

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département : Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

**OUCHEFOUNE Abderraouf
HAMDANI Omar**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : **Electromécanique**

Option : **Electromécanique**

Thème :

**Comparaison des différentes techniques de poursuites de point de
puissance maximale(MPPT) dans une chaine de conversion
d'énergie photovoltaïques**

Devant le jury composé de :

Mr. SAOUDI.K	MCA	UAMOB	Président
Mme.BEN SMAILE.S	MCB	UAMOB	Encadreur
Mr. REZKI.M	MCA	UAMOB	Examinateur

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

Avant tous, Allah dit : « mais vous ne le voudrez que si Allah le veut », donc ; Merci d'abord et tous les temps à Allah seul.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein de l'université **Akli Mohand Oulhadj Bouira -UAMOB-**, faculté des sciences et des sciences technologies, sous-direction du Dr. **BENSMAIL.S**, à qui nous présentons l'expression de notre profonde gratitude pour tous les encouragements qu'elle nous a prodigué pendant toute la durée de ce travail.

Nous sommes très reconnaissants aux membres du jury: Monsieur le président du jury et les membres, qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'examiner et d'évaluer ce travail.

DÉDICACE

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

A celle qui a attendue avec patience les fruits de sa bonne éducation

et qui a toujours été là pour moi ; ma très chère mère .

A celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté

fait toujours les grands hommes ; mon cher père .

A mes chers frères : Mohamed, howari

A ma très chère soeur : Roumaïssa

A toute ma famille, grande et petite,

A tous mes collègues de promotion en reconnaissance pour leur

solidarité,

A tous mes amis qui me sont très chers.

HAMDANI OMAR

DÉDICACE

Je dédie ce travail à,

*Mes très chers parents pour leurs soutient moral et financier et
d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour
terminer mes études, en leur espérant une longue vie et que dieu
les gardes.*

*A mes chers frères, sœurs et leurs enfants, source de joie
Et de bonheur*

A toute ma famille de près ou de loin sans exception.

*Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma
formation, depuis le primaire à ce jour.*

*A toute mes amis surtout mon binôme et a tous qui m'ont aidé
pour réaliser ce mémoire.*

Enfin, à ceux qui j'aime, et qui m'aiment.

**OUCHEFOUNE
ABDERRAOUF**

Remerciements	II
Dédicace	III
Dédicace	IV
Liste des figures	IX
Liste des tableaux.....	XII
Liste des acronymes et symboles.....	XIII
Introduction général.....	1

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition des énergies renouvelables.....	3
I.3 L'énergie solaire.....	3
I.4 Historique de l'énergie photovoltaïque.....	3
I.5 L'effet photovoltaïque.....	4
I.6 La cellule photovoltaïque.....	4
I.6.1 Le principe de fonctionnement.....	5
I.6.2 Différents types de cellules solaires.....	6
I.6.2.1 Les cellules monocristallines.....	6
I.6.2.2 Les Cellules poly cristallines.....	6
I.6.2.3 Les Cellules amorphes.....	7
I.6.3 Comparaison.....	9
I.6.4 Assemblage des modules photovoltaïques.....	10
I.6.4.1 Association en série.....	10
I.6.4.2 Association en parallèle.....	10
I.6.4.3 Association hybride (en série et en parallèle)	10

I.7 Protection classique du GPV.....	11
I.7.1 Diode anti-retour.....	11
I.7.2 Diode by-pass	12
I.8 Avantage et inconvénient de l'énergie photovoltaïque	12
I.9 Convertisseur DC-DC.....	13
I.9.1 Convertisseur BOOST.....	13
I.9.2 Principe de fonctionnement d'un convertisseur BOOST.....	14
I.9.3 Avantages de convertisseur Boost.....	14
I.10 Conclusion.....	15

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

II.1 Introduction.....	16
II.2 Générateur photovoltaïque.....	16
II.2.1 Les paramètres les plus importants du GPV.....	17
II.3 Modèle mathématique du GPV.....	17
II.4 Simulation de module photovoltaïque.....	20
II.4.1 Caractéristique électrique du GPV	20
II.4.2 Les facteurs qui influencent le module PV.....	21
II.4.2.1 Influence du l'éclairement sur les caractéristiques (I-V) et (P-V).....	21
II.4.2.2 Influence de la Température sur les courbes (I-V) et (P-V).....	22
II.5 Modèle mathématique équivalent.....	23
II.5.1 Rapport de conversion.....	24
II.6 Conclusion.....	26

Chapitre III : Maximisation de puissance de système photovoltaïque

III.1 Introduction.....	27
-------------------------	----

III.2 Commande MP.....	28
III.2.1 Définition.....	28
III.2.2 Les techniques de commande MPPT.....	29
III.2.2.1 Méthode Perturbation & Observation (P&O).....	29
III.2.2.2 Méthode de l'incrémentation de la conductance « Inc Cond ».....	31
III.2.2.3 MPPT à base de la Logique Floue « FLC ».....	32
III.3 Simulation des techniques MPPT.....	36
III.3.1 Modèle d'une chaîne photovoltaïque sur le logiciel Matlab/Simulink.....	36
III.3.2 Fonctionnement sous des conditions environnementales stables.....	36
III.3.3 Fonctionnement sous des conditions environnementales variable.....	37
III.3.3.1 Température constante et éclairage variable «lent »	37
III.3.3.2 Température constante et éclairage variable « brusque »	38
III.4 Interprétation des résultats et comparaison.....	38
III.5 Conclusion.....	39

Chapitre IV : Introduction de convertisseur Zeta dans le système photovoltaïque

IV.1 Introduction.....	41
IV.2 Convertisseur Zeta.....	41
IV.2.1 Les avantages et les inconvénients du convertisseur Zeta.....	42
IV.2.2 Dimensionnement des inductances et du condensateur.....	45
IV.2.3 Simulation, résultats et discussion.....	46
IV.3 Simulation des techniques MPPT.....	47
IV.3.1 Fonctionnement sous des conditions environnementales stables.....	47
IV.3.2 Fonctionnement sous des conditions environnementales variables.....	48
IV.3.2.1 Température constante et Eclairage variable « lent ».....	48

IV.3.2.2 Température constant et éclairage variable « brusque »	49
IV.3.3 Interprétation et la comparaison des résultats.....	50
IV.4 Etude comparative entre convertisseur Zeta et Boost.....	51
IV.4.1 Interprétation et la comparaison des résultats.....	54
IV.5 Conclusion.....	55
Conclusion générale et perspectives	56

Chapitre I

Figure I.1: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	5
Figure I.2: le type de cellule monocristalline.....	6
Figure I.3: le type de cellule poly cristalline.....	7
Figure I.4: le type de cellule amorphe.....	7
Figure I.5: Cellule photovoltaïque de type cuivre - indium – sélénium.....	8
Figure I.6: Cellules identiques en série.....	10
Figure I.7: Cellules identiques en parallèle.....	10
Figure I.8: Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (np+ ns) cellules identique.....	11
Figure I.9: Schéma équivalent de connexion en série des cellules PV avec diode anti-retour.....	11
Figure I.10: Module de 36 cellules protégées par deux diodes de by-pass.....	12
Figure I.11: Conversion DC-DC.....	13
Figure I.12: Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Boost.....	14

Chapitre II

Figure II.1: Cellule, module et générateur PV.....	16
Figure II.2: Caractéristique de la Cellule Solaire.....	17
Figure II.3: Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.....	18
Figure II.4: Caractéristique courant-tension I-V d'un module PV	20
Figure II.5: Caractéristique puissance-tension P-V d'un module photovoltaïque.....	21
Figure II.6: Caractéristiques (I-V) du module PV pour différentes valeurs d'Éclairements.....	21
Figure II.7: Caractéristiques (P-V) du module PV pour différentes valeurs d'Éclairements.....	22
Figure II.18: Caractéristiques (I-V) du module PV pour différentes valeurs de la température.....	22
Figure II.9: Caractéristiques (P-V) du module PV pour différentes valeurs de la température.....	23
Figure II.10: a) Circuit idéal d'un convertisseur survolteur avec interrupteur k fermé, b) Circuit idéal d'un convertisseur survolteur avec interrupteur k ouvert.....	23

Chapitre III

Figure III.1: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....27

Figure III.2: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal

a) Suite à une variation d’ensoleillement b) Suite à une variation de charge,

c) Suite à une variation de température.....29

Figure III.3: Principe de la MPPT avec la méthode PO.....30

Figure III.4.: Organigramme de la méthode P&O.....30

Figure II.5: Principe de la MPPT avec la méthode IC.....31

Figure III.6: Organigramme de la méthode IC.....32

Figure III.7: Principe du Contrôleur flou.....33

Figure III.8: Fonctions d'appartenances de : (a) L'entrée E, (b) L'entrée ΔE et (c) La sortie ΔD34

Figure III.9 : Modèle de simulation d’une chaîne photovoltaïque avec le logiciel Matlab/Simulink..36

Figure III.10 : Variation de la puissance du panneau PV des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$37

Figure III.11 : Variation du rapport cyclique des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$37

Figure III.12 : Variation de la puissance du panneau PV des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions variables de l’ensoleillement «lent».....38

Figure III.13 : Variation de la puissance du panneau PV des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions variables de l’ensoleillement « Brusque ».....38

Chapitre IV

Figure IV.1 : Circuit électrique d’un convertisseur DC-DC de type Zeta.....42

Figure IV.2 : Circuit idéal d’un convertisseur Zeta avec interrupteur k fermée.....43

Figure IV.3 : Circuit idéal d’un convertisseur Zeta avec interrupteur k ouvert44

Figure IV.4 : La tension et le courant de sortie du convertisseur Zeta à $D=0,4$ et $D=0.7$46

Figure IV.5 : Variation de la puissance du panneau PV des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$	48
Figure IV.6 : Variation du rapport cyclique des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$	48
Figure IV.7: Variation de la puissance du panneau PV des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions variables de L'ensoleillement « lent».....	49
Figure IV.8 : Variation de la puissance du panneau PV des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions variables de l'ensoleillement « brusque ».....	49
Figure IV.9 : Variation de la puissance du GPV de technique MPPT (P&O), sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$	51
Figure IV.10 : Variation de la puissance du GPV de technique MPPT (Inc-Cond), sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$	51
Figure IV.11 : Variation de la puissance du GPV de technique MPPT (FLC), sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$	52
Figure IV.12: Variation de la puissance du panneau PV de technique MPPT (P&O), sous des conditions variables de L'ensoleillement « brusque».....	52
Figure IV.13: Variation de la puissance du panneau PV de technique MPPT (Inc-Cond) ,sous des conditions variables de L'ensoleillement « brusque».....	53
Figure IV.14: Variation de la puissance du panneau PV de technique MPPT (FLC) ,sous des conditions variables de L'ensoleillement « brusque».....	53
Figure IV.15 : Variation de la tension de sortie du convertisseur par les trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$	
a) Convertisseur boost b) Convertisseur zeta.....	54

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Comparaison entre les différents types des cellules.....10

Chapitre II

Tableau II.1: Paramètres du GPV19

Chapitre III

Tableau III.1. Tableau des règles floues.....36

Tableau III.2 : Comparaison numérique des trois algorithmes MPPT.....40

Chapitre IV

Tableau IV.1: les paramètres du convertisseur zeta.....47

Tableau IV.2 : Comparaison des trois algorithmes MPPT..... ;.....50

Tableau IV.3: Comparaison entre les deux convertisseurs55

Acronymes

PV	Panneau Photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque
MPP	Maximum Power Point
PPM	Point de Puissance Maximal.
MPPT	Poursuite du Point de Puissance Maximale « Maximum Power Point Tracking en anglais »
ConvertisseurDC-DC	Convertisseur Continu-continu
P&O	Perturber et Observer « Perturb and Observe en anglais »
Inc-Cond	Conductance Incrémentée « Incremental Conductance en anglais »
FLC	Contrôleur avec la logique floue « FuzzyLogic Controller en anglais »
FF	Facteur de forme.
IGBT	Transistors Bipolaire à Gâchette Isolée
MOSFETS	Transistors à effet de champ d'oxyde de métal

Symboles

I_{SC}	Le courant de court-circuit (A).
V_{OC}	La tension de circuit ouvert (V).
I_{mpp}	Courant d'un module PV au point de puissance maximale (A).
V_{mpp}	Tension d'un module PV au point de puissance maximale (V).
P_{max}	La puissance maximale produite PV (W).
E_a	Éclairement (w/m^2).
E_{ref}	Éclairement de référence (w/m^2).
I_{ph}	Le courant photonique, il dépend de la température et de l'ensoleillement (A) .
V_{PV}	Tension de sortie de la cellule photovoltaïque en Volt (V).
R_S	Résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexion.
R_P	Résistance shunt qui modélise les courants de fuites de la jonction (Ω).
I_D	Courant de jonction P/N (A).
I_P	Courant de fuite de la jonction (A).
T_{ref}	Température référence (K°).
T_f	Température absolue de fonctionnement de la cellule (K°).

K_i	Le rapport entre le courant de court-circuit et la température.
K	Constant de Boltzmann ($K=1.38*10^{-38}$ J/K).
V_t	Tension thermique (V).
q	Charge d'électron ($q=1.6*10^{-19}$)C.
a	Facteur d'idéalité de la diode.
I_0	Le courant de saturation de la diode (A).
N_S	Nombre de cellules connectées en série par module.
$I_{0,n}$	Le courant de saturation inverse
η	Rendement de la cellule photovoltaïque.
V_i	La tension d'entrée d'un hacheur (V).
V_{opt}	La tension optimale.
V_o	La tension de sortie d'un hacheur (V).
I_{opt}	Courant optimale.
R_{opt}	Résistance optimale.
D	Rapport cyclique.
D_{opt}	Rapport cyclique optimale.
dD	La variation du rapport cyclique D.
E	L'erreur.
ΔE	Le changement de l'erreur.
V_L	La tension aux bornes de l'inductance (V).
I_L	Le courant de l'inductance (V).
V_c	La tension aux bornes de condensateurs (V)
$P(K)$	Puissance actuelle du générateur photovoltaïque (W).
$P(K - 1)$	Puissance précédente (W).
ΔP	Variation de la puissance (W).
$V(K)$	Tension actuelle du générateur photovoltaïque (V).
$V(K - 1)$	Tension précédente (V).
ΔV	Variation de la tension (V).

INTRODUCTION GENERALE

La crise pétrolière et la demande croissante d'énergie, ainsi que la possibilité d'une réduction de l'offre de carburants conventionnels, ont motivé des progrès dans la recherche et les applications des énergies renouvelables. Parmi les sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire est actuellement considérée comme la source d'énergie naturelle la plus utile car elle est abondante, propre et distribuée sur toute la planète. L'énergie solaire est un facteur majeur dans tous les autres processus de production d'énergie sur Terre. Malgré ces avantages, l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire est actuellement faible et le coût initial de mise en œuvre est toujours considéré comme élevé. [1][2]

Malgré ses divers avantages, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients dus à la relation entre son intensité et les conditions climatiques (intensité variable), son caractère intermittent et son coût. La nécessité de faire une étude de simulation de ces énergies pour optimiser leurs performances est très utile. [3]

Les conditions atmosphériques qui changent rapidement peuvent réduire la puissance de sortie du panneau photovoltaïque (PV) et, par la suite, les performances du système photovoltaïque. En raison de ces inconvénients, une conception efficace d'un système photovoltaïque est nécessaire. Par conséquent, pour que la production photovoltaïque soit efficace, une technique compétente de suivi du point de puissance maximale (MPPT) est nécessaire pour prévoir et suivre le MPP dans toutes les conditions météorologiques et pour fixer le point de fonctionnement de l'installation photovoltaïque. dans le MPP. [4][5]

Le choix du convertisseur DC-DC pour systèmes PV joue un rôle majeur dans l'amélioration de l'efficacité du système PV. Divers convertisseurs DC-DC dans le système PV sont analysés dans de nombreuses recherches. Les convertisseurs sont divisés en un certain nombre de catégories, basées sur l'application, types de commutation, modes de courant, etc. il est évident que chaque convertisseur a ses propres avantages et inconvénients[6]. Par conséquent, il est essentiel de développer un système PV qui a la capacité à produire une efficacité maximale, une contrainte minimale et une ondulation réduite. C'est pourquoi dans ce travail nous utiliserons deux types de convertisseur DC-DC (convertisseur Zeta et Boost) Pour tester l'efficacité de chaque type dans les systèmes PV.

L'objectif principal de ce travail est le développement et la simulation d'algorithmes MPPT. Cela inclut des algorithmes intelligents, y compris des algorithmes traditionnels, qui suivent le MPP dans toutes les conditions météorologiques et peuvent ainsi augmenter l'efficacité du système PV.

Le système proposé consiste en un panneau solaire, un convertisseur DC-DC et un contrôleur MPPT. Le suivi du point maximal (MPPT) est réalisé en utilisant les méthodes suivantes : Perturbation et d'Observation (P&O) est populaire et la plus couramment utilisée dans la pratique en raison de sa simplicité d'algorithme et de la facilité de mise en œuvre, la méthode incrémentation de conductance, et la méthode de l'intelligence artificielle par logique floue.

Ce mémoire comprend quatre chapitres: le résumé de chaque chapitre est donné comme suit :

Le premier chapitre présente des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque, le principe de l'effet photovoltaïque, la conception de la cellule PV, Enfin, le convertisseur DC-DC de type Boost, ces informations seront utiles à la compréhension de principe de fonctionnement de notre système et facilite par la suite de mettre en œuvre un modèle mathématique décrivant le comportement de chaque partie de la chaîne de conversion photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation détaillée du GPV ce qui nous permet d'avoir les caractéristiques (I-V) et (P-V) et analyser le comportement de notre système face aux variations climatiques, aussi nous traitons le modèle mathématique équivalent du convertisseur DC_DC de type Boost.

Dans le troisième chapitre, nous montrons quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), tel que "P&O", "Inc-Cond "qui sont considérées comme des techniques classiques et qui présentent quelques inconvénients de divergences face aux variations rapides des conditions climatiques puis nous présenterons une méthode robuste intelligente FLC qui est largement utilisée dans la commande des systèmes non linéaire qui est le cas des systèmes photovoltaïques. Ensuite, nous passons à l'étude et la simulation par MATLAB-SIMULINK de chaque élément du système PV réalisé (générateur photovoltaïque, convertisseur survolteur (Boost) et les commandes MPPT développées).

Dans le quatrième chapitre, Nous introduisons le convertisseur de type Zeta, puis nous passons à l'étude et la simulation par MATLAB-SIMULINK de chaque élément du système PV (GPV, convertisseur Zeta et les commandes MPPT développées). Ensuite, nous présentons les résultats de simulation pour différentes conditions climatiques et leurs interprétations. Une étude comparative entre le convertisseur Zeta et Boost sera faite pour démontrer l'efficacité de notre convertisseur Zeta.

Nous achèverons ce travail, par une conclusion générale et des perspectives.

I.1 Introduction

Aujourd'hui, la technologie photovoltaïque est suffisamment mature et dominée pour vraiment décoller dans le domaine des applications énergétiques, de sorte que l'optimisation des systèmes photovoltaïques conduit certainement à une meilleure utilisation de l'énergie solaire[7].

Les cellules solaires convertissent généralement la lumière du soleil en énergie électrique avec une basse tension limitée. Ces cellules sont intégrées et connectées ensemble pour donner les modules solaires disponibles dans le commerce, qui sont ensuite connectés pour former un générateur photovoltaïque basé sur les exigences de tension et de courant du système. [8].

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur l'énergie solaire. Nous décrirons ensuite le fonctionnement des cellules PV, ses performances ainsi que ses principaux types existant dans le monde industriel. Enfin, Nous présentons le convertisseur DC-DC de type Boost, le principe de fonctionnement et ses avantages.

I.2 Définition des énergies renouvelables

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation [9].

I.3 L'énergie solaire

La première énergie disponible en grande quantité sur la surface terrestre est l'énergie solaire, caractérisée par l'ensoleillement qui donne l'énergie fournie par le soleil par unité de surface sur une période donnée, en J/m^2 , et par l'irradiation solaire qui correspond à la puissance à un instant donné, en W/m^2 [10].

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque.

I.4 Historique de l'énergie photovoltaïque

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque [11]

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur L'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par des cellules.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à L'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie

I.5 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu CC). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie. Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur, l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction .

Si les photons ont une énergie très supérieure à l'énergie de gap , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction. Si les photons ont une énergie inférieure à l'énergie de gap ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. [12]

I.6 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839 .Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.[13]

I.6.1 Le principe de fonctionnement

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés des semi-conducteurs, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s. Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner. Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche anti-reflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface.[14]

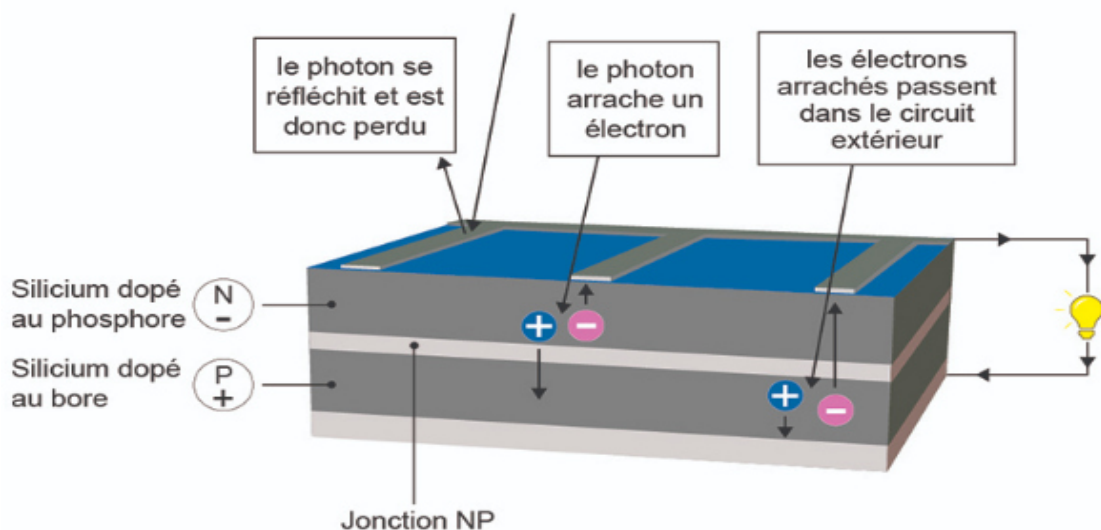


Figure I.1: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [14].

