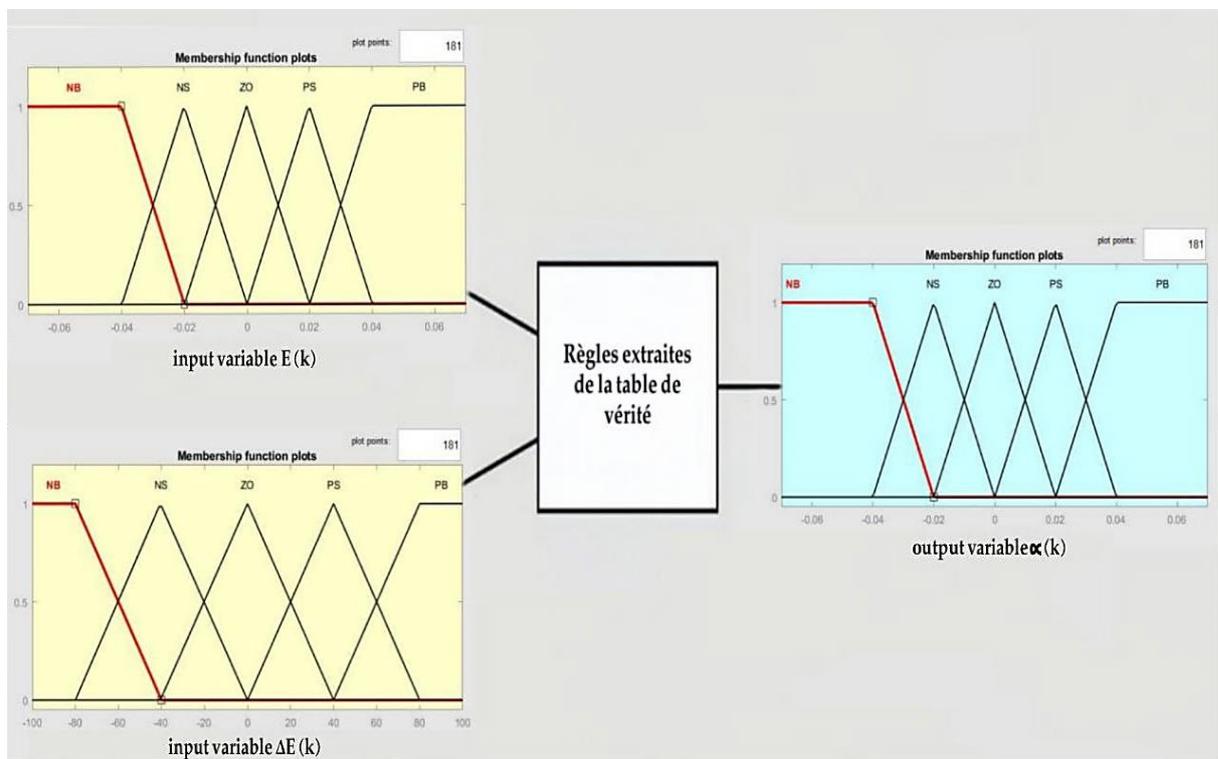


Figure II.10 Fonctions d'appartenance : l'entrée $E(K)$ et $\Delta E(K)$, la sortie $\alpha(K)$

Tableau II.1 Table de vérité (Base de règles) [31]

	ΔE				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	ZO	ZO	NB	NB	NB
NS	ZO	ZO	NS	NS	NS
ZO	NS	ZO	ZO	ZO	PS
PS	PS	PS	PS	ZO	ZO
PB	PB	PB	PB	ZO	ZO

Avec :

- **NB** : negative big (en français : négatif grand) ;
- **NS** : negative small (en français : négatif petit) ;
- **ZO** : zero (en français : zéro) ;
- **PS** : positive small (en français : positif petit) ;
- **PB** : positive big (en français : positif grand).

Le convertisseur DC-DC fonctionne avec un signal de commande précis (α). Par conséquent, les informations floues doivent être converties en informations déterministes, ce processus étant appelé « défuzzification ». La défuzzification consiste à convertir un sous-ensemble flou de la sortie en une valeur physique qui permet de contrôler le système. La méthode de défuzzification la plus couramment utilisée est la détermination du centre de gravité (en anglais : centre of gravity) [31].

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous étudions deux méthodes de contrôle d'un convertisseur DC-DC (Boost) afin de suivre le point de puissance maximale. Ces deux méthodes sont P&O et la logique floue.

Dans le chapitre suivant, nous simulerons un panneau solaire photovoltaïque et étudierons son comportement, en plus d'appliquer les deux commandes mentionnées ci-dessus (P&O et logique floue) à ce panneau photovoltaïque.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation d'un panneau photovoltaïque et à l'étude de son comportement en fonction des changements climatiques, à savoir la température et l'éclairement. Dans ce chapitre, nous simulerons également un système photovoltaïque utilisant la commande MPPT et nous le soumettrons à plusieurs scénarios différents. Deux commandes ont été utilisées : P&O et logique floue. Enfin, dans ce chapitre, nous comparerons la commande P&O à la commande par logique floue. Le logiciel Matlab/Simulink sera utilisé pour cette simulation.

III.2 Caractéristiques du module PV

Le tableau suivant présente les caractéristiques électriques du module PV de type PWX 500 (49 W) [32] :

Tableau III.1 Caractéristiques du module PWX 500 (49W) [32]

PWX 500 (49 W)	
Paramètres	Valeurs
P_m (W) Puissance maximale	49
I_{mp} (A) (Courant au PPM)	2.88
V_{mp} (V) (Tension au PPM)	17
I_{cc} (A)	3.11
V_{co} (V)	21.8
R_s (Ω)	0.55
N_s	36

III.3 Résultats de simulation

III.3.1 Simulation du panneau PV

À une température (T) constante de 25 °C et pour différents niveaux d'éclairement (I_r : 700 W/m², 850 W/m² et 1000 W/m²), les courbes P-V et I-V du panneau PV sont illustrées dans les figures (III.1 et III.2).

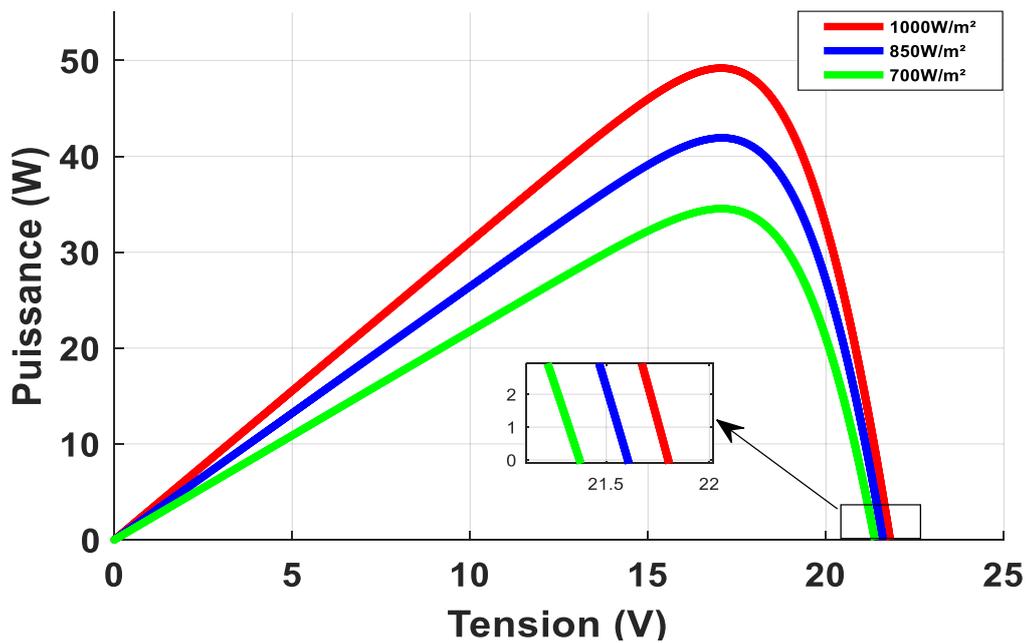


Figure III.1 Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V

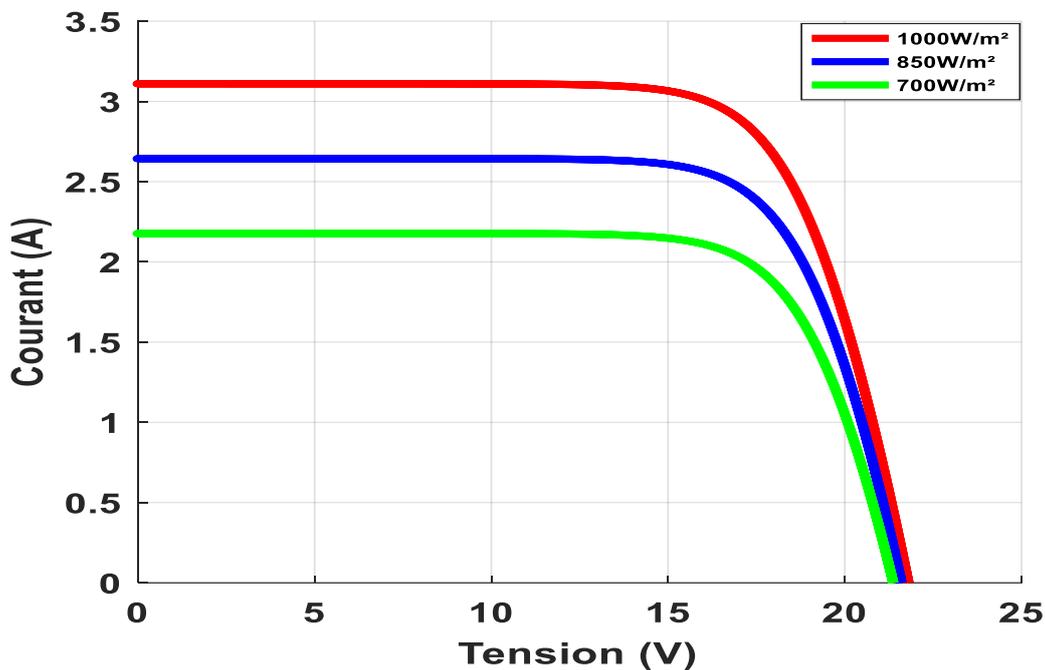


Figure III.2 Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V

À un éclairement (I_r) constant de 1000 W/m^2 et pour différents niveaux de température (T : 25°C , 45°C et 65°C), les courbes P-V et I-V du panneau PV sont illustrées dans les figures (III.3 et III.4).

