

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : GENIE ELECTRIQUE
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE
OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: ROUBI Houdheyfa

AIB Hichem

Intitulé

**Amélioration de la commande MPPT d'un
système Photovoltaïque par backstepping**

Soutenu devant le jury composé de:

Mr LAAMARI YAHIA

Université De M'sila

Président

Mr MESSALTI Sabir

Université De M'sila

Rapporteur

Mr AIB Abdelghani

Université De M'sila

Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et
miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience
d'accomplir ce Modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur
« Pr Messalti Sabir », son précieux conseil et son aide durant
toute la période du travail.*

*Nous tenons à remercier aussi « Mr boudai Assam » 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.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes
qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce
travail*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mon père en hommage de son sacrifice pour notre bien.*
- *Ma chère mère.*
- *Mes frères, Abdelhafid, Saber, Samir.*
- *Ma sœur, Soria et Chaima Laib.*
- *Toute ma famille.*
- *Tous ceux qui m'ont offert de l'aide de près ou de loin.*
- *Tous mes amis et surtout Lazhar Djaalab et Khaled Saadi et étudiants de la promotion réseaux électriques 2019.*

Hichem

Je dédie ce travail :

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de
M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser
Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

Je dédie ce modeste travail :

A ma très cher mon père (rabbi yarhmou)

*A ma très chère ma mère, que dieu la garde et la
Protège pour leurs soutien moral et financier, pour
Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

A mes frères Oussama, Charaf el-ddine

A tout familles Roubi

Aux chers amis (es)

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

A tous mes collègues de la promotion 2019.

*Je ne peux pas clore mes dédicaces, sans rendre un
grand hommage au
« Dr. MESSALTI Sabir » Pour m'avoir tout simplement
donné une grande
partie de l'énergie nécessaire pour conclure ce travail*

Houdheyfa

Introduction générale	01
Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques	
I.1. Introduction.....	04
I.2 Définition et Historique du photovoltaïque	04
I.3.L'énergie solaire	06
I.4.Notions sur la Nature du rayonnement solaire	06
I.5.Différents types de rayonnement solaire	07
a. Rayonnement direct.....	07
b. Rayonnement diffus	07
c. Rayonnement réfléchi.....	07
d. Rayonnement global.....	07
I.6.Les énergies renouvelables en Algérie	08
I.7.Les modes d'exploitation d'un panneau photovoltaïque.....	09
I.7.1.Le mode autonome.....	09
I.7.2.Le mode connecté au réseau.....	10
I.7.3.Mode hybride.....	10
I.8.L'effet photovoltaïque.....	11
I.9. Association des modules photovoltaïques.....	11
I.9.1.Association en série	11
I.9.2.Association en parallèle.....	12
I.9.3.Association série-parallèle.....	12
I.10.La cellule photovoltaïque	13
I.10.1.Principe de fonctionnement.....	13
I.10.2.Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque).....	14
I.10.3.Comparatif des différentes technologies.....	15
I.10.4.fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	16
I.11.Circuit équivalent et modèle mathématique.....	16

I.12. Générateur photovoltaïque.....	17
I.12.1. Paramètre photovoltaïque	18
I.12.2. Courant de court-circuit ICC.....	18
I.12.3. Tension en circuit ouvert VCO.....	18
I.12.4. Rendement énergétique.....	18
I.13. Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque	19
a. La zone (1)	19
b. La zone (2)	19
c. La zone (3)	19
I.14. Panneau photovoltaïque	19
I.14.1. Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	20
I.14.1.1. Avantages	20
I.14.1.2. Inconvénients.....	20
I.15. Conclusion.....	21
Chapitre II : Les convertisseurs DC-DC et la commande MPPT	
II.1. Introduction	23
II.2. Modélisation d'un system photovoltaïque	24
II.2.1 Les Hacheurs	24
II.2.2. Les types des convertisseurs DC-DC.....	25
II.2.3. Hacheur dévolteur (Buck Convert.	26
II.2.4. Hacheur survolteur (Boost converter).....	27
II.2.5. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost converter).....	28
II.3. La commande MPPT	29
II.3.1. Définition.....	29
II.3.2. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque	30
II.3.3. Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum(MPPT).....	30
II.4. Différentes techniques d'MPPT.....	32

II.4.1. Algorithme perturbation et observation	33
II.4.2. Principe des techniques “Perturbe and Observe” (P&O).....	34
II.5.Conclusion.....	35
Chapitre III : Simulation de la commande MPPT par backstepping	
III.1. Introduction	37
III.2. Le générateur photovoltaïque « GPV »	37
III.3.Simulation d’un panneau photovoltaïque (150w).....	37
III.4. Caractéristiques électriques des modules photovoltaïques.....	38
III.4.1. Simulation. Effet température et rayonnement.....	38
III.4.1.1.Influence de l’Éclairement	38
III.4.1.2. Influence de la Température	39
III.4.2. Simulation de l’association en série et parallèle.....	40
III.4.2.1Association en série	40
III.4.2.2.Association en parallèle.....	41
III.4.2.3.Association série-parallèle.....	42
III.5 Simulation du système photovoltaïque.....	44
III.5.1. Programme de simulation de l’algorithme perturbation et observation P&O.....	44
III.5.2. Programme de simulation de l’algorithme perturbation et observation P&O.....	45
III.6. Commande MPPT par Backstepping.....	48
III.6.1.Introduction	48
III.7.La Commande Backstepping.....	48
III.7.1. Synthèse de la commande par backstepping.....	49
III.7.2. analyses et résultats et commentaires de la simulation.....	52
III.8. Comparaison entre le « P&O et Backstepping ».....	54
III.9.Conclusion.....	55
Conclusion Générale.....	56

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Figure I.1 : Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque.

Figure I.2 : Composants du rayonnement solaire.

Figure I.3 : L'atlas mondial de l'irradiation solaire.

Figure I.4: Mode Autonome.

Figure I.5: Le mode connecté aux réseaux.

Figure I.6: Schéma de Branchement Mode Hybride.

Figure I.7: Association de N modules solaires en série.

Figure I.8: Association des modules solaires en parallèle.

Figure I.9: Association mixte des modules solaires.

Figure I.10: Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

Figure I.11: photos d'une cellule monocristalline.

Figure I.12: photo de cellule poly cristallin.

Figure I.13: photo d'une cellule amorphe.

Figure I.14 : Fonctionnement d'une cellule PV.

Figure I.15: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Figure I.16 : Les différentes zones de Caractéristique I(V) entre générateur et module Photovoltaïque.

Figure I.17 : Panneau photovoltaïque.

Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC et la commande MPPT

Figure II.1 : les différents types de convertisseurs statiques.

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

Figure II.3: Tension de commande du commutateur durant une période de commutation.

Figure II.4: Circuit idéal du convertisseur dévolteur (Buck).

Figure II.5: Circuits équivalents du convertisseur Buck pendant une période de commutation(A) et(B).

