

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° :



FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

OPTION : CMT

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Professionnel**

Par : HOUICHE Chaima

FAID Lemia

Intitulé

**Commande MPPT intelligente d'une classe
de systèmes photovoltaïques**

Proposé par :

Dr. BOUKHALFA Abdelouaheb Université De M'sila

Rapporteur

Dr. KHETTAB Khatir Université De M'sila

Co-Rapporteur

Année universitaire : 2020 /2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*A ma très chère **Mère** et mon très cher **Père***

*A ceux qui m'ont toujours encouragé pour que je réussisse dans mes
études*

A ceux qui ont veillé pour mon bien être

ceux qui m'ont soutenu dans les moments les plus difficiles de ma vie

A ceux que j'aime et je respecte infiniment

Le jour est venu pour leur dire Merci...

*A toute la famille **FAID** et **HOUICHE**.*

*A tous mes amis qui ont toujours été présents et qui n'ont ménagé
aucun effort pour me bénéficier avec leur aide et leurs suggestions,*

*A tous mes camarades du Groupe **CMT**.*

Remerciements

Avant tout je remercie

Dieu de nos avoir Donné la force et le courage.

A la suite Nous tenons à remercier vivement

*Dr. BOUKHALFA Abdelouaheb et Dr. KHETTAB Khatir qui ont
fourni des efforts énormes, par ses Informations ses conseils et*

Ses encouragements

*Nous tenons à remercier aussi « Dr. BOUDAI Assam » pour son aide
durant toute la période du travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt
qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de
l'enrichir par leurs propositions.*

Table des Matières

Liste des figures.....

Liste des tableaux.....

INTRODUCTION GENERALE1

Chapitre I: GENERALITE SUR LES SYSTEMES

PHOTOVOLTAÏQUES

I.1 Introduction	4
I.2 Le système photovoltaïque.....	4
I.2.1 La cellule photovoltaïque	4
I.2.1.1 Principe de fonctionnement.....	4
I.2.1.2 Type et rendement des cellules photovoltaïques	5
I.2.2 Association des modules photovoltaïques	6
I.2.2.1 Association en série.....	6
I.2.2.2 Association en parallèle.....	7
I.2.2.3 Association série-parallèle (mixte).....	7
I.3 Influence des différents paramètres sur les caractéristiques du PV.....	8
I.3.1 Influence de la température sur les modules.....	8
I.3.2 Influence du rayonnement sur les modules.....	9
I.4 L'effet photovoltaïque.....	10
I.5. Générateur photovoltaïque.....	10
I.5.1. Paramètre photovoltaïque.....	10
I.5.2. Courant de court-circuit ICC.....	10
I.5.3. Tension en circuit ouvert VCO.....	11

I.5.4.Rendement énergétique.....	11
I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie Photovoltaïque.....	11
I.6.1 Avantages de l'énergie Photovoltaïque.....	11
I.6.2 Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque.....	12
I.7 Le Potentiel Solaire en Algérie.....	12
I.7.1 La future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie.....	13
I.8 Conclusion.....	13

CHAPITRE II MODELISATION D'UN SYSTEME

PHOTOVOLTAÏQUES

II.1 Introduction.....	15
II.2 Modélisation d'un system Photovoltaïque	15
II.2.1 Les Hacheurs.....	15
II.2.2 Les types des convertisseurs DC-DC.....	16
II.2.2.1 Hacheur dévolteur (Buck Converter).....	17
II.2.2.2 Hacheur survolteur (Boost converter).....	18
II.2.2.3 Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost converter).....	19
II.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.	21
II.4 Modélisation d'un panneau.....	22
II.5 La commande MPPT.....	25
II.5.1 Définition.....	25
II.5.2 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.....	26
II.5.3 Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum(MPPT).....	26
II.6. Différentes techniques d'MPPT.....	28
II.6.1 Algorithme perturbation et observation.....	28
II.6.2. Principe des techniques "Perturbe and Observe" (P&O).....	30

II.7.1 Avantages et inconvénients de (P&O).....	31
II.8 Conclusion.....	31

CHAPITRE III :

SIMULATION ET ANALYSE DE MPPT PAR UN CONTROLEUR BASE A LA LOGIQUE FLOUE.

III.1 Introduction.....	33
III.2 La logique floue.....	34
III.2.1 Historique.....	34
III.2.2 Domaine d'application	34
III.2.3 Base de la logique floue.....	34
III.2.3.1 Principe de base de la logique floue.....	34
III.3 Règles floues.....	35
III.3.1 La logique floue et l'intelligence artificielle.....	35
III.4 Technique MPPT par logique floue.....	36
III.4.1 Fuzzification.....	37
III.4.2 Inférence.....	37
III.4.3 Défuzzification.....	37
III.5 Commande MPPT à base de contrôleur floue.....	38
III.5.1 Fuzzification.....	39
III.5.2 Les variables linguistiques.....	40
III.5.3 Méthodes d'inférence (les règles floues)	41
III.5.4 Défuzzification.....	43
III.6 Avantages et inconvénients du réglage par logique floue	43
III.6.1 Les Avantages.....	43
III.6.2 Les inconvénients.....	43

III.7 Simulation du système photovoltaïque.....	44
III.7.1 L'algorithme perturbation et observation (P&O).....	44
III.7.2 Analyse et simulation de méthode d'extraction de puissance maximale par le contrôleur basé sur la logique floue.....	47
III. Conclusion.....	48
Conclusion Générale	51
Références Bibliographiques	
Résumé	

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	5
Figure I.2 Types de cellules photovoltaïques.....	6
Figure I.3 Association de N modules solaires en série.....	7
Figure I.4 . Association des modules solaires en parallèle	7
Figure I.5 . Association mixte des modules solaires.....	8
Figure I.6 Effet de la température sur la caractéristique P-V, I-V.....	9
Figure I.7 Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V, I-V	9
Figure I.8 Moyenne annuelle de l'irradiation globale en Algérie.....	13

CHAPITRE II

Figure II.3 Circuit idéal du convertisseur dévolteur (Buck).....	15
Figure II.4 . Circuits équivalents du convertisseur Buck pendant une période de commutation(A) et (B).....	16
Figure II.5 Circuit idéal d'un convertisseur survolteur (Boost).....	18
Figure II.6 . Circuits équivalents du convertisseur Boost pendant une période de commutation.....	18
Figure II.7 Circuit idéal d'un convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost).....	19
Figure II.8 Circuits équivalents du convertisseur Buck-Boost pendant une période de commutation (A) et (B).....	20
Figure II.9 Schéma équivalent de la cellule PV	20
Figure II.10 Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT.....	26
Figure II.11 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale.....	27
Figure II.12 Algorithme de perturbation et de l'observation (P&O).....	28
Figure II.13 Signe de et à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance	30

Chapitre III:

Figure III.1 Image réelle pour contrôleur flou.....	33
Figure III.2 Comparaison d'un ensemble classique et un ensemble flou.....	35
Figure III.3 Traitement flou.....	36
Figure III.4 Structure d'un régulateur flou.....	37
Figure III.5 Schéma synoptique d'un système PV avec une commande MPPT flou.....	38
Figure III.6 Structure de base du contrôleur flou.....	38
Figure III.7 variation de la puissance par rapport à la variation de la tension.....	39
Figure III.8 Fonctions d'appartenances de : (a) L'entrée erreur E, (b) L'entrée changement d'erreur CE et (c) La sortie dD.....	41
Figure III.9 La variation du point de puissance maximal.....	42
Figure III.10 Schéma bloc SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).....	44
Figure III.11 Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O).....	45
Figure III.12 Allure de la tension générée en utilisant pas variable en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 700, 1000 \text{ W/m}^2$).....	45
Figure III.13 Allure de la puissance générée en utilisant pas variable en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 700, 1000 \text{ W/m}^2$).....	46
Figure III.14 Allure de la puissance en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 700, 1000 \text{ W/m}^2$).....	46
Figure III.15 Allure de courant en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 700, 1000 \text{ W/m}^2$).....	47
Figure III.16 Schéma block SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT Logique flou....	47
Figure III.17 Schéma de simulation de l'algorithme de contrôleur flou.....	48

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableaux I.1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 150[103].....	8
Tableaux I.2 Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.....	12

CHAPITRE II

Tableau II .1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 60W et 150w.....	23
--	----

CHAPITRE III

Tableau III .1 Les règles du contrôleur flou.....	44
Tableau III .2 Tableau des règles d'inférence.....	45

INTRODUCTION GENERALE

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général dans des unités de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Dans les pays industrialisés, ce système est aujourd'hui très centralisé.

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon anarchique pour les générations futures.

On distingue deux types d'énergie : les énergies non renouvelables et les énergies renouvelables. Les premières sont dérivées à partir du pétrole, du gaz, du charbon, et d'uranium... Les secondes de l'hydraulique, la biomasse, les déchets, l'éolien, le solaire, le géothermique, etc.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière photovoltaïque (PV) qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé. L'énergie PV est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux PV composés des cellules PV ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

Concernant ce travail, nous nous sommes intéressés essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation du générateur photovoltaïque. En effet, par exemple dans le cas des engins mobiles alimentés par l'énergie photovoltaïque, l'alimentation doit être assurée au point maximal de la puissance (MPPT) quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairement). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation - Observation (P&O), Incrémentation (INC) et l'approche Floue.

D'autre part, la logique floue a reçu une attention particulière de la part d'un certain nombre de chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance. Vu ses performances, nous l'avons appliquée pour développer une technique MPPT Floue.

Le mémoire présenté est organisé en trois chapitres.

Après une introduction générale

Le chapitre I présente d'une manière générale les systèmes photovoltaïques et leurs composants.

Ensuite, nous passerons au deuxième chapitre consacré à la modélisation du générateur photovoltaïque, ainsi le principe de la conversion photovoltaïque puis nous donnerons les principales caractéristiques d'un GPV et nous présenterons les systèmes photovoltaïques, avec leurs avantages et leurs inconvénients. Les convertisseurs Buck et Boost. De plus, il montre quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), et nous nous intéresserons à l'étude de la méthode "Perturbation - Observation" et "IncCond".

Dans le troisième chapitre, nous présenterons la commande floue d'un système photovoltaïque pour la recherche du point de puissance maximale (MPPT).

Le travail a été complété par une étude comparative avec un test de robustesse entre les méthodes dites conventionnelles à savoir, la méthode Perturbation- Observation (P&O), IncCond et celle basée sur l'approche Floue. Les résultats obtenus mettent en évidence l'avantage de l'approche Floue par rapport à la méthode Perturbation et Observation (P&O) et IncCond.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES SYSTEMES

PHOTOVOLTAÏQUES

I.1. Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique [1].

Pour définition le mot " photovoltaïque " vient de la grec " photo " qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la lumière électricité.

Le Soleil est une grande sphère formée de gaz extrêmement chauds. Il est constitué, par la masse de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments lourds (Fer, Néon, Azote, Silicium, ...). Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La masse est alors transformée en énergie selon la fameuse formule d'Einstein. Cette énergie est transmise sous forme de rayonnement [2]. Vitres qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques.

I.2 Le système photovoltaïque

I.2.1 La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3V à 0.7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [3].

I.2.1.1 Principe de fonctionnement

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe).

Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales.

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit :

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ($E_{ph} = h\nu$) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires « électron- trou ».

Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule.

Figure I.1 [4].

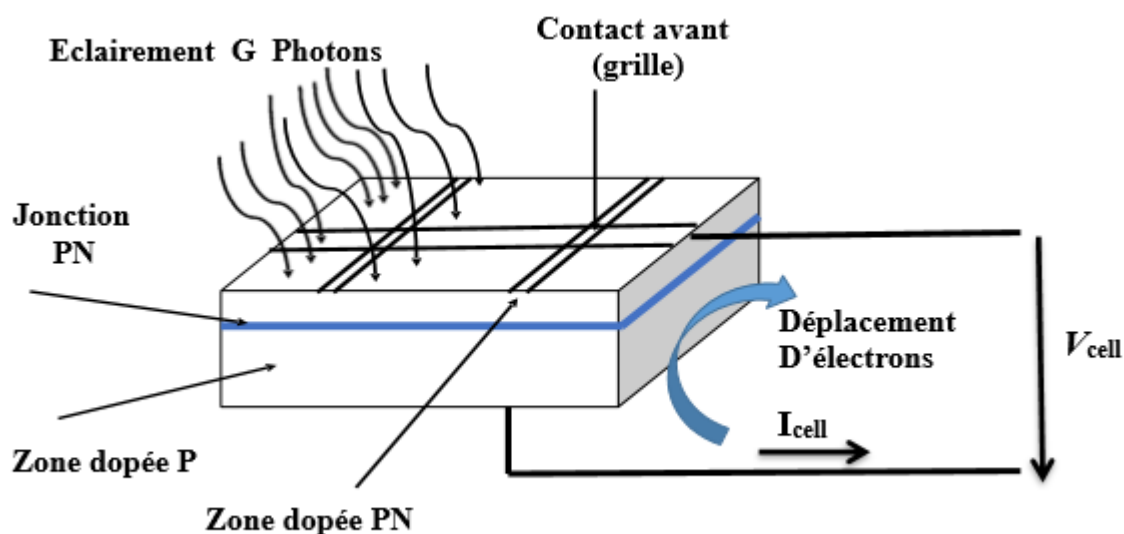


Figure I.1 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

I.2.1.2 Type et rendement des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule SiO_2 . Les différents types de cellules PV existants sont : • cellules en silicium monocristallin sont gris bleuté ou noir d'un aspect uniforme, rendement de 13 à 17%, (a) • cellules en silicium poly cristallin sont bleues d'un aspect mosaïque, rendement de 11 à 15%, (b) • cellule en silicium amorphe sont de rendement de 6 à 10%, (c)[5]

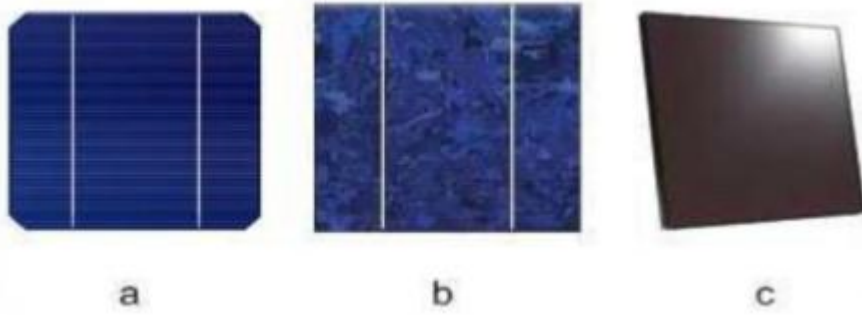


Figure I.2 Types de cellules photovoltaïques. (a) silicium monocristallin, (b) silicium polycrystalline, (c) silicium amorphe

I.2.2 Association des modules photovoltaïques

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d’augmenter la tension et l’intensité du courant d’utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l’existence de cellules moins efficaces ou l’occlusion d’une ou plusieurs cellules (dus à de l’ombrage, de la poussière, etc..) peuvent endommager les cellules de façon permanente [6].