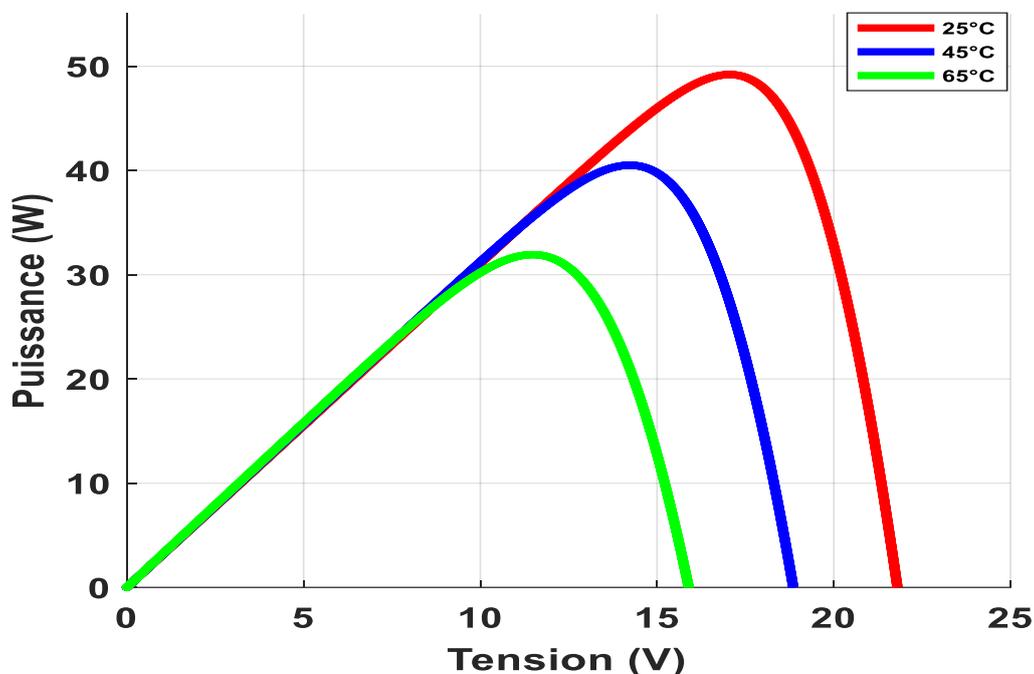


Figure III.3 Effet de la température sur la caractéristique P-V

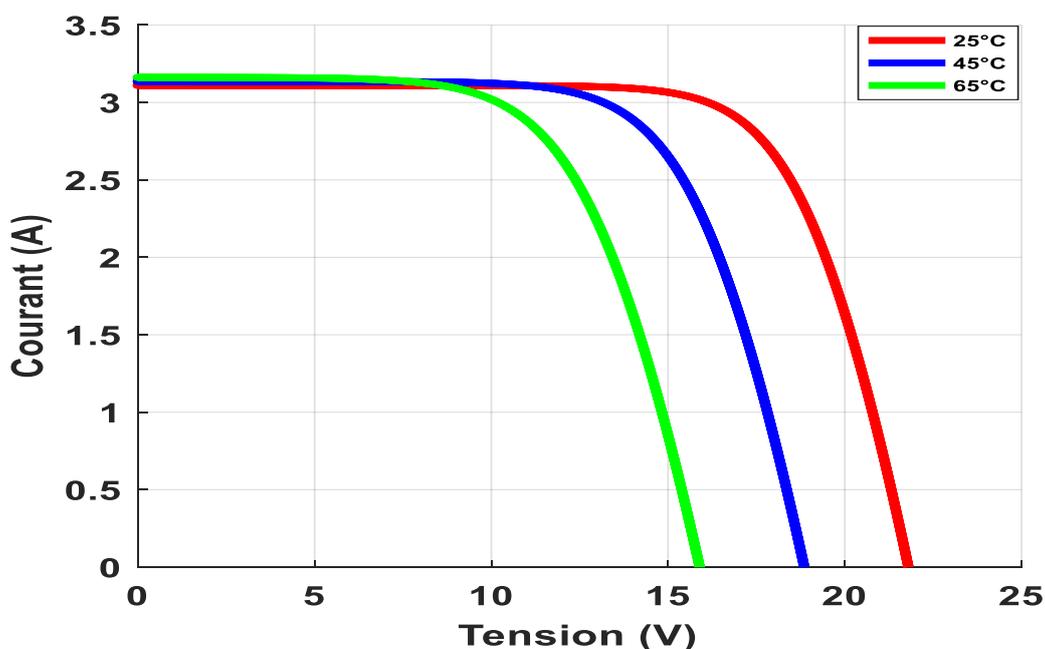


Figure III.4 Effet de la température sur la caractéristique I-V

On remarque sur les figures (III.1 et III.2) que lorsque l'éclairement augmente, la tension (V_{co}) reste presque constante. Par contre, on remarque que la valeur de la puissance (P) et du courant (I_{cc}) augmentent lorsque l'intensité de l'éclairement augmente. D'autre part, les figures (III.3 et III.4) indiquent que lorsque la température augmente, elle affecte négativement la puissance (P) et la tension (V_{co}), dont les valeurs diminuent, tandis que le courant (I_{cc}) reste presque constant. Suite à ces résultats (figures III.1, III.2, III.3 et III.4), on constate l'importance du facteur d'éclairement (I_r) et de la température (T) sur la performance et l'efficacité des panneaux photovoltaïques.

III.3.2 Commandes MPPT

Le schéma de principe du système photovoltaïque avec commande MPPT dans le logiciel Matlab/Simulink est présenté à la figure (III.5).

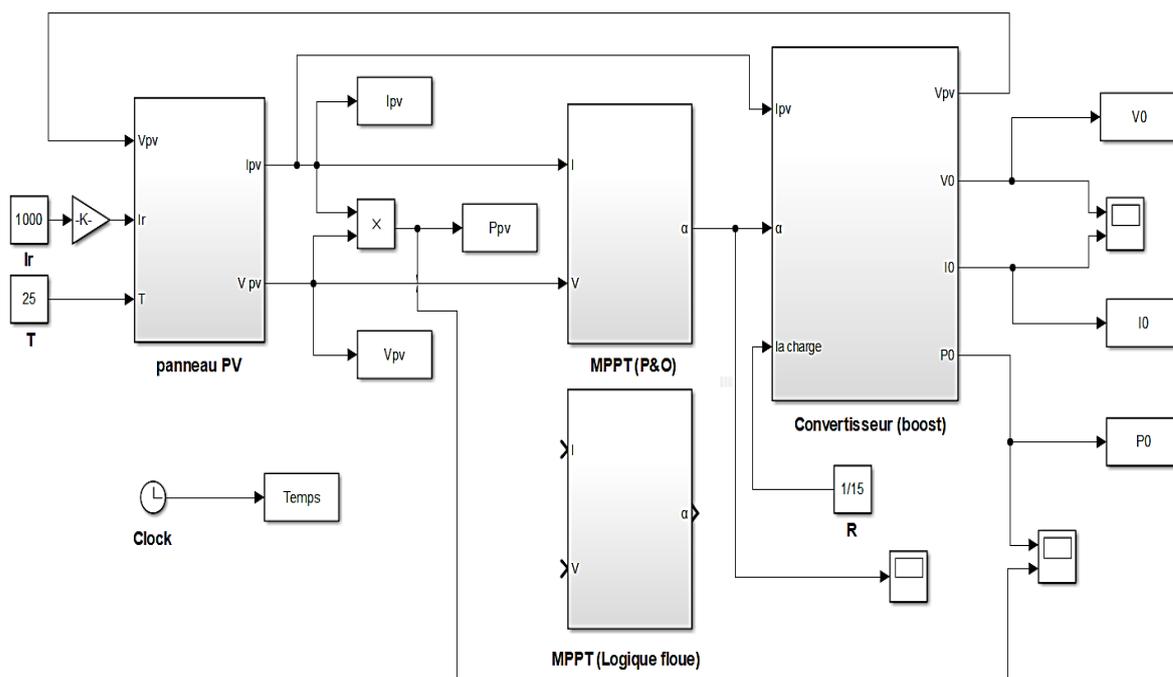


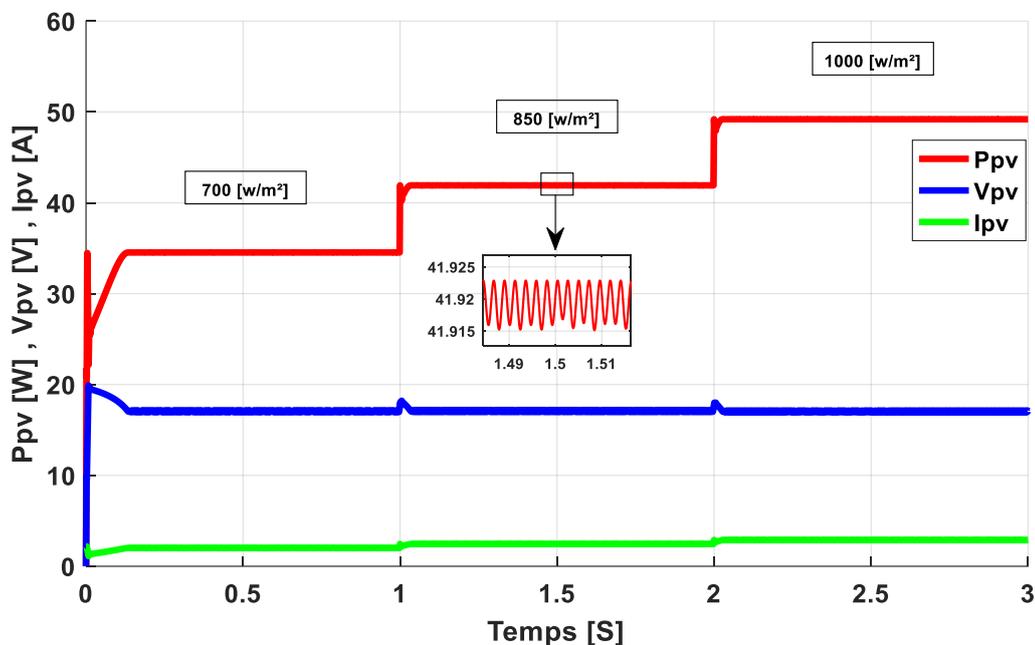
Figure III.5 Schéma du système PV avec commande MPPT