Figure II.6: Circuit idéal d'un convertisseur survolteur (Boost).

Figure II.7: Circuits équivalents du convertisseur Boost pendant une période de commutation(A) et(B).

Figure II.8: Circuit idéal d'un convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost).

Figure II.9: Circuits équivalents du convertisseur Buck-Boost pendant une période de commutation (A)et(B).

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

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.

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

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

Chapitre III : Simulation de la commande MPPT par Backstepping

Figure III.1 : Système photovoltaïque.

Figure III.2 : La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement avec $T=25C^{\circ}$.

Figure III.3 : La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement avec $T=25C^{\circ}$.

Figure III.4 : La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température avec $G=1000$.

Figure III.5 : La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température avec $G=1000$.

Figure III.6: La caractéristique $I=f(v)$ en association série de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000$ w/m^2 .

Figure III.7: La caractéristique $P=f(v)$ en association série de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000$ w/m^2 .

Figure III.8: La caractéristique $I=f(v)$ en association parallèle de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000$ w/m^2 .

Figure III.19: La caractéristique $P=f(v)$ en association parallèle de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000$ w/m^2 .

Figure III.10: La caractéristique $I=f(v)$ en association série-parallèle de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000$ w/m^2 .

Figure III.11: La caractéristique $I=f(v)$ en association série-parallèle de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000$ w/m^2 .

Figure III.12: La caractéristique $P=f(v)$ en association série-parallèle de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000$ w/m^2 .

Figure III.13: La caractéristique $P=f(v)$ en association série-parallèle de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000$ w/m^2 .

Liste des figures

Figure III.14: Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

Figure III.15: Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O).

Figure III.16: Allure de la puissance en fonction de temps pour ($T=25^{\circ}\text{C}$ $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

Figure III.17: Allure de la puissance générée par le panneau photovoltaïque Pour ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$)

Figure III.18: Allure de courant en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

Figure III.19: Allure de la puissance en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W}/\text{m}^2$).

Figure III.20: Allure de courant en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W}/\text{m}^2$).

Figure III.21: Allure de tension en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W}/\text{m}^2$).

Figure III.22: Allure de la puissance générée en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W}/\text{m}^2$).

Figure III.23: Allure de la puissance en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W}/\text{m}^2$).

Figure III.24: Allure de courant en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W}/\text{m}^2$).

Figure III.25: Allure de tension en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W}/\text{m}^2$).

Figure III.26: Allure de la puissance générée en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W}/\text{m}^2$).

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie.

Tableau I.2 : Comparatif des différentes technologies cellule.

Tableau II.1: Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC.

Tableau III.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 150.

Tableau III.2 : Paramètres DC-DC et Backstepping.

Liste des symboles

D : Diamètre de soleil(1.39.10⁹m).

D_t : Diamètre de soleil(1.27.10⁷m).

D_{LTS} : Distance moyenne soleil terre(1.5.10¹¹m).

R_p : Résistance parallèle shunt(Ω).

R_s : Résistance série(Ω).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

I_{sat} : Courant de saturation (A).

T_c : Température de jonction ($^{\circ}$ K).

G : L'éclairement.

I : Le coefficient de courant en fonction de température (A/ $^{\circ}$ C).

T_{ref}: La température de référence (298 $^{\circ}$ K).

n: Facture de non idéalité de la jonction.

I_{cc} : Le courant de court-circuit (A).

V_{co} : La tension de circuit ouvert (V).

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).

V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

V_{opt} : Tension optimale (V).

I_{opt} : Courant optimum (A).

V_{co} : Tension à circuit ouvert (V).

I_{cc} : Courant de court-circuit (A).

K : coefficient de Boltzman (1.38.10⁻²³ J / K).

T_c : Température de la cellule (C $^{\circ}$).

PV: Panneau Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie photovoltaïque en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

L'énergie photovoltaïque issue de la conversion de l'énergie solaire souffre d'un problème d'optimisation, dû aux caractéristiques électriques non linéaires (courant - tension) des cellules photovoltaïques, Ces caractéristiques dépendent essentiellement des conditions climatiques de rayonnement et de température.

L'extraction de la puissance maximale d'un ensemble de ces cellules dite Stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet d'une manière efficace de résoudre ce problème d'optimisation.[1]

Les installations PV domestiques raccordées aux réseaux électriques de distribution (applications de quelques kilowatts), qu'appelées les systèmes PV décentralisées, peuvent utiliser les onduleurs classiques à deux niveaux. On utilise la commande MLI vectorielle pour synchroniser la puissance de sortie de l'onduleur avec celle injectée au réseau.

L'Algérie, pays du soleil et de l'espace, peut s'inspirer de ces programmes pour une exploitation à grande échelle de l'énergie solaire. Elle a les moyens humains et financiers à la mesure de ces programmes. L'enjeu est grand, et vital. L'Algérie est dans le monde l'un des pays de fort potentiel d'exportation de l'énergie électrique solaire. [2]

Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement défini par une tension et un courant connus, appelé point de puissance maximale. En outre, la position de ce point n'est pas fixe mais elle se déplace en fonction de l'irradiation et de la température des cellules solaires ainsi que de la charge utilisée [3]. A cause du coût relativement onéreux de ce genre d'énergie, on doit extraire le maximum de puissance des panneaux solaires. Cela nécessite un mécanisme de poursuite de ce point afin que la puissance maximale soit générée en permanence ce qui est connu sous le nom de commande MPPT « The maximum power point tracking ». [1]

Nous nous intéressant dans ce mémoire à l'étude et la modélisation d'un panneau PV reliée à un hacheur élévateur commandé par la technique MPPT« The maximum power point tracking».

Ce mémoire est divisé en trois chapitres, réparti comme suit:

Le premier chapitre sera dédié aux généralités sur le photovoltaïque, les éléments composant le système photovoltaïque (cellules, modules, panneau...) ainsi que les différents types de système.

Au deuxième chapitre on va faire la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque, et on exposera les convertisseurs statiques "hacheur" « buck, boost, et buck-boost », ainsi à la description de la commande MPPT,

Dans la dernier chapitre, nous allons présenter la simulation de chaque modélisation et différents méthodes de MPPT « P&O, buckstepping » puis nous allons montrer les résultats de simulation d'un système PV, et on donnera une comparaison entre les deux méthodes. Ainsi quelques perspectives pour les futurs travaux.

Chapitre I
Généralité sur les systèmes
photovoltaïques

I.1. Introduction

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations :

- non autonomes ou «grid connected», rattachées au réseau de distribution électrique. Dans Les systèmes reliés aux réseaux, les consommateurs standards AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur). Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau public et les demandes de puissance qui existent la capacité de production du générateur sont attachées sur le réseau.

- Autonomes ou « stand-alone », qui sont le propose de cette étude, ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps.