I.2.2.1 Association en série

La cellule individuelle, unité de base d’un système photovoltaïque, ne produit qu’une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d’un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). L’association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d’une seule cellule [5].

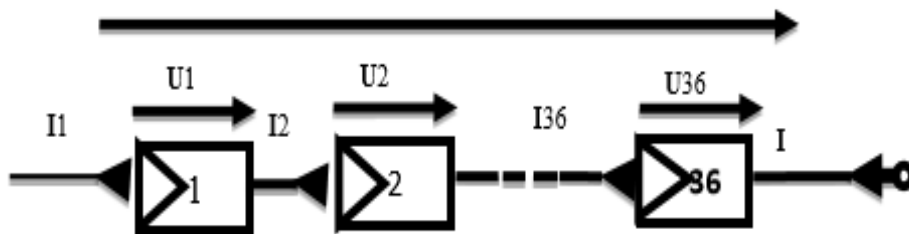


Figure I.3 Association de N modules solaires en série.

I.2.2.2 Association en parallèle

En additionnant 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 [3].

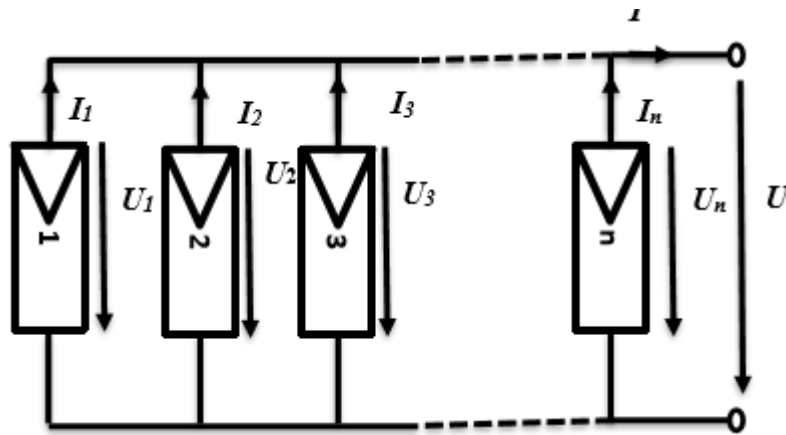


Figure I.4 Association des modules solaires en parallèle.

I.2.2.3 Association série-parallèle (mixte)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [3].

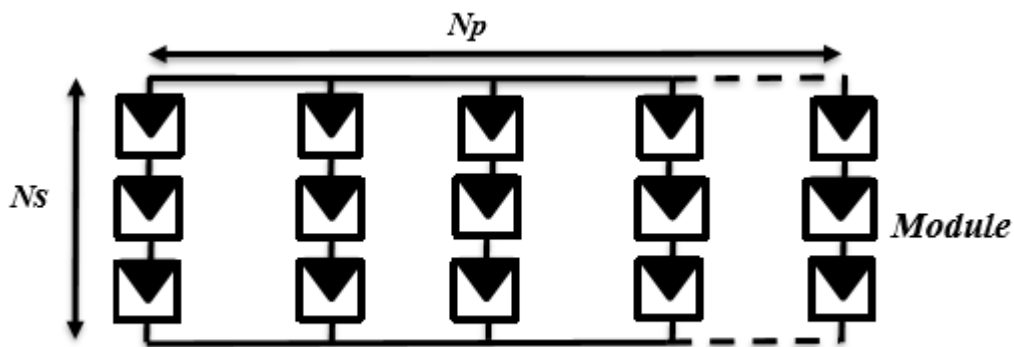


Figure I.5 Association mixte des modules solaires.

I.3 Influence des différents paramètres sur les caractéristiques du PV

Afin d'étudier l'impact des systèmes photovoltaïques, Nous avons choisi le modèle photovoltaïque BP SX 150 de chez BP Solaire. Le module est composé de 72 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 150 W.

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 150 [7].

Paramètre	Valeur
Puissance maximale (Pmax)	150W
Tension à Pmax (Vmp)	34.5 V
Courant à Pmax (Imp.)	4.35 A
Tension à circuit ouvert (Voc)	43.5V
Courant de court-circuit (Isc)	4.75 A
Coefficient de température de Isc(a)	0.065 0.015% /Co

I.3.1 Influence de la température sur les modules

Afin d'étudier l'effet de température sur le système photovoltaïque, La figure I.6 ci-dessous montre les caractéristiques tension- courant tension-puissance pour différentes températures de fonctionnement du module PV.

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Figure I.6:

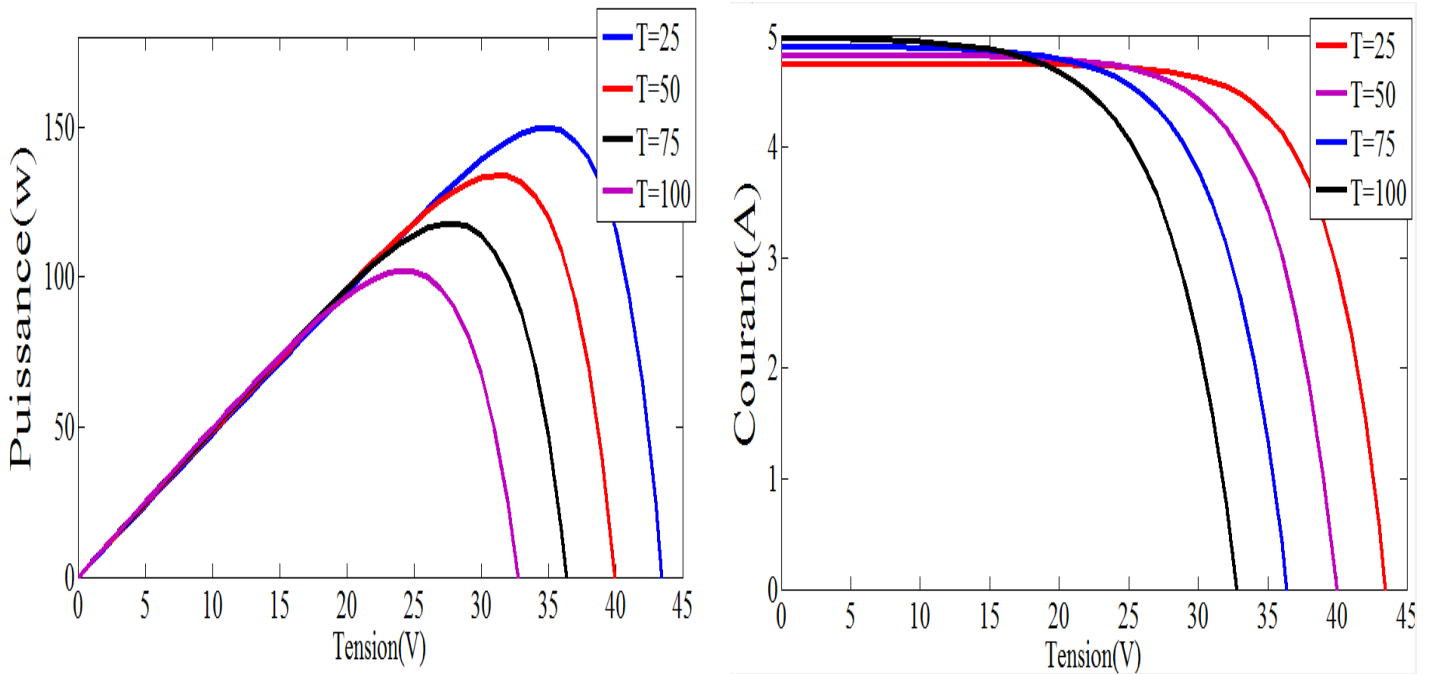


Figure I.6 Effet de la température sur la caractéristique P-V, I-V.

I.3.2 Influence du rayonnement sur les modules

Afin d'étudier l'effet de rayonnement sur le système photovoltaïque, La figure I.7 présente l'effet de rayonnement pour les trois sorties de module photovoltaïque puissance courant-tension, on remarque que la valeur du courant de court-circuit et la puissance est

Directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions.

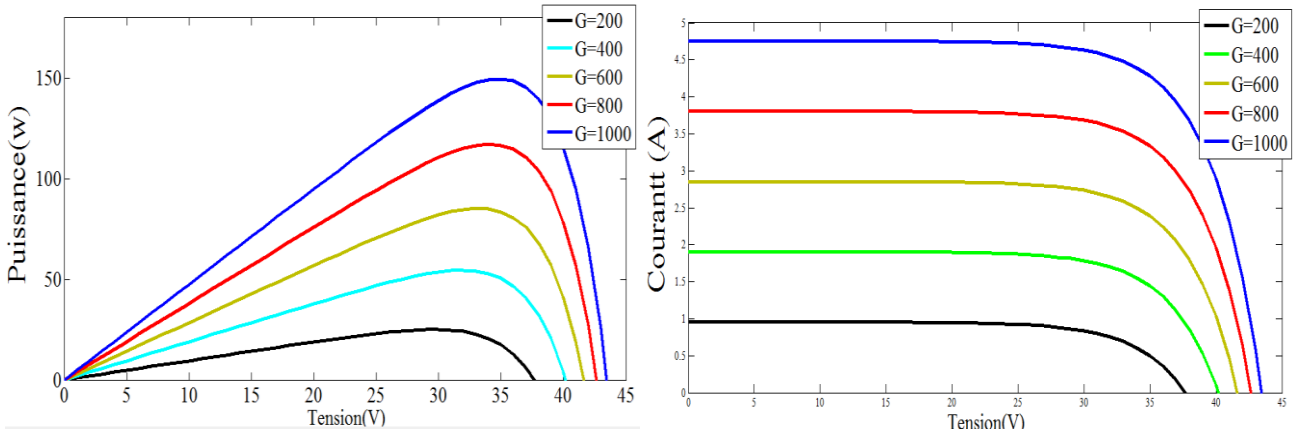


Figure I.7 Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V, I-V.

I.4 L'effet photovoltaïque

Lorsque la lumière atteint une cellule solaire, une partie de l'énergie incidente est convertie directement en électricité. Cette propriété remarquable est au cœur de toute installation photovoltaïque elle est appelée l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" qui, exposés à la lumière, produisent de l'électricité. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans 90% des panneaux solaires produits dans le monde.

I.5.Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit [3].

I.5.1. Paramètre photovoltaïque

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituant le champ PV [8].

I.5.1.1 Courant de court-circuit ICC

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. Dans le cas idéal (R_{ser} nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (I.1), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(I_{cc} * R_{ser})}{nkT}\right) - 1 \right] \frac{(I_{cc} * R_{ser})}{R_{shu}} \quad (I.1)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut Négliger le terme,

$$I_{sat} = \left[\exp\left(\frac{e(I_{cc} * R_{ser})}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (I.2)$$

Devant I_{ph} L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \quad (I.3)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc}=I_{ph}$).

I.5.1.2 Tension en circuit ouvert VCO

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul. (C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e V_{pv}}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \quad (I.4)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{oc} = V_t \ln \left[\frac{I_{pv}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (I.5)$$

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{P_{inc}} \quad (I.6)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie Photovoltaïque

Tout système de production d'énergie photovoltaïque a ses avantages et ses inconvénients.

I.6.1 Avantages de l'énergie Photovoltaïque

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- 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.

I.6.2 Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque

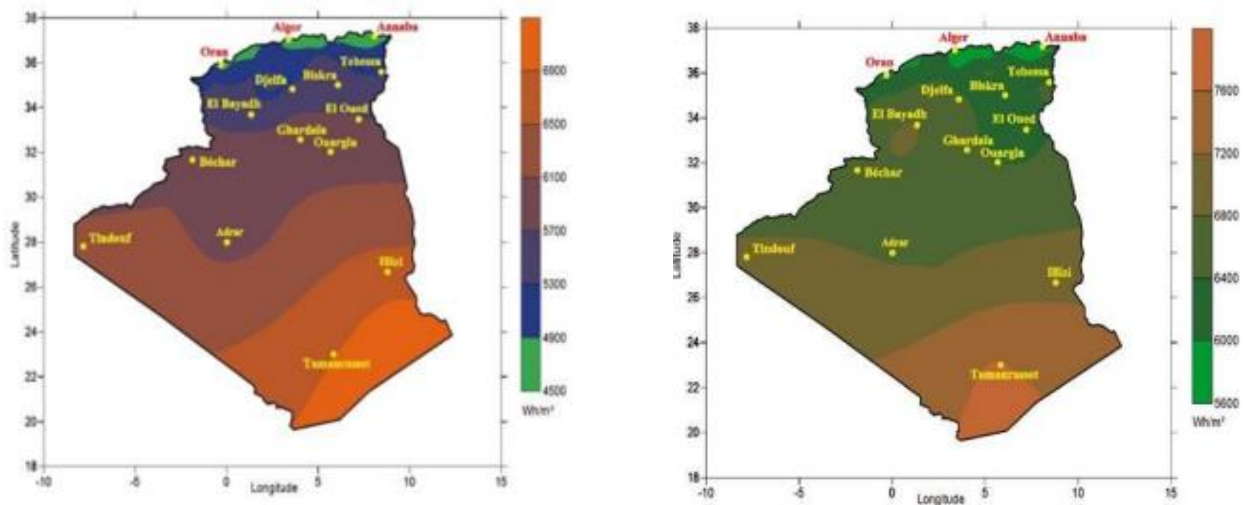
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le Fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [9].

I.7 Le Potentiel Solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m²/an au nord et 2263kwh/m²/an au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [10].

Régions	Régions côtières	Régions côtières	Sahara
Superficie	4 %	10 %	86 %
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures=an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m2/an)	1700	1900	2650

Tableau I.1 Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.



<p>a. Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale période 1992-2002</p>	<p>b. Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale cas d'un ciel totalement clair</p>
--	---

Figure I.8 Moyenne annuelle de l'irradiation globale en Algérie [10].

I.7.1 La future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie

Cette énergie est une source d'énergie non polluante qui répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture. La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030 [11].

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur l'énergie photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que leur type avec à la fin un aperçu de cette énergie en Algérie.

CHAPITRE II

MODELISATION D'UN SYSTEME

PHOTOVOLTAÏQUE

II.1 Introduction

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutifs. Dans un système énergétique photovoltaïque, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP.