Trois scénarios (tests) différents seront mis en œuvre dans cette simulation, en gardant deux variables constantes à chaque fois et en changeant une variable, ces variables étant l'éclairement (I_r), la température (T) et la charge (résistance (R)). Dans le premier test, l'éclairement est variable. Les valeurs utilisées sont les suivantes : 700, 850 et 1000 W/m²,

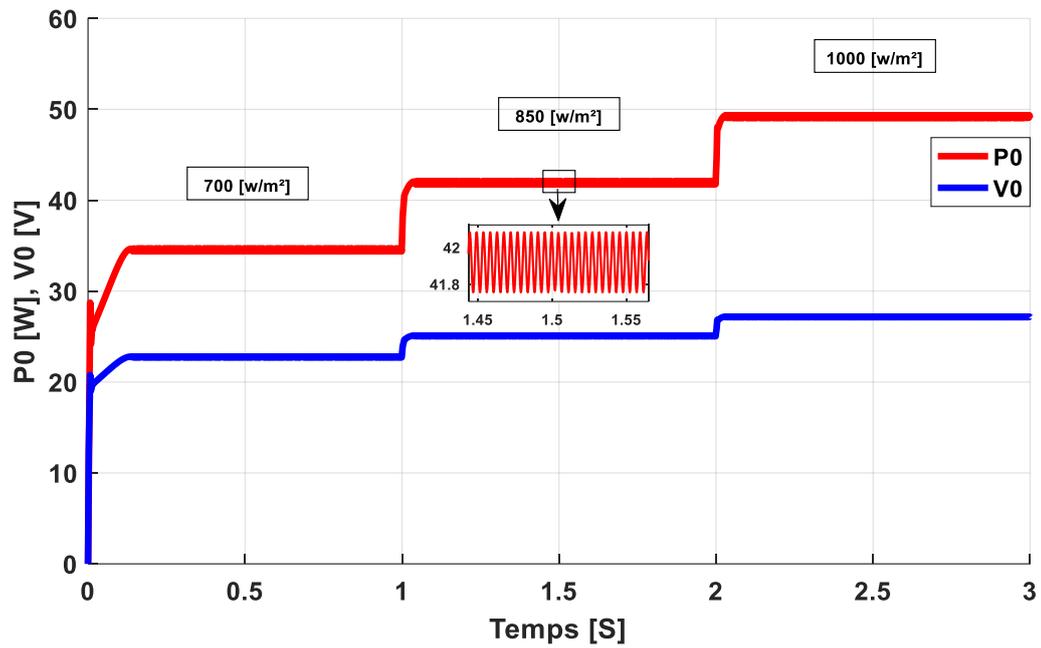
tout en maintenant la température à 25 °C et la résistance à 15 Ω. Dans le second test, la température est variable. Les valeurs utilisées sont les suivantes : 25, 45 et 65 °C, tout en maintenant l'éclairement constant à 1000 W/m² et la résistance à 15 Ω. Pour le troisième et dernier test, nous changeons la valeur de la résistance de 15 à 20 Ω, tout en maintenant l'éclairement constant à 1000 W/m² et la température constante à 25 °C. Nous allons d'abord simuler la commande P&O, puis la commande par logique floue.

III.3.2.1 Commande P&O

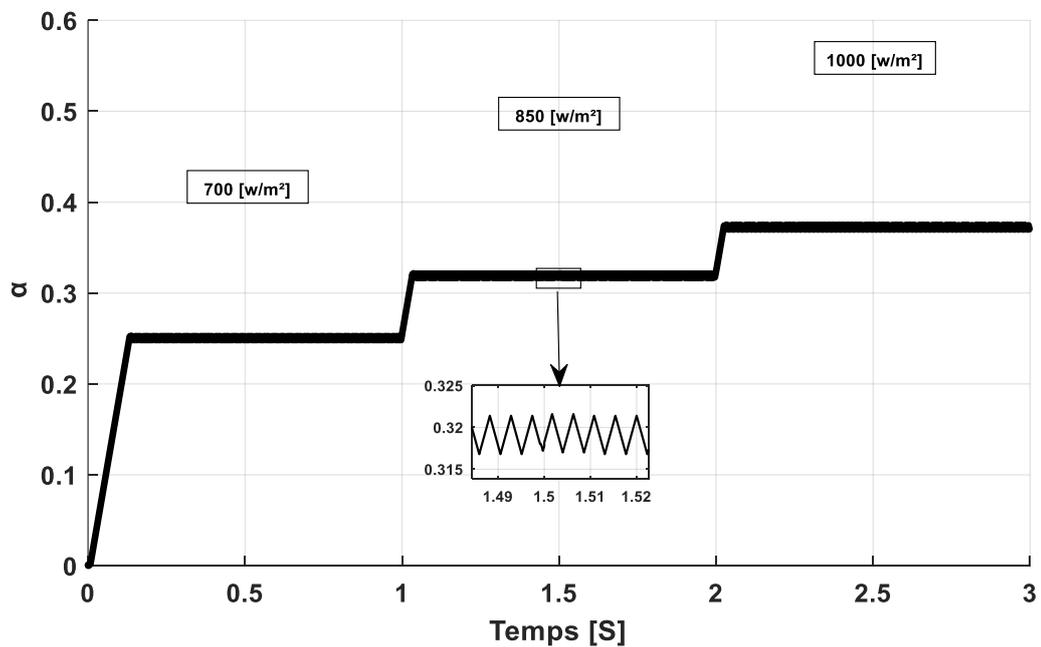
a) Test 1 :



(a)



(b)



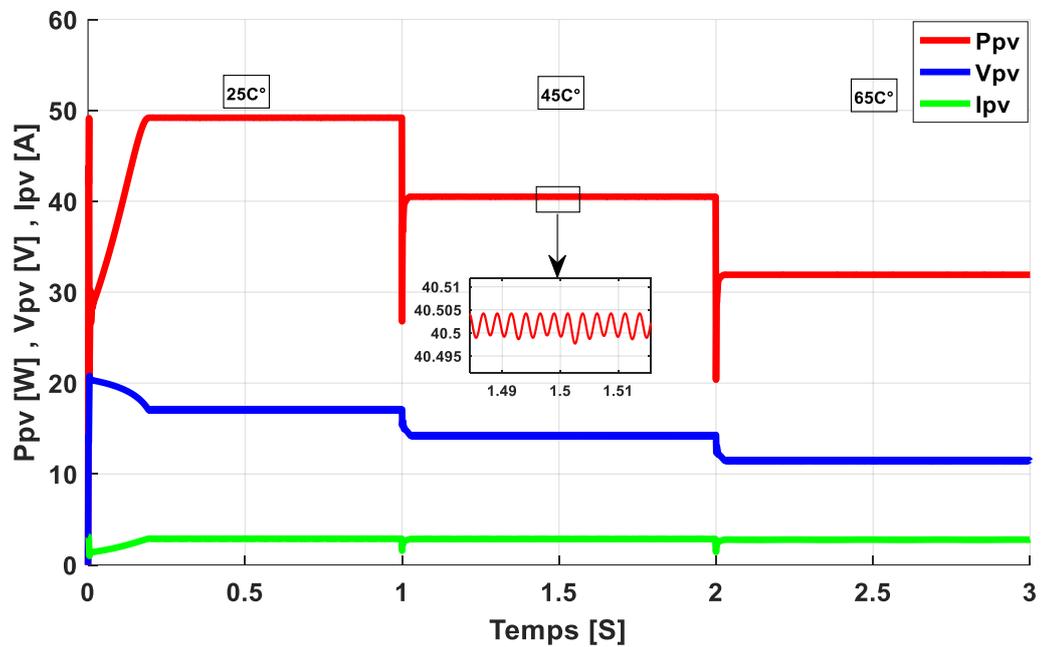
(c)

Figure III.6 Résultats de simulation de la commande MPPT (P&O) lorsque l'éclairement est variable : (a) sortie du panneau PV, (b) sortie du convertisseur, (c) rapport cyclique