La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système est-elle assurée par un système de stockage d'énergie [3]

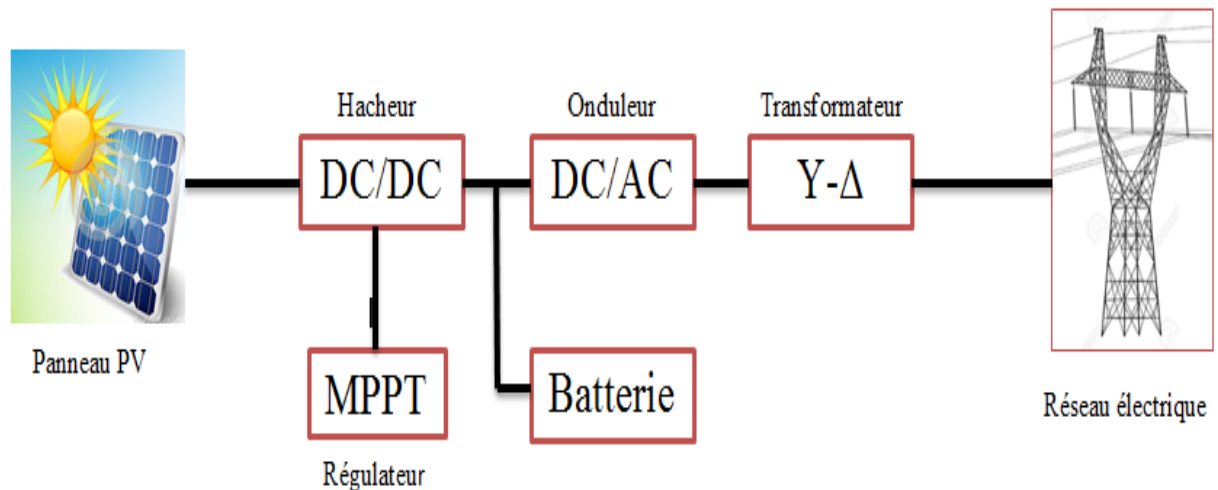


Figure (I.1) : Schéma simplifié d'un système PV [4].

Dans ce chapitre, nous commencer par la définition de l'énergie solaire puis la construction des cellules photovoltaïques et leur effet ainsi principe de fonctionnement et Les modes d'exploitation d'un panneau photovoltaïque. Puis nous présentons les différents types des cellules photovoltaïques.

Enfin les principaux caractéristiques d'un module photovoltaïque.

I.2 Définition et Historique du photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien

Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque [5].

Quelques dates de l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Antoine 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.

1887 : L'effet photoélectrique a été compris et présenté en 1887 par Heinrich Rudolf Hertz qui en publia les résultats dans la revue scientifique *Annalen der Physik*.

1905 : Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1905 et obtint le prix Nobel de physique sur ses travaux en 1921.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince des laboratoires BELL mirent au point la première cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement de 4%, au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule photovoltaïque avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites Vanguard alimentés par des cellules photovoltaïques sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Wilmington dans l'Etat du Delaware, USA.

1983 : La première voiture alimentée par de l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

2000 : Entrée en application le 1er avril 2000 et modifiée en 2004 et en 2009, l'EEG Renewable Energy Sources Act (EEG) est le résultat de la transposition de la directive européenne relative à la promotion des énergies renouvelables dans le secteur de l'électricité.

2005 : En décembre 2005 mise en réseau de la première centrale solaire photovoltaïque du groupe Prime Energy à Weil am Rhein (Baden-Württemberg), Hagen heimer strasse 17, 79576 Weil am Rhein [6].

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles

représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé [4].

I.3.L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ [8400] fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [7].

I.4. Notions sur la Nature du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales [8] :

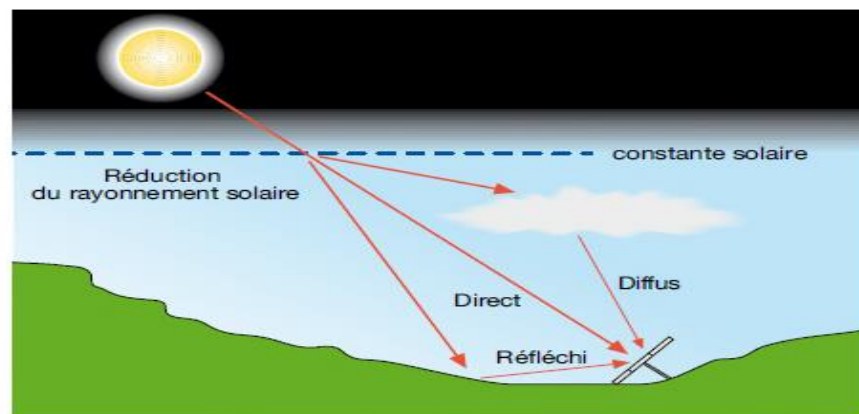


Figure (I.2) : Composants du rayonnement solaire [4].

I.5. Différents types de rayonnement solaire

Par ensoleillement, nous faisons référence à l'intégrale de l'irradiante solaire sur une période donnée [kWh/m²]. Par conséquent, le rayonnement tombant sur une surface horizontale est constitué d'un rayonnement direct, associé à l'irradiante directe sur la surface, d'un rayonnement diffus qui frappe la surface depuis l'ensemble du ciel et non depuis une partie spécifique de celui-ci et d'un rayonnement réfléchi sur une surface donnée par le sol et l'environnement (Figure I.2). En hiver, le ciel est couvert et le composant diffus est donc supérieur au composant direct.

a) Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre [9]. Si I est le rayonnement direct.

Dans le cas d'un plan horizontal le rayonnement s'écrit : $I = I_{sinh}$ (I.1)

b) Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus (D_h) est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions, Il peut être mesuré par un pyromètre avec écran masquant le soleil [9].

c) L'albédo ou réfléchi

L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface.

Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

$$\text{L'albédo Alb} = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie recue}} \quad (\text{I.2})$$

d) Rayonnement global

Le rayonnement global est le rayonnement émis par le soleil incident sur un plan donné, et c'est la somme du rayonnement direct et diffus, il est mesuré par un pyromètre ou un Solari mètre sans écran [9].