Cette simulation sert afin de comprendre le comportement opérationnel de ces composants et les interactions entre eux. Depuis la simulation de la performance d'un système, on peut tracer toutes les étapes de la conversion d'énergie et identifier en détail les pertes à travers le système.

Ce chapitre, a pour but de montrer les résultats de simulation d'un panneau photovoltaïque (150W) dont les deux effets températures, rayonnement puis l'étude de la simulation d'un système photovoltaïque adapté à un hacheur survolteur « boost » avec deux commandes MPPT « P&O » et « Backstepping » et comparaison entre les deux méthodes.

Toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel MATLAB 2013a [4].

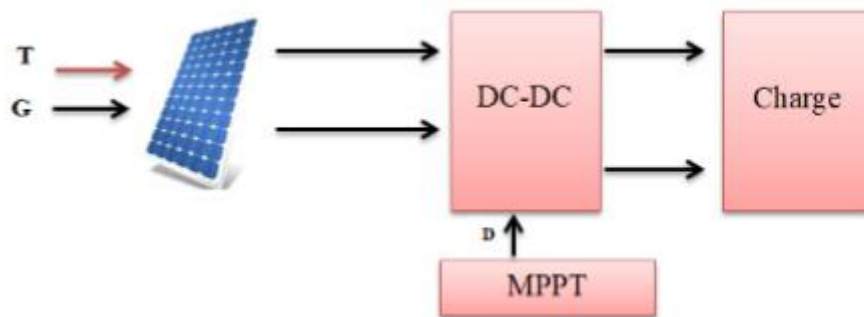


Figure II.1 conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT en utilisant le convertisseur DC-DC.

On présente dans ce chapitre, quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

II.2 Modélisation D'un system Photovoltaïque

II.2.1 Les Hacheurs

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [12].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [13].

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [14].

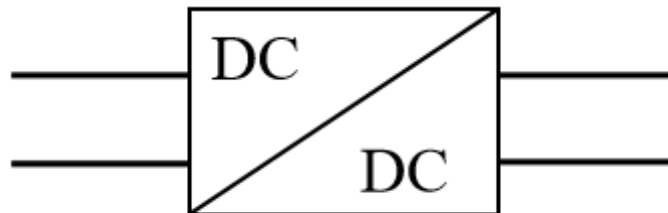


Figure II.2 Symbole d'un convertisseur DC-DC.

Généralement le commutateur est un transistor MOSFET qui travaille en mode bloqué-saturé. Si le commutateur est bloqué, son courant est nul, il ne dissipe donc aucune puissance ; S'il est saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très petite.

Le commutateur du convertisseur est commandé par un rapport cyclique D variable. De la figure (II.2) on ferme le commutateur pendant un temps de fermeture égal à $D \cdot T_s$, ensuite on l'ouvre durant un temps d'ouverture égal à $(1-D) \cdot T_s$. Où : D est le rapport cyclique du commutateur ($D \in [0,1]$).

II.2.2 Les types des convertisseurs DC-DC

Il y a plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Elles sont classées par catégorie, selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence. Elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [15].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu.

- ✓ Abaisseurs (Buck);
- ✓ Élévateurs (Boost);
- ✓ Élévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

II.2.2.1 Hacheur dévolteur (Buck Converter)

Le convertisseur dévolteur a pour rôle principal de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

La figure (II.3) présente son circuit idéal.

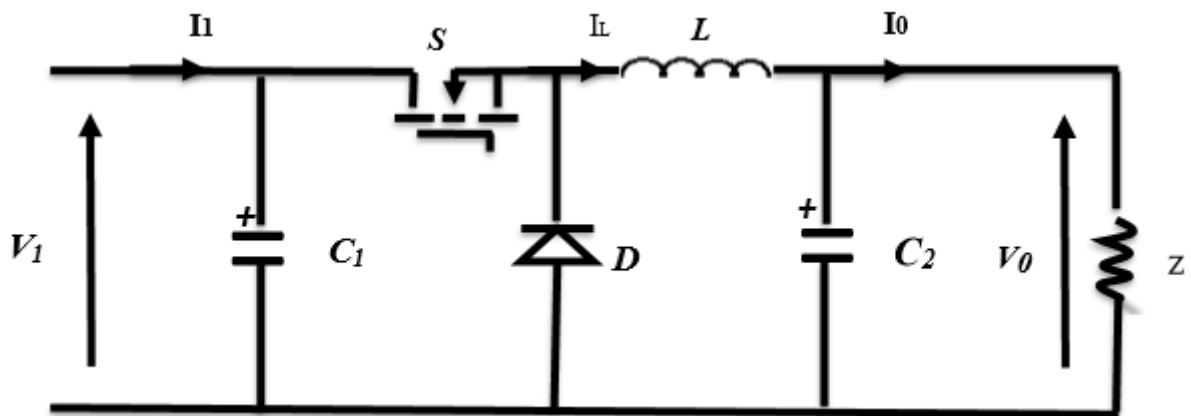


Figure II.3 Circuit idéal du convertisseur dévolteur (Buck).

Commutation T_s . Pendant le temps de fermeture ($t \in [0, D \cdot T_s]$), la diode se bloque et un courant circule dans la charge à travers l'inductance, cette dernière se charge alors d'énergie. Dès que le commutateur s'ouvre ($t \in [D \cdot T_s, T_s]$), la source et la charge ne sont plus en contact, la diode se sature et l'inductance libère une énergie à la charge avec une diminution du courant I_L .

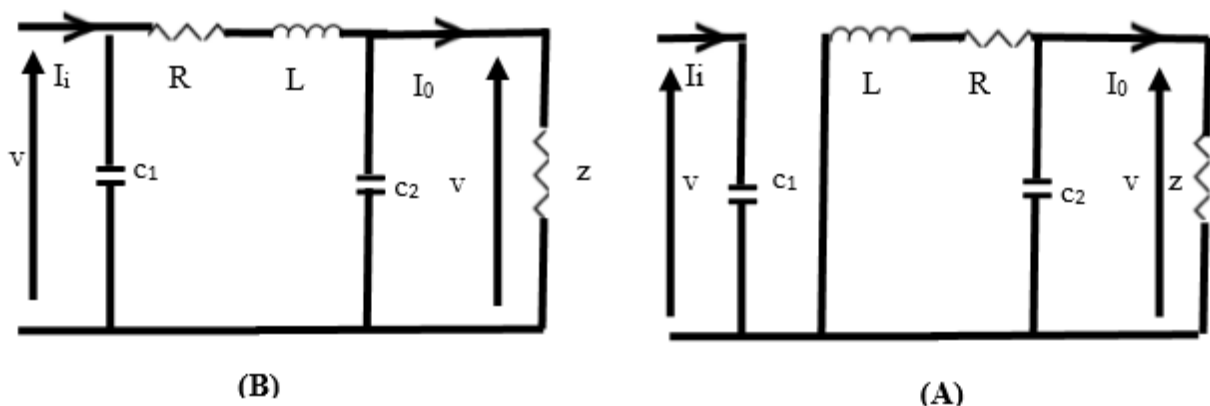


Figure II.4 Circuits équivalents du convertisseur Buck pendant une période de commutation(A) et (B).

(A): pendant le temps de fermeture ($t \in [0, DT_s]$)

(B) : pendant le temps d'ouverture ($t \in [DT_s, T_s]$)

Le rapport de conversion d'un hacheur est le rapport entre la tension d'entrée V_i et la tension de sortie V_o . Pour un hacheur dévolteur, il est donné sous la forme suivante :

$$V(D) = V_o/V_i = D \tag{II.1}$$

Donc le convertisseur Buck est un abaisseur de tension

II.2.2.2 Hacheur survolteur (Boost Converter)

Le convertisseur survolteur a pour rôle principal de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. Il est aussi appelé convertisseur Boost, convertisseur élévateur de tension ou hacheur parallèle [14]. Son circuit idéal est donné par la figure (II.5).

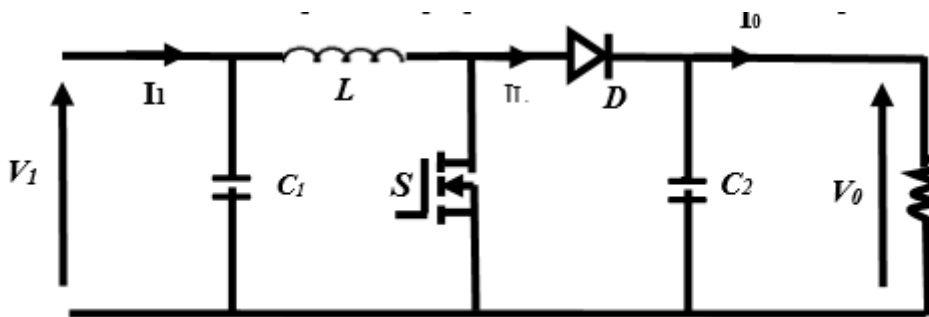


Figure II.5 Circuit idéal d'un convertisseur survolteur (Boost).

La figure (II.6) explique le fonctionnement du convertisseur Boost durant une période de commutation T_s . Pendant le temps de fermeture ($t \in [0, D \cdot T_s]$), le courant dans l'inductance croît progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie. Dès que le commutateur s'ouvre ($t \in [D \cdot T_s, T_s]$), l'inductance L s'oppose à la diminution du courant I_L , ainsi elle génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge Z à travers la diode D .

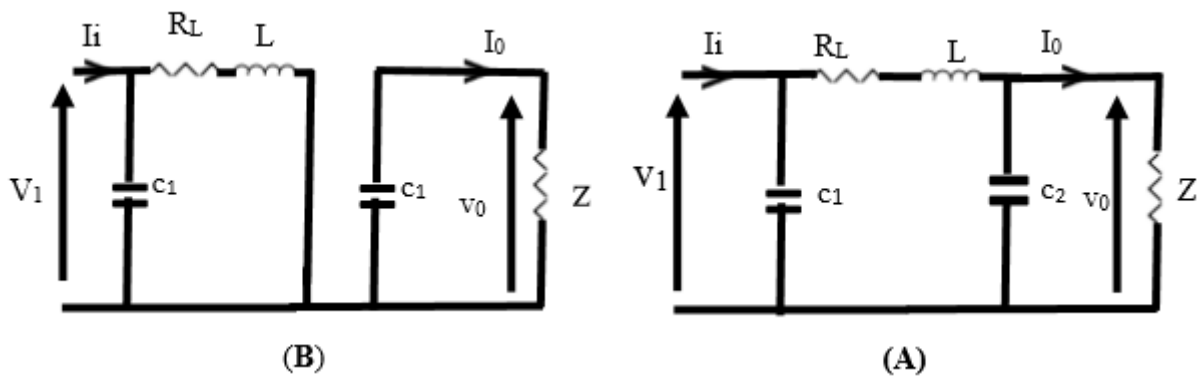


Figure II.6 Circuits équivalents du convertisseur Boost pendant une période de commutation(A) et (B).

(A) : pendant le temps de fermeture ($t \in [0, DT_s]$).

(B) : pendant le temps d'ouverture ($t \in [DT_s, Ts]$).

Le rapport de conversion d'un hacheur Boost est donné sous la forme suivante :

$$(D) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-D} \tag{II.2}$$

Donc le convertisseur Boost est un élévateur de tension.

II.2.2.3 Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost Converter)

Le convertisseur dévolteur-survolteur (ou Buck-Boost) combine les propriétés des deux hacheurs déjà étudiés. Il peut être employé pour transformer idéalement n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue de sortie [16]. La figure (II.7) illustre son circuit idéal.

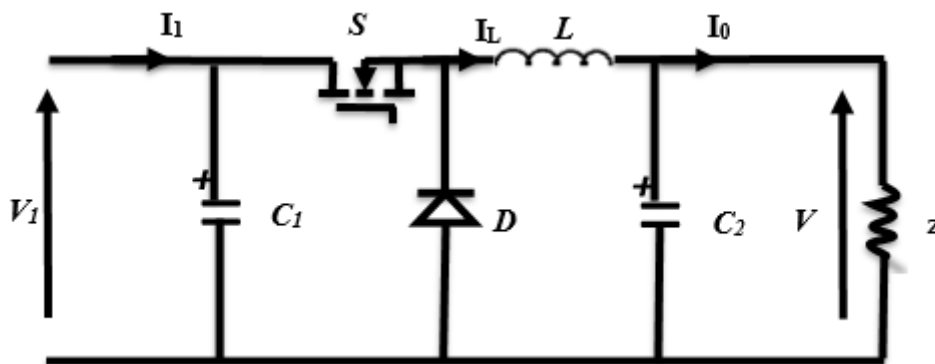


Figure II.7 Circuit idéal d'un convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost).

La figure (II.8) explique le fonctionnement du convertisseur Buck-Boost durant une période de commutation T_s . Pendant le temps de fermeture ($t \in [0, D \cdot T_s]$), la tension de la source est appliquée à l'inductance qui se charge d'énergie. Durant la période d'ouverture ($t \in [D \cdot T_s, T_s]$), la tension de l'inductance se trouve appliquée à la charge Z et son courant circule dans le sens inverse des aiguilles d'une montre à travers la diode D . Ainsi, la tension de sortie V_0 du convertisseur sera négative.

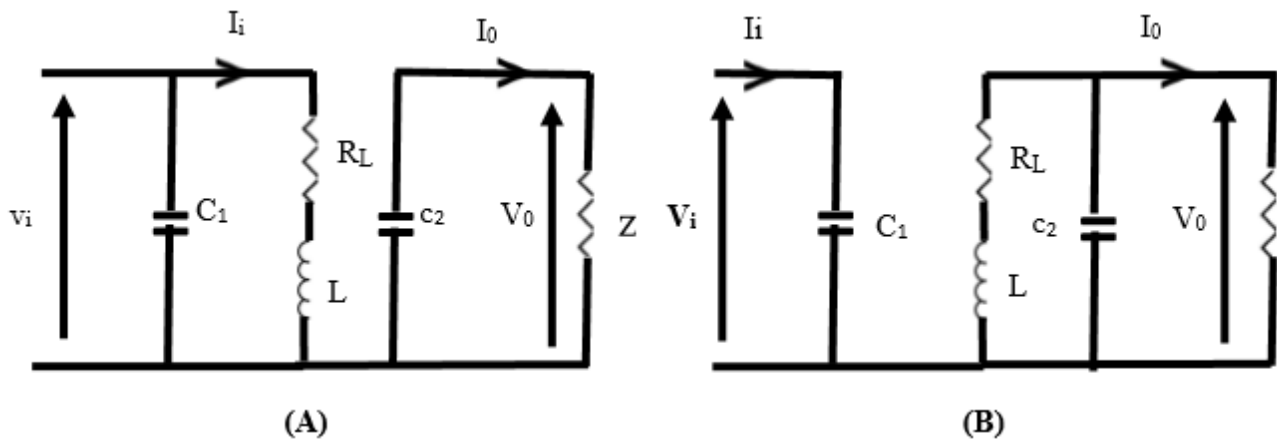


Figure II.8 Circuits équivalents du convertisseur Buck-Boost pendant une période de commutation (A) et (B).