I.6.2 Différents types des cellules solaires

Il existe trois types principaux de cellules [15]:

I.6.2.1 Les cellules monocristallines

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches.

Avantage :

- Très bon rendement (17.2%).

Inconvénients :

- Coût élevé.

- Rendement faible sous un faible éclaircissement.



Figure I.2: le type de cellule monocristalline.[15]

I.6.2.2 Les Cellules poly cristallines

Les cellules poly cristallines sont composées de cristaux. Elles proviennent aussi du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes.

Avantage :

- Bon rendement (13%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin.

- Moins cher que le monocristallin.

-Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité prix).

Inconvénient :

- Coût élevé.



Figure I.3: le type de cellule poly cristalline.[15]

I.6.2.3 Les Cellules amorphes

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).

Avantage :

- Fonctionnement avec un éclairage faible.
- Moins chères que les autres.

Inconvénient :

- Rendement faible en plein soleil (environ 7%) ;
- Performances diminuent sensiblement avec le temps.

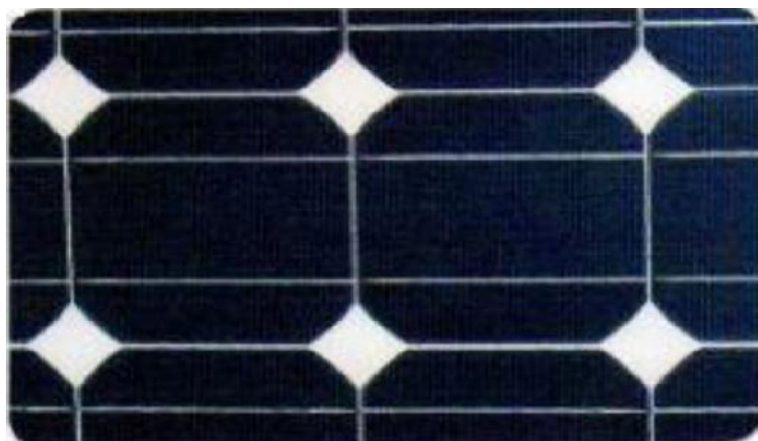


Figure I.4: le type de cellule amorphe.[15]

On trouve aussi certaines cellules qui utilisent d'autres matériaux [16]:

- Arséniure de gallium (GaAs) : Matériau monocristallin, qui fournit des cellules en couches minces ayant un très bon rendement mais dont le prix les destine au domaine spatial.
 - Le Tellurure de Cadmium (CdTe) : Le rendement de conversion obtenu pour Cette Filière est nettement plus satisfaisant. Cependant, la limite principale au déploiement de grande ampleur de cette technologie reste la toxicité du cadmium.
 - Le Cuivre Indium Sélénium (CIS) : Cette filière plus complexe à maîtriser présente un fort potentiel de développement dans le futur (jusqu'à 20% de rendement en laboratoire). Cependant, les matériaux nécessaires à la fabrication de ce type de cellule ne sont pas disponibles en grande quantité.
 - Dioxyde de titane (TiO₂) : Cette technologie en est au stade expérimental.
- Ces technologies sont encore très coûteuses mais elles laissent espérer des rendements bien supérieurs au silicium et une durée de vie plus grande.

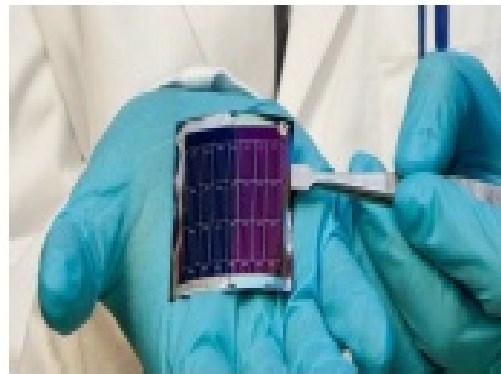


Figure I.5: Cellule photovoltaïque de type cuivre - indium –sélénium [16]

I.6.3 Comparaison

Le tableau I.1 présente une comparaison entre les différents types de cellules

Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales Utilisations
Silicium Monocristallin	12 à 18% (24,7% en Laboratoire)	20 à 30 ans	- Très performant - Stabilité de production - Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades...
Silicium Poly cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	- Adapté à la production à grande échelle. - Stabilité de production. - Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)	20 à 30 ans	- Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. - Fonctionnement si faible luminosité. - Fonctionnement par temps couvert. - La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

Tableau I.1 : Comparaison entre les différents types des cellules [17].

I.6.4 Assemblage des modules photovoltaïques

I.6.4.1 Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

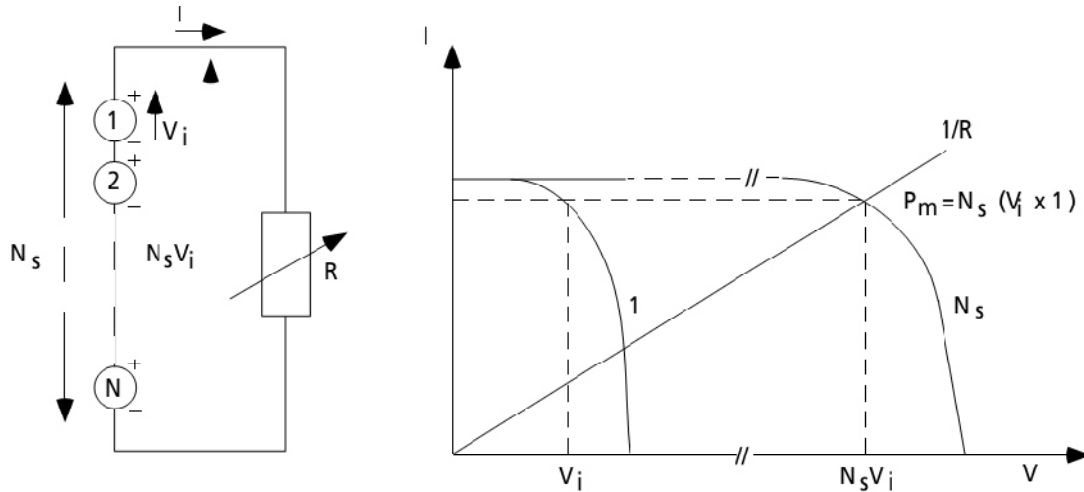


Figure I.6: Cellules identiques en série[18]

I.6.4.2 Association en parallèle

En additionnant des cellules ou des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

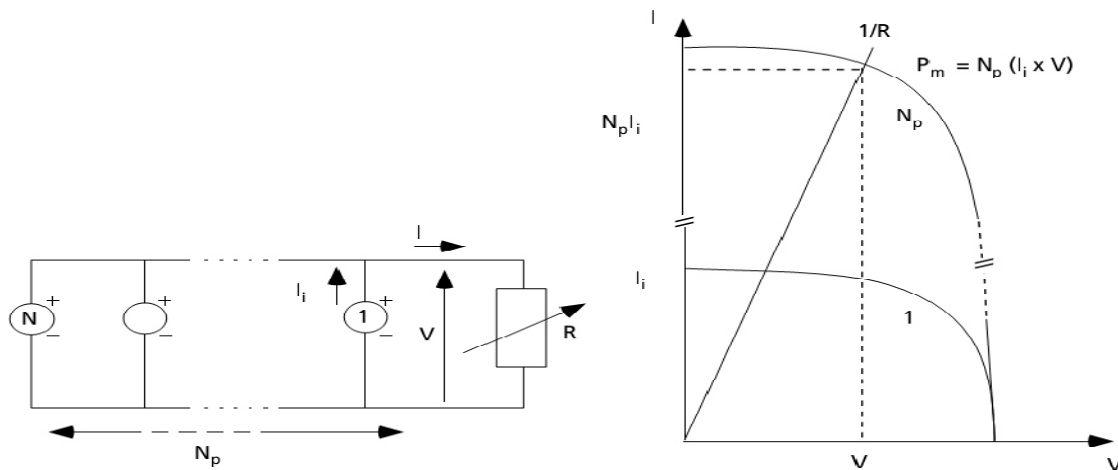


Figure I.7: Cellules identiques en parallèle.[18]

I.6.4.3 Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc}^t = n_p \times I_{cc}$$

$$V_{oc}^t = n_s \times V_{oc}$$

Avec : (n_p) nombre des cellule en parallèle, (n_s) nombre des cellule en série.

La figure I.8 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle n_p , cellules identiques.

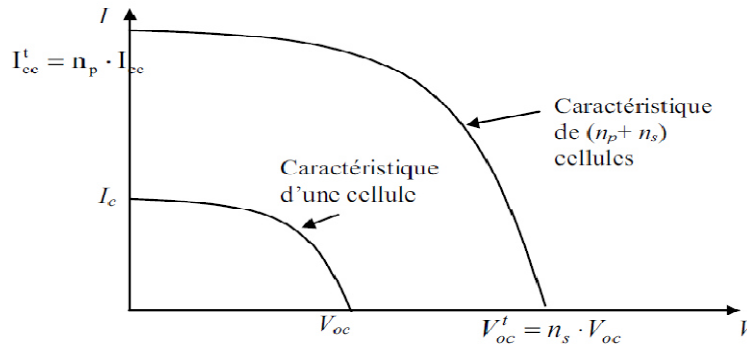


Figure I.8:Caractéristique résultante d'un groupement hybride de ($n_p + n_s$) cellules .[18]
identiques.

I.7 Protection classique du GPV

I.7.1 Diode anti-retour

Les diodes de blocage ou diodes anti-retour (série) (figure I.9) sont placées en série avec un module ou une branche de modules câblés en série afin d'empêcher tout courant électrique de retourner vers les modules. Pour les systèmes solaires connectés à une batterie, la diode de blocage empêche la circulation d'un courant inverse dans le sens batterie vers panneau durant la nuit. La chute de tension aux bornes de la diode dépend du type utilisé.[19]

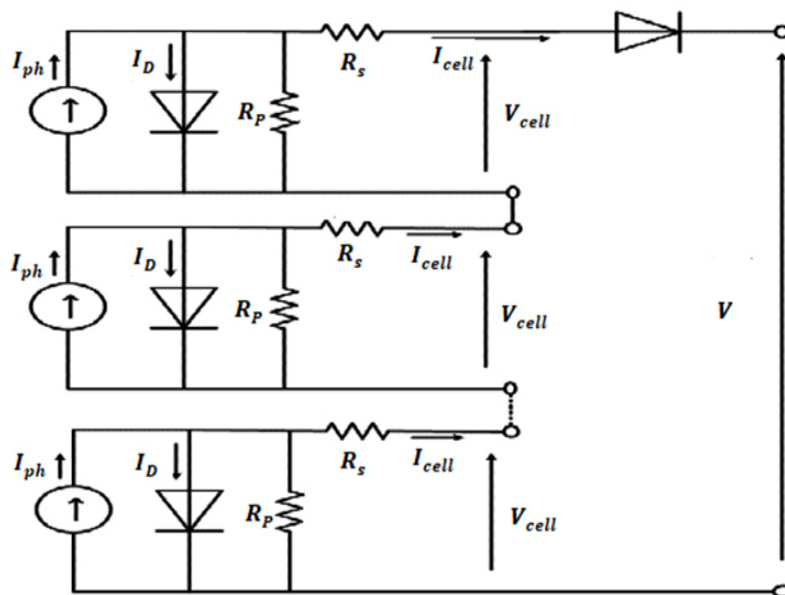


Figure I.9:Schéma équivalent de connexion en série des cellules PV avec diode anti-retour.[19]

I.7.2 Diode by-pass

Pour éviter le phénomène de « hot spot », les diodes by-pass (figure I.10) sont utilisées pour empêcher les phénomènes de point chaud et pour minimiser les pertes dans une branche série dans le cas où une cellule, un groupe de cellules ou un module se trouve en position circuit ouvert (coupure ou ombre portée). La diode by-pass est appelée diode shunt car elle shunte les cellules correspondant à la partie non éclairée les autres cellules continuent à produire l'énergie correspondant à la partie éclairée du module. En condition normale de fonctionnement les diodes shunt ne conduisent aucun courant.[20]

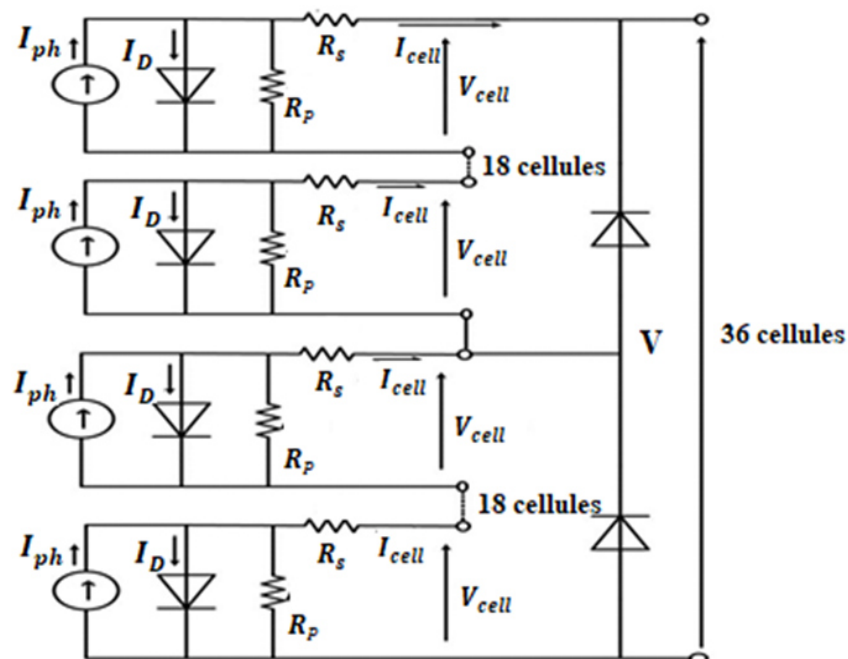


Figure I.10: Module de 36 cellules protégées par deux diodes de by-pass.[20]

I.8 Avantage et inconvénient de l'énergie photovoltaïque

- L'avantage

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- une haute fiabilité – elle ne comporte pas de pièces mobiles – qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.
- le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.

- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. [21]

- **L'inconvénient**

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).

- les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée. [21]

I.9 Convertisseur DC-DC

Le convertisseur DC-DC est un dispositif de l'électronique de puissance, mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés ce qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Le découpage se fait à une fréquence élevée afin de pouvoir filtrer facilement le signal de sortie. [22]

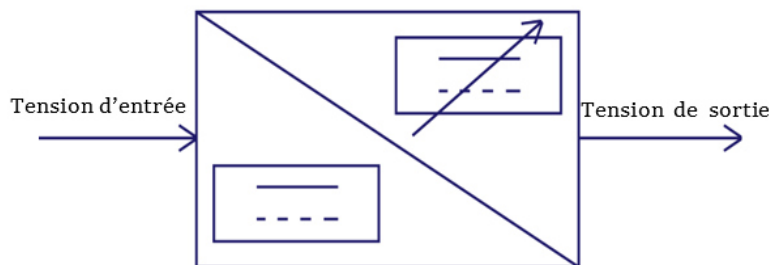


Figure I.11:Conversion DC-DC.

I.9.1 Convertisseur Boost

La (figure I.12) montre un convertisseur survolteur. Comme son nom montre l'application typique, la conversion d'une basse tension à une tension plus élevée est donc son courant de sortie est inférieur à son courant d'entrée en raison de l'équilibre de puissance La structure se compose principalement d'une inductance L et de deux interrupteurs K et D_h . [23]

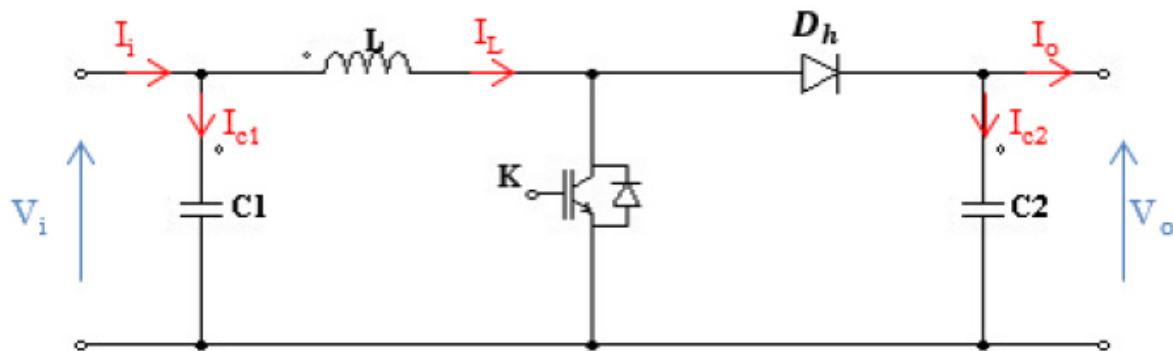


Figure I.12: Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Boost.[23]

I.9.2 Principe de fonctionnement d'un convertisseur Boost

Le fonctionnement d'un convertisseur BOOST peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K :

- ❖ Une phase d'accumulation d'énergie: lorsque l'interrupteur K est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode (D_h) est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation. Le condensateur C fournit de l'énergie à la charge .[24]
- ❖ La phase de roue libre lorsque l'interrupteur K est ouvert et l'interrupteur D_h est fermé. Durant cette séquence, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est restituée au condensateur et à la charge R. Lors de cette phase, le fait que l'inductance L soit en série avec la source de tension d'entrée permet d'obtenir un montage survolteur.

I.9.3 Avantages de convertisseur Boost

Le convertisseur Boost est plus adapté aux systèmes de cellules solaires avec suivi du point de puissance maximale (MPPT) en raison de ces avantages:

- Le convertisseur Boost fonctionne en mode courant continu et extrait beaucoup d'énergie du générateur de cellules solaires.
- Ce convertisseur présente l'avantage d'une ondulation du courant d'entrée limitée par l'inductance L.
- Il peut également fonctionner avec une tension d'entrée fiable, ce qui vous permet de récupérer la petite énergie disponible pendant les périodes de faible luminosité. Le convertisseur élévateur est généralement utilisé pour une tension de sortie plus élevée tandis que le transformateur Buck est utilisé pour une tension de sortie inférieure

1. Conclusion

Nous avons relaté dans ce chapitre les notions de base concernant l'énergie solaire et le fonctionnement des cellules Photovoltaïques, Ensuite, nous avons fait une comparaison entre ses principaux types existant dans le monde industriel. Enfin, Nous avons présenté le convertisseur DC-DC de type Boost, Le principe de fonctionnement et ses avantages.

Dans le chapitre prochain. Nous présenterons la modélisation et la simulation d'un générateur photovoltaïque et l'influence des différents paramètres extérieurs sur ses caractéristiques. Ensuite, on va représenter le model mathématique équivalent de convertisseur DC_DC de type Boost.

II.1 Introduction

Un générateur photovoltaïque est un module photovoltaïque qui fonctionne comme un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques montées entre elles électriquement soit en série ou en parallèles afin d'obtenir des caractéristiques tel que la tension, le courant et la puissance .[25]

Dans ce chapitre nous présentons la modélisation et la simulation d'un générateur photovoltaïque par l'environnement Matlab/Simulink . Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques.

Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, nous utiliserons un convertisseur de type Boost comme un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge . Pour se faire nous présentons un model mathématique équivalent de ce type de convertisseur.

II.2 Générateur photovoltaïque

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système ou champ solaire, auxquels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie) des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur. [26]

Le terme GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier. Pour la suite de ce document, on utilisera le terme GPV pour désigner un module ou un panneau PV.

La figure ci-dessous, représente une cellule, un module et un panneau PV.

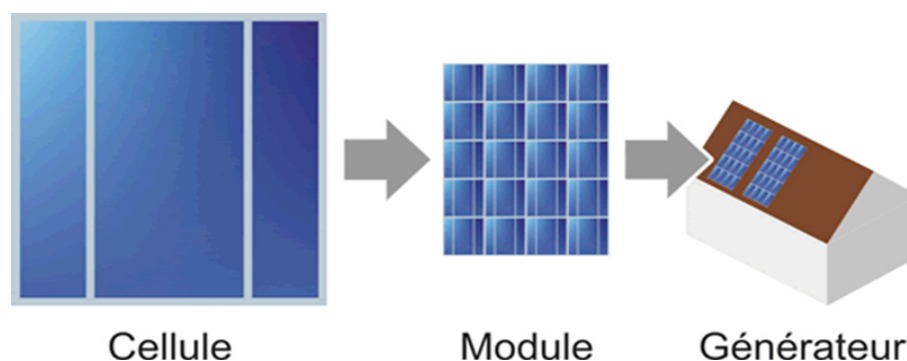


Figure II.1: Cellule, module et générateur d'un panneau PV.[26]

II.2.1 Les paramètres les plus importants du GPV

Les paramètres importants des GPV peuvent être obtenus à partir des courbes P-V et I-V, [22]:

- Le courant de court-circuit I_{sc}
- La tension à circuit ouvert V_{oc}
- Le point de puissance maximale (MPP)

Il y a généralement un point unique sur la courbe I(V) où P(V), qu'on appelle souvent un « MPP » (Maximum Power Point), à ce point le système photovoltaïque global fonctionne avec un rendement maximum et produit une puissance de sortie maximale. Ceci peut être vu sur la (figure II.2) où la puissance est maximale (la puissance absorbée par la charge résistive est maximale), Une condition de puissance maximale est vérifiée quand I_{mpp} rencontre V_{mpp} Où :

I_{mpp} : Le courant de MPP.

V_{mpp} : La tension de MPP.