Dans le cas d'une surface horizontale, le rayonnement global s'écrit:

$$G = I_{sinh} + D_h \quad (\text{I.3})$$

h: hauteur angulaire

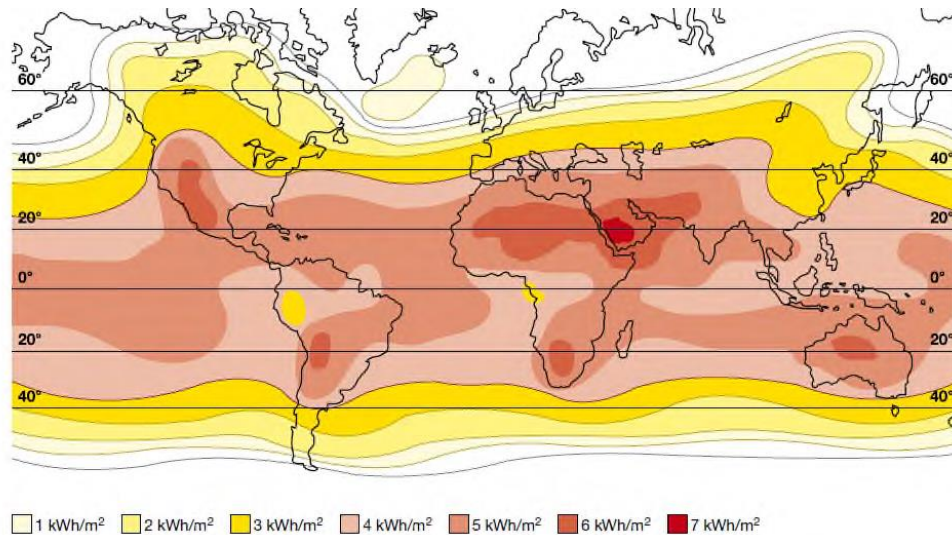


Figure (I.3) : L'atlas mondial de l'irradiation solaire [10].

I.6. Les énergies renouvelables en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde et en particulier de la région La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays. Le tableau (I.1) résume le potentiel solaire en Algérie [10].

<i>Régions</i>	<i>Région côtière</i>	<i>Hauts plateaux</i>	<i>Sahara</i>
<i>Superficie(%)</i>	4	10	86
<i>Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)</i>	2650	3000	3500
<i>Energie moyenne reçue (KWh/m²/an)</i>	1700	1900	2650

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie. [10]

L'Algérie en particulier et les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. Les taux d'irradiation solaire effectués par satellites par l'Agence Spatiale Allemande (DLR), montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200 kWh/m²/an dans le Nord du Grand Sahara. Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800 kWh/m²/an limités à la partie sud de l'Europe. Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a

conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit: 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35 TWh/an pour l'éolien. Cette énergie renouvelable présente à l'heure actuelle une réponse aux problèmes environnementaux et aux émissions de gaz à effet de serre qui menace la planète entière et une solution durable à la crise actuelle de l'énergie, avec la hausse du prix du baril de pétrole, ce qui place les énergies renouvelables, ENR, (hydraulique, éolien, photovoltaïque, solaire thermique, géothermie, biomasse, biogaz et pile à combustible), au centre des débats portant sur l'environnement, et plus généralement le développement durable. Dans ce contexte vient le projet allemand DESERTEC «clean frome désert» dans cette article, nous décrivons le potentiel algérien en matière d'énergie renouvelable surtout solaire et éolien et leurs intégration dans une vision de développement à travers plusieurs scénarios énergétiques mettant l'Algérie comme un noyau de production d'énergie renouvelable et son environnement surtout européen dont les études de la banque mondiale indique qu'il sera obligé dans les années à venir d'importer son énergie du grand Sahara d'où vient l'initiative allemande pour exporter l'énergie solaire du grand Sahara à l'Europe.

L'Algérie a adopté en 2011 une stratégie ayant pour objectif de produire d'ici 2030, 40% d'électricité à partir de ressources renouvelables. Cette stratégie vise en outre à développer une véritable industrie du solaire, associée à un programme de formation et de capitalisation qui permettra, à terme, d'asseoir un savoir-faire efficient, notamment en matière d'engineering et de management de projets. [11]

I.7.Les modes d'exploitation d'un panneau photovoltaïque

On distingue trois mode d'exploitation d'un panneau PV : autonome, connecté au réseau et hybride [12].

I.7.1.Le mode autonome

En mode autonome figure (I.4), le générateur photovoltaïque représente la seule source d'énergie électrique pour alimenter des récepteurs. [13].



Figure (I.4): Mode Autonome.

Ce mode adopté lorsque le réseau n'est pas disponible ou lorsque fonctionnement des récepteurs dépend uniquement du fil de soleil (Pompage, éclairage, climatisation, chauffage...) [12].

I.7.2. Le mode connecté au réseau

Dans ce mode, le panneau PV est connecté au réseau électrique figure (I.5), Le système photovoltaïque est muni de convertisseurs de puissance pour adapter l'énergie produite par les panneaux PV.

Ces convertisseurs sont composés d'un hacheur muni d'un MPPT, d'un filtre d'un onduleur et d'une électronique appropriée pour assurer l'adaptation en amplitude et fréquence avec le réseau (accrochage au réseau) [12].

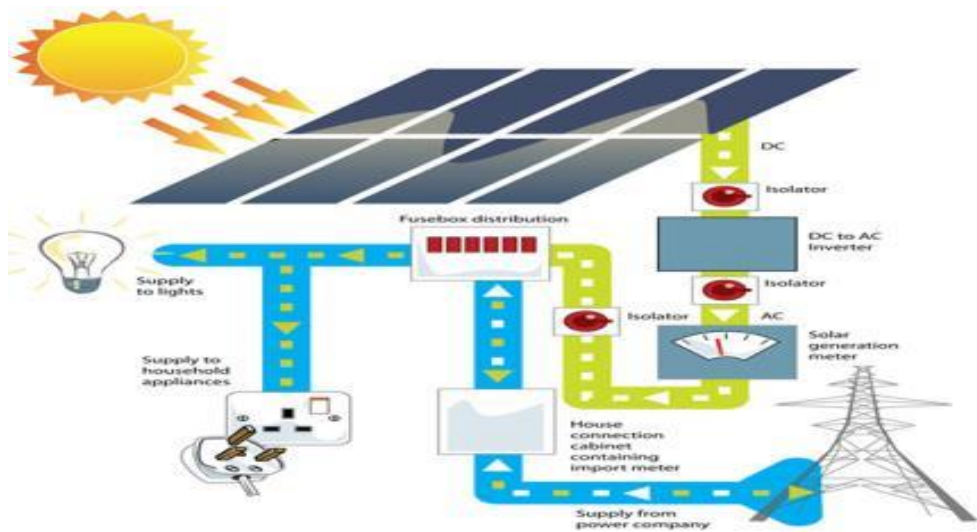


Figure (I.5): Le mode connecté aux réseaux.

I.7.3. Mode hybride

Un système d'énergie hybride comporte plus qu'une source d'électricité telle que les panneaux photovoltaïques, les cellules à combustible, les générateurs éoliens, les batteries de stockage, les groupes électrogènes, etc... figure (I.6)

Ce type d'installation est utilisé pour l'électrification des régions loin du réseau.