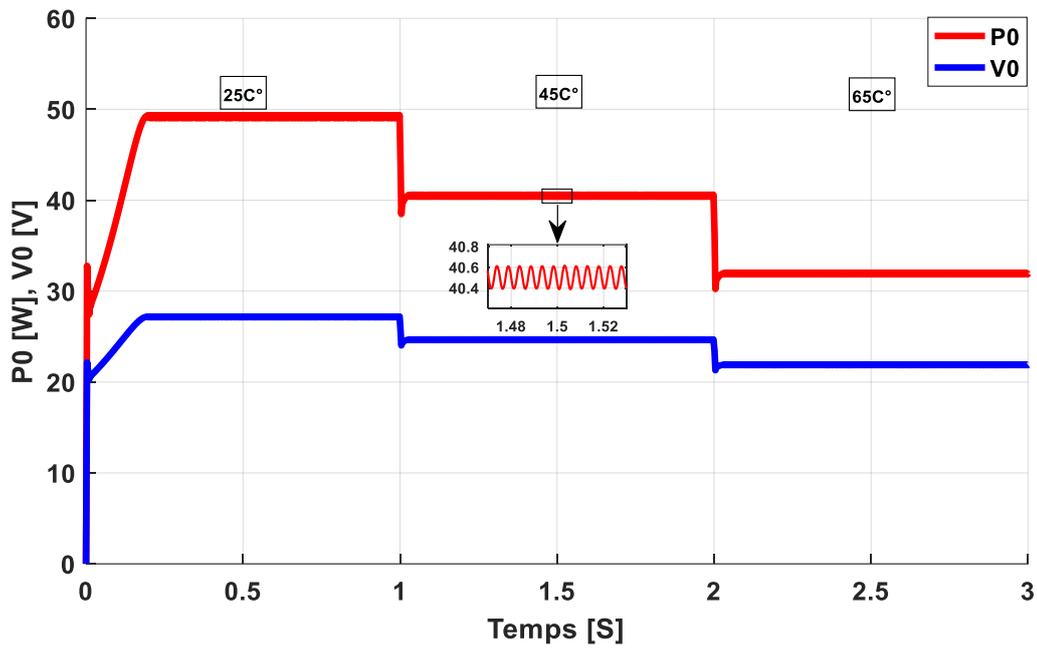
Avec :

- P_{pv} : puissance du panneau photovoltaïque ;
- V_{pv} : tension du panneau photovoltaïque ;
- I_{pv} : courant du panneau photovoltaïque ;
- P_0 : puissance de charge ;
- V_0 : tension de charge ;
- α : rapport cyclique.

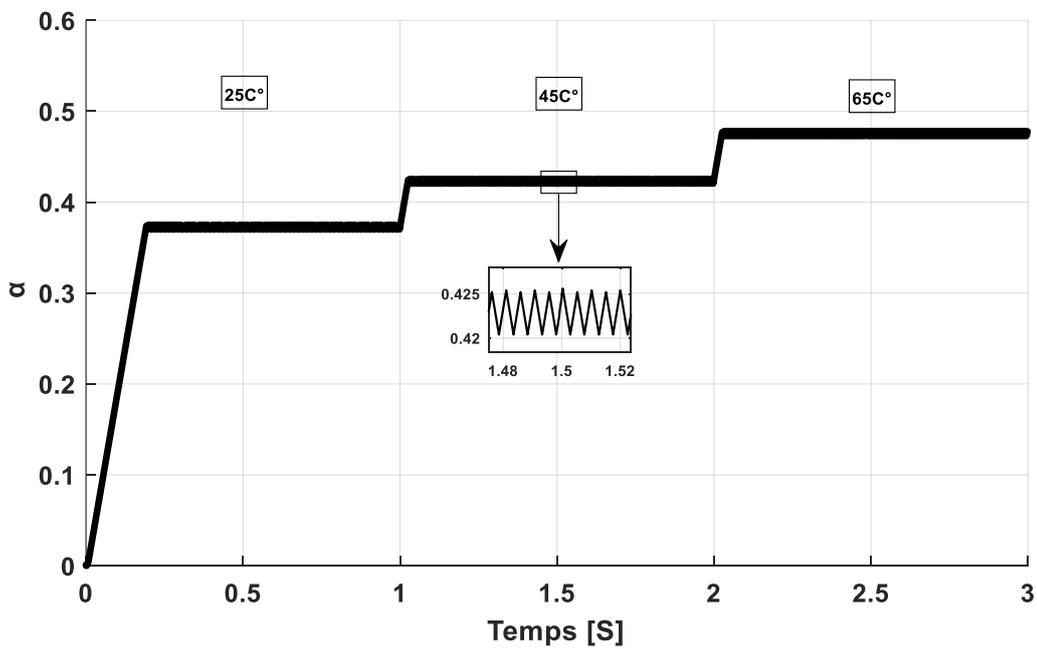
b) Test 2 :



(a)



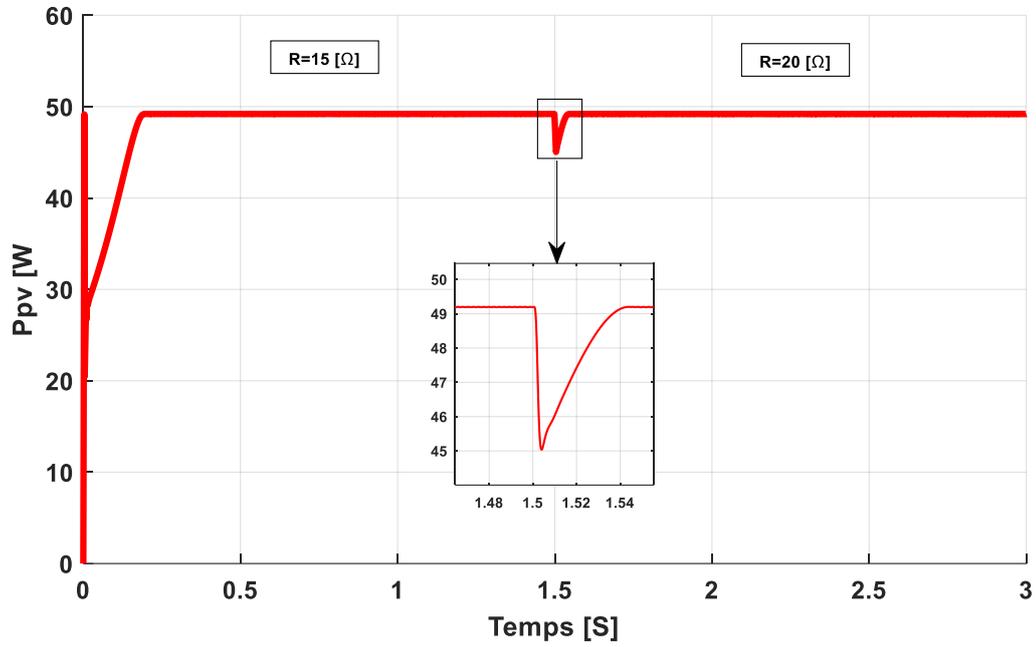
(b)



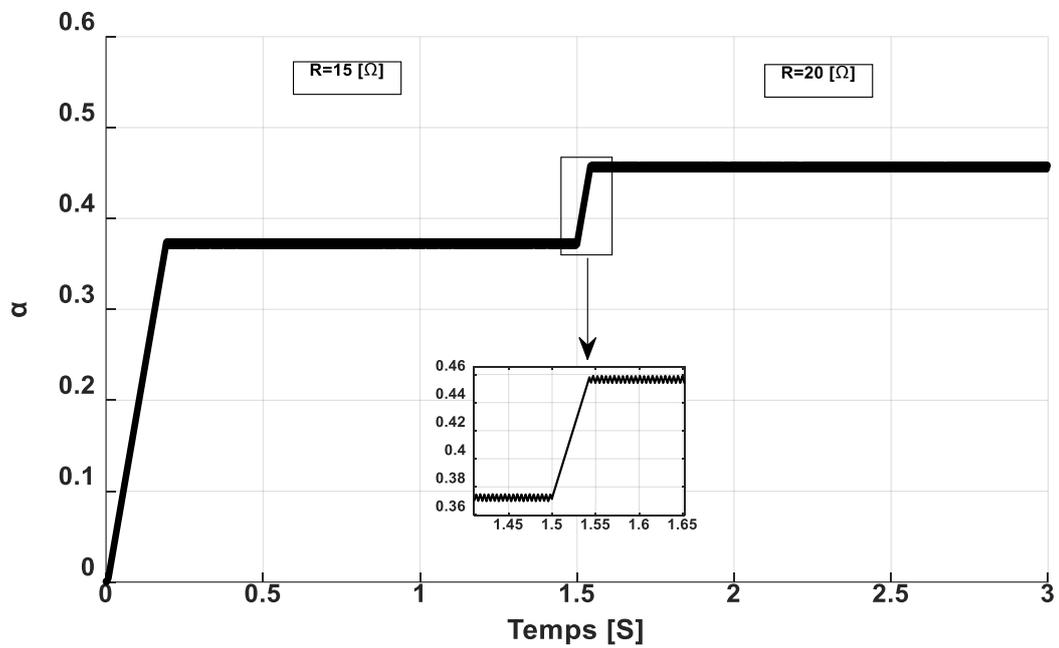
(c)

Figure III.7 Résultats de simulation de la commande MPPT (P&O) à des températures variables : (a) sortie du panneau PV, (b) sortie du convertisseur, (c) rapport cyclique

c) Test 3 :



(a)