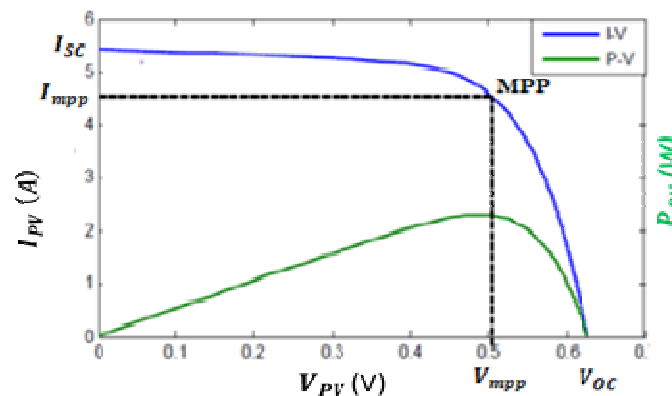


Figure II.2: Caractéristique de la Cellule Solaire [27]

II.3 Modèle mathématique du GPV

Pour trouver le modèle de cellule photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent. [23][28]

La littérature offre de nombreux modèles avec différentes configurations dépendant du besoin d'utilisation. Dans ce travail, nous avons utilisé le modèle à une seule diode (cinq paramètres).

Le schéma équivalent d'une cellule PV est montré dans la (figure II.3) Le modèle présenté est constitué d'un générateur de courant continu I_{ph} qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique avec une diode parallèle modélisant la jonction P-N, d'une seule diode D et de deux résistances R_p et R_s caractérisant respectivement les courants de

fuite de la jonction et les diverses résistances des contacts de connexion.

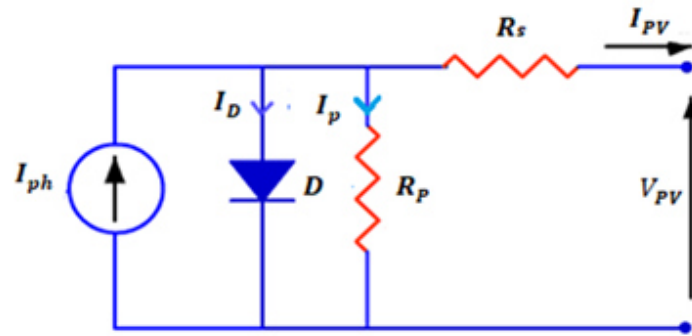


Figure II.3:Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.

Les paramètres du modèle sont donnés dans le tableau II.1 ci-dessous.

Les paramètres	Les valeurs
Type	Suntech 85W
Nombre de cellule en série N_s	36
Eclairement solaire de référence E_{ref}	1000w/m ²
Puissance maximale P_{max}	85.2W
Tension au point maximale V_{mpp}	17.60V
Courant au point maximal I_{mpp}	4.83 A
Tension de circuit ouvert V_{OC}	21.9V
Courant de court-circuit I_{SC}	5.15A
Résistance en série R_s	0.145Ω
Résistance en parallèle R_p	300Ω
Température ambiante de référence, T_{ref}	25 C°

Tableau II.1:Paramètres du GPV.[28]

Le courant I_{pv} est donné par

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + (I_{pv} \times R_s))}{n \times K \times T} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} \times R_s)}{R_p} \tag{I.1}$$

Où :

I_{sat} : Est le courant de saturation.

K : Est la constante de Boltzmann ($k = 1.381 \times 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right]$).

T : est la température effective des cellules en Kelvin ($[K]$).

q : est la charge de l'électron ($q = 1.6 \times 10^{-19} [C]$).

n : est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$) ex : $n = 1.6$.

I_{pv} : Est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur.

V_{pv} : est la tension aux bornes de cette même cellule.

I_{ph} : Est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit).

R_p : est la résistance Shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

R_s : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

I_{ph} : le courant photonique, il dépend de la température et de l'ensoleillement comme montré dans l'équation qui suit :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - T_{ref})] \times \frac{E}{1000} \quad 1.2$$

I_{ph} : Est en $[A]$, calculé dans les conditions nominales ($25^\circ [C]$, $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$)

K_i : Est le rapport entre le courant de court-circuit et le coefficient de température ($0.0017 [A/K]$).

T_{ref} : Température de référence, égale à $25^\circ [C] = 298^\circ [K]$.

E : Eclairement en $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.

I_{cc} : Courant de court-circuit en $[A]$.

I_{sat} : Est le courant de saturation en $[A]$ exprimé par :

$$I_{sat} = I_{rs} \times \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \times \exp \left[\frac{q \times E_g}{n \times K} \times \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad 1.3$$

E_g : L'énergie de gap du semi-conducteur utilisé ($E_g \approx 1.1 eV$ pour le silicium poly cristallin à $25^\circ C$).

I_{rs} : Le courant de saturation inverse en $[A]$, il est donné par :

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{[\exp(q \times V_{oc}/K \times n \times T) - 1]} \quad 1.4$$

II.4 Simulation de module photovoltaïque

II.4.1 Caractéristique électrique du GPV

Les caractéristiques électriques du GPV sont les mêmes que celles des cellules PV avec rapports proportionnels. Ces rapports dépendent du nombre de cellules connectées en série parallèle. La relation entre le courant et la tension du module PV est non linéaire. Les courbes I-V et P-V sont très importantes pour l'étude des caractéristiques du module PV.

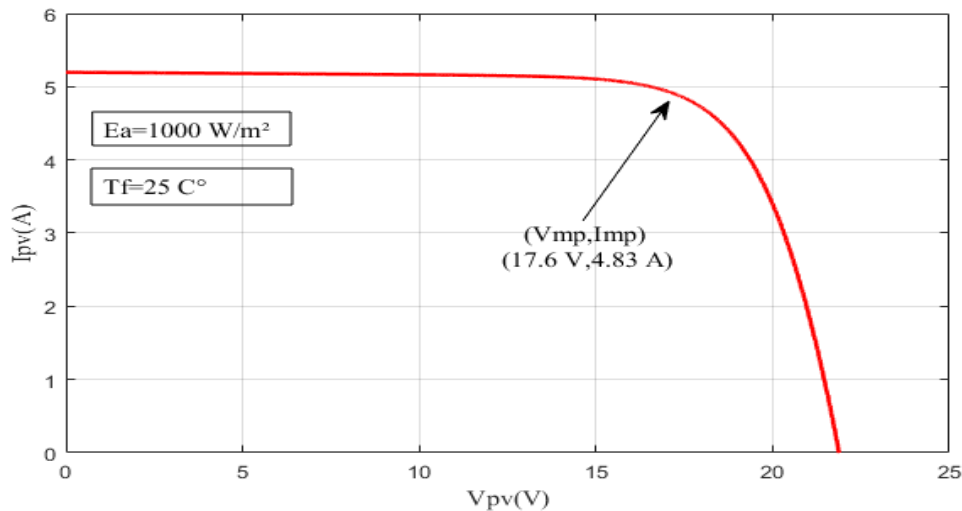


Figure II.4:Caractéristique courant-tension I-V d'un module PV.

La caractéristique I-V de la (figure II.5) peut être divisée en trois parties distinctes, chacune correspondant à un mode de fonctionnement :

- Le premier, entre 0 V et 15 V, où la cellule se comporte comme un générateur de courant.
- Le second, pour un courant I_{pv} inférieur à 4A et, dans lequel la cellule est similaire à un générateur de tension.
- Le troisième, entre les deux précédents, correspond à des variations rapides de l'impédance interne de la cellule.

La puissance du module PV est le produit du courant et de la tension de sortie. La figure I.18 représente la courbe P-V :

$$P = I_{PV} * V_{PV} \quad I.5$$

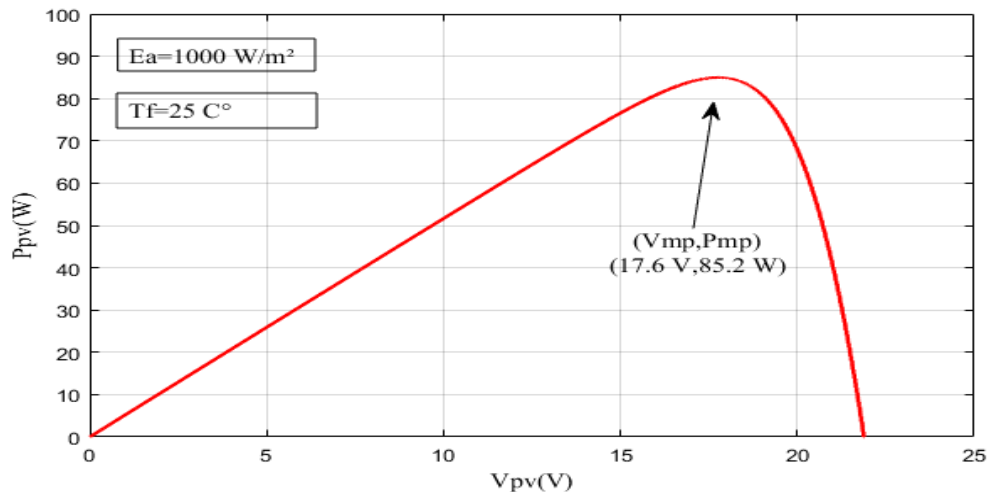


Figure II.5:Caractéristique puissance-tension P-V d'un module photovoltaïque.

II.4.2 Les facteurs qui influencent le module PV

Les caractéristiques électriques des modules PV dépendent de nombreux facteurs tels que la température, le rayonnement solaire, la poussière, l'ombrage causé par les oiseaux et les nuages et le vieillissement. Tous ces facteurs affectent les performances et l'efficacité du module PV.

II.4.2.1 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques (I-V) et (P-V)

Les figures (II.7) et (II.8) présentent les courbes I-V et P-V du module photovoltaïque sous différents niveaux d'irradiance solaire à une température fixe $T = 25 \text{ C}^\circ$. Il est évident que l'irradiance solaire a un effet fort sur le courant de court-circuit. Le courant de court-circuit I_{sc} a varié proportionnellement à la variation de l'irradiation solaire. Notez également la légère diminution de la tension de circuit ouvert V_{oc}

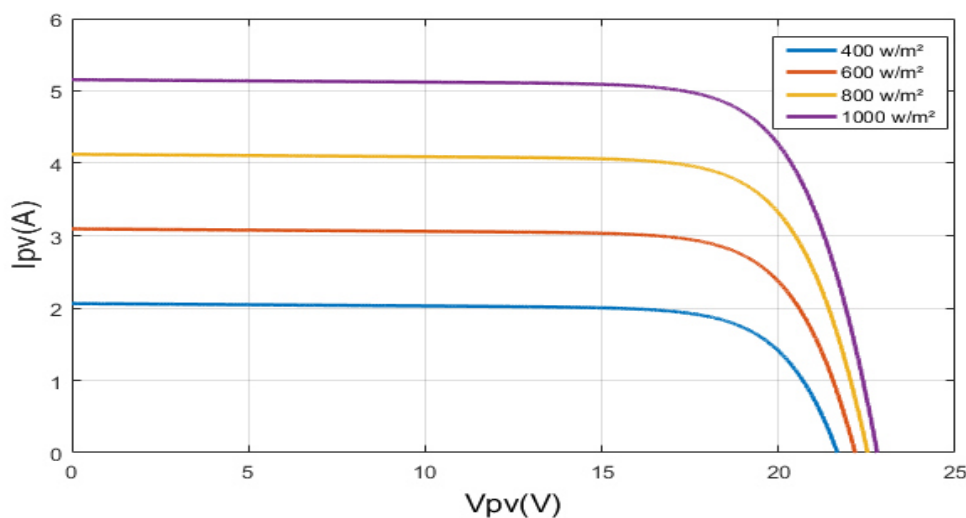


Figure II.6:Caractéristiques (I-V) du module PV pour différentes valeurs d'Éclairements.

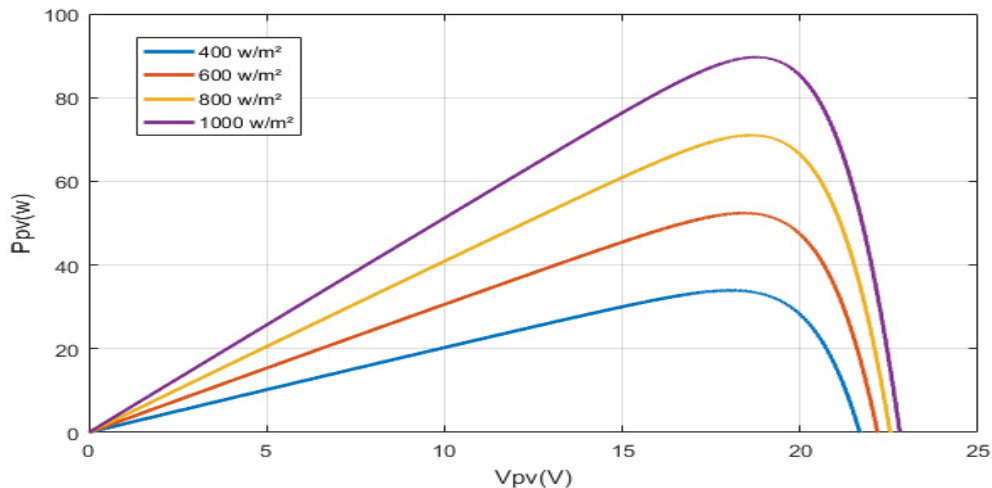


Figure II.7:Caractéristiques (P-V) du module PV pour différentes valeurs d'Éclairements.

II.4.2.2 Influence de la Température sur les courbes (I-V) et (P-V)

Comme tous les autres dispositifs à semi-conducteurs, les cellules solaires sont sensibles à la température. La température est un paramètre important dans le comportement des cellules photovoltaïques. En effet, si la température augmente, le courant des cellules I_{PV} augmente très légèrement, cette dernière génère une diminution rapide de la tension à circuit ouvert V_{oc} , comme illustré dans les figures (II.9) et (II.10) L'augmentation de la température entraîne également une diminution de la puissance maximale disponible. L'effet de l'irradiance solaire sur la puissance maximale disponible est supérieur à l'effet de variation de la température.

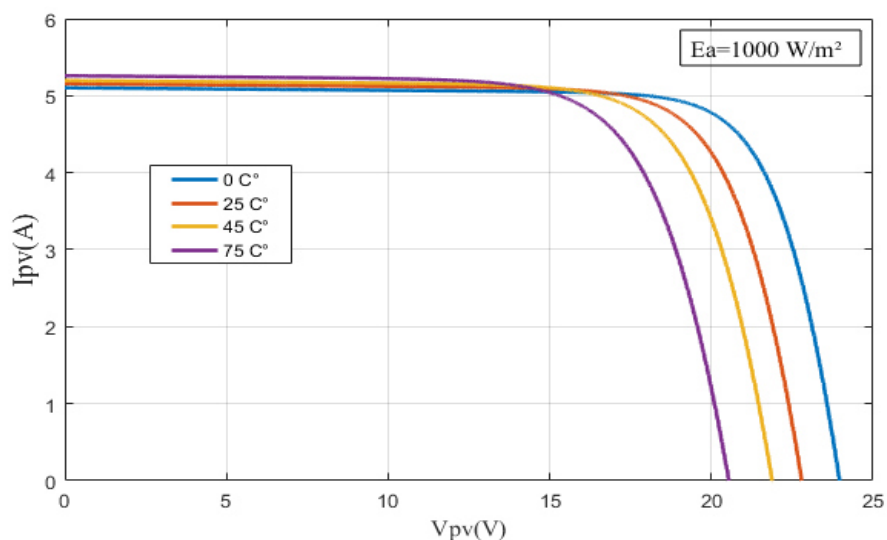


Figure II.8:Caractéristiques (I-V) du module PV pour différentes valeurs de la température.

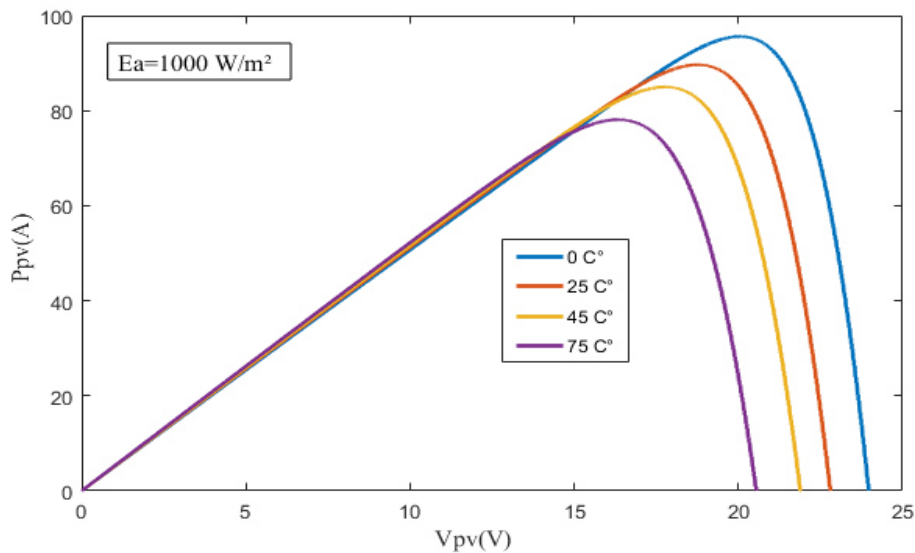


Figure II.9: Caractéristiques (P-V) du module PV pour différentes valeurs de la température.

II.5 Modèle mathématique équivalent de convertisseur Boost

La (figure II.11).a montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur boost avec l'interrupteur K, fermé et ouvert.

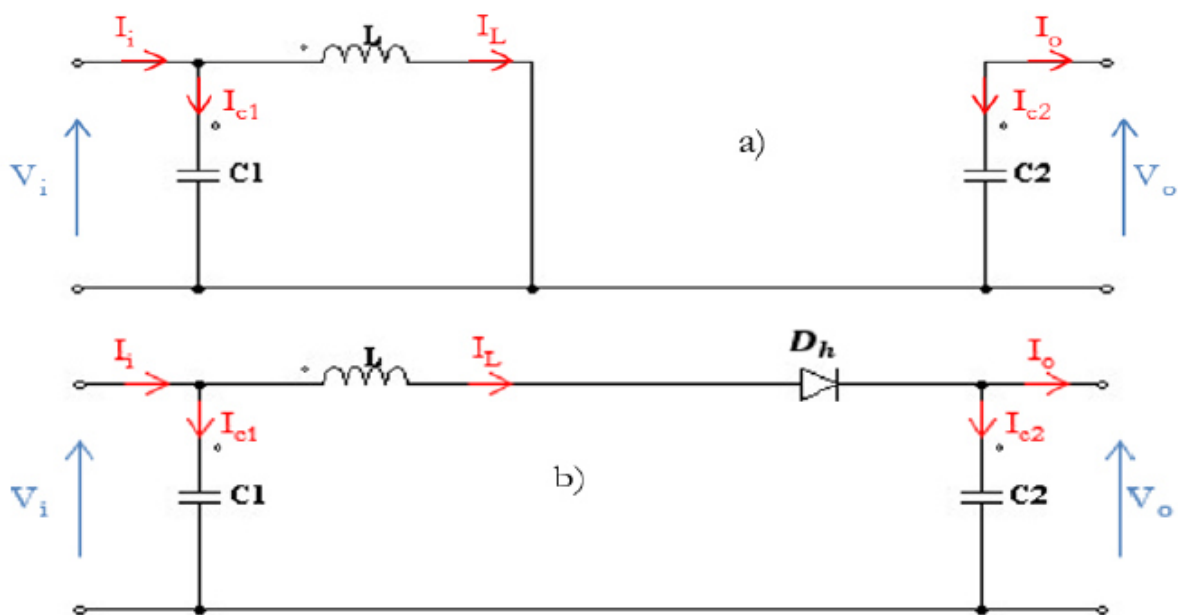


Figure II.10:a) Circuit idéal d'un convertisseur survolteur avec interrupteur k fermé,
 b) Circuit idéal d'un convertisseur survolteur avec interrupteur k ouvert.[24]

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents précédents, on obtient [24]:

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \\ V_L = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad 0 < t < DT \quad \text{II.6}$$

D : le rapport cyclique.

Pour la période de temps (1-D)T du commutateur ouvert représenté sur la figure (II.18.b) un deuxième ensemble d'équations peut être dérivé :

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\ V_L = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad DT < t < (1-D)T \quad \text{II.7}$$

En arrangeant les termes des équations précédentes (II.6) et (II.7), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost.

$$\begin{cases} I_L(t) = I_i(t) - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ I_o(t) = (1 - D)I_L - C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} \\ V_i(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} + (1 - D)V_o \end{cases} \quad \text{II.8}$$

II.5.1 Rapport de conversion [24]

L'approximation de l'existence de petites ondulations permet de remplacer les variables dépendantes du temps dans (II.7) et (II.8) par leurs valeurs moyennes.

Ceci donne pour DT :

$$\begin{cases} I_{c1} = I_i - I_L \\ I_{c2} = -I_o \\ V_L = V_i \end{cases} \quad \text{II.9}$$

Et pour (1-D)T :

$$\begin{cases} I_{c1} = I_i - I_L \\ I_{c2} = -I_o \\ V_L = V_i \end{cases} \quad \text{II.10}$$

En régime permanent les valeurs moyennes sont :

$$\begin{cases} \langle I_{c1}(t) \rangle = D(I_i - I_L) + (1 - D)(I_i - I_L) = 0 & (a) \\ \langle I_{c2}(t) \rangle = D(-I_o) + (1 - D)(I_L - I_o) = 0 & (b) \\ \langle V_L(t) \rangle = DV_i + (1 - D)(V_i - V_o) = 0 & (c) \end{cases} \quad \text{II.11}$$

Ceci peut être encore réduit à un système final d'équations décrivant les caractéristiques stables (DC):

$$\begin{cases} Vi = (1 - D)Vo \\ Io = (1 - D)Ii \end{cases} \quad \text{II.12}$$

Donc on peut exprimer le rapport de conversion à partir de l'équation (II.11).

$$\begin{cases} Fv = \frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-D} & (a) \\ Fi = \frac{Io}{Ii} = 1 - D & (b) \end{cases} \quad \text{III.13}$$

En remplaçant la fonction de transfert de tension continue FV de l'équation (II.18,a) et la fonction de transfert de courant continu Fi de l'équation (II.18,b), l'impédance d'entrée du convertisseur Boost est la suivante :

$$Ri = \frac{Fi}{FV} RL = \frac{1-D}{1} RL \implies Ri = (1-D)2RL \quad \text{II.14}$$

Par conséquent, l'impédance de sortie du convertisseur Boost RL est exprimée comme suit [29]:

$$RL = \frac{Ri}{(1-D)^2} \quad \text{II.15}$$

RL varie de RL_{min} à RL_{max} , lorsque D varie de D_{min} à D_{max} ($D_{min}=0.1$ à $D_{max}=0.9$)

$$RL_{min} = \frac{Ri}{(1-D_{min})^2} \quad \text{Et} \quad RL_{max} = \frac{Ri}{(1-D_{max})^2} \quad \text{II.16}$$

L'impédance d'entrée du convertisseur DC-DC doit être égale à l'impédance optimale du panneau PV de sortie, afin de transférer le maximum de puissance du panneau photovoltaïque à la charge.