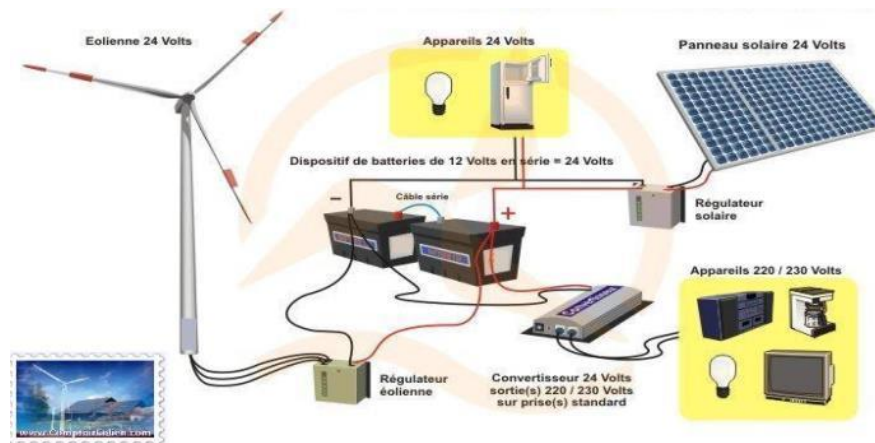


Figure (I.6): Schéma de Branchement d'un system PV Mode Hybride.

Ils sont généralement à base de sources d'énergie renouvelables tel que les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les piles à combustibles, les batteries de stockage, les groupes électrogènes [12].

I.8.L'effet photovoltaïque

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

- ❖ « Phots », qui signifient lumière.
- ❖ « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827, inventeur de la pile électrique).

Appelé aussi « module photovoltaïque » ou PV, c'est un panneau solaire qui est destiné à récupérer les rayonnements du soleil pour les transformer en électricité (Courant continu DC).

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [14].

L'ensemble de panneaux photovoltaïques interconnectés forme le générateur. Celui-ci est caractérisé par sa puissance crête exprimée en kilowatt crête (KWc) [15].

I.9. Association des modules photovoltaïques

I.9.1.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 [16].

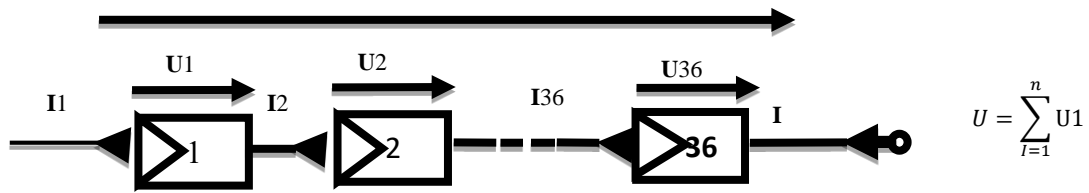


Figure (I.7) Association de N modules solaires en série.

I.9.2. 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 [17].

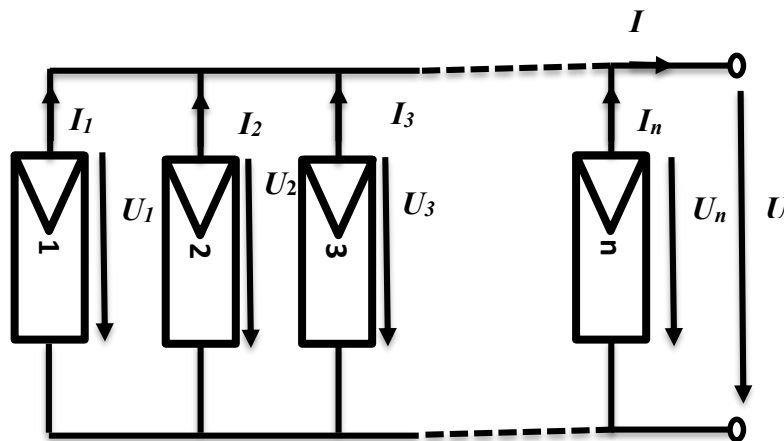


Figure (I.8) Association des modules solaires en parallèle.

I.9.3. Association série-parallèle

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [18].

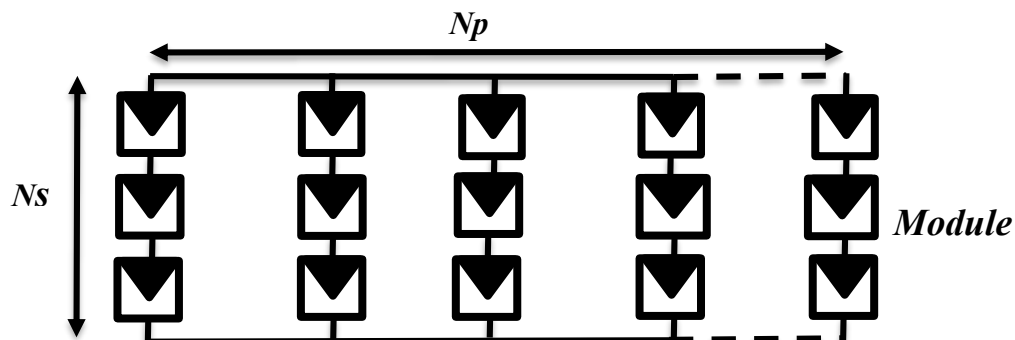


Figure (I.9) Association mixte des modules solaires.

I.10. 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 [19]. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

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.

I.10.1. 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.10) [13].

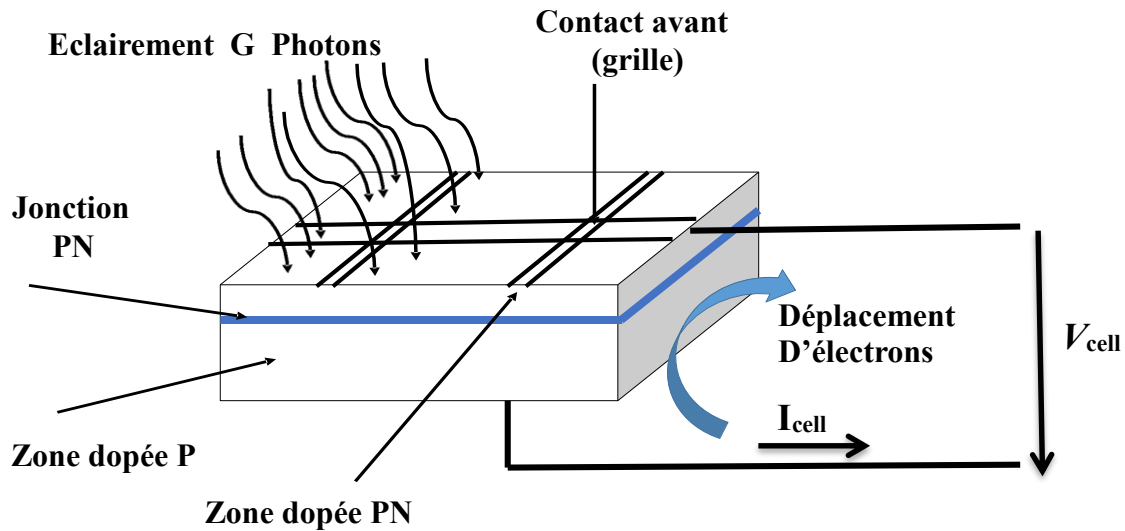


Figure (I.10) : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

I.10.2. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques)

Silicium monocristallin



Figure (I.11) : Photos d'une cellule monocristalline.