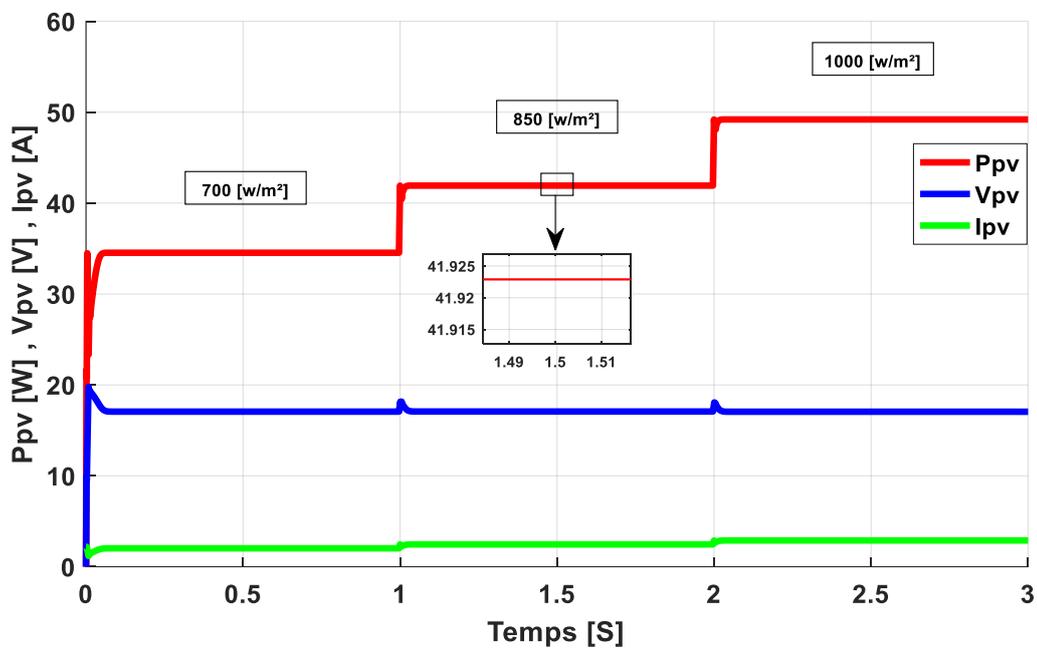


(b)

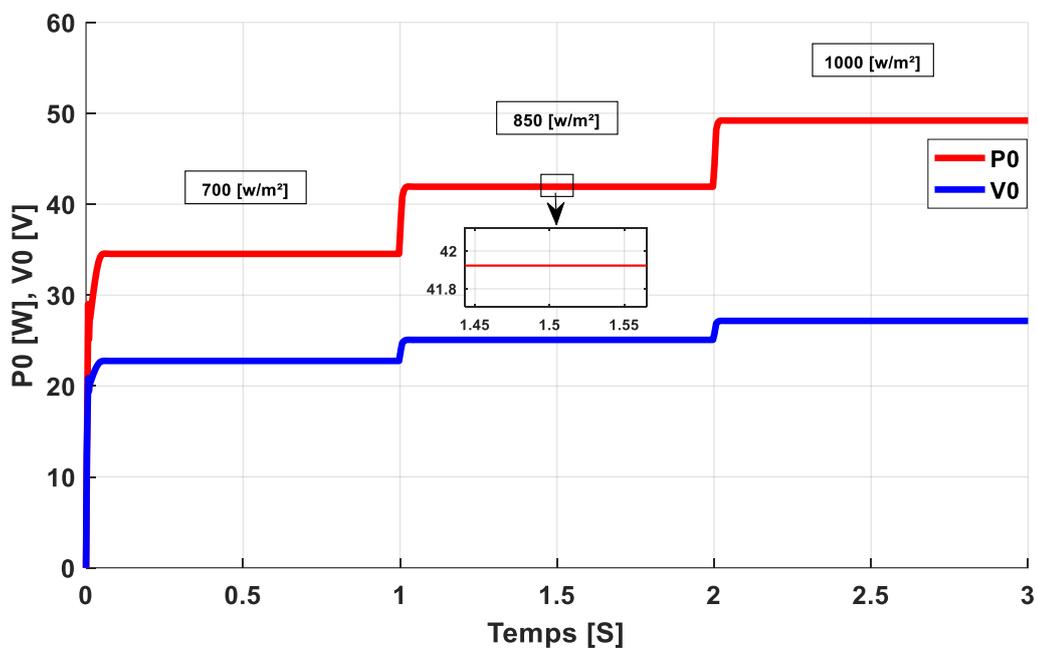
Figure III.8 Résultats de simulation de la commande MPPT (P&O) lors d'un changement de charge : (a) puissance du panneau PV, (b) rapport cyclique

III.3.2.2 Commande MPPT par logique floue

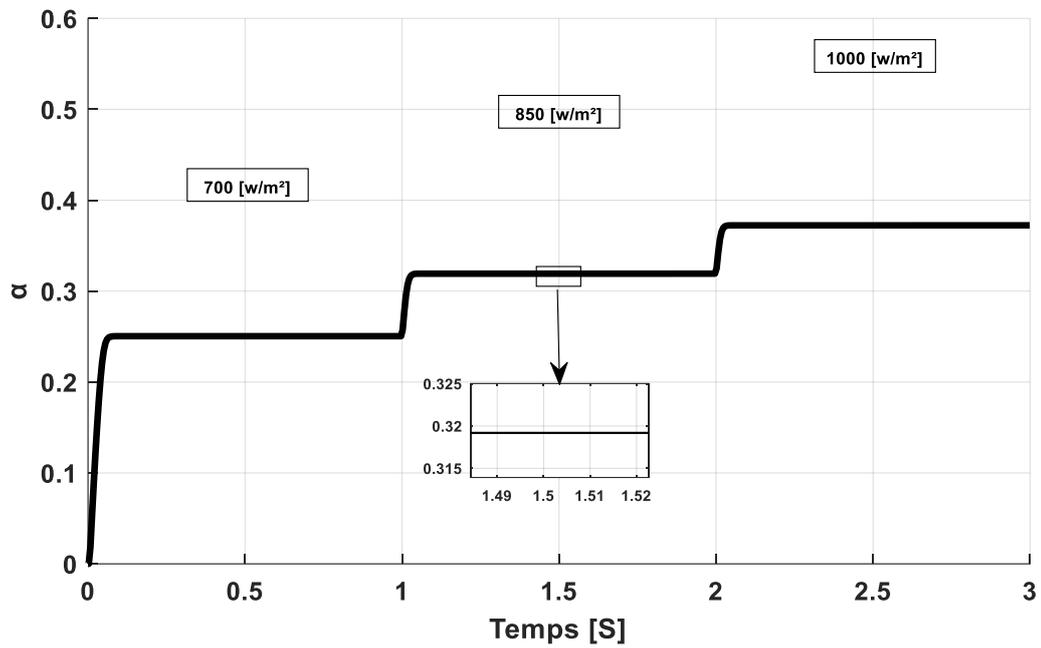
a) Test 1 :



(a)



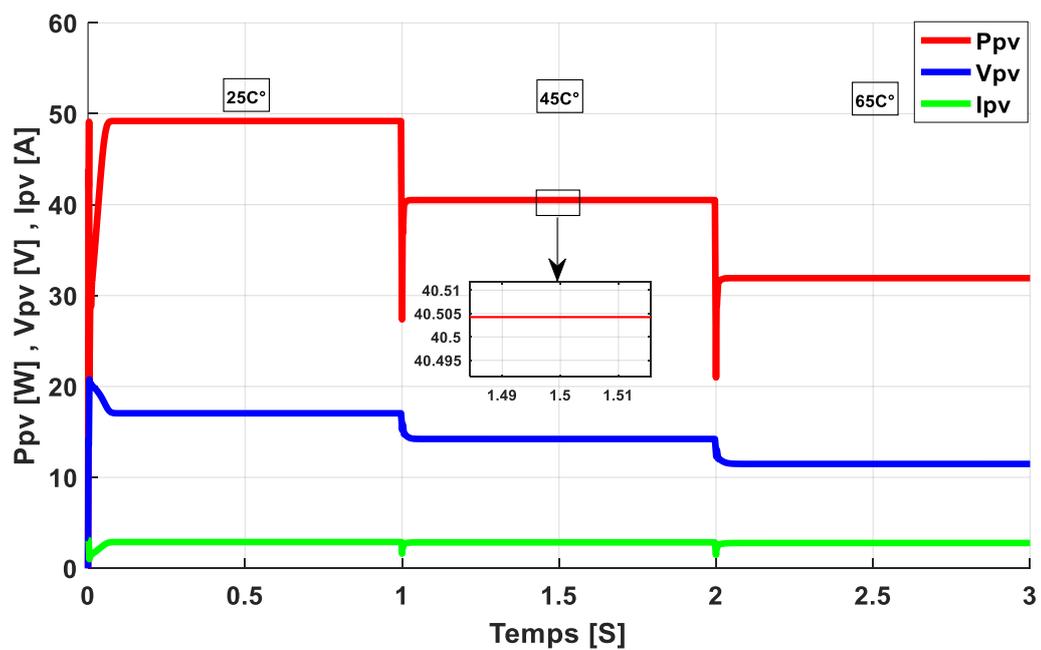
(b)



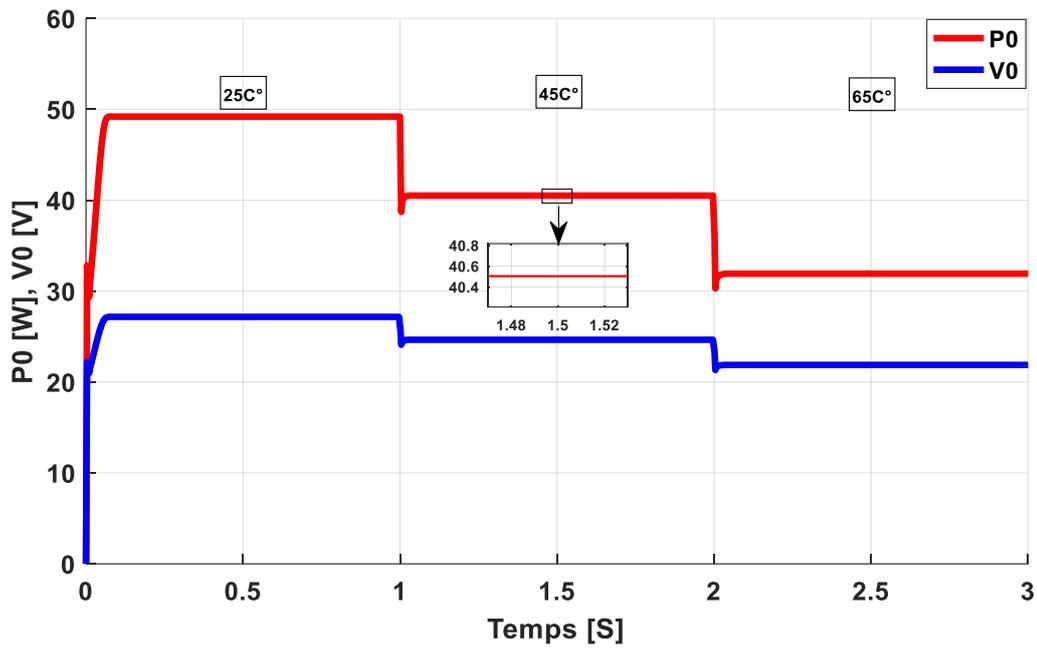
(c)