L'impédance de sortie optimale du module PV (Suntech 85W) est calculée sur la base de l'équation (II.6) à ($T_f=25\text{ C}^\circ, a=1000\text{ W}$)

$$R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} = \frac{17.8}{4.83} = 3.69\Omega$$

Pour mettre en œuvre le convertisseur Boost dans les applications en temps réel et en raison des limites pratiques du convertisseur Boost, le changement d'intervalle du rapport cyclique D doit être pris en compte entre 0,1 et 0,9. Par conséquent, la valeur de la résistance de charge est limitée en fonction de cette plage. En résumé, afin de suivre le MPP basé sur le convertisseur Boost dans différentes conditions climatiques, l'impédance de charge minimale doit être supérieure à RL_{min} , et la plus grande impédance, inférieure à RL_{max} . Par conséquent, les limites de l'impédance de sortie RL pour le convertisseur Boost connecté au module photovoltaïque Suntech 85W sont les suivantes:[29]

Quand $D=0.1$, pour un seul module, $RL_{min}=4.55\ \Omega$.

Quand $D=0.9$, pour un seul module, $R_L \text{ max}=369 \Omega$.

N: est le nombre des modules PV connectés en série

En conclusion, le convertisseur Boost ne peut suivre le MPP que dans une plage d'impédance de charge spécifique. Bien que cela, le convertisseur Boost reste un convertisseur DC-DC préférable dans de nombreuses applications de systèmes PV en raison de ses avantages [29].

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et les caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV avec ses performances. Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques.

Et Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, on a utilisé un convertisseur de type Boost comme un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge.

Le chapitre prochain sera consacré à l'étude des différentes technique de MPPT et la simulation par MATLAB-SIMULINK de chaque élément du système PV réalisé (générateur photovoltaïque, convertisseur survolteur (Boost) et les commandes MPPT développées).

III.1 Introduction

Les stratégies de gestion de l'énergie photovoltaïque et le système de conversion d'énergie sont un élément très important pour améliorer l'efficacité. Parmi les stratégies, la méthode de suivi de la puissance maximale du GPV connue sous le nom de méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT) est largement utilisée. Il trouve automatiquement la tension maximale du module photovoltaïque pendant laquelle il fonctionnera pour atteindre la puissance maximale quelles que soient les conditions météorologiques (température et irradiation). On distingue des MPPT classiques et intelligentes. [30], dont généralement la structure du système de conversion photovoltaïque est basée sur des blocs modulaires, comme illustré ci-dessous:

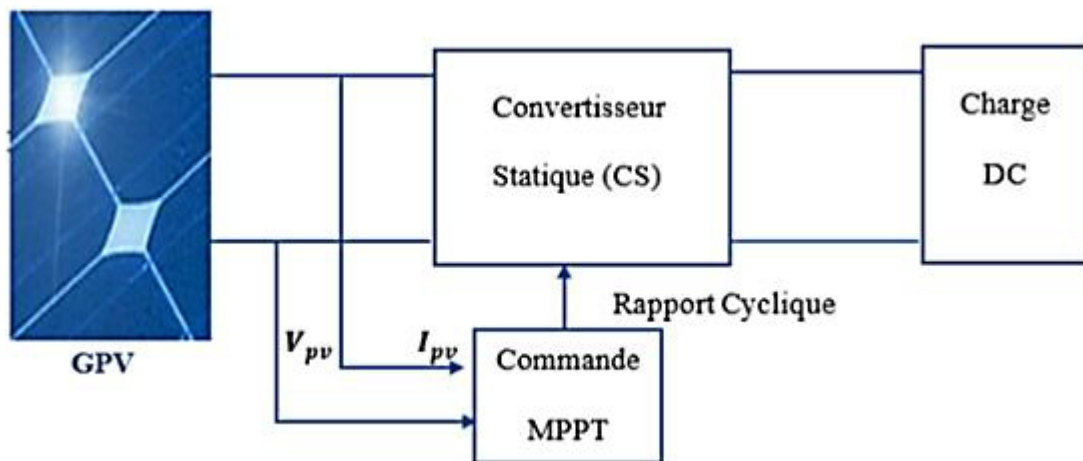


Figure III.1: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.[30]

Dans ce chapitre, on présentera quelques techniques MPPT existantes qui permettent de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale. Ensuite, nous présentons les différents résultats de simulation de tous les éléments électriques qui composent un système photovoltaïque. Le modèle contient un générateur photovoltaïque (PV), le convertisseur (DC-DC de type BOOST) et la commande MPPT.

Les résultats de simulation des techniques de commandes MPPT (P&O, Inc-Cond et FLC) ont été obtenus dans l'environnement MATLAB/Simulink.

Nous réalisons également des tests opérationnels dans des conditions atmosphériques variables d'ensoleillement et de température pour évaluer la poursuite du point de fonctionnement maximal délivré par le panneau photovoltaïque par l'application des algorithmes de commandes MPPT.

III.2 Commande MPPT**III.2.1 Définition**

Pour un éclairement et une température donnée il existe un point de fonctionnement où la puissance débitée est maximale. L'optimisation consiste à poursuivre ce point en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue par le générateur. Cette adaptation de charge dont le principe s'effectue en générale à l'aide d'un convertisseur statique (figure III.1), dont les pertes doivent être aussi faibles que possible et qui peut, par ailleurs, assurer une fonction de mise en forme d'un GPV de sortie, différentes attitudes peuvent être envisagées quant à la commande de l'adaptateur. Ce type de commande est souvent nommé « Recherche du Point de Puissance Maximale » ou bien « Maximum Power Point Tracking » (MPPT).

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.[31]

La (figure III.2) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal MPP1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum MPP2. Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le MPP du GPV.[31]

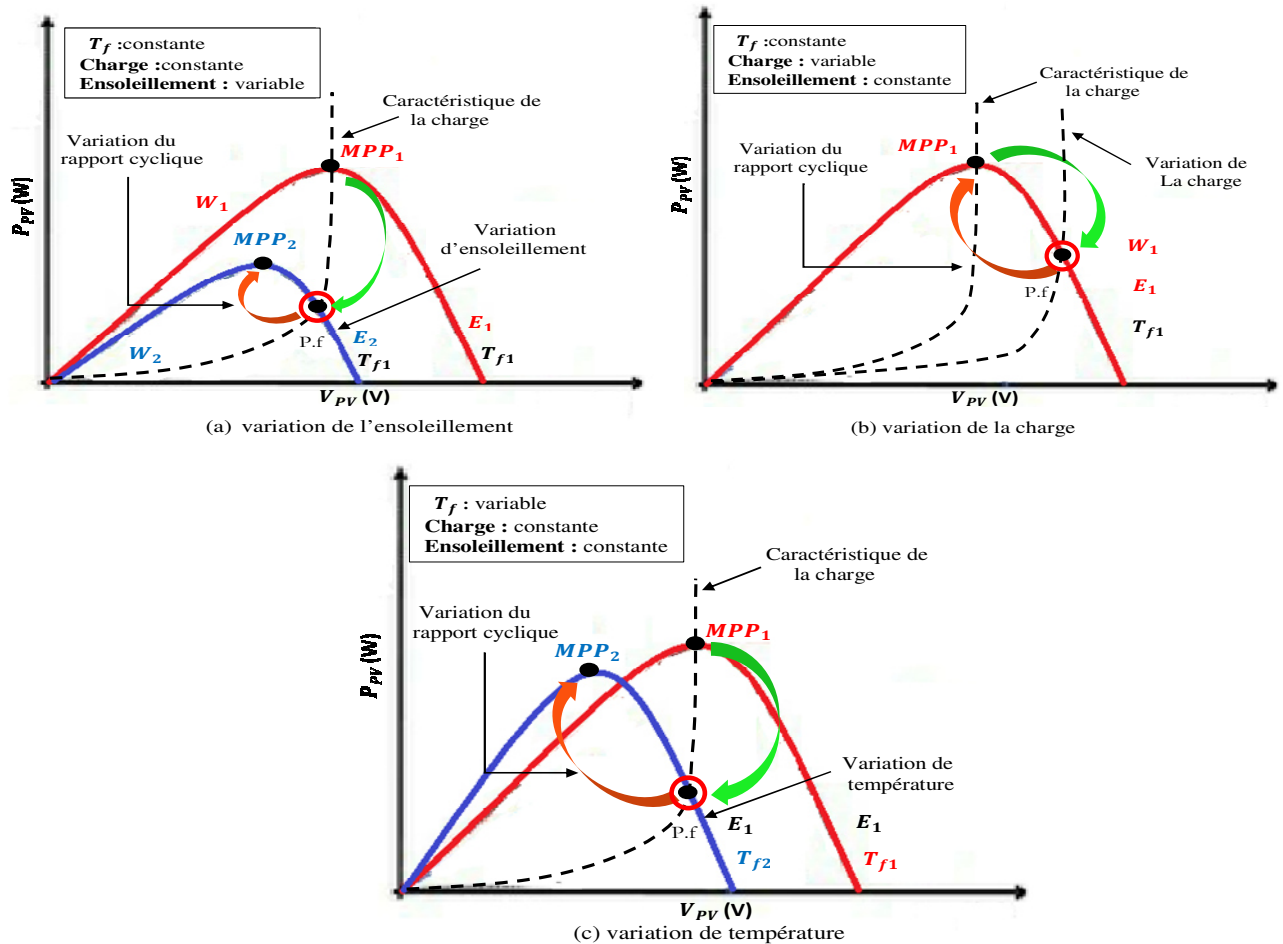


Figure III.2: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal
 a) suite à une variation d'ensoleillement b) suite à une variation de charge,
 c) suite à une variation de température.[31]

III.2.2 Les techniques de commande MPPT

Plusieurs solutions ont été proposées pour l'algorithme de recherche du MPP ; dans ce chapitre, nous élaborons trois techniques à savoir :

L'algorithme Perturbation & Observation (P&O), Algorithme Conductance Incrementale (Inc-Cond), et l'algorithme à base de la logique floue (FLC).

III.2.2.1 Méthode Perturbation & Observation (P&O)

C'est une méthode largement utilisée, de structure simple, facile à implémenter et des résultats intéressants. Son principe est basé sur la perturbation du point de fonctionnement, on augmente et diminue la tension de fonctionnement et on observe son effet sur la puissance (P).

Si la puissance augmente ($\Delta P > 0$), on est donc dans le bon sens, on continue la perturbation dans le même sens sinon ($\Delta P < 0$), donc on s'éloigne du MPP, on inverse la perturbation.

La (figure III.3) illustre son principe de fonctionnement.

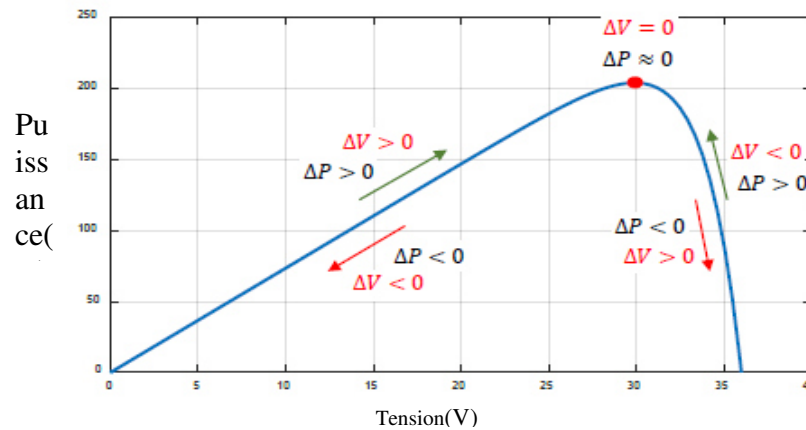


Figure III.3: Principe de la MPPT avec la méthode PO[32]

L’organigramme de cette méthode est donné par la (figure III.4). On mesure le courant et la tension du GPV puis on calcule la nouvelle puissance $P(t)$ et la variation de la tension (ΔV), si la puissance a augmenté ($\Delta P > 0$) on est donc dans le bon sens, on continue ainsi d’augmenter V (si $\Delta V > 0$) ou on continue de la diminuer (si $\Delta V < 0$), sinon ($\Delta P < 0$) il faut inverser (augmenter V si $\Delta V < 0$ et diminuer si $\Delta V > 0$).[32]

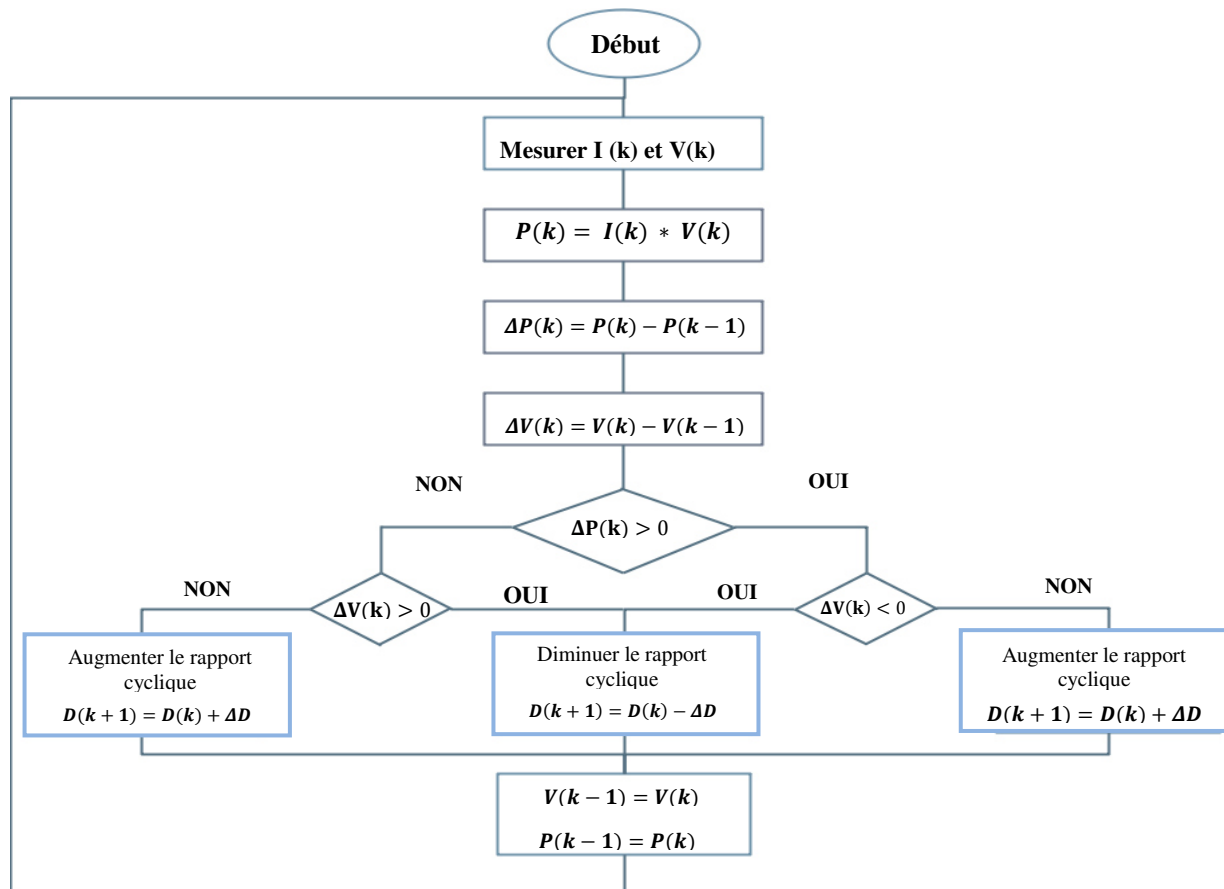


Figure III.4: Organigramme de la méthode P&O. [32]

III.2.2.2 Méthode de l'incrémentation de la conductance « Inc Cond »

C'est aussi une méthode facile à implémenter et largement utilisée, elle vient remédier au problème de la divergence de la PO dans le cas d'un changement rapide de l'ensoleillement, elle est basée sur la détermination du signe de la dérivée de la puissance (la pente) qui ne change pas au changement de l'ensoleillement [33]

La (figure III.5) illustre son principe de fonctionnement.

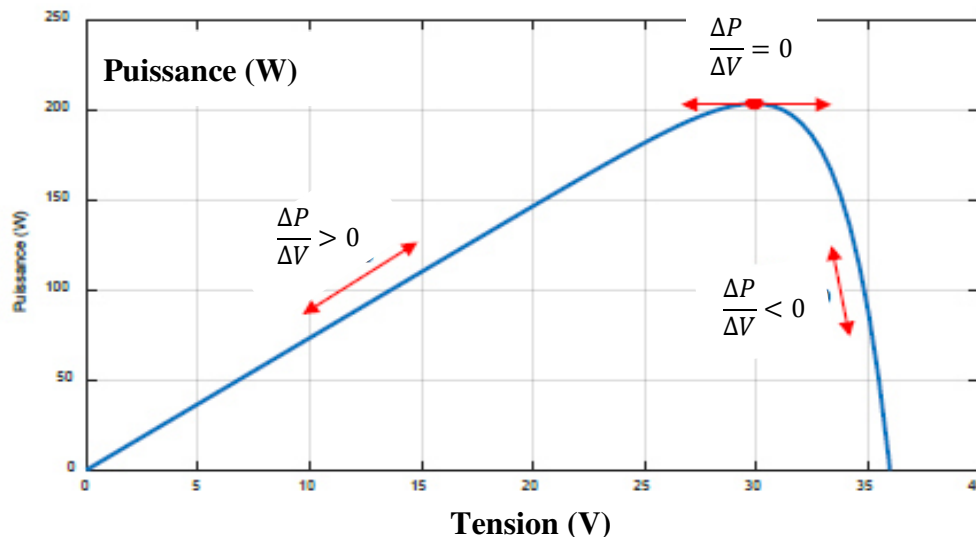


Figure II.5: Principe de la MPPT avec la méthode IC. [33]

La variation de la puissance en fonction de la tension est donnée par:

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{\Delta(I.V)}{\Delta V} = I \frac{\Delta V}{\Delta V} + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \tag{II.1}$$

Donc :

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{\Delta(I.V)}{\Delta V} = I \frac{\Delta V}{\Delta V} + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \tag{II.2}$$

Au point de puissance maximale, la dérivée ($\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0$), ce qui donne :

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \tag{II.3}$$

On peut remarquer que la vérification du signe de la pente revient à comparer la conductance (I/V) et son incrément ($\Delta I/\Delta V$) :

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} > 0 \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \text{ à gauche du MPP (pente positive)} \rightarrow \text{augmenter } V$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} < 0 \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \text{ à droite du MPP (pente négative)} \rightarrow \text{diminuer } V$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0 \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \text{ Au voisinage MPP}$$

Ceci est traduit par l'organigramme donné par la (Figure III.6), le dernier cas est théorique car pratiquement on n'obtient pas la valeur 0 ce qui laisse la méthode osciller autour du MPP, l'amplitude de ces oscillations peut diminuer si le pas d'augmentation (ou diminution) de la tension est très petit mais ceci rend la recherche du MPP plus lente. Beaucoup de travaux ont été consacrés à utiliser un pas variable de perturbation de la tension pour diminuer des oscillations de la puissance au voisinage du MPP

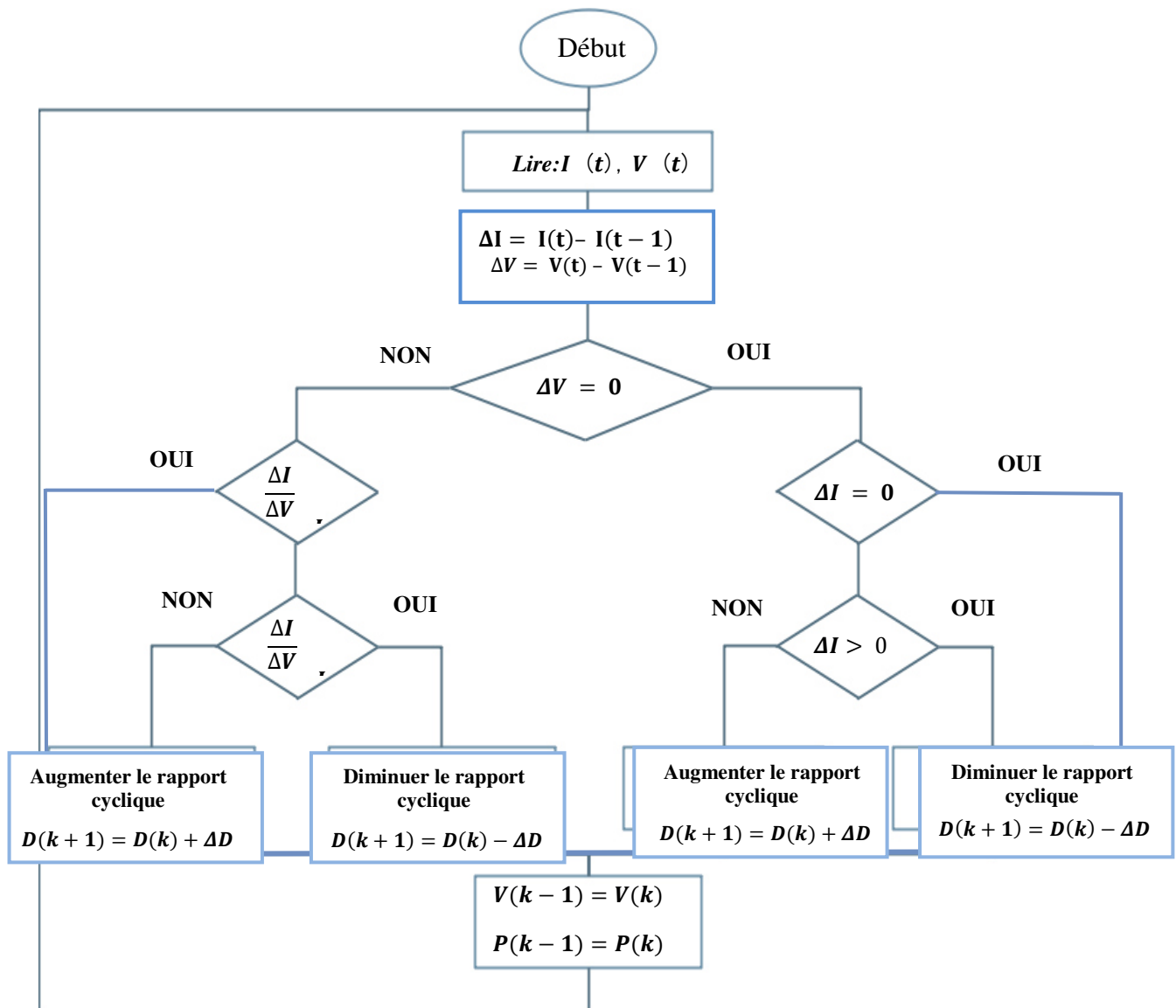


Figure III.6: Organigramme de la méthode IC.[33]

III.2.2.3 MPPT à base de la Logique Floue « FLC »

Cette approche est basée sur deux concepts essentiels : celui de la décomposition d'une plage de variation d'une variable sous forme de nuances linguistiques : "faible", "moyen", "élevé" ... et des règles provenant de l'expertise de l'opérateur humain, qui expriment, sous forme linguistique, comment doivent évoluer les commandes du système en fonction des

variables observées :

"Si l'erreur est positivement grande et la variation de l'erreur est positivement grande alors la variation de la sortie est très négative".