Silicium poly cristallin



Figure(I.12) : Photo de cellule poly cristallin.

Silicium amorphe (a-si)

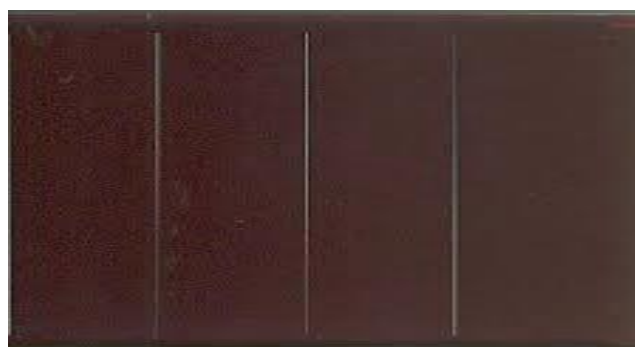


Figure (I.113) : Photo d'une cellule amorphe.

I.10.3.Comparatif des différentes technologies

Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque:




<i>Technologie</i>	<i>Monocristallin</i>	<i>Poly cristallin</i>	<i>Amorphe</i>
<i>Cellule et module</i>			
<i>Caractéristiques</i>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Très bon rendement: 14 à 20%. ❖ Durée de vie : importante (30ans) ❖ Coût de fabrication: élevé. ❖ Puissance : 100 à 150 Wc/m². 7 m²/kWc. ❖ Rendement faible sous un faible éclairement. ❖ perte de rendement avec l'élévation de la température. ❖ Fabrication: élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal ❖ Couleur bleue uniforme. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Bon rendement : 11 à 15 %. ❖ Durée de vie : importante (30 ans) ❖ Coût de fabrication: meilleur marché que les panneaux monocristallins ❖ Puissance: 100Wc/m². 8 m²/kWc. ❖ Rendement faible sous un faible éclairement. ❖ perte de rendement avec l'élévation de la température. ❖ Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. ❖ Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Rendement faible : 5 à 9 %. ❖ Durée de vie : assez importante (20ans) ❖ Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies ❖ Puissance : 50 WC/m². 16 m²/kWc. ❖ Fonctionnement correct avec un éclairement faible. ❖ Peu sensible aux températures élevées. ❖ Utilisables en panneaux souples. ❖ Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium.
<i>Part de marche</i>	43%	47%	10%

Tableau I.2 : Comparatif des différentes technologies cellule.

I.10.4. fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-trou qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraîné dans les zones neutres de chaque côté de la jonction.

Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension) ; s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque [20].

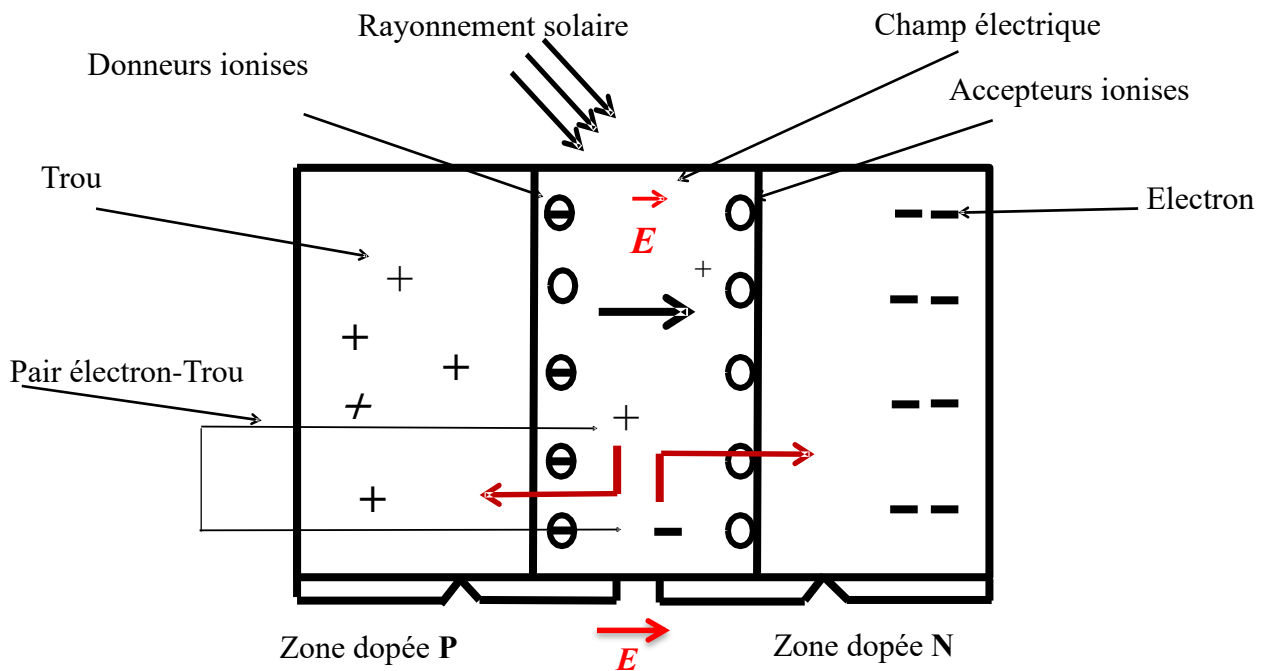


Figure (I.14) : Fonctionnement d'une cellule PV.

I.11. Circuit équivalent et modèle mathématique

La figure (I.15) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque. Il correspond à un générateur de courant I monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

- Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule [4]: La résistance série (R_{ser}) est la résistance interne de la cellule : elle dépend Principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de Contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt (R_{shu}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle Dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

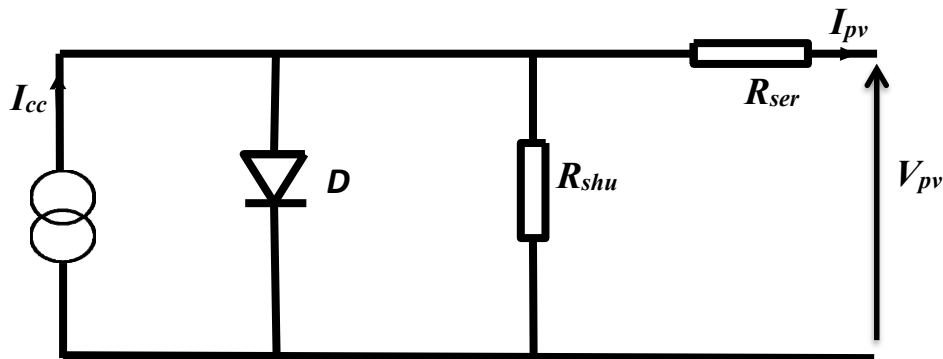


Figure (I.15) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par [21] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{\exp(V_{pv} + (I_{pv} * R_{ser}))}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_{ser})}{R_{shu}} \quad (I.4)$$

Où I_{sat} est le courant de saturation, K est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K), T est la température effective des cellules en Kelvin(K), e est la charge de l'électron ($e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C), n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$), 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_{shu} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_{ser} est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

I.12. 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.