(A) pendant le temps de fermeture ($t \in [0, DT_s]$) (B) : pendant le temps d'ouverture ($t \in [DT_s, Ts]$)

Le rapport de conversion d'un hacheur Buck-Boost est une relation non linéaire, il est donné par l'expression suivante :

$$V(D) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{D}{1-D} \tag{II. 3}$$

II.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Pour développer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de faire un choix judicieux des circuits électriques qui le constituent et de comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. Pour cela, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. Dans la suite nous présentons le modèle à une diode (diode classique).

Ainsi, la figure (II.9) illustre le schéma électrique équivalent d'une cellule PV réelle.

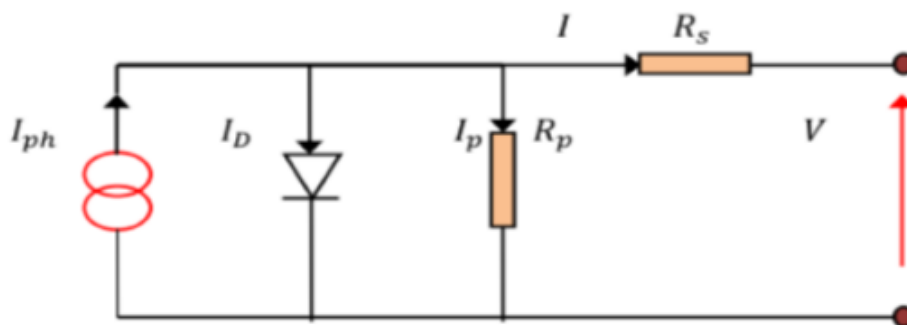


Figure II.9 Schéma équivalent de la cellule PV.

Dans ce schéma, on prend en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique. En statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_D - I_P \quad (\text{II.4})$$

I : Le courant fourni par la cellule

I_{ph} : Photo courant (A).

$I_{sc} = I_{scr} \left(\frac{G}{1000} \right)$: Le courant de court-circuit de référence.

$$I_p = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (\text{II.5})$$

Le courant de court-circuit de référence.

I_p : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

$ID = I_0 [\exp (V+I \cdot R_s / nVT) - 1]$: Le courant traversant la diode.

I_0 : Le courant de saturation inverse d'une diode.

$$VT = KT e \quad (\text{II.6})$$

VT : La tension thermique. Où : e : charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

K : constante de Boltzman ($1.381 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$).

nn : facture non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

T : la température effective de la cellule en kelvin.

En utilisant les équations ci- dessus on peut en déduire l'expression de courant délivré par la cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (\text{II.7})$$

II.4 Modélisation d'un panneau

Pour réaliser cette simulation, nous avons choisi le module photovoltaïque BP SX 60W de BP Solaire. La série SX de BP Solaire fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe des charges à courant continu, ou des charges à courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 36 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 60W. Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau (II.1) [17].

Puissance (P_{max})	150W
Tension à $P_{max}(V_{pmax})$	34.5V
Courant à $P_{max}(I_{pmax})$	4.35A
Tension à circuit ouvert (V_{co})	43.5V
Courant à court-circuit de référence (I_{ccr})	4.75A
Coefficient de la température de V_{co}	-160±20Mv/°C
Coefficient de la température de (I_{ccr})	0.065±0.015%/°C
Coefficient de la température de la puissance	-0.5±0.05%/°C
Température nominale d'opération de la cellule(NOCT)	47±2°C

Tableau II .1: Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 60W et 150w.

Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour simuler le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque. Ces modèles se différencient par la méthode de calcul et le nombre des paramètres intervenants dans la caractéristique courant - tension. Dans notre cas, nous avons choisi un modèle simple nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, la caractéristique I-V de ce èle est illustrée ci-dessous [18] :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (\text{II.8})$$

Où , le courant de diode, est donné par l'équation

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.9})$$

Le courant de saturation inverse d'une diode est donné par :

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right]} \quad (\text{II.10})$$

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_s = \infty$) l'équation (II.4) devienne :

Avec:

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.11})$$

I : Le courant fourni par la cellule.

V : La tension à la borne de cellule.

Calcul de la résistance série dans le point V_{oc} .

$$dI = 0 - I_s \left(\frac{dV + R_s dI}{nV_T} \right) * \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) \quad (\text{II.12})$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristique I-V au voisinage de V. Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$R_s = -\frac{dV}{dI} - \frac{nV_T}{I_0 \cdot \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right)} \quad (\text{II.13})$$

$$R_s = -\frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} - \frac{nV_T}{I_0 \cdot \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right)} \quad (\text{II.14})$$

Enfin, pour résoudre l'équation de caractéristique non linéaire, on utilise la méthode de Newton décrite par :

$$\chi_{n+1} = \chi + \frac{f(\chi_n)}{f'(\chi_n)} \quad (\text{II.15})$$

(PPnn): Le dérivé de la fonction.

(PPnn) PPnn: La présente itération.

PPnn+1: L'itération suivante.

Ainsi, on récrit l'équation (II.12) sous la forme suivante :

$$f(I) = I_{sc} - I - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] = 0 \quad (\text{II.16})$$

En remplaçant dans l'équation (II.16), on calcule le courant (I) par les itérations [19] :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I_n \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right]}{-1 - I_0 \cdot \left(\frac{R_s}{nV_T}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{V + I_n \cdot R_s}{nV_T}\right) \right]} \quad (\text{II.17})$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différentes éclaircissements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

$$\begin{aligned} I_{sc}(T) &= I_{scr}(T_{ref}) \cdot [1 + a(T - T_{ref})] \\ I_{sc} &= I_{scr} \left(\frac{G}{1000} \right) \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

Où I_s courant de court-circuit de référence.

$$I_0(T) = I_0(T_{ref})^{\frac{a}{n}} \cdot \left[\exp\left(\frac{-q \cdot E_g}{nk}\right) \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \right] \quad (\text{II.19})$$

α : Le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

T_{ref} : La température de référence, 298k (25°C).

G : L'irradiation solaire.

II.5 La commande MPPT

II.5.1 Définition

Les générateurs photovoltaïques ont une production électrique aléatoire directement dépendante des conditions météorologiques. Ainsi, le dimensionnement et l'exploitation optimale de l'énergie produite par ces générateurs exige l'utilisation de méthodes de gestion appropriées. De même, l'amélioration du rendement du système photovoltaïque nécessite la maximisation de la puissance du générateur PV qui permet d'établir la commande adéquate en vue de tirer le maximum de puissance de ces générateurs. Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la tension de la batterie, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum [20].

II.5.2 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application.

II.5.3 Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum (MPPT)

Pour la maximisation de puissance de la source PV, en intercalant un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie DC-DC entre la source PV

et la charge et avec le contrôle rigoureux du rapport cyclique de ce dernier, Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le PPM du panneau PV et un suivi continu de la puissance maximale est assuré. Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point Tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95% [15]. La Figure II.10 représente le schéma synoptique du ce système PV par une commande MPPT.

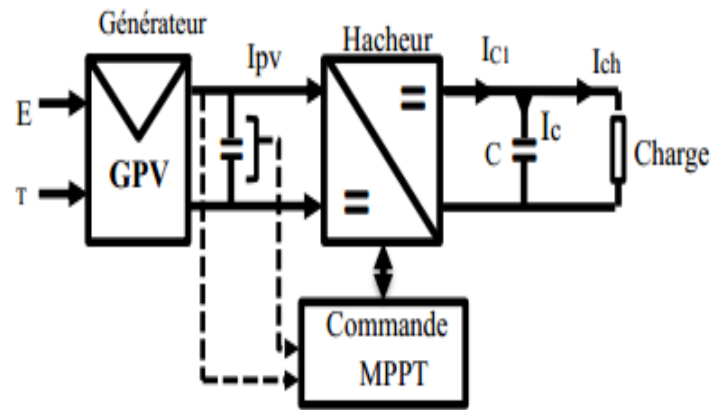


Figure II.10 Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT.

La figure (II.11) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 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 PPM2.
- Variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.
- 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. En résumé, le suivi du PPM.

Réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV.

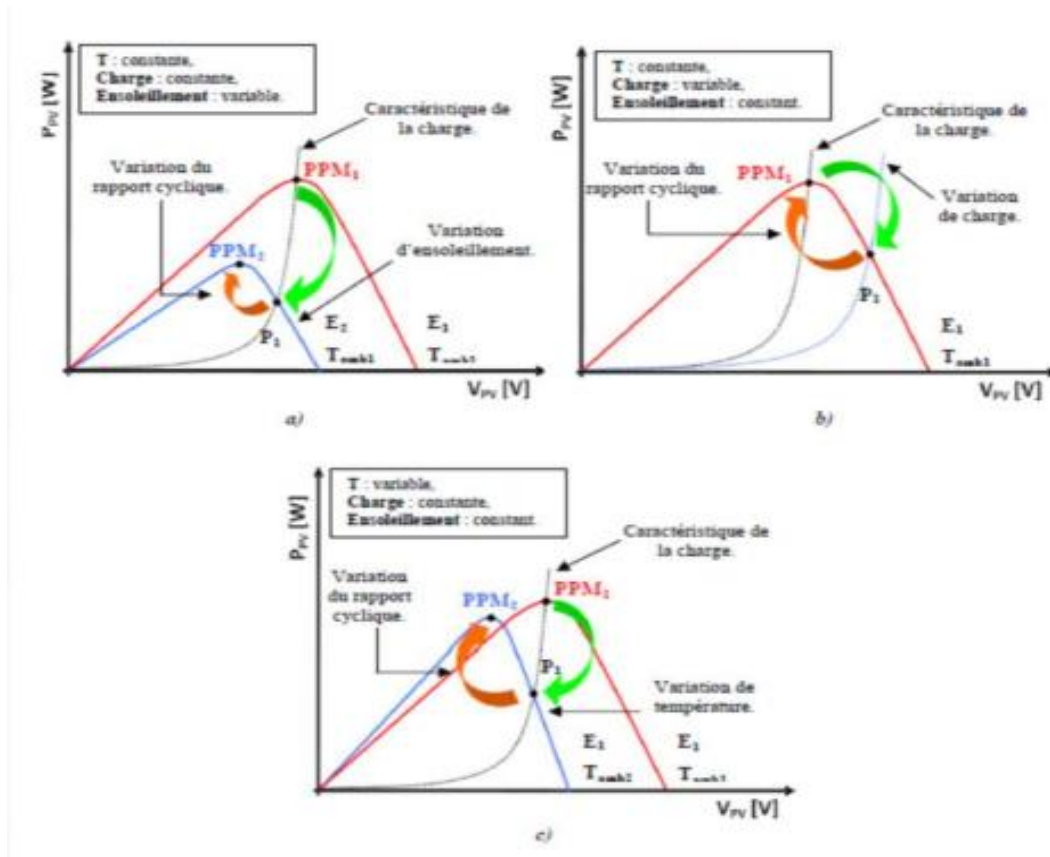


Figure II.11 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

II.6. Différentes techniques d'MPPT

Afin d'extraire Le maximum de puissance d'un panneau solaire, on peut raisonne sur plusieurs et différentes méthodes, Certains des concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres approches exigent des dispositifs de logique très sophistiqués tels que des microprocesseurs combinés avec des circuits de puissance, de convertisseurs de commutation... Divers travaux sur des commandes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type adaptée à une source d'énergie renouvelable de type PV. En littérature on trouve fréquemment les techniques de maximisation de puissance suivantes [20] :

- Algorithme Perturbation et observation(P&O).
- La méthode incrémentation de la conductance.
- La commande de Backstepping.
-etc.

II.6.1 Algorithme perturbation et observation

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (D).

Si la valeur de la puissance actuelle du générateur est supérieure à la valeur précédente alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O) est donné par la Figure (II.12) [7].

D : rapport cyclique

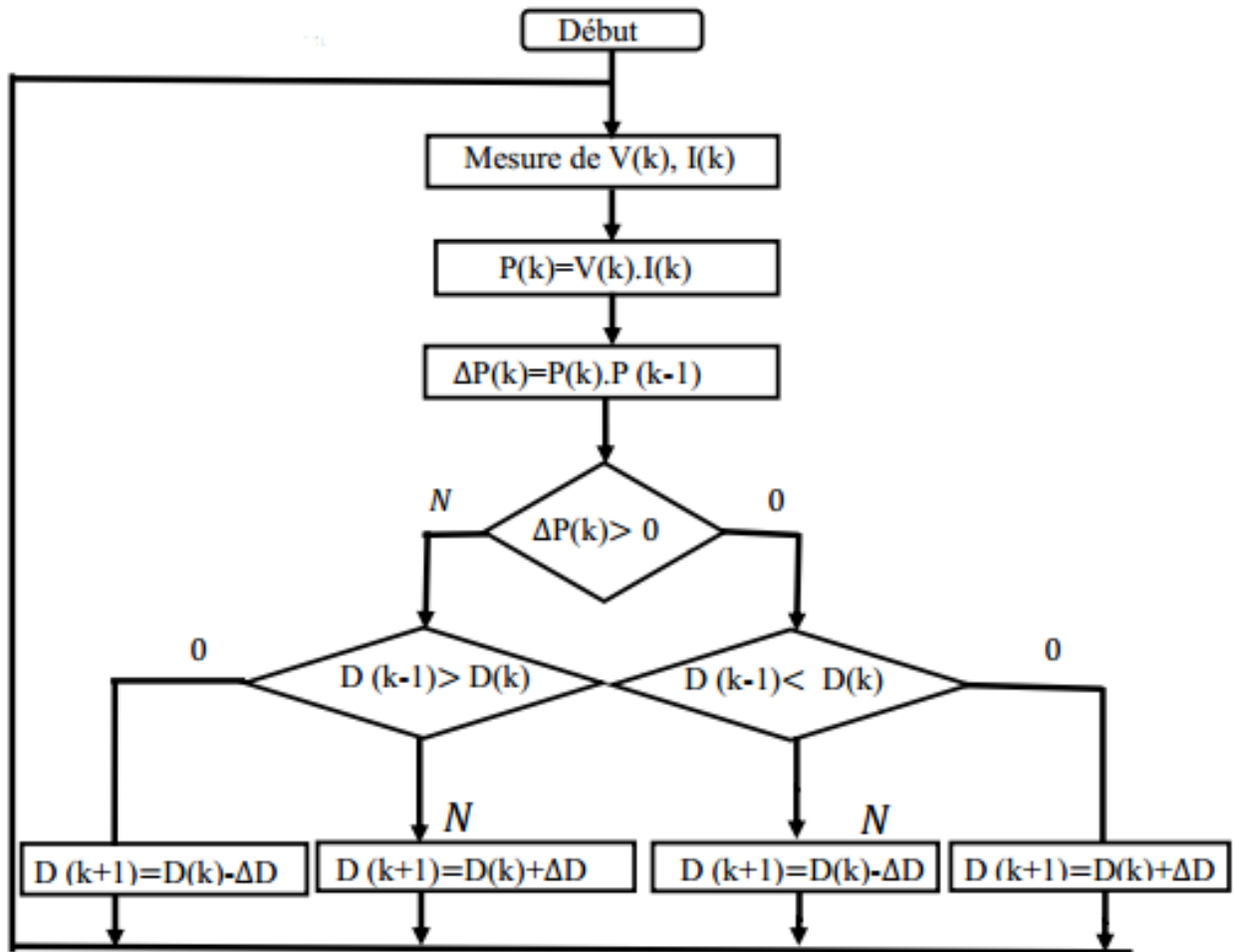


Figure II.12 Algorithme de perturbation et d'observation (P&O).