Ces concepts sont basés sur une partie de la théorie des sous-ensembles flous introduite par Zadeh.

Un régulateur flou peut être présenté de différentes façons, mais en général la présentation adoptée se scinde en trois parties :[34]

La fuzzification qui permet de passer de variables réelles à des variables floues, le cœur du régulateur représenté par les règles reliant les entrées et sorties, et enfin l'inférence et la défuzzification qui permettent à partir des ensembles flous d'entrée de déterminer la valeur réelle de sortie. La (figure III.7), montre la configuration du contrôleur flou qui se compose des: Entrées–Sortie d'échelle, fuzzification, décision floue, et la défuzzification. Les facteurs d'échelle E et ΔD font changer les valeurs des entrées et de sorties du contrôleur proportionnellement. La sortie ΔD est déduite par les deux variables E et CE , ou cette dernière est dérivée du signal actuel par la division avec le facteur d'échelle correspondant.

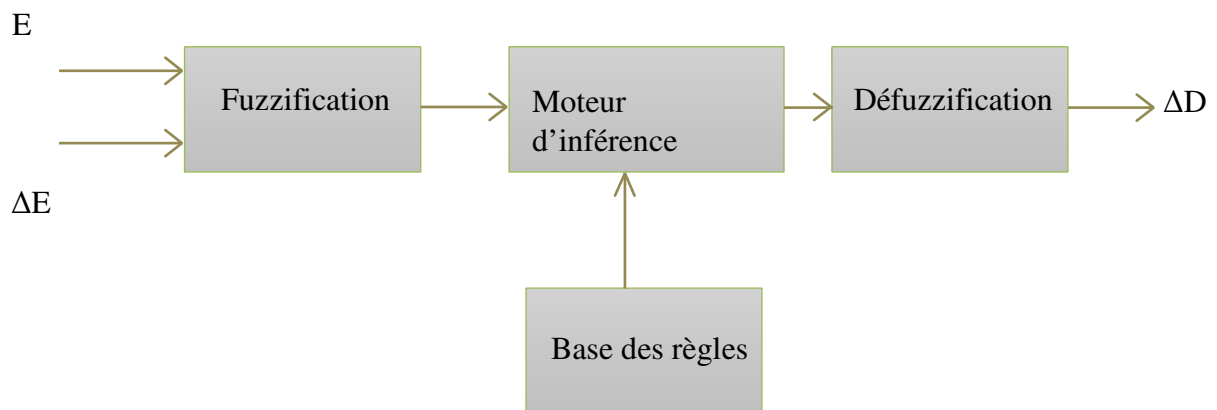


Figure III.7:Principe du Contrôleur flou. [34]

a. Fuzzification :

La tension et le courant actuels du générateur photovoltaïque sont mesurés instantanément, et la puissance peut être ainsi calculée :

$$P(k) = I(k).V(k) \quad \text{II.4}$$

On suppose que le contrôle se fait par la satisfaction de deux critères relatifs à deux variables d'entrées du contrôleur flou proposé, qui sont: L'erreur (E) et le changement de l'erreur (ΔE) à des instants échantillonnés (k). Les variables E et ΔE sont exprimées comme suit :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k - 1)}{V(k) - V(k - 1)} \tag{II.5}$$

$$\Delta E = E(k) - E(k - 1) \tag{II.6}$$

Avec :

$P(K)$: Puissance actuelle du générateur photovoltaïque [W] ;

$P(K - 1)$: Puissance précédente [W];

ΔP : Variation de la puissance [W];

$V(K)$: Tension actuelle du générateur photovoltaïque [V] ;

$V(K - 1)$: Tension précédente [V] ;

ΔV : Variation de la tension [V] ;

$E(K)$: L'erreur à l'instant K actuel (dérivée de la puissance) (c'est la pente de la courbe (P-V) et définit la position du MPP dans le module PV);

$E(K - 1)$: L'erreur à l'instant précédent (dérivée de la puissance) ;

ΔE : La variation de l'erreur est définit la direction du déplacement du point de fonctionnement (si le déplacement est vers le MPP ou non).

La (figure III.8) montre les fonctions d'appartenances des cinq sous-ensembles flous des variables d'entrées ainsi que la variable de sortie.

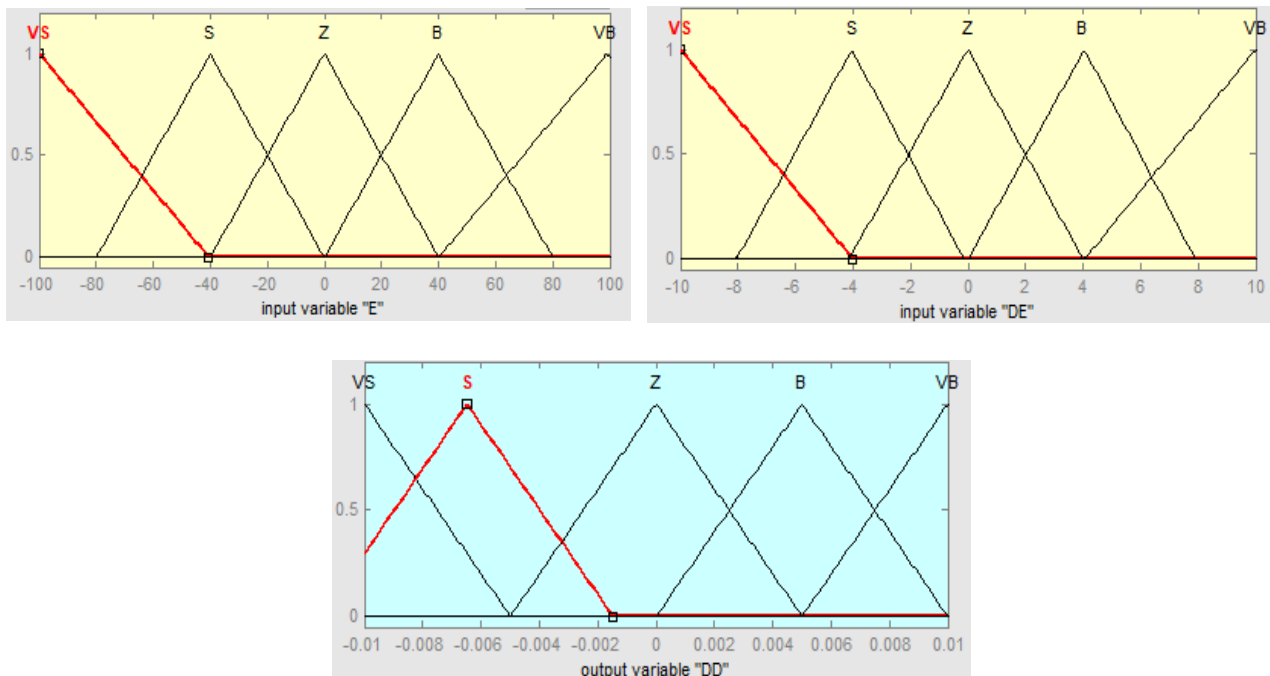


Figure III.8:Fonctions d'appartenances de : (a) L'entrée E, (b) L'entrée ΔE et (c) La sortie ΔD . [35]

b. Méthode d'inférence

La table des règles du contrôleur flou où toutes les entrées de la matrice sont :

E/ ΔE	Very Small	Small	Zero	big	Very big
Very Small	VB	VB	VB	B	B
Small	VB	B	B	B	Z
Zero	Z	Z	Z	Z	Z
big	VS	VS	S	S	Z
Very big	VS	VS	VS	S	S

Tableau III.1. Tableau de règles floues

On prend comme exemple de règles de contrôle du tableau (III.1) :

« Si E est VB et ΔE est Z alors ΔD est VS ».

Ce qui veut dire que :

« Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale vers le côté gauche, et le changement de la pente de la courbe P-V est environ zéro ; Alors diminuer le rapport cyclique ».

c. Défuzzification :

Pour une représentation de données échantillonnées, le centre de gravité est calculé par :

$$\Delta D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) - D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \quad \text{II.7}$$

Les valeurs de sorties sont défuzzifiées et multipliées par le facteur d'échelle pour construire le signal de contrôle, actuel (figure III.8). Son rôle est de régler le contrôleur flou pour obtenir la poursuite du MPP .[35]

La variable de sortie (ΔD) est le pas de l'incrémentement du rapport cyclique, qui peut prendre des valeurs positives ou négatives en fonction de l'emplacement du point de fonctionnement, Cette sortie est envoyée au convertisseur DC-DC pour piloter la charge. En utilisant la valeur de ΔD fournie par le contrôleur, un accumulateur a été créé pour obtenir la valeur du rapport cyclique.

$$D = D(k - 1) + \Delta D (k) \quad \text{II.8}$$

III.3 Simulation des techniques MPPT

III.3.1 Modèle d'une chaîne photovoltaïque sur le logiciel Matlab/Simulink

La (figure III.9) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT.

Le panneau solaire est représenté par un bloc Simulink, il est construit à partir de trois modules connectés en série où chacun est formé de 12 cellules, il donne une puissance maximale de 85 W, la charge est représentée par une résistance R de 2 Ω, et un convertisseur BOOST qui simulant le fonctionnement de la conversion.

Les paramètres du convertisseur BOOST est les suivant :[36]

$L=1\text{mH}$ $C1=450\mu\text{F}$ $C2=450\mu\text{F}$ $F=1.5\text{kHz}$ $R=2\ \Omega$

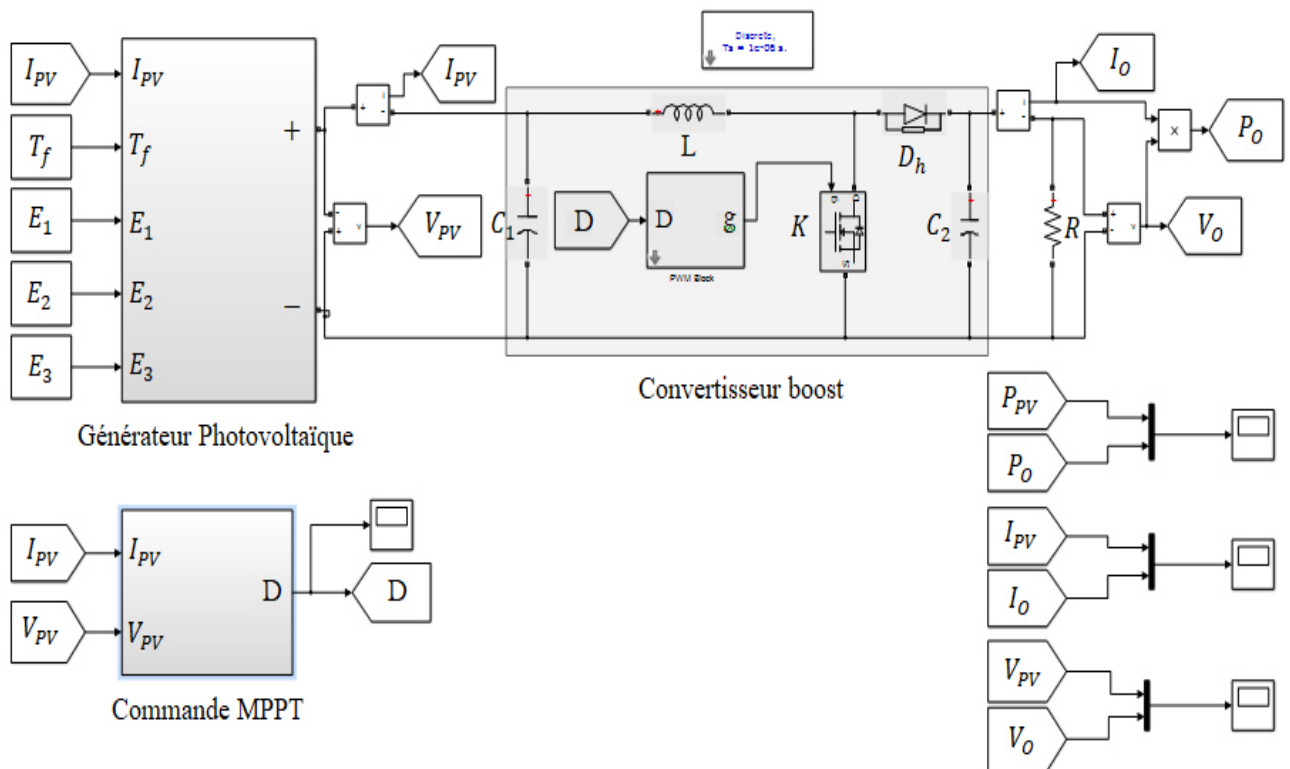


Figure III.9 : Modèle de simulation d'une chaîne photovoltaïque avec le logiciel Matlab/Simulink.

III.3.2 Fonctionnement sous des conditions environnementales stables

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants c'est-à-dire l'éclairement solaire égale 1000W/m² et la température égale 25°C.

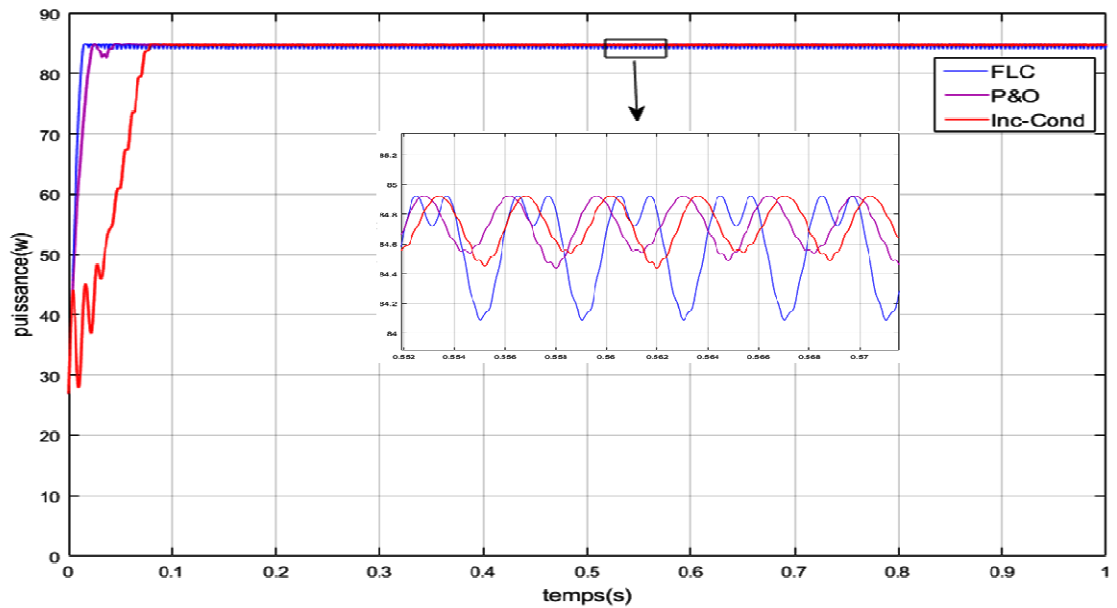


Figure III.10 : Variation de la puissance du panneau PV des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$.

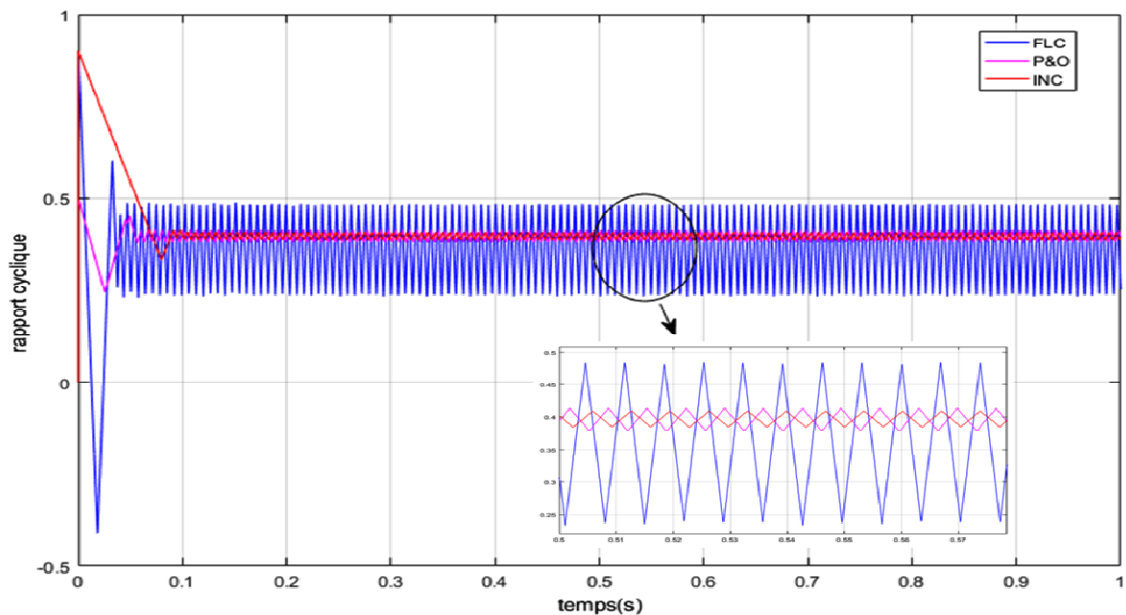


Figure III.11 : Variation du rapport cyclique des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$.

III.3.3 Fonctionnement sous des conditions environnementales variables

III.3.3.1 Température constante et Eclairement variable « lent »

Dans ce test la température est maintenue constante et l'ensoleillement maintenu variable. Changement lent de l'ensoleillement.

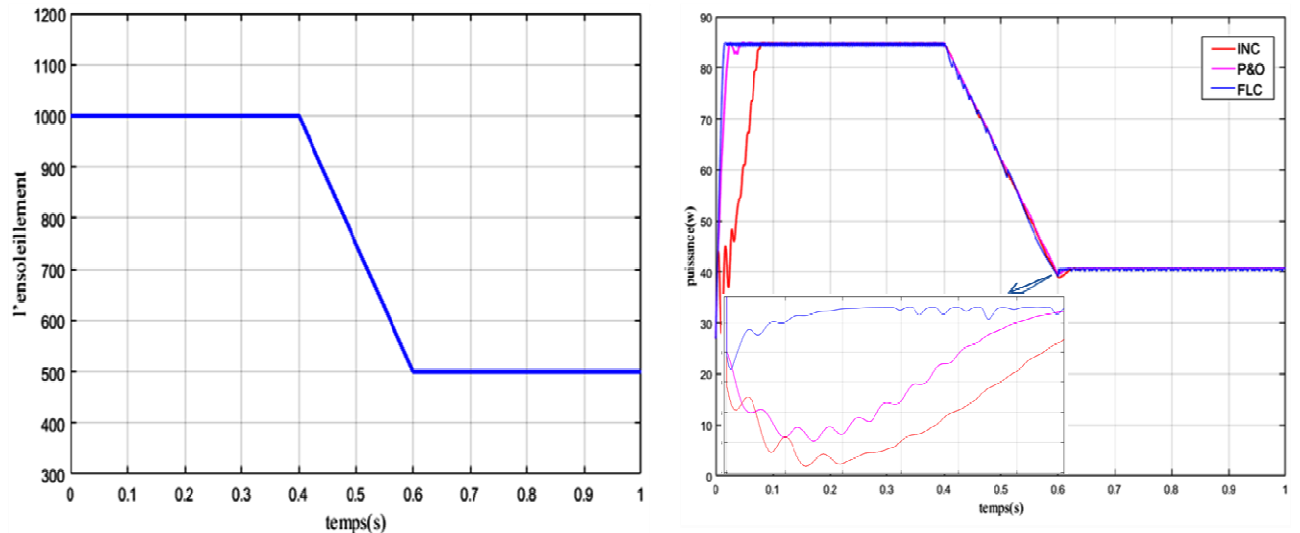


Figure III.12 : Variation de la puissance du panneau PV des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions variables de l'ensoleillement «lent»

III.3.3.2 Température constant et éclairement variable « brusque »

Dans ce test la température est maintenue constante et l'ensoleillement maintenu variable.

Changement brusque de l'ensoleillement.