I.12.1. Paramètre photovoltaïque

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituant le champ PV [22] :

I.12.2. Courant de court-circuit I_{cc}

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. 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.5), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(I_{cc} R_{ser})}{nkT} \right) - 1 \right] \frac{(I_{cc} R_{ser})}{R_{shu}} \quad (I.5)$$

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

$$I_{sat} \left[\exp \frac{e(I_{cc} R_{ser})}{nkT} - 1 \right]$$

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

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \quad (I.6)$$

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

I.12.3. Tension en circuit ouvert V_{co}

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).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e V_{pv}}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \quad (I.7)$$

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

$$V_{oc} = V_t \ln \left[\frac{I_{pv}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (I.8)$$

I.12.4. Rendement énergétique

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 :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{P_{inc}} \quad (I.9)$$

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.13. Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

La figure (I.16) représente trois zones essentielles [13] :

a) La zone (1) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, Le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

b) La zone (2) : correspondant au code de la caractéristique, la région intermédiaire Entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du Générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

c) La zone (3) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une Tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension

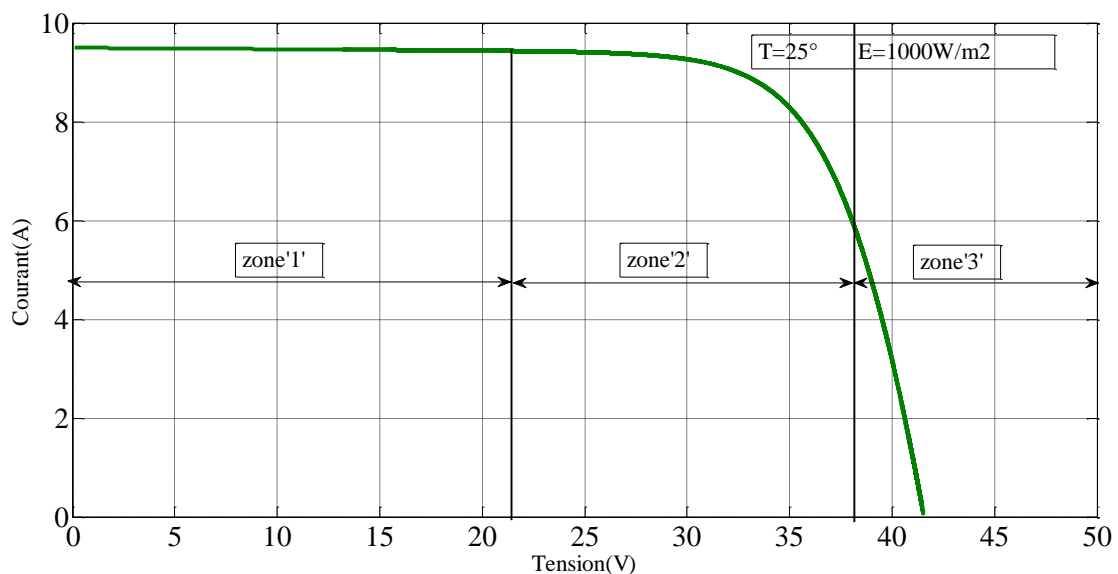


Figure (I.16) : Les différentes zones de Caractéristique I(V) entre générateur et module Photovoltaïque.

I.14. Panneau photovoltaïque

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet et de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [7].



Figure (I.17) : Panneau photovoltaïque.

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui les regroupe, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie [7].

I.14.1. Avantages et inconvénients d'une installation PV

I.14.1.1. Avantages

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent 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 Méga Watt.
- 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 [13].

I.14.1.2. Inconvénients

- 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 % (soit entre 10 et 15 MW/km² pour le BENELUX) avec une limite théorique Pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- 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 [13].

I.15. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le monde de la conversion photovoltaïque qui connaît depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et module photovoltaïque.

Chapitre II
*Les convertisseurs DC/DC et
la commande MPPT*

II.1. Introduction

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT) [23].

Le but de ce chapitre est l'étude de quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur et l'hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC.

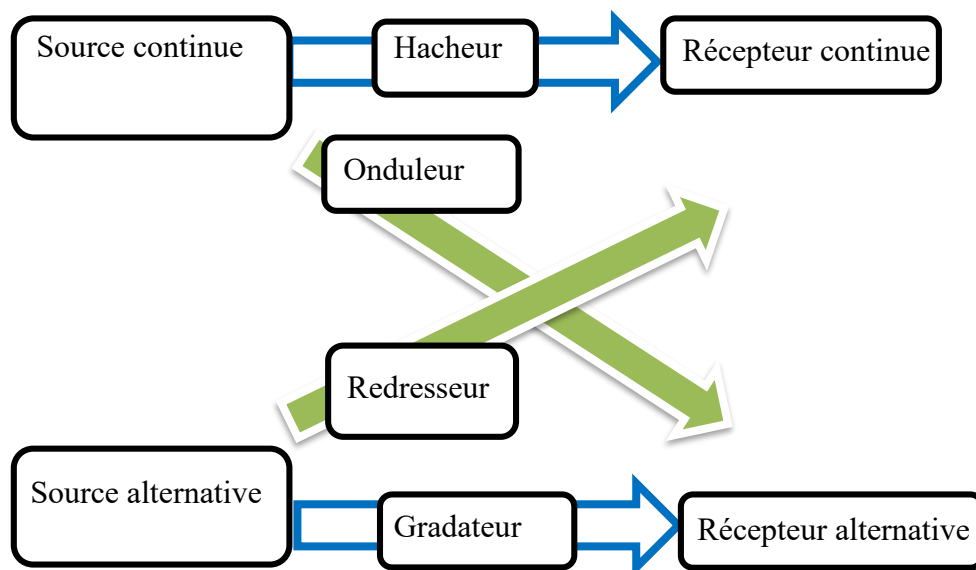


Figure (II.1) : les différents types de convertisseurs statiques.

On présente dans ce chapitre, quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémentacion 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 [16].

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 [17].

Les hacheurs sont des convertisseurs continu 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 [26].

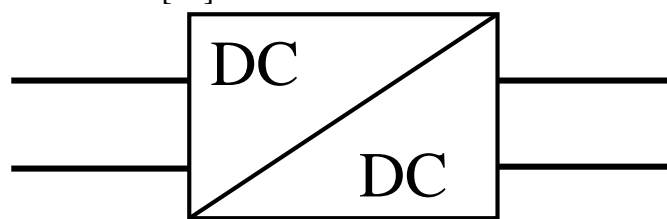


Figure (II.2) : Symbole d'un convertisseur DC-DC.

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.3) on ferme le commutateur pendant un temps de fermeture égal à $D.T_s$, ensuite on l'ouvre durant un temps d'ouverture égal à $(1-D).T_s$. Où :
- D est le rapport cyclique du commutateur ($D \in [0,1]$).