D'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance $P(k)$.

Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure

$P(k-1)$.

1- Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrémementation ou des incréments du rapport cyclique D continueront dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur dV .

- Si $dV > 0$ cela veut dire qu'on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire

$$D(k+1) = D(k) + \Delta D \quad (\text{II.20})$$

- Si $dV < 0$ cela veut dire qu'on a décrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre:

$$D(k+1) = D(k) - \Delta D \quad (\text{II.21})$$

Donc on termine dans le chemin où P continue à augmenter. Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrémementation ou la des incréments du rapport cyclique D sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur dV . Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée avec chaque cycle [22].

II.6.2. Principe des techniques "Perturbe and Observe" (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en observant la variation de la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque. Sur la figure (III.13) on voit que si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente ($P > 0$), la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement (PPM). L'algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction.

Par contre, si la puissance diminue ($P < 0$), alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM. L'algorithme inversera alors la direction de la variation suivante. Cet algorithme est résumé sur la figure (III.13) et l'organigramme descriptif est donné par la figure (III.12). Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le PPM soit atteint. Le système oscille alors autour du PPM, ce qui provoque des pertes de puissance.

L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la variation. Cependant, une taille de variation trop petite ralentit considérablement la poursuite du PPM. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité. [23].

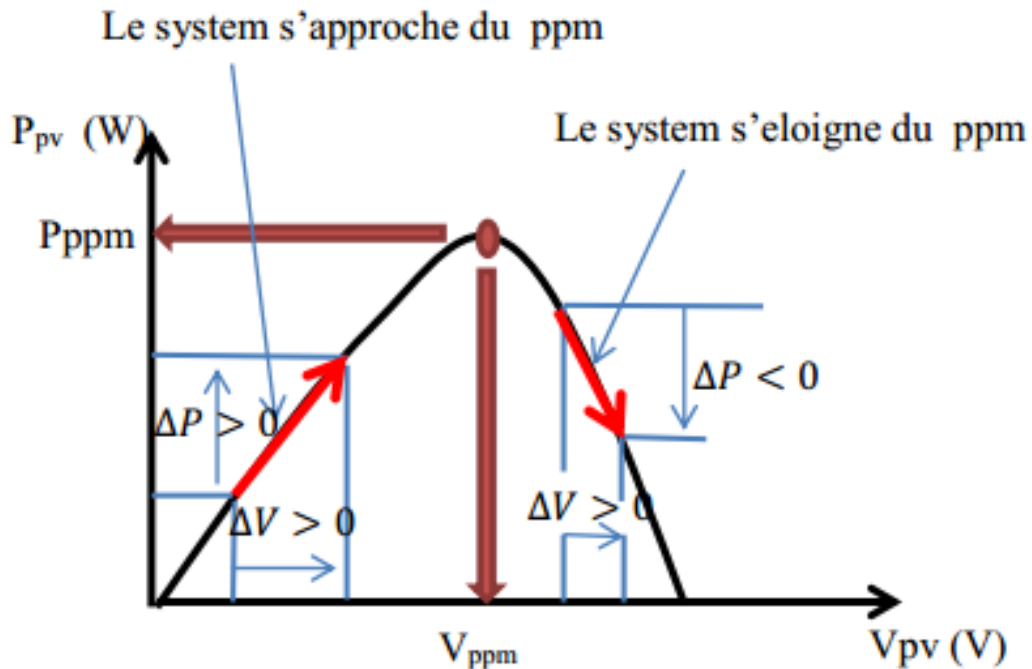


Figure II.13 Signe de et à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance.

II.7.1 Avantages et inconvénients de (P&O)

• Avantages

- Structure de régulation simple
- Nombre des paramètres mesurés réduit

• Inconvénient

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide de conditions atmosphériques.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu des convertisseurs statiques (convertisseur DC-DC), courant continu (boost-Buck-cuk). Nous avons présenté la modélisation d'un système photovoltaïque. Dans la suite de notre travail nous allons étudier la méthode d'extraction de puissance maximale (MPPT) en utilisant la méthode la plus utilisée perturbation et observation (P&O).

CHAPITRE III :

SIMULATION ET ANALYSE DE MPPT PAR UN CONTROLEUR

BASE SUR LA LOGIQUE FLOUE

III.1 Introduction

La logique floue suscite actuellement un intérêt général de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels, et plus généralement de la part de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser des modes de raisonnement naturel, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine et de construire des systèmes artificiels effectuant les tâches habituellement prises en charge par les humains.

La logique floue est une technique pour le traitement de connaissances imprécises basées, sur des termes linguistiques ; elle donne les moyens de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain, en une commande automatique, permettant ainsi la commande des systèmes complexes dont les

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. Vu que des changements dans la conception peuvent facilement être faits à l'étape de la simulation, il est possible d'expérimenter avec un large ensemble de variations des conditions de fonctionnement afin d'aboutir à une solution optimale [24].

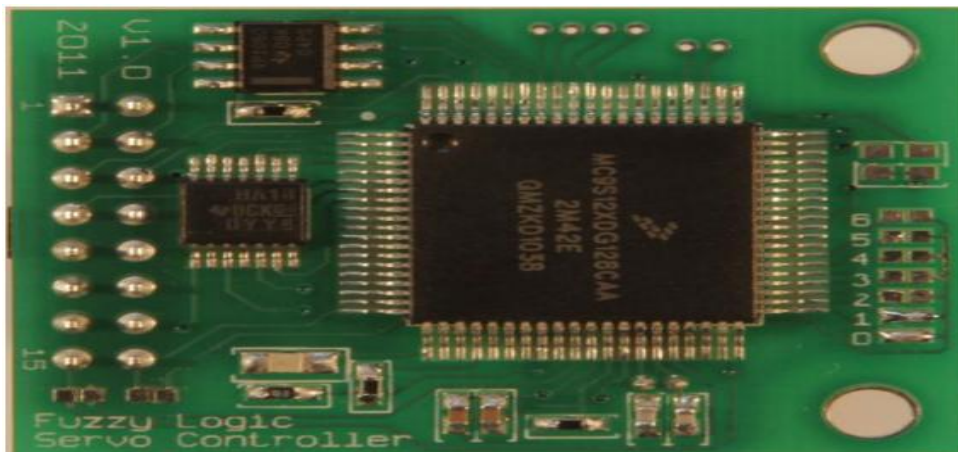


Figure III.1 Image réelle pour un contrôleur flou.

III.2 Logique floue

III.2.1 Historique

La logique floue (fuzzy logic) a fait son apparition en 1965 avec les travaux de Lotfi Zadeh. Ce dernier a formalisé la représentation et le traitement de connaissance imprécises ou approximatives afin de traiter des systèmes de grande complexité ou mal connus. En 1973, le professeur Zadeh publie un article dans l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), il y mentionne pour la première fois le terme de variables linguistiques (dont la valeur est un mot et non un nombre). En 1974, Madani (Université de Londres) réalise un contrôleur flou expérimental pour commander un moteur à vapeur. Dans les années 80, plusieurs applications commencent à émerger (notamment au Japon). Elle a été utilisée dans plusieurs domaines variés de contrôle et de régulation [24].

III.2.2 Domaine d'application

L'approche de traitement des problèmes par la logique floue est différente de celle adoptée, à priori dans une démarche scientifique. Elle est beaucoup plus pragmatique que déterministe. La décision en logique floue est basée sur la notion d'expertise qui permet de quantifier le flou à partir de connaissances à priori ou acquises antérieurement. Les domaines d'application de la logique floue dans un processus de prise de décision s'imposent dans les cas suivants [25] :

- Pour les systèmes complexes dans lesquels la modélisation est difficile ou impossible ;
- Pour les systèmes contrôlés par des experts humains ;
- Quand l'observation humaine est à l'origine d'entrées ou des règles de contrôle ;
- Pour les systèmes ayant de nombreuses entrées/sorties continues ou discontinues ;
- Pour les commandes MPPT des systèmes photovoltaïques.

III.2.3 Base de la logique floue

III.2.3.1 Principe de base de la logique floue

Dans la théorie des ensembles classiques, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. La notion d'ensemble est à l'origine de nombreuses théories mathématiques. Cette notion essentielle ne permet cependant pas de rendre compte de situations pourtant simples et rencontrées fréquemment. C'est pour prendre en compte de telles situations, qu'a été créée la notion d'ensemble flou. La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle, chaque élément appartient partiellement ou

graduellement aux ensembles qui ont été définis. Les contours de chaque ensemble flou (Figure III.2) ne sont « nets », mais « flous » ou « graduels ».

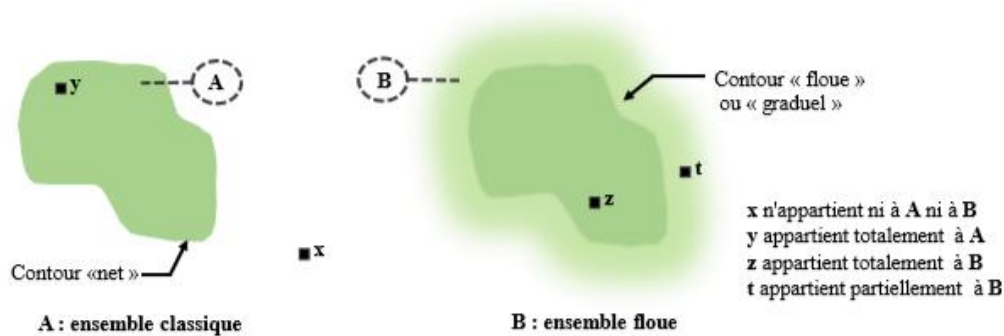


Figure III.2 Comparaison d'un ensemble classique et un ensemble flou.

III.3 Règles floues

III.3.1 La logique floue et l'intelligence artificielle

La logique floue a pour objectif de formaliser et de mettre en œuvre la façon de raisonner d'un être humain. En cela, elle peut être classée dans le domaine de l'intelligence artificielle. L'outil le plus utilisé dans les applications de logique floue est la base de règles floues. Une base de règles floues est composée de règles qui sont généralement utilisées en parallèle, mais peuvent également être enchaînées dans certaines applications. Une règle est du type : SI « prédicat » ALORS « conclusion ». Par exemple : SI température élevée et pression forte ALORS ventilation forte et soupape grande ouverte.

a. Prédicat : Un prédicat (encore appelé prémisse ou condition) est une combinaison de propositions par des opérateurs ET, OU, NON. Les propositions « température élevée » et « pression forte » de l'exemple précédent sont combinées par l'opérateur ET pour former le prédicat de la règle. b. Conclusion : La conclusion d'une règle floue est une combinaison de propositions liées par des opérateurs ET. Dans l'exemple précédent, « ventilation forte » et « soupape grande ouverte » sont la conclusion de la règle. Le traitement flou d'une règle comporte trois étapes fonctionnelles résumées dans Figure III.3 [25].

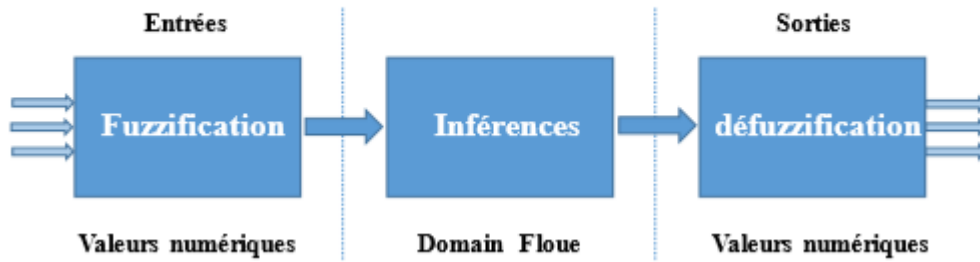


Figure III.3 Traitement flou.

III.4 Technique MPPT par logique floue

Récemment, des contrôleurs à logique floue ont été introduits dans le suivi du PPM dans les systèmes PV. Pour un régulateur flou la connaissance du modèle mathématique du processus n'est pas nécessaire. C'est l'expérience des opérateurs du procédé ou les connaissances des experts, qui sont pris en compte pour établir la commande floue. Les algorithmes de réglage conventionnels sont alors remplacés par une série de règles linguistiques.

La commande par logique floue peut opérer lorsque les procédés à commander sont mal connus ou difficiles à décrire précisément, ou lorsque les variables sont évaluées subjectivement et exprimées en langage naturel et non numériquement. Elle est simple à réaliser, flexible et donc facilement adaptable aux conditions de fonctionnement du processus. Les règles sont faciles à comprendre et à modifier puisqu'elles sont exprimées par des termes du langage naturel. L'architecture interne d'un régulateur floue est donnée par la figure (III .4) [7].