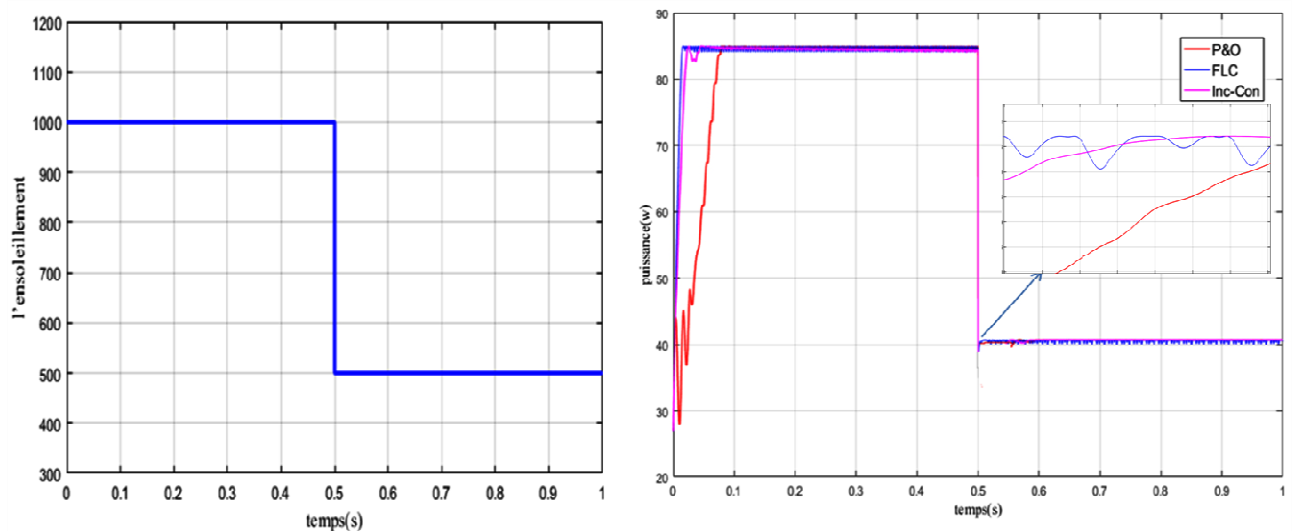


Figure III.13 : Variation de la puissance du panneau PV des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions variables de l'ensoleillement «brusque».

III.4 Interprétation des résultats et la comparaison

Une comparaison entre la méthode intelligente (FLC) et les deux autres méthodes classiques (P&O et Inc-Cond) est présentée dans les courbes de simulation.

Le (figure III.10) montre les résultats de simulation de la puissance du panneau PV des trois algorithmes logique floue et les deux commande classique P&O et Inc-Cond. Au début de la

simulation la commande floue suit la puissance maximale ($P_{max} = 85 \text{ W à } 1000 \text{ W / m}^2$) dans un temps de réponse court ($t_r = 0,017 \text{ s}$) et présente des faibles oscillations autour du MPP, tandis que la commande classique détecte la même puissance maximale dans le temps de réponse est égale à ($t_r = 0,045\text{s}$ pour Inc-Cond , $t_r=0.079\text{s}$ pour P&O) et présente de très faibles oscillations.

D'après les résultats précédents on remarque que les commandes (P&O et Inc-Cond) presque identique.

Sur les (figures III.12, III.13) variation de l'éclairement et de la température a été effectuée, les résultats illustrent clairement les avantages des trois méthodes, qui offrent un temps de réponse rapide avec un avantage remarquable de la logique floue qui paraît plus robuste.

Le tableau III.2 résume la comparaison numérique détaillée des trois algorithmes MPPT. Ces détails sont la puissance du panneau PV moyenne à 1000W / m^2 , le temps de réponse et le rapport cyclique.

Méthode	Temps de réponse	Etat de stabilité	Rapport cyclique
Inc-Cond	$t_r = 0,045\text{s}$	Oscille	D[0.37 0.41]
P&O	$t_r = 0,079\text{s}$	Oscille	D [0.38 0.40]
FLC	$t_r = 0.017\text{s}$	Oscille	D[0.25 0.48]
Observation	Le temps de réponse de la commande flou plus rapide	La logique floue plus robuste face aux changements rapides.	Le rapport cyclique des trois techniques varie.

Tableau III.2 : Comparaison numérique des trois algorithmes MPPT.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié quelques techniques de commandes MPPT à savoir (P&O et Inc-Cond et FLC). Ensuite, dans le but d'étudier le comportement du système photovoltaïque par rapport aux variations climatiques, nous avons simulé au début le système sous conditions d'éclairement stables et variables, en utilisant trois commandes FLC et P&O, Inc-Cond puis nous avons fait une étude comparative.

Le choix du convertisseur DC-DC pour les systèmes PV joue un rôle important dans l'amélioration du rendement du système photovoltaïque et à la recherche des meilleurs

résultats, dans le chapitre suivant nous allons essayer un autre type de convertisseur pour voir son efficacité dans les systèmes PV, c'est le Convertisseur ZETA.

IV.1 Introduction

Le choix du convertisseur DC-DC pour les systèmes PV joue un rôle important dans l'amélioration du rendement du système photovoltaïque. Plusieurs convertisseurs DC-DC dans les systèmes photovoltaïques sont analysés dans de nombreuses recherches. Les convertisseurs sont divisés en plusieurs catégories, basées sur l'application, types de commutation, modes de courant, etc. il est évident que chaque convertisseur a ses propres avantages et inconvénients. Par conséquent, il est essentiel de développer un système photovoltaïque qui a la capacité de produire une efficacité maximale, une contrainte minimale et moins d'ondulation.

Pour ça, nous allons essayer un autre type de convertisseur pour voir leur efficacité et l'étude de l'applicabilité dans les systèmes PV, c'est le Convertisseur Zeta.

Dans ce chapitre nous avons décrit d'une manière détaillée le principe de fonctionnement du convertisseur DC-DC type Zeta comme étage d'adaptation entre le GPV et la charge, Nous présenterons également les résultats des simulations de chaque élément du la chaine photovoltaïque (GPV, convertisseur Zeta et les commandes MPPT développées). Ensuite, nous présentons les résultats de simulation pour différentes conditions climatiques et leurs interprétations. Puis, nous faisons une étude comparative entre les convertisseurs Zeta et boost.

IV.2 Convertisseur ZETA

Le convertisseur Zeta est un convertisseur de puissance DC-DC à stockage capacitif qui réalise la fonction Buck-Boost, mais il est non- inverseur de polarité, ce qui signifie que sa tension de sortie a le même signe par rapport à sa tension d'entrée. Le schéma électrique de ce convertisseur est représenté dans la (figure IV.1) [37].

Ce convertisseur en mode de fonctionnement en conduction continue (CCM). Il y a deux d'état dans une période de commutation (T). Le premier est lorsque l'interrupteur est activé et l'autre lorsque l'interrupteur est désactivé. Le convertisseur Zeta est représenté sur la figure IV.1. Il se compose d'un transistor IGBT en tant que commutateur, une diode, deux condensateurs $C1$ et $C2$ et de deux inductances $L1$ et $L2$ avec une charge R . [38]

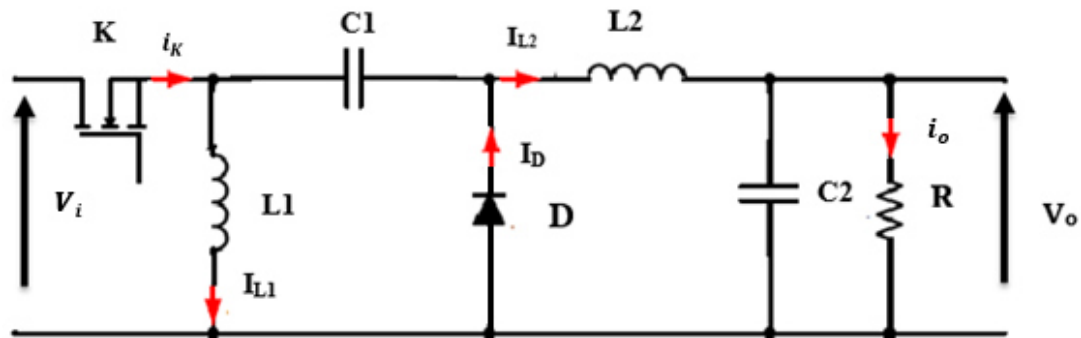


Figure IV.1 : Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Zeta.[38]

IV.2.1 Les avantages et les inconvénients du convertisseur Zeta

1) Les avantages

- Il s'agit d'un convertisseur de type "Buck-boost". Cela signifie que vous pouvez augmenter la tension et la réduire également.
- Il offre un meilleur rendement et un meilleur gain de tension.
- La tension de sortie est positive par rapport à la terre, ce qui rend le circuit de détection simple.

2) Les inconvénients

- L'exigence des éléments passifs.
- Le courant d'entrée est discontinu, ce qui n'est pas souhaitable pour certaines applications.
- Il s'agit d'un convertisseur de quatrième ordre, ce qui rend le contrôle difficile.

Le convertisseur présente deux étapes pour cycle de fonctionnement, les (figures IV.2 et IV.3).

- 1^{er} mode [O, DT] (Fig.IV.2):

K est fermé et D est ouverte : donc, les tensions V_{L1} et V_{L2} sont égales à V_i et $V_D = -(V_i + V_o)$ et la diode est polarisée en sens inverse. L_1 et L_2 sont chargées par la source, et les courants i_{L1} et i_{L2} sont augmentent linéairement par le rapport $\frac{V_i}{L_1}$ et $\frac{V_i}{L_2}$ respectivement. Par conséquent, le courant de commutation $i_K = i_{L1} + i_{L2}$ augmente également linéairement d'un rapport $\frac{V_i}{L}$ où $L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$, et la décharge de C_1 et la charge de C_2 .

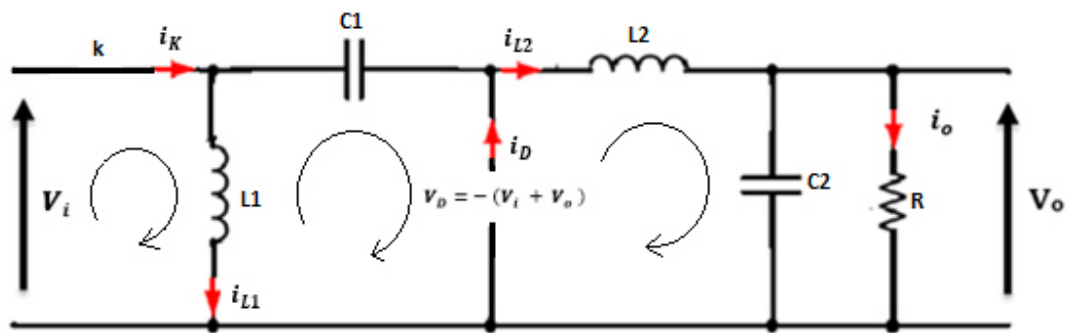


Figure IV.2 : Circuit idéal d'un convertisseur Zeta avec interrupteur k fermée.

Analyse de circuit propose

V_i - tension d'entrée

V_o - tension de sortie

$V_{C1} - V_{C2}$ - tension aux bornes du $C1$ et $C2$ respectivement

$V_{L1} - V_{L2}$ - tension aux bornes du $L1$ et $L2$ respectivement

Les valeurs moyennes de tensions V_{L1}, V_{L2} dans le régime permanent est nulles

On applique loi de kirchouf sur circuit on trouve :

$$V_{L1} - V_{C1} - V_{L2} - V_{C2} = 0 \tag{IV.1}$$

Pour le régime permanent :

$$V_{C1} = -V_o \tag{IV.2}$$

Tension à travers la boucle $V_i, L2$, et $C1$ est:

$$V_i - V_{C1} - V_o = 0 \tag{IV.3}$$

$$V_{C1} = V_i - V_o \tag{IV.4}$$

$$V_{L1} = V_i = L1 \frac{di_{L1}}{dt} \cong L1 \frac{\Delta i_{L1}}{DT} \tag{IV.5}$$

$$\rightarrow (\Delta i_{L1})_{Kfermé} = \frac{V_i}{L1} \times D \times T \tag{IV.6}$$

$$V_i - V_{C1} - V_{L2} - V_o = 0 \tag{IV.7}$$

À partir de l'équation IV.7 et on obtient :

$$(\Delta i_{L2})_{Kfermé} = \left(\frac{V_i}{L2} \right) \times D \times T \tag{IV.8}$$

- 2^{eme} mode [DT, T] (Fig.IV.3):

K est ouvert et D est fermée Donc, la tension aux bornes de K est $V_K = V_i + V_o$, et

$V_D = 0$ et les tensions V_{L1} et V_{L2} sont égales à $-V_o$ et les inductances $L1$ et $L2$ transfèrent d'énergie vers le $C1$ et la charge respectivement. Le courant dans $L1$ et $L2$ diminue linéairement par un rapport $-\frac{V_o}{L1}$ et $-\frac{V_o}{L2}$, respectivement. Le courant dans la diode $I_D = I_{L1} + I_{L2}$ également diminue linéairement par le rapport $-\frac{v_o}{L}$. [39].

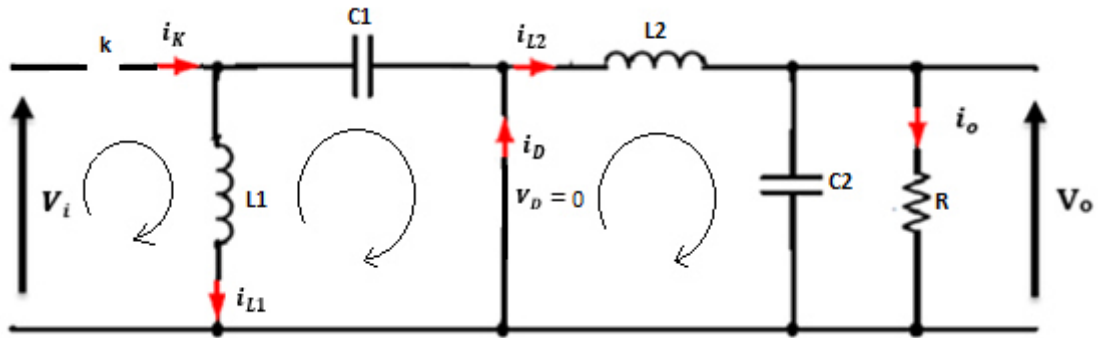


Figure IV.3 : Circuit idéal d'un convertisseur Zeta avec interrupteur k ouvert.

Tension à travers le boucle $L1$ et $C1$

$$V_{L1} - V_{C1} = 0 \quad \text{IV.9}$$

$$V_{L1} = V_{C1} \rightarrow -V_o = L1 \frac{di_{L1}}{dt} \quad \text{IV.10}$$

$$(\Delta i_{L1})_{D_{fermée}} = \left(\frac{V_o}{L1}\right) \times (1 - D) \times T \quad \text{IV.11}$$

Tension aux bornes de l'inductance $L2$ est donné par

$$-V_{L2} - V_o = 0 \quad \text{IV.12}$$

$$V_{L2} = -V_o = L2 \frac{di_{L2}}{dt} \cong L2 \frac{\Delta i_{L2}}{(1 - D) \times T} \quad \text{IV.13}$$

$$(\Delta i_{L2})_{D_{fermée}} = -\frac{V_o}{L2} \times (1 - D) \times T \quad \text{IV.14}$$

Le changement de courant dans l'inductance est nul (pour les conditions de régime permanent) :

$$(\Delta i_{L1})_{K_{fermée}} + (\Delta i_{L1})_{D_{fermée}} = 0 \quad \text{IV.15}$$

$$\frac{V_i}{L1} \times D \times T - \frac{V_o}{L1} \times (1 - D) \times T = 0 \quad \text{IV.16}$$

On obtient :

$$V_o = \frac{D}{1 - D} V_i \quad \text{IV.17}$$

Ainsi, à partir de l'équation ci-dessus, on observe que la tension continue de sortie V_o est contrôlée par le rapport cyclique D . [40]

L'impédance équivalente $R_{\acute{e}q}$ d'entrée du convertisseur Zeta est:

$$R_{\acute{e}q} = \frac{V_i}{i_i} = \frac{\frac{1-D}{D}}{\frac{D}{1-D}} R_L \rightarrow R_{\acute{e}q} = \frac{(1-D)^2}{D^2} R_L \quad \text{IV.18}$$

Donc , l'impédance de sortie R_L du convertisseur ZETA est exprimée comme suit [14]:

$$R_L = \frac{D^2}{(1-D)^2} R_{\acute{e}q} \quad \text{IV.19}$$

R_L varie de R_{Lmin} a R_{Lmax} , lorsque D varie de D_{min} a D_{max} ($D_{min}=0.1$ a $D_{max}=0.9$)

$$R_{Lmin} = \frac{D_{min}^2}{(D_{min}-1)^2} R_{\acute{e}q} \quad \text{et} \quad R_{Lmax} = \frac{D_{max}^2}{(D_{max}-1)^2} R_{\acute{e}q} \quad \text{IV.20}$$

L'impédance $R_{\acute{e}q}$ d'entrée du convertisseur DC-DC doit être égale à l'impédance optimale du panneau PV de sortie, afin de transférer le maximum de puissance du panneau photovoltaïque à la charge.

L'impédance de sortie optimale du module PV (Suntech 85W) est calculée a ($T_f=25, E_a=1000$ W)

$$R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} = \frac{17.8}{4.83} = 3.69 \Omega \quad \text{IV.21}$$

D'après l'équation (IV.20), les valeurs exactes du R_{Lmin} et R_{Lmax} en utilisant un panneau PV (Suntech 85 W) connectés en série avec de convertisseur Zeta comme interface d'alimentation sont:

Quand $D = 0.1$, pour un seul module, $R_{Lmin}=0.046 \Omega$.

Quand $D = 0.9$, pour un seul module, $R_{Lmax}=298.9 \Omega$.

IV.2.2 Dimensionnement des inductances et du condensateur

Les paramètres du convertisseur Zeta ($L1$, $L2$ et $C1$) peuvent être conçu pour fonctionner en mode de conduction continue (CCM). Le mode CCM entraîne toujours une réduction des contraintes sur les composants du convertisseur. De plus, le CCM offre des ondulations faibles côté sortie à cause de la présence de l'inductance $L2$. Par conséquent, de meilleurs résultats MPP seront obtenus.

Les composants du convertisseur Zeta sont conçus comme suit :

La tension d'entrée $V_i = 17.6$

La tension de sortie $V_o = 22$

On calcule le rapport cyclique D :

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_i} = \frac{22}{22 + 17.6} \rightarrow D = 0.56 \quad \text{IV.1}$$

On calcule l'inductance L_1

$$L_1 = \frac{V_i \times D}{f \times \Delta I_{L1}} = \frac{17.6 \times 0.56}{2500 \times 0.1} \rightarrow L_1 = 0.039H \quad \text{IV.2}$$

On calcule l'inductance L_2 :

$$L_2 = \frac{V_o \times (1 - D)}{f \times \Delta I_{L2}} = \frac{22 \times (1 - 0.56)}{2500 \times 0.1} \rightarrow L_2 = 0.039H \quad \text{IV.3}$$

La capacité C_1 :

$$I_{DCB} = \frac{P_{mpp}}{V_o} = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{V_o} = \frac{17.6 \times 4.83}{22} = 3.864 \quad \text{IV.4}$$

$$C_1 = \frac{I_{DCB} \times D}{f \times \Delta V_{C1}} = \frac{3.864 \times 0.56}{2500 \times 0.5} \rightarrow C_1 = 0.0017F \quad \text{IV.5}$$

V_o : La tension de sortie du convertisseur,

V_{mpp} :La tension MPP du GPV,

f :La fréquence de commutation.

ΔI_{L1} et ΔI_{L2} :sont les ondulations des courants des deux inductances qui sont de 5%,

ΔV_{C1} : Est l'ondulation de tension du condensateur C_1 qui est de 9%.

Le condensateur $C_2 = 200 \mu F$ [41]

IV.2.3 Simulation, résultats et discussion

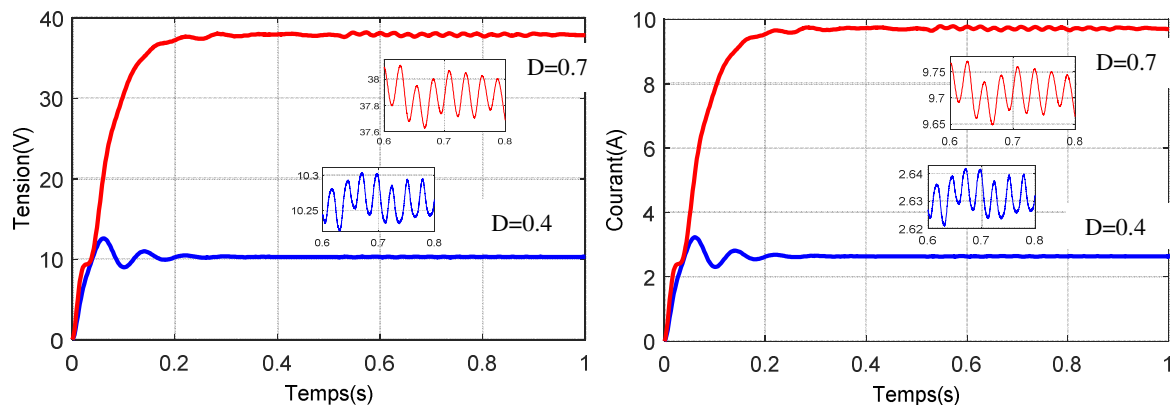


Figure IV.4 : La tension et le courant de sortie du convertisseur Zeta à $D=0,4$ et $D=0,7$.

Interprétation des résultats de simulation de la tension et du courant de sorties du convertisseur

La tension a la réponse d'un système de premier ordre à $D=0,7$ de gain $k=37V$ et de

temps de réponse $t_r = 0.2s$, pour $D=0.4$ la forme de la tension est semblable à la réponse d'un système de deuxième ordre avec un gain $k=10V$ et $t_r = 0.2s$.

De même pour le courant de sortie à $D=0.7$ de gain $k=0.97A$ et de temps de réponse $t_r = 0.2s$ et à $D=0.4$ de gain $k=0.24A$ de $t_r = 0.2s$.

Au régime permanent il y a de faibles ondulations. Par conséquent, le convertisseur Zeta permet d'augmenter et diminuer la tension de sortie du convertisseur et le niveau d'ondulation est très faible. Pour $D=0.4$ le convertisseur fonctionne comme convertisseur BUCK et dans $D=0.7$ le convertisseur fonctionne comme BOOST.