Figure III.9 Résultats de simulation de la commande MPPT (logique floue) lorsque l'éclairement est variable : (a) sortie du panneau PV, (b) sortie du convertisseur, (c) rapport cyclique

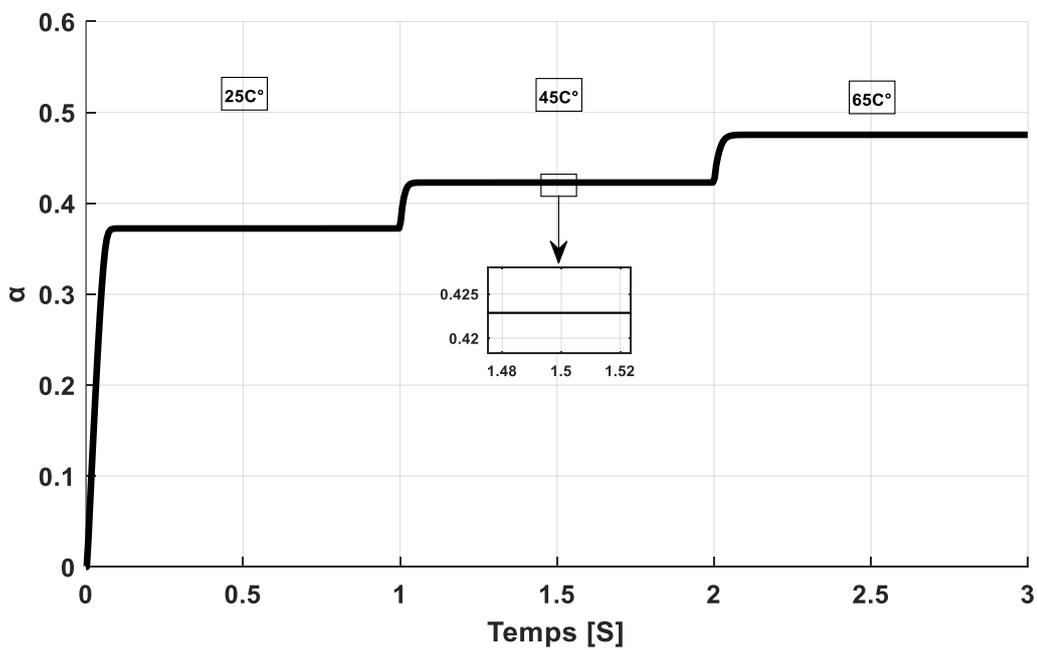
b) Test 2 :



(a)



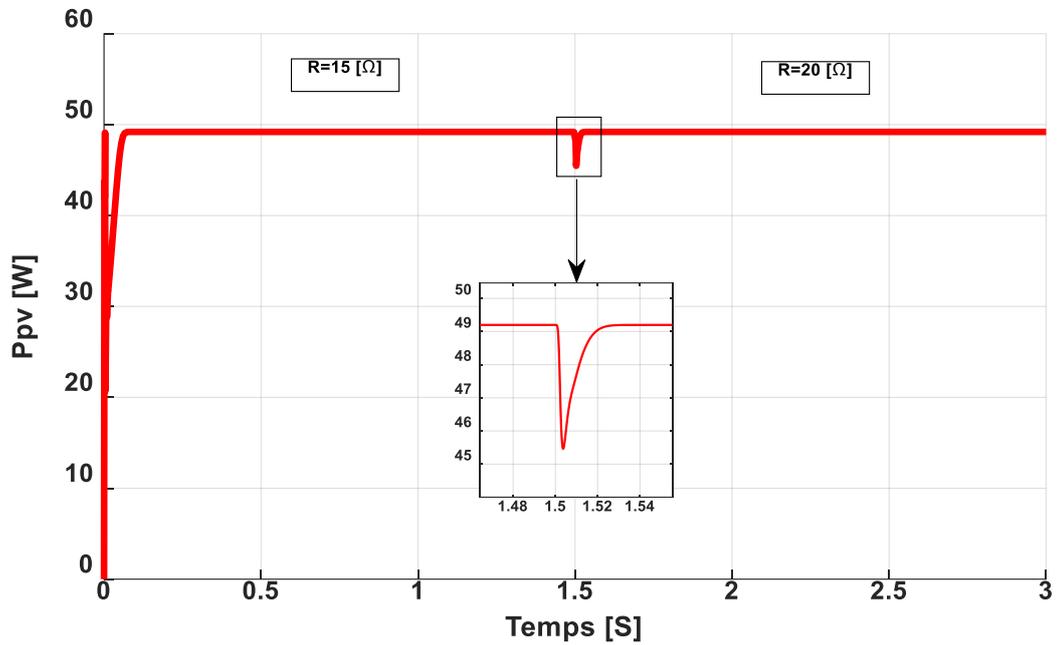
(b)



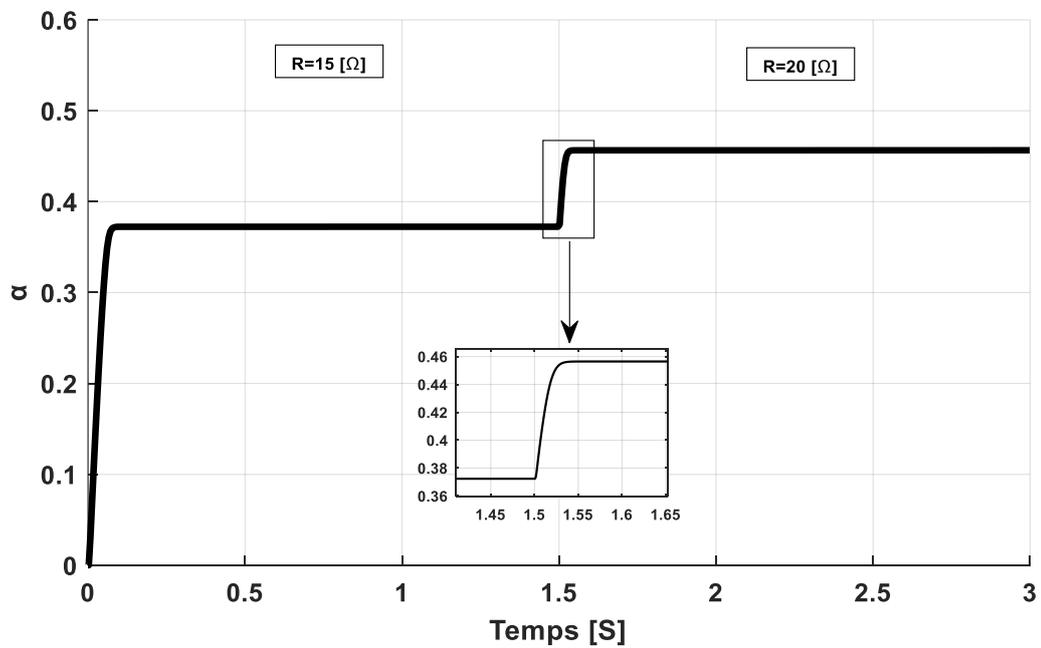
(c)

Figure III.10 Résultats de simulation de la commande MPPT (logique floue) à des températures variables:
 (a) sortie du panneau PV, (b) sortie du convertisseur, (c) rapport cyclique

c) Test 3 :



(a)



(b)

Figure III.11 Résultats de simulation de la commande MPPT (logique floue) lors d'un changement de charge : (a) puissance du panneau PV, (b) rapport cyclique

On peut observer sur les figures (III.6 et III.9) que l'augmentation de l'éclairement affecte positivement la puissance (P_{pv} et P_0) et le courant (I_{pv}), contrairement à la tension (V_{pv}) qui reste constante et n'est pas affectée. De plus, le rapport cyclique (α) augmente avec l'augmentation de l'éclairement. On constate, d'après les figures (III.7 et III.10), qu'une augmentation de la température a un effet négatif sur la puissance (P_{pv} et P_0) et la tension (V_{pv}). Par contre, le courant (I_{pv}) reste constant et n'est pas affecté par la température. Le rapport cyclique (α) augmente avec la température. On observe sur les figures (III.8 et III.11) que lorsque la charge (R) change à $t=1,5$ s, il y a une diminution de la puissance (P_{pv}). Nous observons également que le rapport cyclique (α) augmente lorsque la charge augmente.

Les variations climatiques et de charge sur la commande P&O et la commande par logique floue montre des comportements légèrement différents, en particulier en ce qui concerne la rapidité, la précision et les oscillations. Afin de déterminer quelle méthode est la plus efficace, ces deux méthodes sont comparées.