Elle est composée de trois blocs :

- **la fuzzification;**
- **l'inférence;**
- **la défuzzification.**

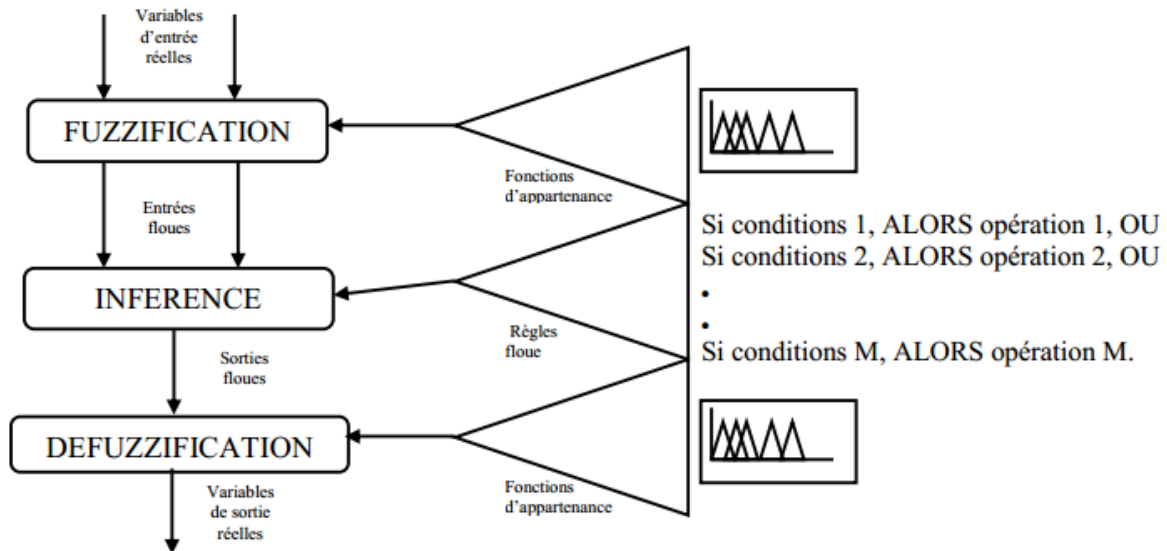


Figure III.4 Structure d'un régulateur flou.

III.4.1 Fuzzification

L'opération de fuzzification, permettant le passage des grandeurs réelles aux valeurs floues, consiste à déterminer les différents univers de discours correspondant aux domaines de variation des variables d'entrée et de sortie. Ensuite, définir pour chacune des variables ses sous-ensembles flous ainsi que leurs fonctions d'appartenance associée [25, 28].

III.4.2 Inférence

L'opération d'inférence permet de relier les valeurs des variables linguistiques d'entrée à celles des variables linguistiques de sortie par une table de règles, qui doivent tenir compte du comportement statique et dynamique du système à commander. C'est un mécanisme qui, en manipulant les règles floues, établit une décision. Il existe plusieurs méthodes d'inférence : Maximum-Minimum, Max-Produit, Somme Produit. Le nom de la méthode désigne les opérateurs utilisés respectivement pour l'agrégation des règles floues et l'implication floue [25, 28].

III.4.3 Défuzzification

Elle consiste à définir précisément quelle doit être l'action sur le processus. En effet, le procédé ne peut pas interpréter des ordres linguistiques fournis par les méthodes d'inférence.

L'opération de défuzzification permet de calculer à partir de la fonction d'appartenance résultante, la valeur réelle de la variable de sortie à appliquer au processus. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification : méthode du maxima, méthode du centre de gravité, méthode de la moyenne des

maximas. Il est toutefois reconnu que la méthode du centre de gravité donne les meilleurs résultats. Notons que des blocs de normalisation et de dénormalisation sont ajoutés respectivement en entrée et en sortie du régulateur floue afin qu'il soit transportable et adaptable même avec des paramètres différents [25, 26, 28].

III.5 Commande MPPT à base de contrôleur floue

Dans un but de poursuivre le point maximum de puissance, comme pour toutes les méthodes de poursuite MPPT, le contrôleur MPPT à base de logique floue fonctionne aussi suivant le même principe. Un convertisseur DC/DC (continu-continu) est généralement utilisé entre le générateur photovoltaïque et la charge (Figure III.5).

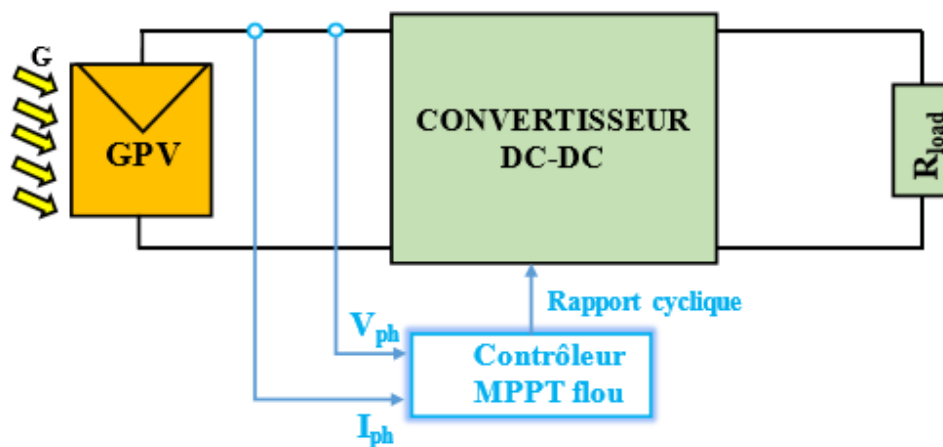


Figure III.5 Schéma synoptique d'un système PV avec une commande MPPT floue.

Comme tous contrôleurs flous, le contrôleur MPPT flou comporte les trois blocs suivants :

Fuzzification des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions triangulaire, ensuite l'inférence ou ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée. Et enfin la défuzzification pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs en utilisant la défuzzification par le centre de gravité. La structure de base de notre contrôleur flou est donnée par la Figure III.6.

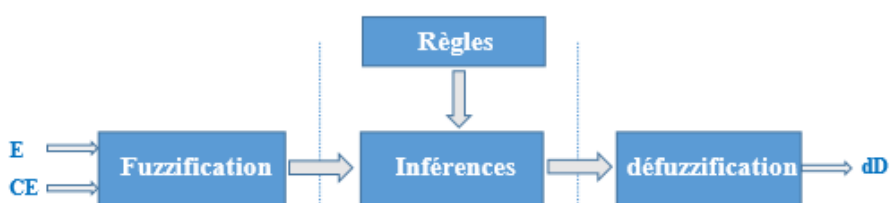


Figure III.6 Structure de base d'un contrôleur flou.

Avec :

- dD : La variation du rapport cyclique D ,
- E : L'erreur,
- CE : La variation de l'erreur.

Pour l'implémentation de notre contrôleur flou, nous allons nous baser sur l'algorithme MPPT P&O, pour modéliser les différentes parties de ce contrôleur.

III.5.1 Fuzzification

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

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (\text{III.1})$$

$$CE = E(k) - E(k-1) \quad (\text{III.2})$$

Où $P(k)$ et $V(k)$ sont la puissance et la tension de module PV, respectivement. Dans le cas de notre travail on va choisir l'univers de discours des variables d'entrée (erreur (E) et le changement d'erreur (CE)) et de sortie (dD) d'après la méthode P&O qui a été étudiée précédemment. D'après la Figure III.7 on peut déduire l'univers du discours de chaque variable d'entrée/sortie comme suit :

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta V} \in [-506.6] \quad (\text{III.3})$$

$$CE = E(k) - E(k-1) \in [-506.6]$$

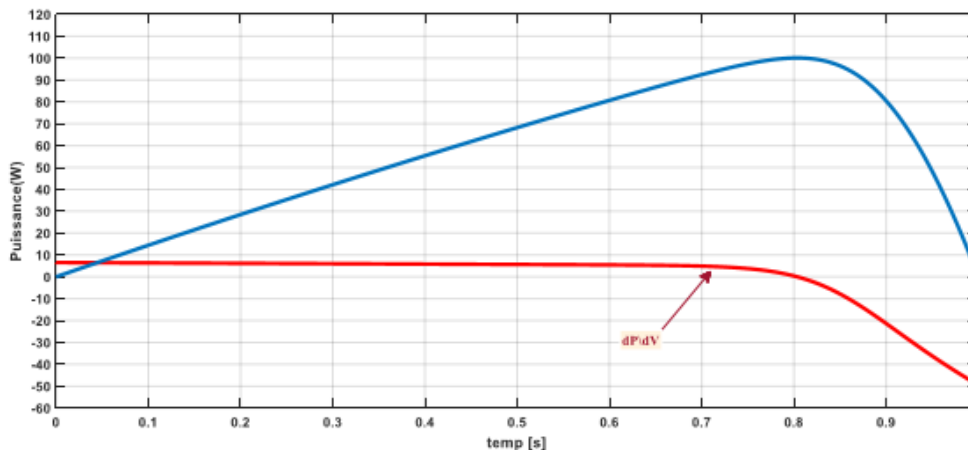


Figure III.7 variation de la puissance par rapport à la variation de la tension.

De la même manière, nous pouvons définir l'intervalle de variation du rapport cycle D comme suit :

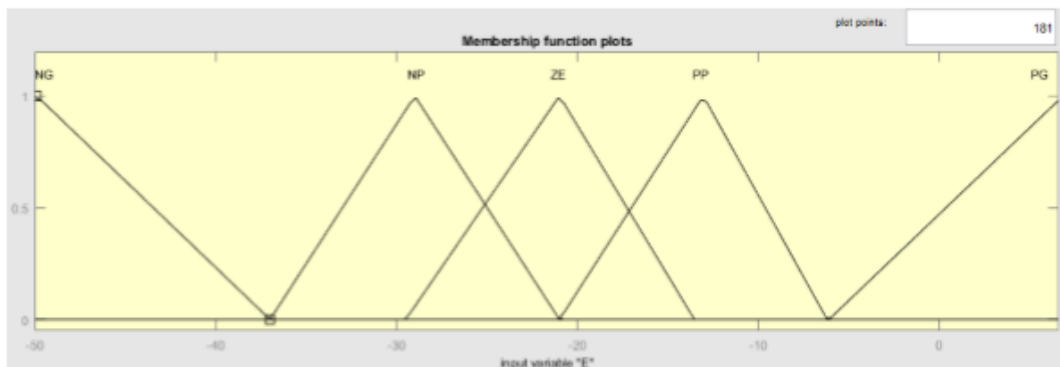
$$dD \in [-0.10.1] \quad (\text{III.4})$$

La valeur de l'entrée $E(k)$ nous indique de quel côté est situé le point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale MPP. Si cette valeur est positive, cela veut dire que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point MPP, si par contre elle est négative alors le point de fonctionnement est à droite du point MPP. L'entrée $CE(k)$ nous permet d'estimer le degré d'éloignement entre le point de fonctionnement et le point MPP. Si sa valeur est petite, cela veut dire que le point de fonctionnement est encore loin du point MPP, si par contre cette valeur est élevée cela indique que le point de fonctionnement est très proche du point MPP. Ces deux entrées nous permettent de prendre la décision appropriée sur la valeur de la sortie dD du pas du rapport cyclique. Augmenter le rapport cyclique du convertisseur DC-DC permet d'augmenter la tension du point de fonctionnement et inversement.

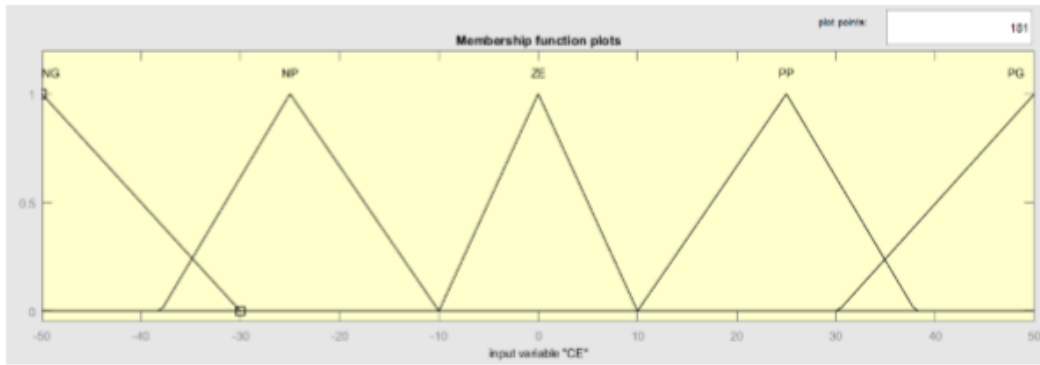
III.5.2 Les variables linguistiques

En utilisant les bases des sous-ensembles flous, on peut exprimer les variables d'entrées et de sorties en termes des variables linguistiques suivantes : PG : (positif grand), PP : (positif petit), ZE : (environ Zéro), NP : (négatif petit) et NG : (négatif grand). La Figure III.28 – Fonctions d'appartenance de :

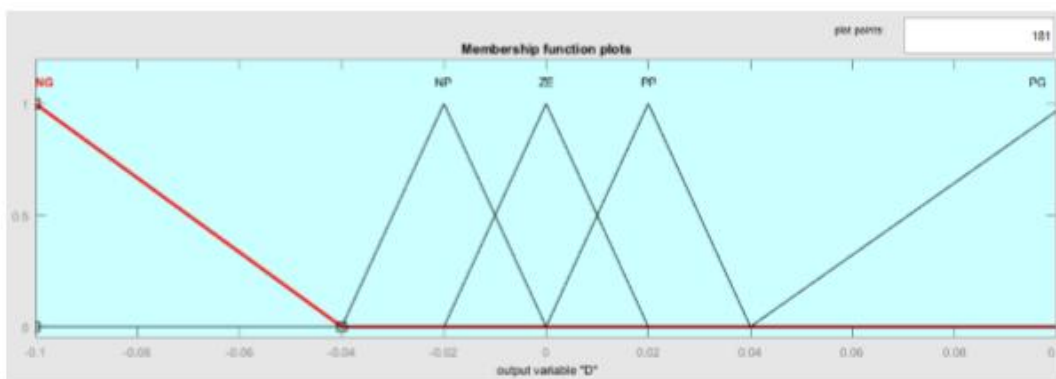
(a) L'entrée erreur E, (b) L'entrée changement d'erreur CE et (c) La sortie dD . Montre les fonctions d'appartenance du cinq sous-ensemble flou de base pour les variables d'entrée et de sortie.



(a)



(b)



(c)

Figure III.8 Fonctions d'appartenances de : (a) L'entrée erreur E, (b) L'entrée changement d'erreur CE et (c) La sortie dD.

III.5.3 Méthodes d'inférence (les règles floues)

La Figure III.9 montre l'évolution de la variation de la puissance par rapport à la variation de la tension dp/dv les points de 1 à 10 montre le sens de variation et l'éloignement de la valeur courant par rapport au point maximum de puissance.

Le Tableau III.1 représentent la méthode que nous avons suivie pour extraire les règles floues à partir de la compréhension du système en fonctionnement avec la méthode P&O. Ceci implique que : "si le point de fonctionnement est éloigné du point de puissance maximale MPP au côté gauche et le changement de la pente dans la courbe P-I est environ zéro, alors lever le rapport cyclique [25].