IV.3 Simulation des techniques MPPT

Le GPV est de 36 cellules de puissance maximale de 85 W

Les paramètres du convertisseur Zeta sont les suivant :

<i>L1</i>	<i>0.039H</i>
<i>L2</i>	<i>0.039H</i>
<i>C1</i>	<i>0.0017F</i>
<i>C2</i>	<i>200μF</i>
<i>f</i>	<i>2.5khz</i>
<i>R</i>	<i>2Ω</i>

Tableau IV.1: les paramètres du convertisseur zeta

Dans cette section, nous présenterons une comparaison entre la méthode intelligente (logique floue) et la commande classique (P&O et Inc-Cond) sous un ensoleillement uniforme avec des conditions différentes.

IV.3.1 Fonctionnement sous des conditions environnementales stables

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants c'est-à-dire l'éclairement solaire égale $1000W/m^2$ et la température égale $25^{\circ}C$.

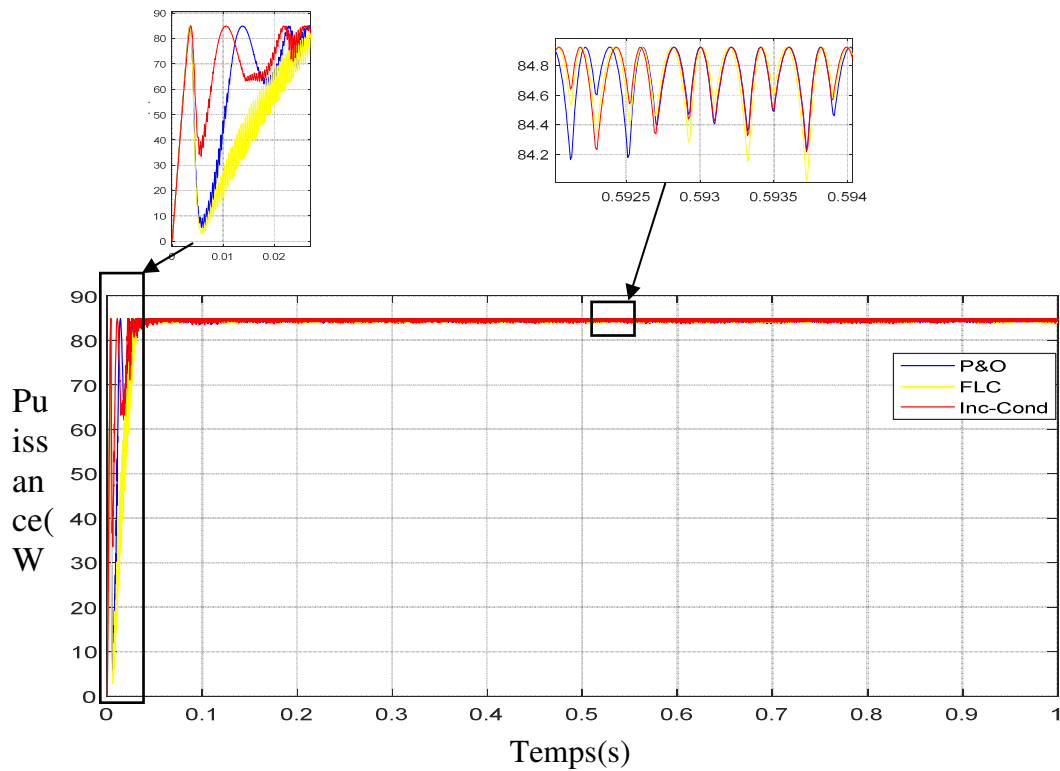


Figure IV.5 : Variation de la puissance du panneau PV des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$.

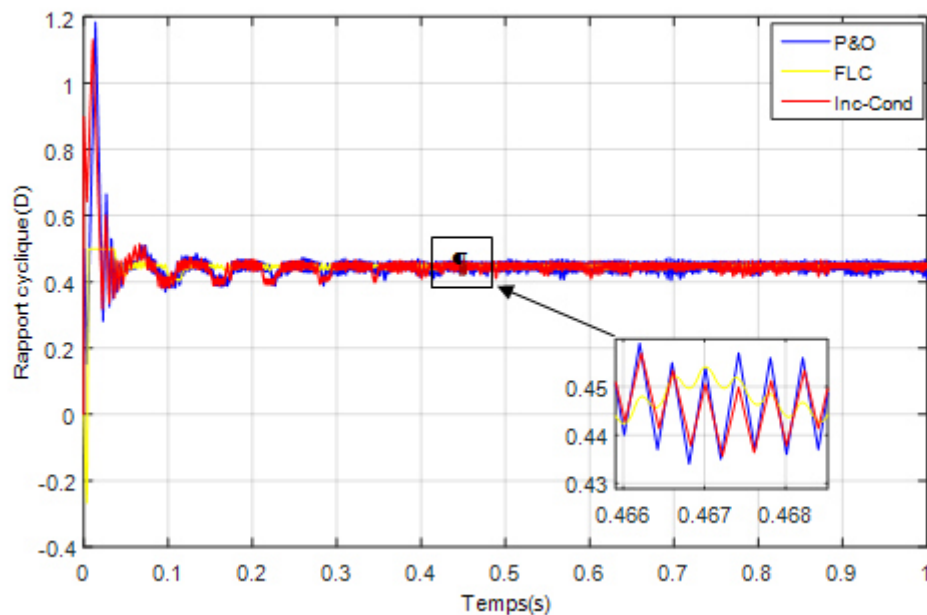


Figure IV.6 : Variation du rapport cyclique des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$.

IV.3.2 Fonctionnement sous des conditions environnementales variables

IV.3.2.1 Température constante et Eclairage variable « lent »

Dans ce test la température est maintenue constante à 25°C et l'ensoleillement est variable.

- Changement lent de l'ensoleillement.

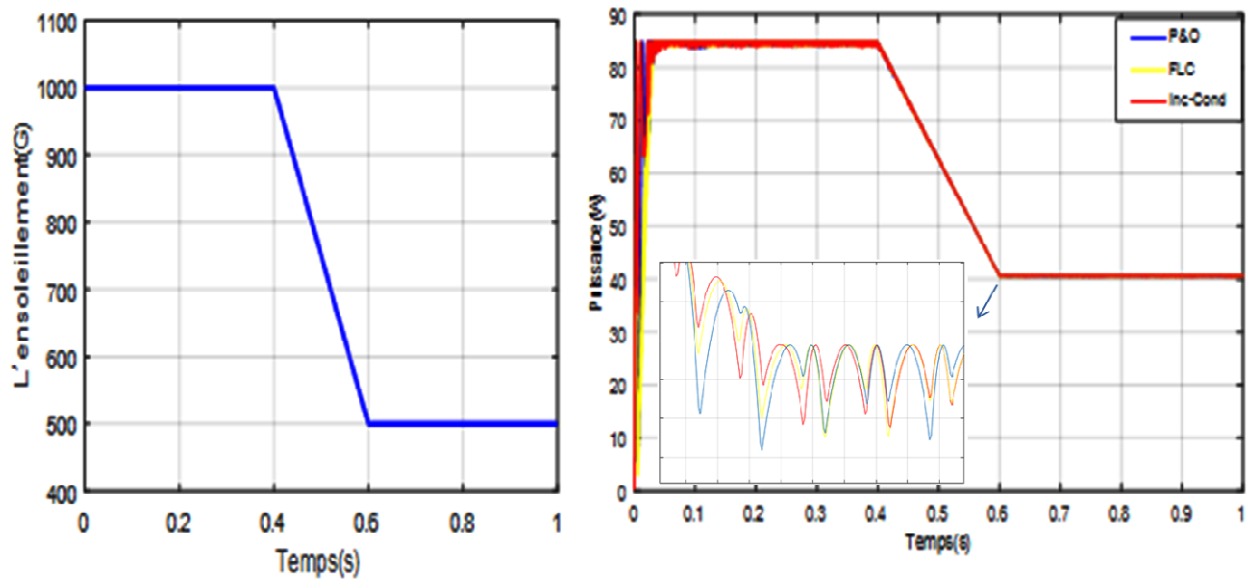


Figure IV.7: Variation de la puissance du panneau PV des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions variables de L'ensoleillement « lent »

IV.3.2.2 Température constant et éclaircissement variable « brusque »

Dans ce test, la température est maintenue constante et l'ensoleillement est variable.

- Changement brusque de l'ensoleillement.

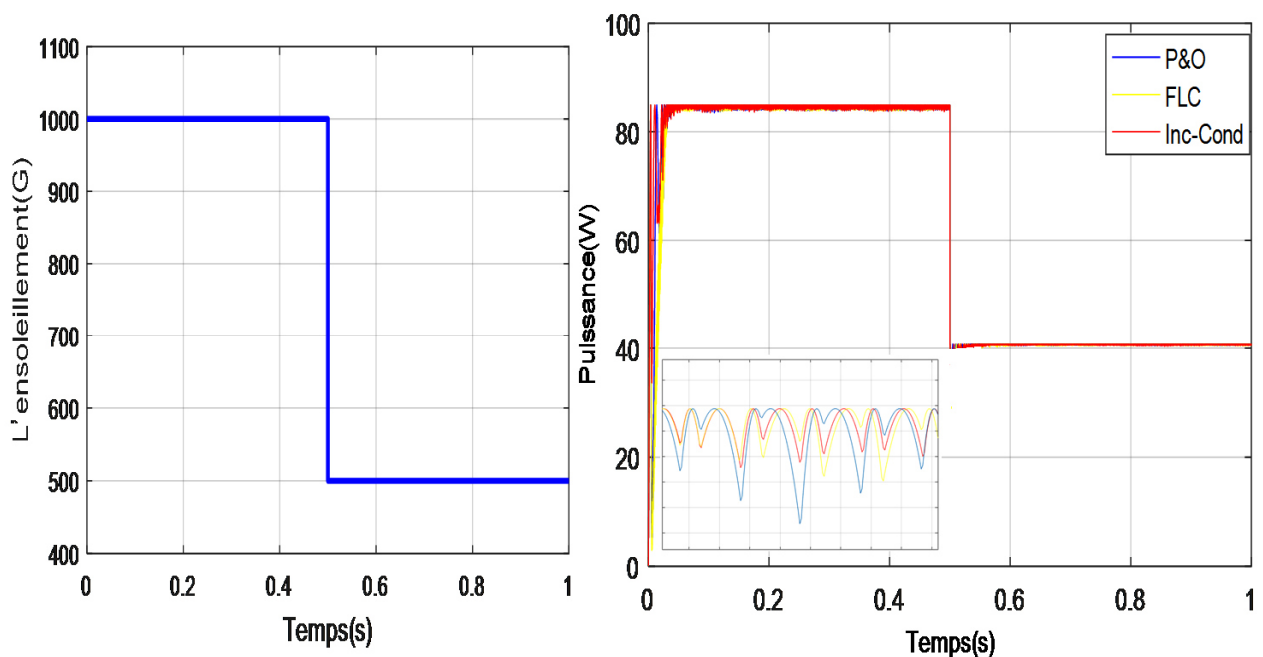


Figure IV.8 : Variation de la puissance du panneau PV des trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions variables de l'ensoleillement « brusque ».

IV.3.3 Interprétation et la comparaison des résultats

La simulation du système photovoltaïque a été réalisée en mesurant la puissance du GPV et en observant le niveau d'ondulation.

Une comparaison entre la méthode FLC et les deux autres méthodes classiques (P&O et Inc-Cond) est présentée.

La figure IV.5 montre les résultats de simulation de la puissance du panneau PV des trois algorithmes FLC et les deux commandes classiques P&O et Inc-Cond ($P_{max} = 85 \text{ W}$ à $1000 \text{ W} / \text{m}^2$). Les deux commandes classiques P&O et Inc-Cond détectent presque aux mêmes temps la puissance maximale avec un temps de réponse $t_r = 0,022s$ avec des oscillations significatives (jusqu'à 1 W) par contre la commande floue suit la puissance maximale ($P_{max} = 85 \text{ W}$ à $1000 \text{ W} / \text{m}^2$) dans un temps de réponse court ($t_r = 0.0253s$) et présente de faibles oscillations $[0.8-1] \text{ W}$ autour du MPP.

Les figures IV.7 et IV.8 montrent la variation de l'éclairement et la température. Les résultats illustrent clairement les avantages des trois méthodes, qui offrent un temps de réponse rapide et un faible dépassement.

Le tableau IV.2 résume la comparaison entre les trois algorithmes MPPTs.

Méthode	Temps de réponse	Etat de stabilité	Rapport cyclique
P&O	$t_r = 0,022s$	Oscille	D[0.413 0.467]
Inc-Cond	$t_r = 0,0225s$	Oscille	D[0.423 0.46]
FLC	$t_r = 0.0253s$	Oscille	D[0.435 0.46]

Tableau IV.2 : Comparaison des trois algorithmes MPPT.

IV.4 Etude comparative entre convertisseur Zeta et Boost

A) La forme de puissance du GPV sous des conditions constantes

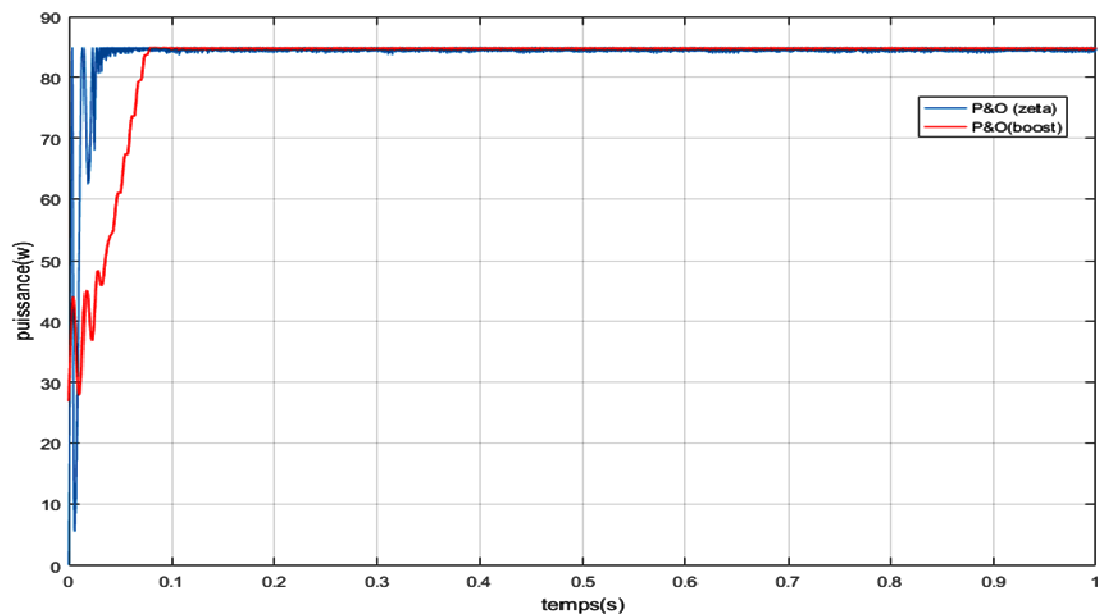


Figure IV.9 : Variation de la puissance du GPV de technique MPPT (P&O), sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$

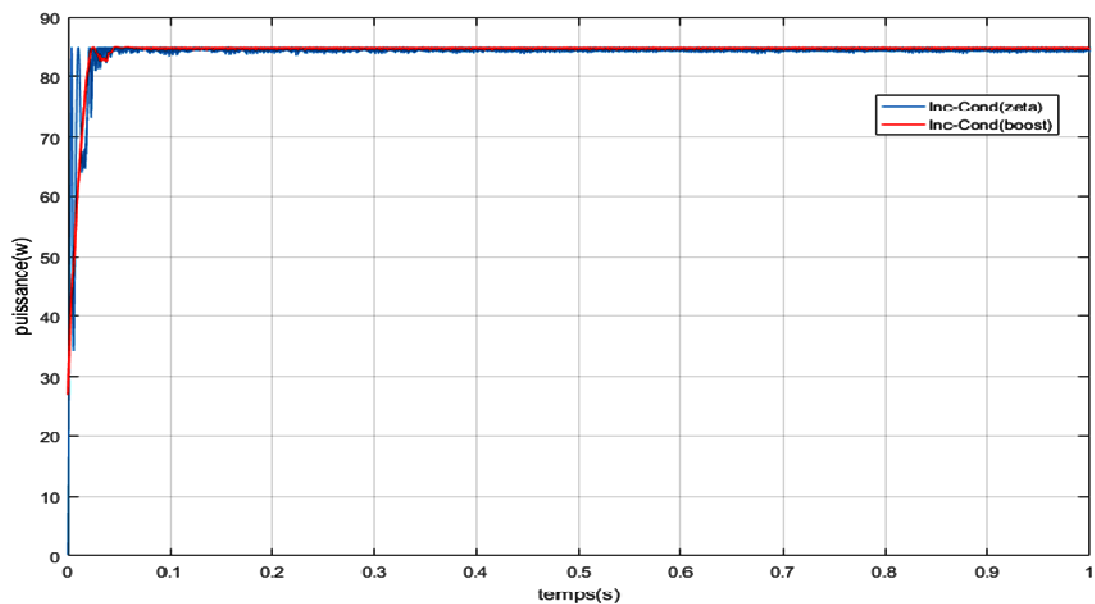


Figure IV.10 : Variation de la puissance du GPV de technique MPPT (Inc-Cond), sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$

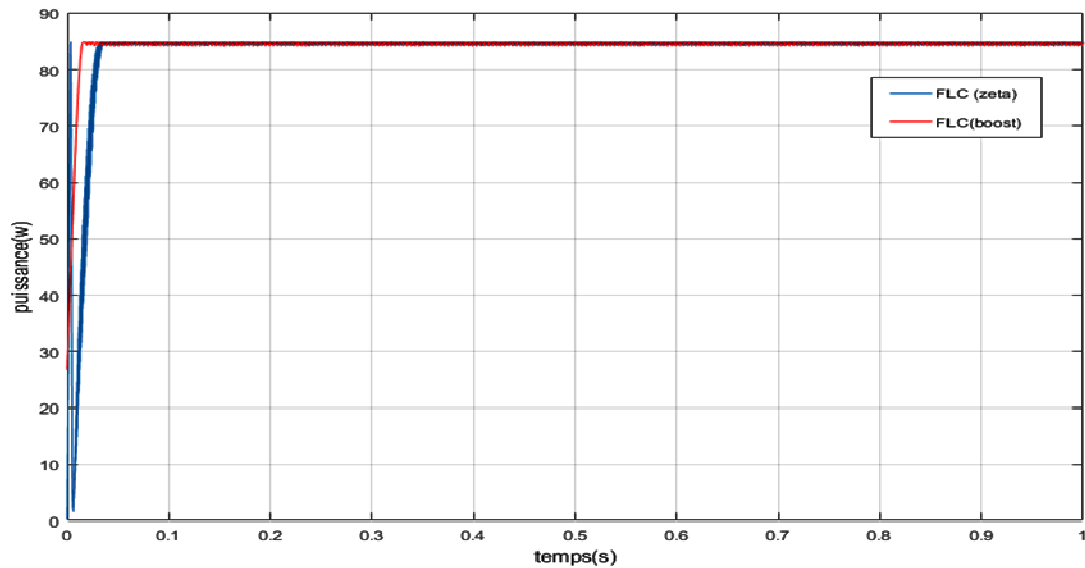


Figure IV.11 : Variation de la puissance du GPV de technique MPPT (FLC), sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$

B) Fonctionnement sous des conditions environnementales variables

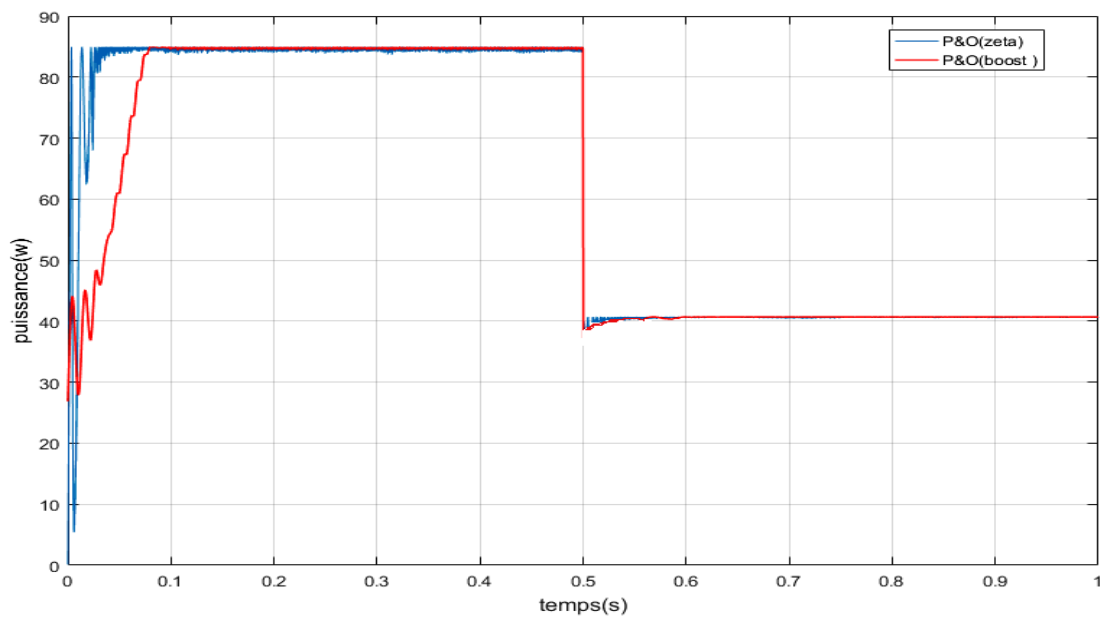


Figure IV.12: Variation de la puissance du panneau PV de technique MPPT (P&O), sous des conditions variables de L'ensoleillement « brusque »