III.3.2.3 Étude comparative

Pour comparer les performances de la commande P&O et de la commande par logique floue, nous avons réalisé les simulations suivantes :

❖ **test 1 :**

✓ **$I_r = 1000\text{W}/\text{m}^2$; $T = 25^\circ\text{C}$ et $R = 15 \Omega$.**

❖ **test 2 :**

✓ **I_r variable : ($700\text{W}/\text{m}^2$, $850\text{W}/\text{m}^2$ et $1000\text{W}/\text{m}^2$) ;**

✓ **$T = 25^\circ\text{C}$ et $R = 15 \Omega$.**

❖ **test 3 :**

✓ **T variable : (25°C , 45°C et 65°C) ;**

✓ **$I_r = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et $R = 15 \Omega$.**

❖ **test 4 :**

✓ **R variable : (15Ω et 20Ω) ;**

✓ **$I_r = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$.**

Test 1 :

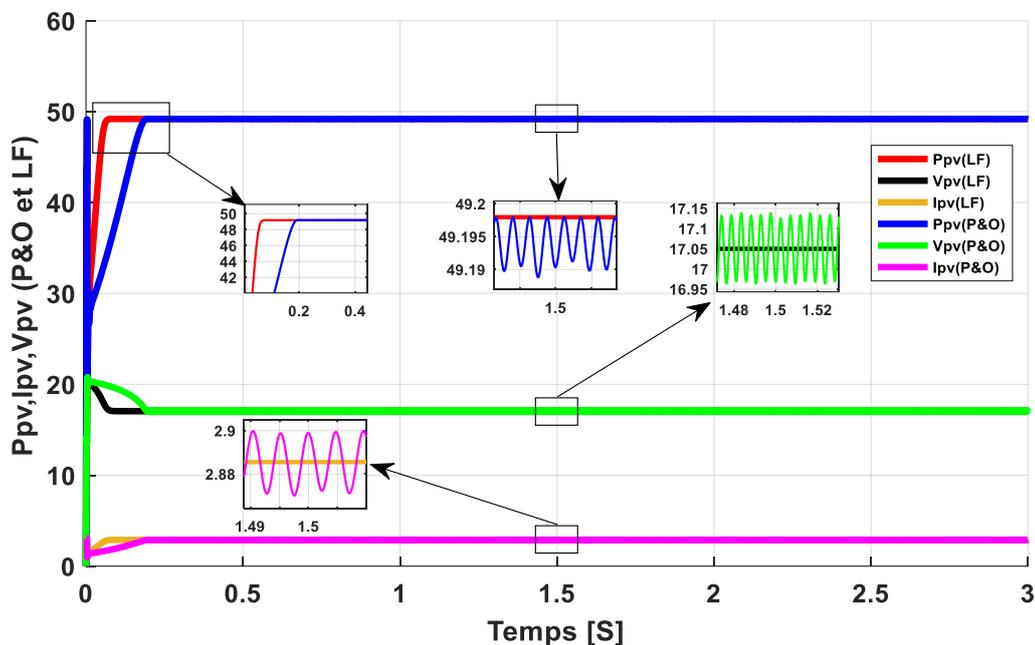


Figure III.12 Évaluation de l'efficacité de la commande P&O et de la commande par logique floue

Test 2 :

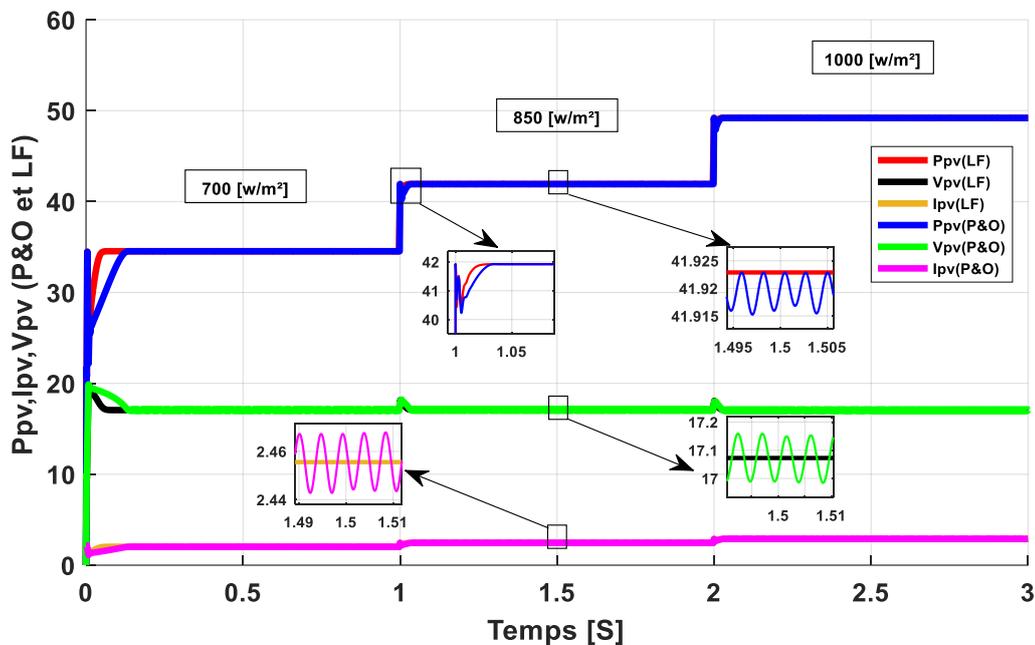


Figure III.13 Évaluation de l'efficacité de la commande P&O et de la commande par logique floue lorsque l'éclairement est variable

Test 3 :

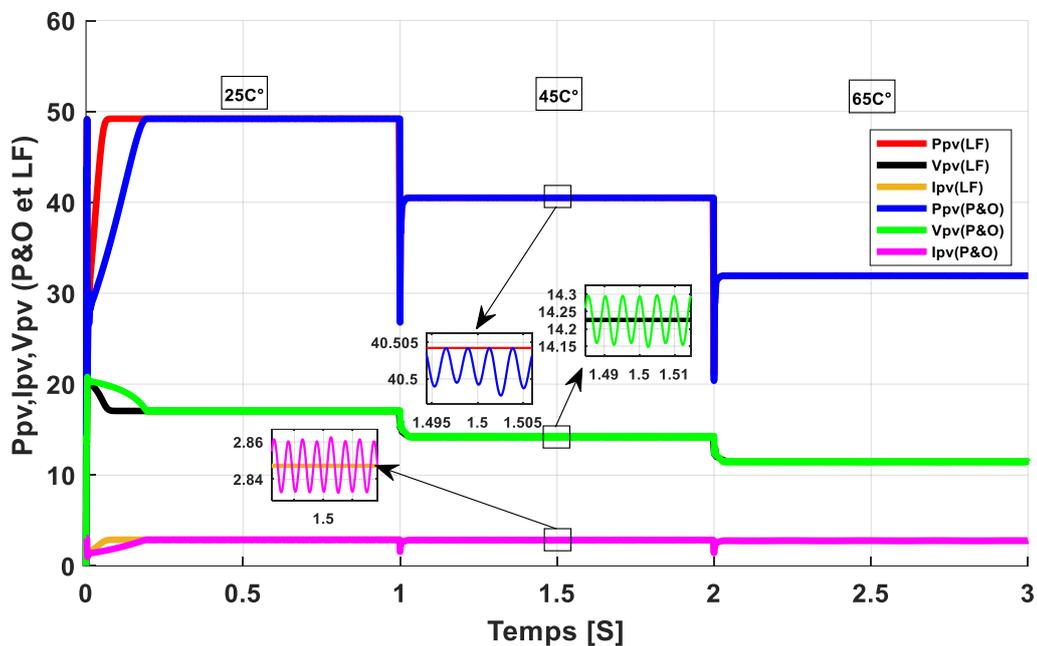


Figure III.14 Évaluation de l'efficacité de la commande P&O et de la commande par logique floue à des températures variables

Test 4 :

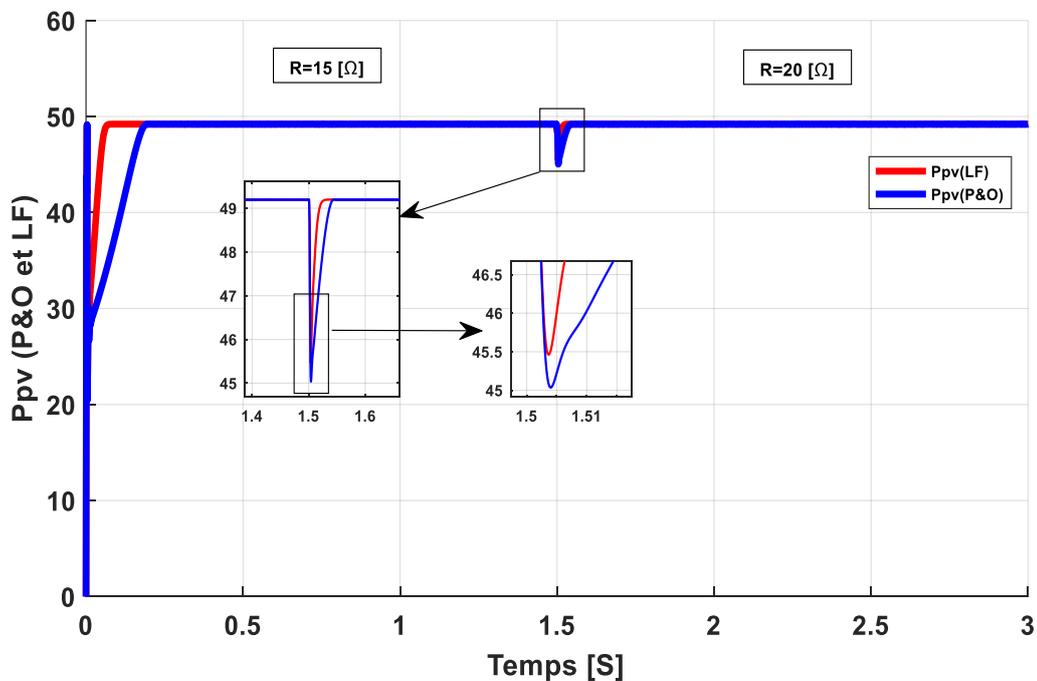


Figure III.15 Évaluation de l'efficacité de la commande P&O et de la commande par logique lors d'un changement de charge

D'après les figures (III.12, III.13 et III.14), on remarque que la commande par logique floue est plus rapide que la commande P&O dans toutes les courbes et tous les scénarios (Tests). En outre, la commande P&O présente des oscillations dans les courbes de la puissance, du courant et de la tension, tandis que la commande par logique floue est plus stable.