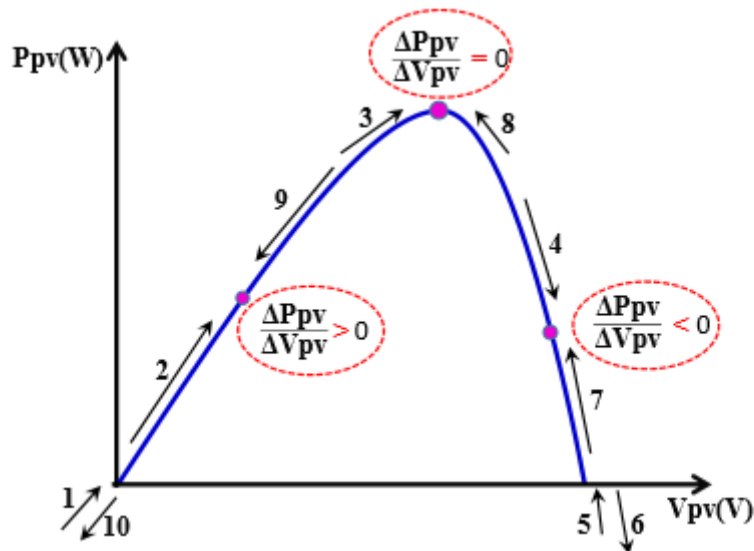


Figure III.9 La variation du point de puissance maximal.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔP	+	+	0	-	-	+	+	0	-	-
ΔV	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
$E = \Delta P / \Delta V$	+	+	0	-	-	-	-	0	+	+
ΔE	+	+	0	-	-	-	-	0	+	+
D	PG	PP	ZE	NP	NG	PP	PP	ZE	NP	NG

Tableau III.1 Les règles du contrôleur flou.

Le Tableau III.2 montre les règles du contrôleur flou, où toutes les entrées de la matrice sont les fonctions d'appartenance floues de l'erreur E et celle du changement de l'erreur CE et la variation du rapport cyclique dD. Dans le cas de la commande floue, la règle de commande doit être conçue pour que la variable d'entrée E doive toujours être zéro.

E \ CE	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	NG	NG	NP	NP	ZE
NP	NP	NG	NP	NP	NG
ZE	NP	NP	ZE	PP	PP
PP	PP	PP	ZE	ZE	PG
PG	PG	PP	PP	PG	PG

Tableau III .2 Tableau des règles d'inférence.

Le Tableau III.2 inclut 25 règles floues de commande. Ces règles sont employées pour la commande de convertisseur SEPIC tels que la puissance maximum du panneau solaire est vérifiée.

III.5.4 Défuzzification

Les sorties floues des règles floues précédentes sont combinées en utilisant la fonction MAX pour former un seul ensemble flou, cet ensemble est défuzzifié pour générer une seule valeur de commande, il existe plusieurs méthodes de défuzzification, nous avons choisi celle du centre de gravité qui donne de meilleure performance [27].

III.6 Avantages et inconvénients du réglage par logique floue

III.6.1 Avantages

Le réglage par logique floue présente les avantages suivants [7, 28] :

- Le non nécessité de la modélisation du système.
- La possibilité d'implémenter des connaissances linguistiques de l'opérateur du processus.
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (systèmes non linéaire et difficile à modéliser).
- La disponibilité de système de développement efficace, soit par microprocesseur ou PC, soit par des circuits intégrés.

III.6.2 Inconvénients

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix de grandeur mesurée).
- Détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- L'approche artisanale et asymptotique (implantation des connaissances de l'opérateur souvent difficile).
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute circonstances (en l'absence d'un modèle valable).
- La cohérence des inférences non garanties (possibilité d'apparition de règles d'inférences contradictoires).

III.7 Simulation du système photovoltaïque

III.7.1 L'algorithme perturbation et observation (P&O)

La figure (III.11): présente Schéma bloc SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O), composé avec un module PV avec un hacheur commandé en MPPT qui a pointées la tension et le courant de sortie du module.

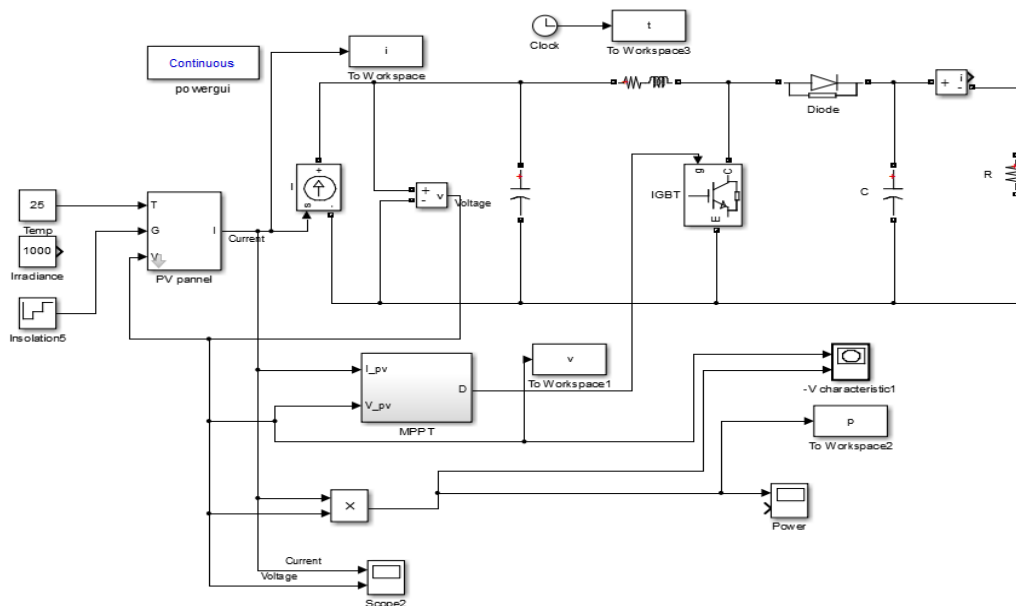


Figure III.10 Schéma bloc SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

Dans cette simulation on a utilisé un Module photovoltaïque BP SX 150W de BP, un hacheur Boost caractérisé par : $C1 = 3000e-6F$, $C2 = 2e-3F$, $L = 0.01H$, $R = 0.01ohm$, on a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O et une charge $R = 500 ohm$. On représente le modèle mathématique de l'Algorithme (P&O) sous le programme MATLAB Comme suit :

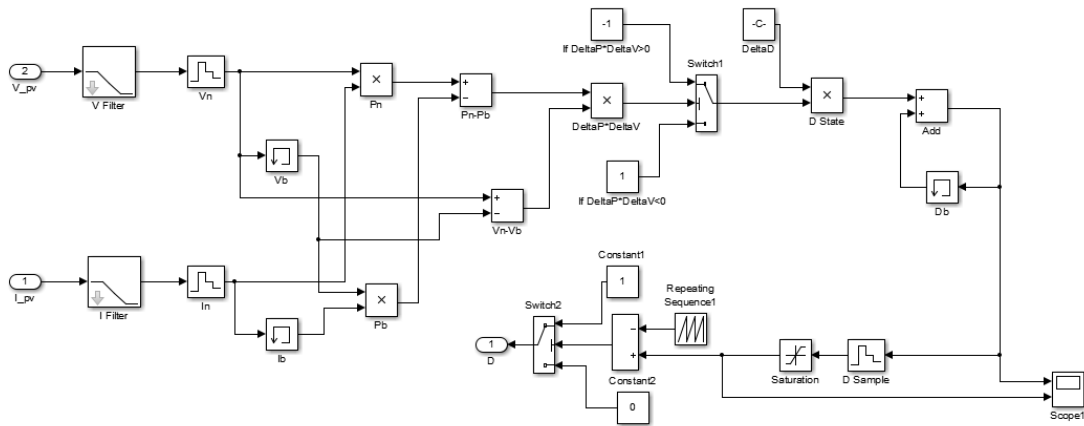


Figure III.11 Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O).

Les résultats de la simulation du système PV utilisant l'algorithme de perturbation et d'observation sont présentés aux figures ci-dessus.

Les résultats de la simulation du système PV utilisant l'algorithme de perturbation et d'observation sont présentés sur les figures ci-dessus.

Les figures (III.12) et (III.13) suivantes présente allure de puissance et de tension en fonction de temps d'un système photovoltaïque (panneau 150W) commandé par un contrôleur P&O dans une température constante et éclairements variable ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 700, 1000\text{W}/\text{m}^2$) :

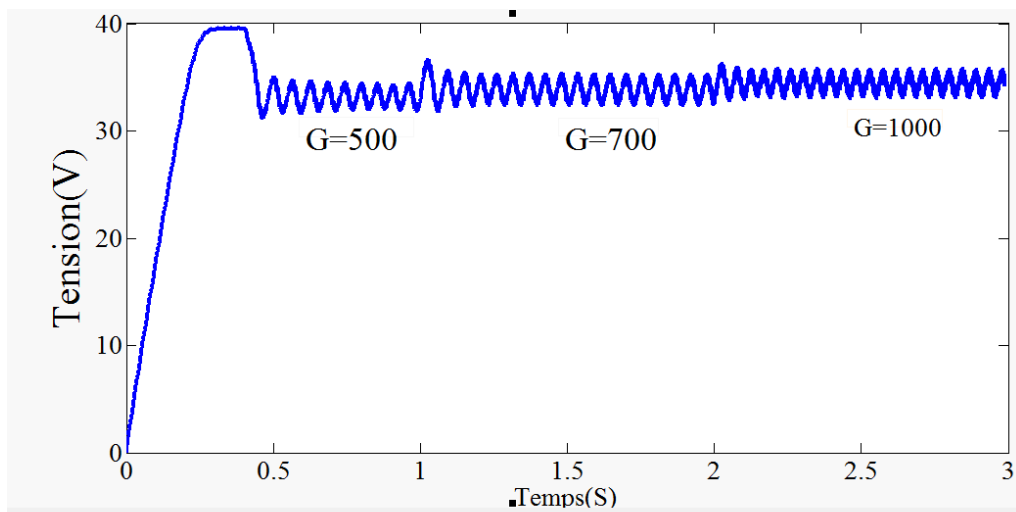


Figure III.12 Allure de la tension générée en utilisant pas variable en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 700, 1000\text{ W}/\text{m}^2$).

Figure (III.12): Allure de la tension générée en utilisant pas variable en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 700, 1000\text{ W}/\text{m}^2$).

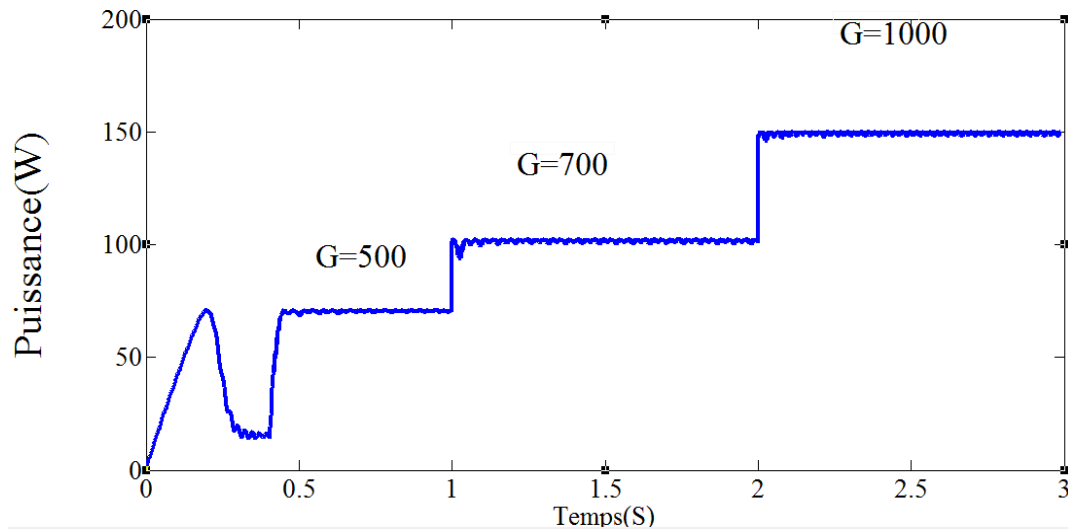


Figure III.13 Allure de la puissance générée en utilisant pas variable en fonction de temps
($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 700, 1000 \text{ W/m}^2$).

Dans un premier temps, nous avons soumis le système à une variation de luminosité de 500, 700 à 1000 W/m^2 à l'instant $t=2\text{s}$ et $t=4\text{s}$. Par conséquent, nous constatons dans les Figures une augmentation de la tension qui induit une diminution de la puissance, le point de fonctionnement du système s'éloigne.

Les figures(III.14) (III.15) suivantes présente allure de puissance et le courant en fonction de la tension d'un système photovoltaïque (panneau 150W) commandé par un contrôleur P&O dans une température constante et différents éclairagements ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=200, 500, 1000 \text{ W/m}^2$):

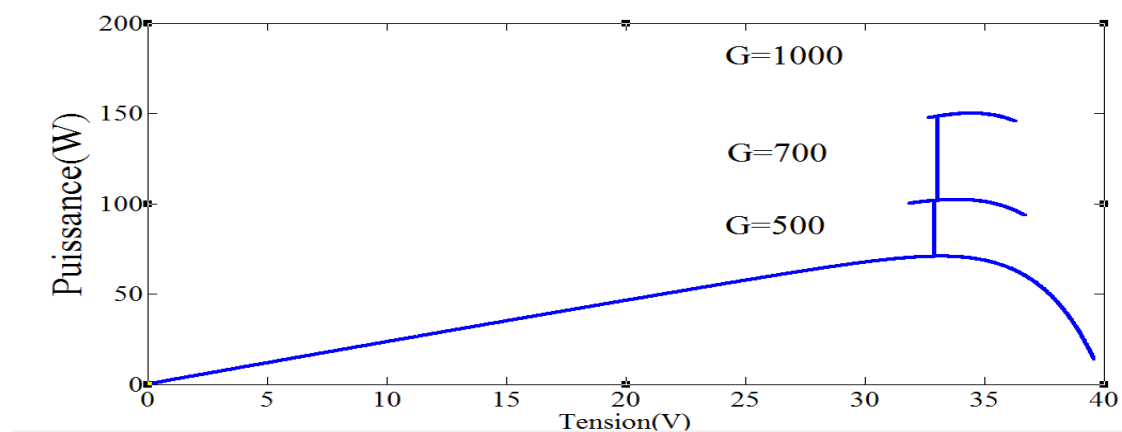


Figure III.14 Allure de la puissance en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 700, 1000 \text{ W/m}^2$).