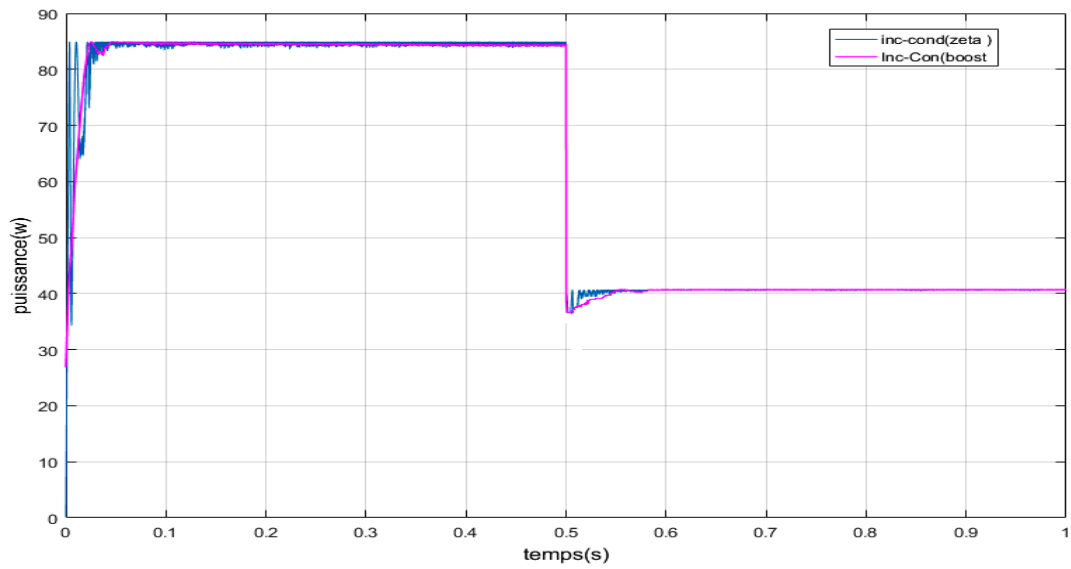


Figure IV.13: Variation de la puissance du panneau PV de technique MPPT (Inc-Cond) ,sous des conditions variables de L'ensoleillement « brusque»

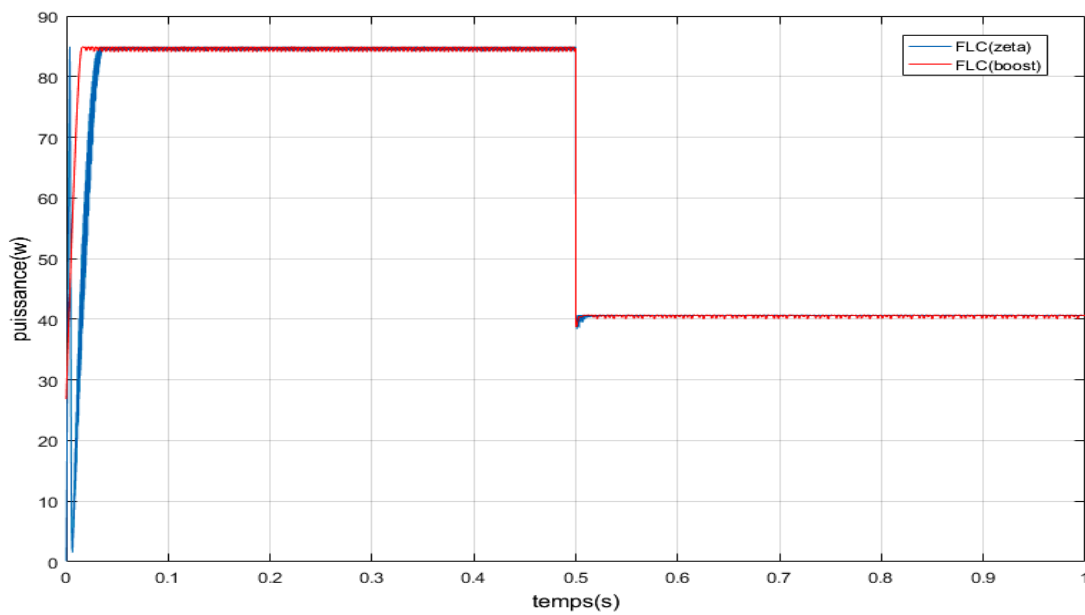
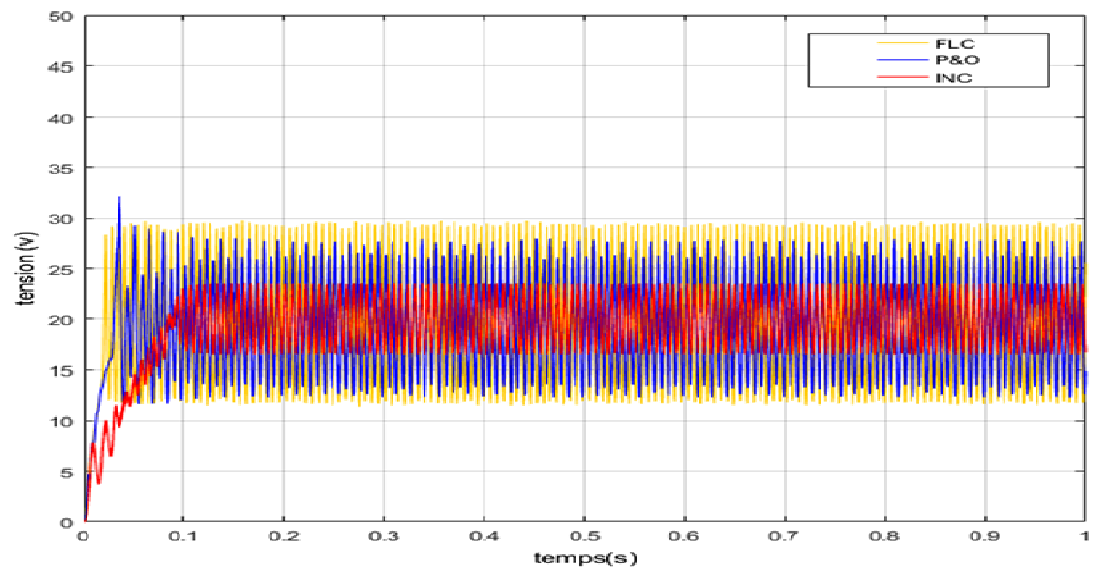
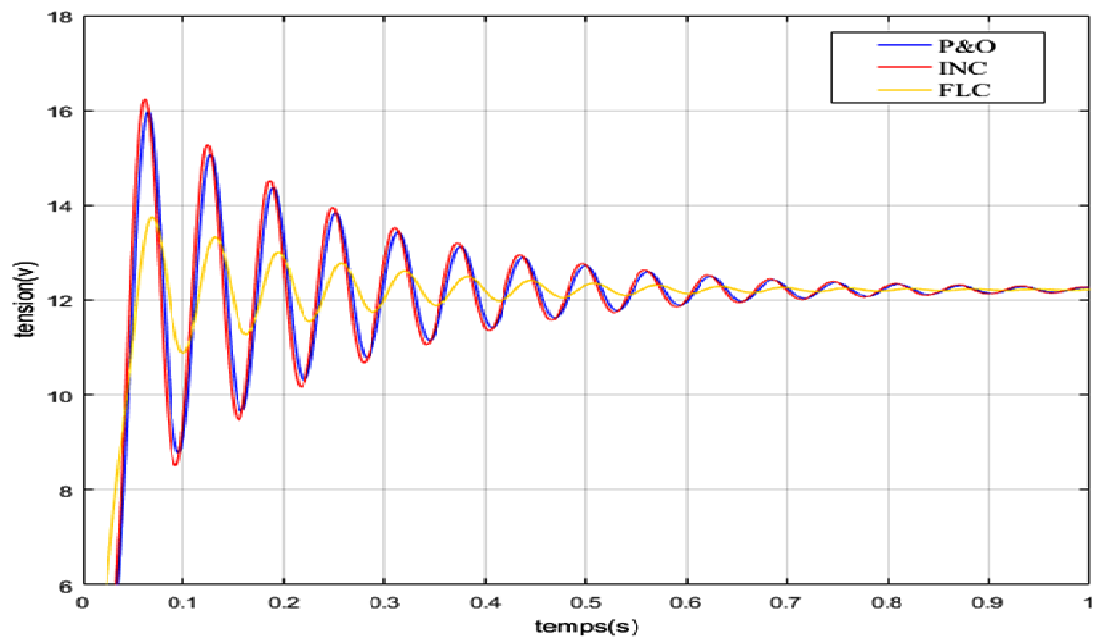


Figure IV.14: Variation de la puissance du panneau PV de technique MPPT (FLC) ,sous des conditions variables de L'ensoleillement « brusque»

C) La forme de la tension de sortie de convertisseur



(a)



(b)

Figure IV.15 : Variation de la tension de sortie du convertisseur par les trois techniques MPPT P&O, Inc-Cond et FLC, sous des conditions constantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$

a) Convertisseur boost b) Convertisseur zeta

IV.4.1 Interprétation et la comparaison des résultats

Dans les simulations des deux convertisseurs Boost et Zeta (même famille).

L'ondulation de la tension de sortie du convertisseur Zeta est faible comparée au boost. Concernant le temps réponse de la puissance du GPV et l'état de stabilité des trois commandes le (tableau IV.3) résume la comparaison entre les deux convertisseurs.

La Commande	Le convertisseur	Le temps de réponse	L'état de stabilité
P&O	Zeta	$t_r = 0,022s$	Meilleur pour le convertisseur Boost
	Boost	$t_r = 0,079s$	
Inc-Cond	Zeta	$t_r = 0,0225s$	Meilleur pour le convertisseur Boost
	Boost	$t_r = 0,045s$	
FLC	Zeta	$t_r = 0,0253s$	Meilleur pour le convertisseur Zeta
	Boost	$t_r = 0,017s$	

Tableau IV.3: comparaison entre les deux convertisseurs.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé le système photovoltaïque constitué d'une : générateur photovoltaïque, convertisseur Zeta, la commande MPPT , avec une charge résistive .

Dans le but d'étudier le comportement du système photovoltaïque par rapport aux variations climatiques, nous avons simulé d'abord le système sous conditions d'éclairement stables , en utilisant trois commande P&O, Inc-Cond et FLC d'après les résultats de simulation nous avons conclu que les trois méthodes ont prouvé une meilleures poursuit de MPP, avec un avantage pour la logique flou .on remarque aussi que l'utilisation de convertisseur zeta a amélioré le temps de réponse .aussi dans le cas des conditions climatique variable le convertisseur zeta montre une robustesse notable fasse aux changement rapide ce qui nous permet de dire que ce l'utilisation de ce convertisseur est bénéfique dans les systèmes photovoltaïques .

Conclusions Générales

Le travail qu'on a présenté s'intéresse à la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Dans un premier temps, on a présenté quelques généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV et cellule PV. afin de comprendre le fonctionnement de générateur PV.

La chaîne énergétique étudié dans notre cas est constituée d'un GPV, de l'étage d'adaptation basé sur la technique de poursuite de point de puissance maximal (MPPT) et la charge.

Dans Ce document nous avons présenté aussi des méthode permettant de maximiser l'énergie sortant du générateur photovoltaïque en transférant l'énergie à la charge en utilisant le convertisseur DC-DC boost et en la contrôlant avec les techniques MPPT, On a présenté des méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et la méthode de perturbation et observation. Et une technique basée sur l'intelligence artificielle qui est la logique floue FLC, Différentes simulations, sous l'environnement Matlab/Simulink, ont été réalisées pour mettre en évidence l'influence des variations des conditions climatiques (éclairage et température) sur le MPP où la puissance du système est maximale.

Dans un deuxième temps, et comme le choix de l'étage d'adaptation est d'une importance non négligeable nous avons introduit un autre type de convertisseur DC-DC (Zeta) afin de voir son efficacité dans les systèmes PV. La simulation dans MATLAB a montré la réaction du convertisseur Zeta proposé tout en l'utilisant dans une installation photovoltaïque accompagné d'un contrôle MPPT. La puissance maximale est toujours atteinte, même pendant les changements d'irradiation et de température (brusques et lents), et en faire un Etude comparative de Convertisseur Zeta par rapport au convertisseur boost on trouve que Zeta améliore le temps de réponse du système et renforce la stabilité sous conditions climatiques variables ce qui permet de le considérer comme très bon convertisseur dans le processus de suivi du point de puissance maximale.

Perspectives

En perspective de ce travail, nous avons pensé à quelques suggestions :

- L'utilisation de la méthode combinée neurone - floue pour l'optimisation de la puissance maximale du système photovoltaïque.

- L'utilisation des algorithmes génétiques pour optimiser les différents gains et paramètres du système flou.
- L'élaboration des algorithmes pour la recherche MPP dans le cas de l'ombrage partiel avec une modification de la topologie du convertisseur zeta qui donne des meilleures performances.

Bibliographique

- [1] M. A. G. de Brito, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. de Azevedo e Melo, and C. A. Canesin, « Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications », IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 3, pp. 1156–1167, 2013.
- [2] C.TIGRINE, O. AitOuali , « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque » mémoire de master université bejaia ,2019.
- [3] F. Belouahchi , « Contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique » mémoire de master université Ferhat Abbas Sétif 2016.
- [4] G. J. Yu, Y. S. Jung, J. Y. Choi, I. Choy, J. H. Song, and G. S. Kim, «A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms» in Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1531–1534, doi: 10.1109/PVSC.2002.1190903, May 2002.
- [5] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu, and Y. Kang, « A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems » IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 7, pp. 2622–2628, doi: 10.1109/TIE.2008.920550,2008.
- [6] N. S. S. Raj and B. Urmila, « PV fed Zeta converter », Int. J. Eng. Res. Appl. IJERA, vol. 3, no. 4, pp. 2692–2696, 2013.
- [7] A. Talha , et K. Ameer. « Modélisation Et Commande D'un Générateur Photovoltaïque Muni D'un Régulateur MPPT» mémoire de Master, 2009.
- [8] A. Hussein «A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules». Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, Vol. 25, 2017.
- [9] Site web <https://lenergie-solaire.net/energies-renouvelables> , consult le 10/12/2020.
- [10] L. Croci, « gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super-condensateurs », Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, France,2013.

- [11] M. HARAOUUBIA « Etude simulation d'un générateur de panneau photovoltaïque » mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba.2019 .
- [12] R. Maouedj, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah ». Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2005.
- [13] S. Bensmail, D.REKIOUA « Optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque » International Congress on Télécommunication and Application, Bejaia, Algeria 11-12 April 2012.
- [14] Dossier Thématique « effet photovoltaïque et fonctionnement des installations solaires isolées » énergies solidaires courrier es n°03 – janvier 2000.
- [15] M .Thomas, V. Alexis, V. Marion, Sup-D, « les cellules photovoltaïques », classes préparatoires CPE institution des chartreux année 2004/2005.
- [16] J.F. REYNAUD, « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques » Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III, 2011.
- [17] H. BENNACER « modélisation d'un système photovoltaïque», Mémoire de Magister, Université D Liabès Sidi bel Abbès, 2009.
- [18] B. Abdelhalim, « étude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire », Mémoire magister. Biskra, 2009.
- [19] J. Bai, Y. Cao, Y. Hao, Z. Zhang, S. Liu, and F. Cao, “Characteristic output of PV systems under partial shading or mismatch conditions”, Solar Energy, vol. 112, pp. 41,2015.
- [20] R. Kadri, H. Andrei, J.-P. Gaubert, T. Ivanovici, G. Champenois, and P. Andrei, «Modeling of the photovoltaic cell circuit parameters for optimum connection model and real-time emulator with partial shadow conditions », Energy, vol. 42, no. 1, pp. 57–67, Jun 2012.

- [21] S. Singer, and A. Braunstein, « A general model of maximum power point tracking » Proceedings of MELECON'85 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Madrid, Spain pp 147-151,1985.
- [22] M. Kassah, C. Laouar « Elaboration et implémentation des techniques MPPTs d'un système photovoltaïque sur DSP » mémoire de master en électrotechnique université Farhat Abbas Sétif. 2015.
- [23] M. Meddah , M. Bourahla et N. Bouchetata « Synthèse des convertisseurs statiques DC/AC pour les systèmes photovoltaïques »mémoire de master , université d'Oran Mohamed Boudiaf ,2011
- [24] A. ZEMOURI, « Etude expérimentale d'un convertisseur dc/dc contrôler par une commande robuste », thèse de magister, université de Batna, 2014.
- [25] A . Belbao Learetta, « Réalisation De commande MPPT Numérique », Rapport de Stage Projet Fin d'Etude au niveau de CNRS, France, Septembre 2006.
- [26] B. kanj « Technique intelligentes pour la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque » mémoire de master université Libanaise, 2012.
- [27] A. Bouyahia « Etude et commande d'un filtre actif de puissance parallèle triphasé associé à un générateur photovoltaïque » mémoire de master université Ferhat Abbas-Sétif ,2017.
- [28] C.lazazga « Optimisation de l'énergie solaire par les techniques évolutionnaires» mémoire de master en électronique université Ferhat Abbas-Sétif ,2014.
- [29] T. radjai, «Commande avancées des convertisseurs utilisés dans les systèmes photovoltaïque », thèse de doctorat en automatique université Farhat Abbas Sétif, 2015.
- [30] S.LHLAH, « Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C) ». thèse de magister, université de Batna, 2007.

- [31] K. Kassmi, M. Hamdaoui, et F. Olivié, « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique», vol. 10. 2007.
- [32] HADJI Slimane, « Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie», thèse de doctorat ,université Farhat Abbas Sétif, 2018.
- [33] B.boukezata, « Etude et commande d'une chaine de conversion d'énergie d'un système solaire photovoltaïque ». thèse de doctorat en électrotechnique université Farhat Abbas Sétif, 2015 .
- [34] H. Buhler, « Réglage Par Logique Floue», Presses Polytechniques et Universitaires Romandes CH-1015 Lausanne. 1994.
- [35] L.A. Zadeh, « Information and Control, Fuzzy Sets », vol 8, pp 338- 353, 1965.
- [36] M. Ayres, D. L. Wait, M. Weiderholt, and T. Le« photovoltaic cell model for the International Space Station », in Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1301–1303, 2000.
- [37] M. Kassah, C. Laouar « Elaboration et implémentation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque sur DSP »mémoire de master en électrotechnique université Ferhat Abbas Sétif. 2015.
- [38] C. Chabert and A. Rufer, « Optimisation des Convertisseurs de Puissance Embarqués: Adaptation Des Cellules A Lien Alternatif MF Et Commutation Douce» 8 ème Colloque Electronique de Puissance du Future, Lille, France, Novembre-Decembre 2000.
- [39] I. Bouzghaya, « Etude d'un Hacheur à Stockage Capacitif», Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Boughi, Mémoire de Master, 2013.
- [40] J. Manohar and K. S. Rajesh, « A comparative study and performance analysis of synchronous SEPIC Converter and synchronous Zeta Converter by using PV system with MPPT technique», in2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), pp. 1–6, 2016.
- [41] A. M. Khatab, M. I. Marei, and H. M. Elhelw, « An Electric Vehicle Battery Charger

Based on Zeta Converter Fed from a PV Array », in 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), pp. 1–5, 2018.

Résumé :

La croissance de la demande en énergie dans le monde a largement stimulé la recherche des nouvelles sources d'énergie illimitées, telles que l'énergie solaire. La production d'énergie électrique, à partir de source de conversion photovoltaïque, bénéficie actuellement d'un essor très important et trouve une large application dans divers domaines de l'industrie. Le point de puissance maximal de l'installation solaire est très variant de sorte qu'un algorithme de recherche est nécessaire en fonction de la courbe tension-courant (VI) et courbe puissance-tension (PV) de la cellule solaire. Les algorithmes (P&O, Inc-Cond et FLC) sont couramment utilisés, en raison de leur simplicité de mise en œuvre. Les convertisseurs DC-DC est largement utilisés comme alimentation électrique dans les systèmes électroniques surtout dans les systèmes solaires, Dans ce projet, nous parlerons de deux types de convertisseurs, et nous nous concentrerons sur un qui n'a pas été beaucoup pris en compte et qui peut être utilisé à la fois pour faire baisser ou augmenter la production c'est le convertisseur ZETA .

Mots Clés : l'énergie solaire, MPPT, Techniques classiques, Techniques intelligentes, convertisseur zeta.

Abstract:

The growing demand for energy around the world has greatly stimulated the search for unlimited new sources of energy, such as solar energy. The production of electrical energy, from a photovoltaic conversion source, is currently enjoying a very important growth and is widely used in various fields of the industry. The maximum power point of the solar installation is highly variable so that a search algorithm is required according to the voltage-current (VI) and power-voltage (PV) curves of the solar cell. The P&O, Inc-Cond and FLC algorithms are commonly used because of their simplicity of implementation. DC-DC converters are widely used in power supplies of electronic systems especially in solar systems. In this project, we will talk about two types of converters, and we will focus on one that has not been taken into account much and that can be used either to lower or increase production, that is the ZETA converter.

Key Words: Solar energy, MPPT algorithms, Conventional techniques, intelligent techniques, zeta converter .

ملخص :

حفز الطلب المتزايد على الطاقة حول العالم بشكل كبير البحث عن مصادر جديدة غير محدودة للطاقة مثل الطاقة الشمسية. يتمتع إنتاج الطاقة الكهربائية من مصدر تحويل الطاقة الضوئية حالياً بنمو مهم للغاية ويستخدم على نطاق واسع في مختلف المجالات الصناعية. تكون نقطة الطاقة القصوى للتركيب الشمسي متغيرة للغاية بحيث تكون خوارزمية البحث ضرورية اعتماداً على (VI) ومنحنى (PV) للخلية الشمسية. تُستخدم خوارزميات P&O و Inc-Cond و FLC بشكل شائع، نظراً لبساطتها في التنفيذ. تستخدم محولات DC-DC على نطاق واسع كمصدر للطاقة في الأنظمة الإلكترونية خاصة في الأنظمة الشمسية، في هذا المشروع سوف نتحدث عن نوعين من المحولات، وسوف نركز على نوع لم يتم أخذه في الاعتبار كثيراً ويمكن استخدامه لخفض الإنتاج أو زيادته، إنه المحول ZETA .

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية, خوارزمية تتبع نقطة الاستطاعة العظمى, التقنيات الذكية, التقنيات الذكية, محول zeta.