Grâce à la figure (III.15), on remarque qu'au moment où la charge (R) change à $t = 1,5$ s, il y a une diminution notable de la courbe de puissance (P_{pv}) de la commande P&O par rapport à la commande par logique floue. De plus, la courbe de puissance (P_{pv}) pour la commande par logique floue atteint plus rapidement la stabilité par rapport à la commande P&O.

III.4 Conclusion

Le troisième et dernier chapitre présente la simulation d'un panneau solaire photovoltaïque dans différentes conditions climatiques. Les résultats de la simulation montrent que l'augmentation de l'éclairement augmente la puissance produite par le panneau photovoltaïque (P_{pv}), tandis que l'augmentation de la température la diminue.

Des simulations ont également été réalisées sur un système solaire photovoltaïque utilisant des commandes MPPT de type P&O et logique floue dans des conditions d'éclairement, de température et de charge différentes et constantes. Les résultats de la comparaison montrent que la commande MPPT par logique floue est plus rapide, plus efficace et plus précise que la commande MPPT par P&O.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, on a présenté une étude des systèmes photovoltaïques en modélisant et en simulant un système photovoltaïque fonctionnant à l'aide de la commande MPPT du type conventionnel (P&O) et du type intelligent (logique floue).

Dans le premier chapitre, avant de mettre en œuvre la modélisation, nous avons fourni des informations sur les systèmes photovoltaïques et mentionné certains de leurs types. Nous avons également expliqué comment fonctionne la conversion photovoltaïque et, enfin, nous avons mentionné les principaux avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié la technique de commande MPPT via P&O et la logique floue, afin de suivre le point de puissance maximale dans différentes conditions climatiques, d'autant plus que le plus grand ennemi des systèmes photovoltaïques est le changement climatique (éclairage et température). Dans ce chapitre, nous avons également étudié quelques convertisseurs DC/DC.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous avons étudié et simulé un système photovoltaïque de 49 W utilisant deux commandes du type P&O et logique floue, connecté à un convertisseur DC/DC (Boost) dans différentes conditions telles que le changement de l'éclairage, de la température et de la charge. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de l'éclairage a un effet positif, tandis que la température a un effet négatif sur la puissance. On constate aussi que la commande P&O présente certains inconvénients, tels que l'oscillation, la chute brutale de la puissance lorsque la charge change, et elle est plutôt lente par rapport à la commande par logique floue.

Enfin, pour l'amélioration de ce travail, quelques perspectives sont proposées à savoir :

- l'implémentation pratique des techniques MPPT étudiées ;
- l'utilisation d'autres stratégies de commandes (MPPT).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Dj. Loukriz, " Poursuite du point maximale d'un système photovoltaïque par les méthodesIntelligente ", Mémoire master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [2] F. Benadel, " Etude et simulation d'une commande MPPT pour système PV ", Mémoire master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [3] R. Ayat, " Contribution à la commande synergétique d'une installation de production d'énergie photovoltaïque autonome ", Thèse doctorat, Université Ferhat Abbas – Setif 1, 2021.
- [4] M.N. Mechalikh, Ch.E. Hamada, " Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ", Mémoire master, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2013.
- [5] A. Harendi, A. Arbaoui," Calcul de l'MPPT par réseaux de neurone pour un système photovoltaïque ", Mémoire master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [6] O. Godin, " L'intérêt du solaire thermique en matière de rénovation ", Annales des Mines-Réalités industrielles, 2022.
- [7] F. Hananou, A. Rouabah, " Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque ", Mémoire master, Université Kasdi Merbah Ouargla 2014.
- [8] M. Sankar, B. Karthikeyan, B. Vineeth, V.C. Raju, K. Kaliappan, " Analysis of solar energy technology in leading countries ", International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2019.
- [9] <https://fr.statista.com/statistiques/753480/capacite-solaire-photovoltaique-monde/>.
- [10] B. Faiza, " Etude et simulation d'une commande MPPT pour système PV ", Mémoire master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [11] G. Benterki, A. Mekidech, " Commande MPPT appliquée à un système PV connecté à un réseau électrique triphasé ", Mémoire master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [12] A. Houam, " Optimisation de l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de distribution par la commande MPPT ", Thèse doctorat, Université Larbi Tebessi – Tébessa, 2022.
- [13] M.Z. Ouanoughi," Commande d'un système photovoltaïque par deux techniques (P&O et FLC) ", Mémoire master, Université Mohamed Khider Biskra, 2019.

Références Bibliographiques

- [14] M.A.S. Selman, M.E.A. Taibi, " Étude des panneaux solaires photovoltaïques ", Mémoire licence, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2021.
- [15] M. Trieket, A. Benayache, " Commande MPPT d'un système photovoltaïque autonome ", Mémoire master, Université Mohamed Seddik Benyahia Jijel, 2022.
- [16] A. Benhaya, " Cellules photovoltaïques ", Journées portes ouvertes sur la Faculté des Sciences Exactes, 2017.
- [17] S. Kouche, C. Bounecer, " Etude et simulation d'une commande MPPT à base de la logique floue ", Mémoire master, Université A. MIRA – Bejaia, 2020.
- [18] H. Essakhi, S. Farhat, " Modélisation et simulation d'un module photovoltaïque ", 5 èmes Journées internationale matériaux et environnement, 2019.
- [19] B.L. Sofia, " Cours énergie solaire photovoltaïque ", Université A.Mira de Bejaia, 2015.
- [20] F. Belhachat, C. Larbes, L. Barazane, S. Kharzi, " Commande neuro-floue d'un hacheur MPPT ", 4ème conférence internationale " Computer Integrated Manufacturing", 2007.
- [21] F. Tati, O.B. Lamoudi, " Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque optimisé par logique floue ", Mémoire master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [22] A. Zahra, C. Imane, B. Ahmed, " Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par la commande MPPT ", Mémoire master, Université Salhi Ahmed - Naama., 2012.
- [23] D. Rekioua, " Hybrid renewable energy systems, optimization and power management control ", Green energy and technology, livres.google.com, 2019.
- [24] B. Tidjet, F. Ghilas, " Modélisation et optimisation de puissance d'un système Photovoltaïque autonome ", Mémoire master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2020.
- [25] A. Belkaid, " Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome ", Thèse doctorat, Université Ferhat Abbas – Setif 1, 2018.
- [26] H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, M. Abid, " Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque ", Journal of renewable energies, 2014.
- [27] A. Djalab, M.M. Rezaoui, A. Teta, M. Boudiaf, " Analysis of MPPT methods: P&O, INC and fuzzy logic (CLF) for a PV system ". 2018 6e Conférence internationale sur l'ingénierie de control, 2018.

Références Bibliographiques

- [28] A. Bouchter, C. Mokrane, " Comparaison entre différentes techniques de commande MPPT d'un système solaire ", Mémoire master, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2020.
- [29] A. hakoumi, A. Benamar, T. Ghitaoui, " Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue ", Mémoire master, Université Ahmed Draia Adrar, 2019.
- [30] H. Attoui, " Contribution à la synthèse de nouvelles stratégies de commande des systèmes", Thèse doctorat, Université Ferhat Abbas – Setif 1, 2017.
- [31] B. Bendib, F. Krim, H. Belmili, M. F. Almi, S. Boulouma, " Advanced fuzzy MPPT controller for a stand-alone PV system ". Energy procedia, 2014.
- [32] A. Ganesan, A.A.R. Al-Abri, " Mathematical Modeling of Solar PV Panels ", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2018.

الملخص :

تم في هذا العمل تقديم دراسة عن الأنظمة الكهروضوئية، حيث قمنا بتطبيق تحكم MPPT (تتبع أقصى نقطة للطاقة) باستخدام طريقتين، طريقة تقليدية تسمى الاضطراب و المراقبة وطريقة ذكية تسمى المنطق الضبابي، وذلك للحصول على أفضل أداء للأنظمة الكهروضوئية في أي ظرف. علاوة على ذلك، فإن تغير المناخ هو المشكلة الرئيسية التي تواجه هذه الأنظمة. قمنا بمحاكاة نظامنا باستخدام ماتلاب/سيمولينك. أظهرت نتائج المحاكاة فعالية كلا الطريقتين، ولكن التحكم بالمنطق الضبابي كان أفضل من التحكم بالاضطراب و المراقبة.

الكلمات المفتاحية: الأنظمة الكهروضوئية، MPPT، الاضطراب و المراقبة، المنطق الضبابي.

Résumé:

Dans ce travail, une étude sur les systèmes photovoltaïques a été présentée, dans laquelle nous avons appliqué la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) en utilisant deux méthodes, une méthode traditionnelle appelée P&O et une méthode intelligente appelée logique floue, afin d'obtenir le meilleur rendement du système photovoltaïque dans n'importe quelle condition. Par ailleurs, le changement climatique est le principal problème auquel sont confrontés ces systèmes. Nous avons simulé notre système à l'aide de MATLAB/SIMULINK. Les résultats de la simulation montrent l'efficacité des deux méthodes, mais la commande par logique floue est plus performante que la commande P&O.

Mots clés: systèmes photovoltaïques, MPPT, perturbation et observation, logique floue.

Abstract:

In this work, a study on photovoltaic systems has been presented, in which we have applied MPPT (Maximum Power Point Tracking) control using two methods, a traditional method called P&O and an intelligent method called fuzzy logic, in order to obtain the best performance from the photovoltaic system under any condition. Moreover, climate change is the main problem facing these systems. We simulated our system using MATLAB/SIMULINK. The simulation results show the effectiveness of both methods, but fuzzy logic control outperforms P&O control.

Keywords: photovoltaic systems, MPPT, perturbation and observation, fuzzy logic.