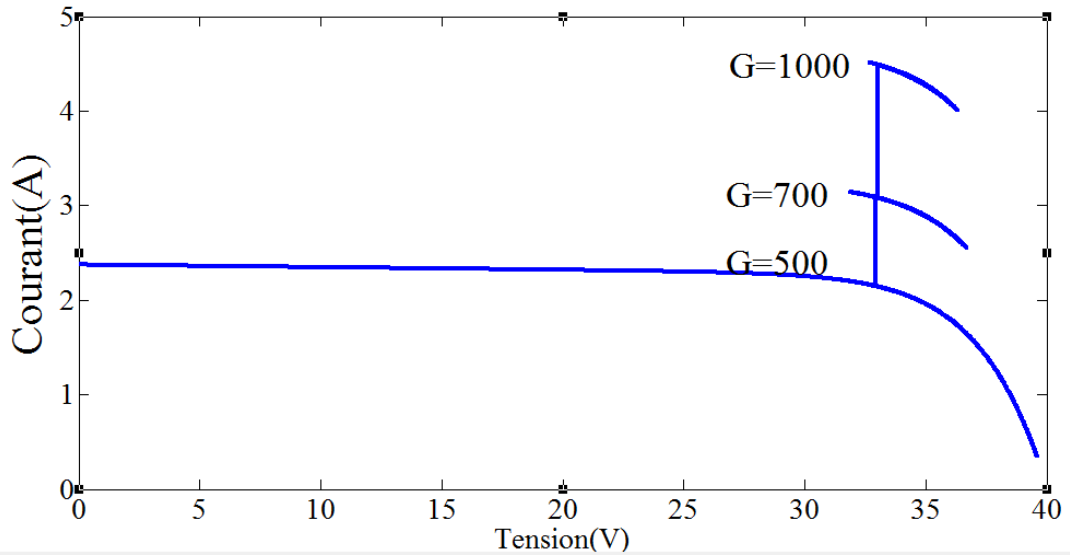


Figure III.15 Allure de courant en fonction de la tension (T=25°C,G=500, 700,1000 W/m²).

D’après les figures obtenues on remarque que la puissance réagit en fonction de l’éclairement et ce fixe toujours à la puissance maximale et la même pour la courbe de courant.

III.7.2 Analyse et simulation de méthode d’extraction de puissance maximale par le contrôleur basé sur la logique floue

La figure (III.16) : présente Schéma MATLAB SIMULINK d’un système photovoltaïque avec la commande MPPT (FLOU), composé avec un module PV avec un hacheur commandé en MPPT qui a pointées la tension et le courant de sortie du module. Dans cette simulation on a utilisé un Module photovoltaïque BP SX 150W de BP, un hacheur Boost caractérisé par : $CC1= 3000e-6F$, $CC2= 2e-3F$, $L= 0.01H$, $R= 0.01ohm$, on a utilisé aussi une commande MPPT de type logique flou et une charge $R=500$ ohm.

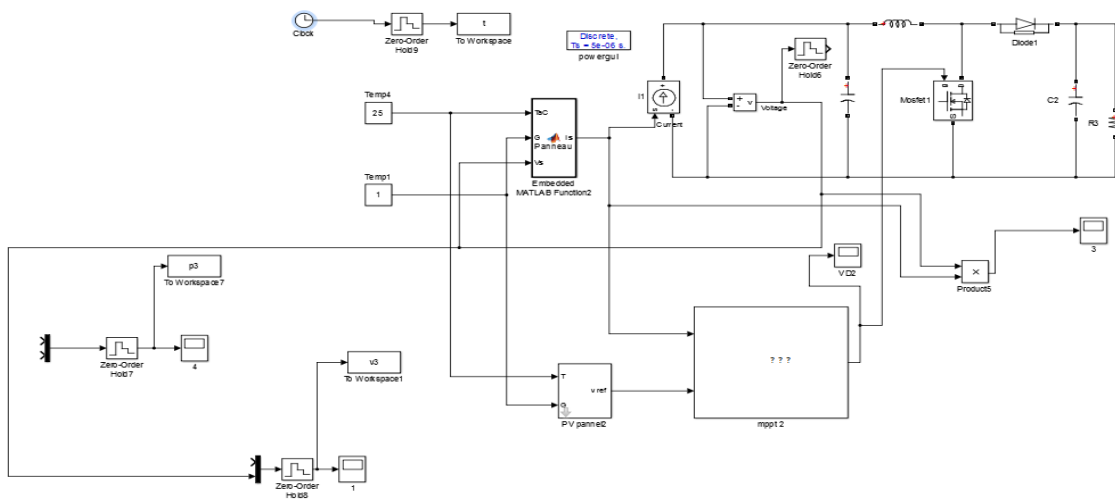


Figure III.16 Schéma block SIMULINK d’un système photovoltaïque avec la commande MPPT Logique flou.

On représente le modèle mathématique de contrôleur flou sous le programme MATLAB Comme suit :

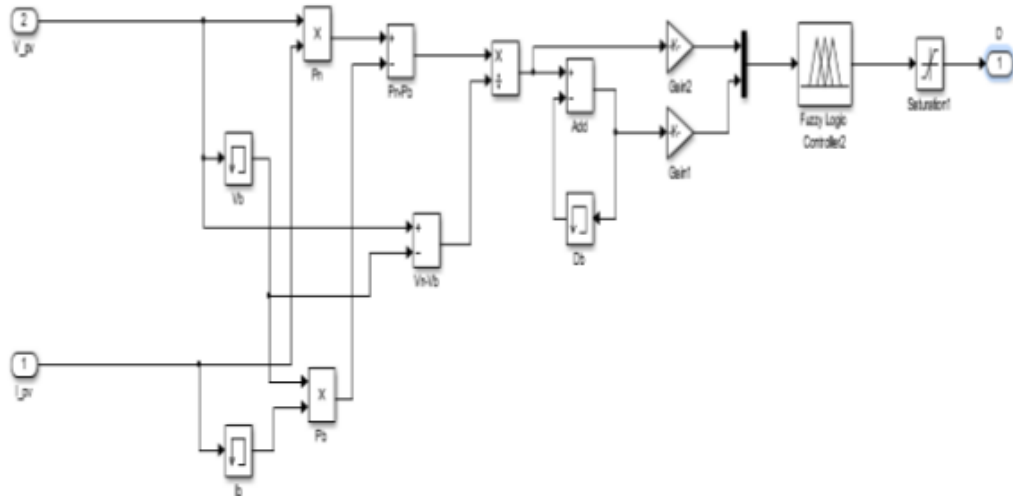


Figure III.17 Schéma de simulation de l'algorithme de contrôleur flou.

III. Conclusion

Les résultats obtenus avec un Contrôleur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle perturbation et observation. Ainsi le contrôle par logique floue peut être vu comme un pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. Aussi, ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P and O) mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail nous avons fait l'étude de la modélisation d'une chaîne photovoltaïque qui se compose d'un générateur photovoltaïque (avec une seule diode), un étage d'adaptation (convertisseur DC /DC Boost), une charge DC (résistance) et un étage de commande pour piloter le convertisseur (une première fois la commande MPPT classique en l'occurrence P&O, IncCond et puis la commande MPPT Floue).

Dans ce cadre nous avons présenté les systèmes d'énergie renouvelable en portant un intérêt particulier au système photovoltaïque qui est constitué essentiellement par un générateur photovoltaïque (GPV) et un convertisseur DC-DC Boost. Le modèle électrique à une seule diode du GPV décrit par le modèle mathématique de 'Sandia' est étudié. De même pour le convertisseur Boost qui est dont le modèle électrique et les équations mathématiques explicités. Différentes simulations, sous l'environnement

Matlab/Simulink, sont réalisées pour mettre en évidence l'influence des variations des conditions climatiques (éclairage et température) sur le MPP où la puissance de fonctionnement du système est maximale.

La commande MPPT soit classique (P&O, IncCond) ou Floue permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle force le de faire fonctionner toujours au point de puissance maximale, cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT Floue conduit à des meilleurs performances (réduction du temps de réponse et de l'erreur en régime permanent).

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire, l'étude des systèmes photovoltaïques autonomes et les commandes MPPT classiques et floue.

Comme perspective à ce travail, il serait intéressant de procéder à l'implémentation matérielle des techniques MPPT simulées, sur des systèmes à base de microcontrôleur ou DSP, afin de valider les résultats de simulation et confirmer les performances obtenues.

BIBLIOGRAPHIES

- [1] : **BENKHERIF, A.** (2018). *ETUDE TECHNICO ÉCONOMIQUE D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE EN SITE ISOLE PAR PVSYST* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).
- [2] : **Khaled, B. E. N. Z. A. O. U. I., & Ayoub, D. E. L. A. L. D. J. A.** (2019). *Etude comparative des commandes MPPT pour une chaîne de conversion photovoltaïque* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [3] : **ALILI, A.** (2018). *COMMANDE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE EN UTILISANT UN CONTROLEUR FLOUE* (Doctoral dissertation, univ msila).
- [4]: **Houdheyfa, R. O. U. B. I., & Hichem, A. I. B.** (2019). *Amélioration de la commande MPPT d'un système Photovoltaïque par backstepping* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [5] : **K. Sobaihi** " étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction " Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El -Harrach Alger.
- [6] : **BOUKAROURA Abdelkader**" Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé Par l'Approche Bond Graph "Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 02/12/2009.
- [7] : **Boudia, A.** (2020). *Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec un système de stockage à base d'une inductance supraconductrice (SMES)* (Doctoral dissertation, Univ M'sila).
- [8] : **W. Bensaci** " Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT " Mémoire de Master Université Kasdi-Merbah-Ouargla 2012.
- [9] : **M. Hatti**, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.
- [10] : **Mohamed Redha Yaiche et Abdellah Bouhanik** « Atlas Solaire Algérien » Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique direction générale de la recherche scientifique et

du développement technologique centre de développement des énergies renouvelables, dépôt légal 2062-2002.

[11] : Le Ministère de L'énergie et des mines conception et réalisation satinfo société du groupe sonelgaz « programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique » mars 2011.

[12] : **CH. Maher** "Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque" Mémoire Master Université Sfax 2008.

[13] : **K.Sobaihi** " étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction " Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique10, Avenue Hassen Badi El -Harrach Alger.

[14] : **W. Boucheritte**, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau», Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mohamed Khider, Biskra 2013.

[15] : **F.Chekired**, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[16] : **A.N.Sahraou**. «Étude d'une chaine de convertisseur photovoltaïque», Mémoire de magistère Université de Msila, 2010.

[17] : **photovoltaïque** " Mémoire de doctorat Université Toulouse III-Paul Sabatier le 15 décembre 2008.

[18] : **R.KETATA** " Méthodologies de régulation numérique incluant la logique floue " -Thèse de Docteur L.A.A.S Toulouse – 1992.

[19] : **M. BAUER** " Application de contrôleurs à logique floue pour la commande vectorielle des machines à induction: commande en vitesse et en position " Rapport de stage ingénieur- ESIM-22 Février 1995.

[20] : **M. Hatti**, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.

[21] : **A. Fortin**, Analyse numérique pour ingénieurs, 2eme édition, Presses internationales Polytechnique, 1996.

[22]: **Trishan Esram**, Student Member, IEEE, and Patrick L. Chapman, Senior member,IEEE.Compariason Photovoltaic array maximum power point tracking techniques ", iee transactions on energy conversion, 2006.

[23] : **Bernard**, énergie solaire, calculs et optimisation, édition 2004.

[24] : **H. BUHLER**" Réglage par logique floue " -Presse polytechniques et universitaires – 1994.

[25] : **Walid, A. B. I.** (2019). *Commande floue pour l'optimisation de la puissance d'un générateur photovoltaïque* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).

[26] : **H. BUHLER**" Réglage par logique floue " -Presse polytechniques et universitaires Romandes – 1994.

[27] : **D. Rao** and **S. Saraf**, "Study of défuzzification methods of fuzzy logic controller for speed control of a DC motor," in Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1996, vol. 2, pp. 782-787: IEEE.

[28] : **K. Khettab**, « Techniques avancées pour la synthèse et l'amélioration des performances des systèmes de commande adaptative d'ordre fractionnaire pour les processus incertains ». Thèse de doctorat, Université de Skikda – 2016.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VU DE L'OBTENTION DU DIPLOME

MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : COMMANDE DES MACHINE TOURNANTE

Année Universitaire : 2020 / 2021

Proposé et dirigé par : **Dr. BOUKHALFA Abdelouaheb & Dr. KHETTAB Khatir**

Présenté par : **HOUICHE Chaima & FAID Lemia**

Thème :

Commande MPPT intelligente d'une classe de systèmes photovoltaïques

Résumé :

La demande de l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années ainsi que les contraintes liées à sa production, tels que l'effet de pollution et de réchauffement climatique global, conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables. Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une solution très concurrentielle. Dans ce travail nous avons simulé un système PV régulé par la commande de la logique floue (MPPT flou) pour assurer la poursuite de la puissance maximale fournie par le GPV, et nous avons comparé les résultats obtenus avec une autre commande (MPPT P&O). Une modélisation du système a été effectuée qui comprend un GPV associé à une charge par le biais d'un convertisseur DC/DC commandé. Les résultats de simulation et comparer avec le fonctionnement du système avec et sans régulation. L'apport de la régulation par logique floue a été mis en valeur, et qui montre sa nécessité dans ces systèmes.

Mots clés : système PV - logique floue – MPPT - P&O - convertisseur DC/DC.

ملخص :

الطلب على الطاقة الكهربائية يزيد باستمرار في السنوات الأخيرة وكذلك القيود المتعلقة بإنتاجها مثل تأثير التلوث و الاحتباس الحراري العالمي دفع الباحثين نحو تطوير مصادر الطاقة المتجددة في هذا السياق، تقدم الأنظمة الضوئية حل تنافسي للغاية. في هذا العمل قمنا بمحاكاة نظام ضوئي وفق التحكم بواسطة المنطق الضبابي من أجل استغلال أقصى قدر من الاستطاعة المنتجة من المولد الضوئي , ومقارنة النتائج المحصل عليها مع آلية أخرى (الاضطراب و الملاحظة). لتصميم هذا النظام يلزمنا مولد ضوئي مرتبط مع الحمل بواسطة محول (مستمر - مستمر). و قد أبرزت نتائج المحاكاة مع وبدون تحكم مساهمة المنطق الضبابي في تحسين مردود النظام الضوئي مما يدل على أهميته الكبيرة في النظام.

الكلمات المفتاحية: النظام الضوئي - المنطق الضبابي - الاضطراب و الملاحظه - محول (مستمر - مستمر).