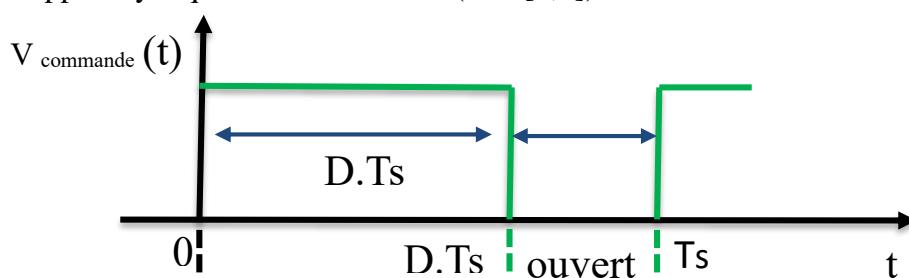


Figure (II.3) Tension de commande du commutateur durant une période de commutation.

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 flyback, 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 [24].

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).

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau de service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telle que le buck-boost, le cuk, et le sepic.

Le tableau (II.1) résume les principaux rapports de transformation en fonction du rapport cyclique pour les différentes structures de convertisseurs statiques avec et sans isolement galvanique. Où D désigne le rapport cyclique du convertisseur et K le rapport de transformation du transformateur d'isolement [25].

Convertisseur	Rapport de transformation en fonction de (D)	Isolement galvanique
Buck	D	Non
Boost	$\frac{1}{1-D}$	Non
Buck-Boost	$\frac{-D}{1-D}$	Non
Cuk	$\frac{D}{1-D}$	Non
SEPIC	$\frac{D}{1-D}$	Non
Flyback	$K \cdot \frac{D}{1-D}$	Oui
Push-pull	$K \cdot D$	Oui
Forward	$K \cdot D$	Oui

Tableau II.1: Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC.

D : Le rapport cyclique de convertisseur.

K : le rapport de transformation du transformateur d'isolement

II.2.3.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.4) présente son circuit idéal.

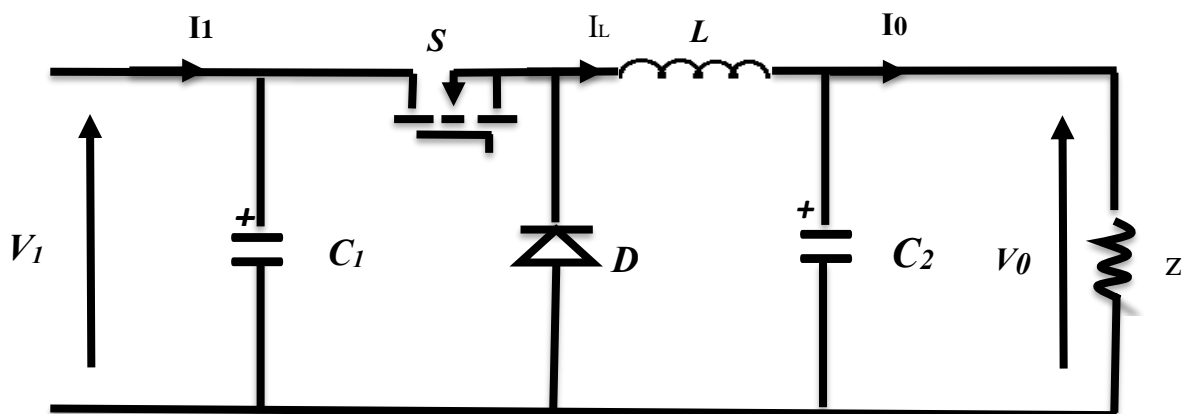


Figure (II.4) : Circuit idéal du convertisseur dévolteur (Buck).

Commutation Ts. Pendant le temps de fermeture ($t \in [0, D.Ts]$), 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 ($t \in [D.Ts, Ts]$), 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 .

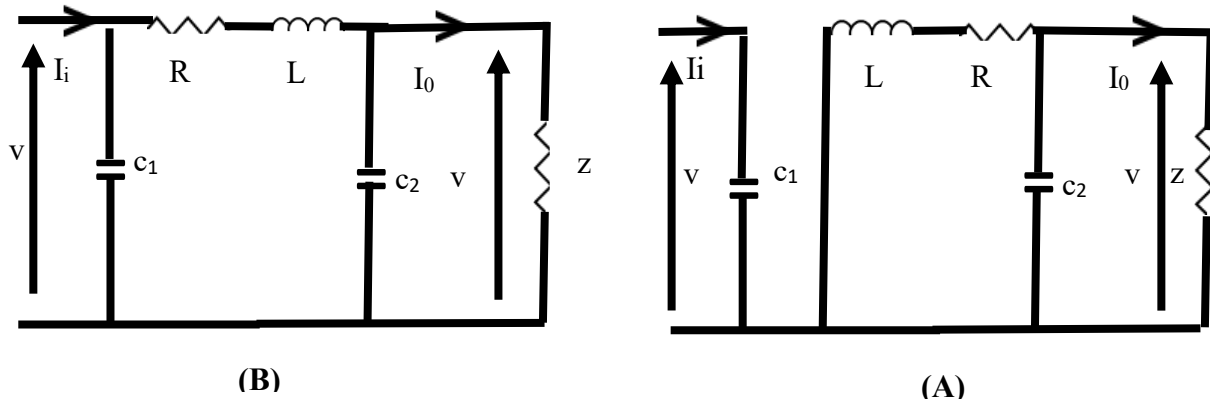


Figure (II.5): Circuits équivalents du convertisseur Buck pendant une période de commutation(A) et (B).

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

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

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.2.4. 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 [26]. Son circuit idéal est donné par la figure(II.6)

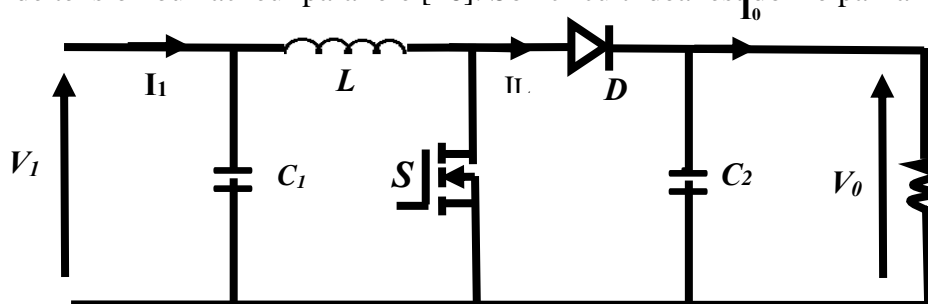


Figure (II.6): Circuit idéal d'un convertisseur survolteur (Boost).

La figure(II.7) explique le fonctionnement du convertisseur Boost durant une période de commutation T_s . Pendant le temps de fermeture ($t \in [0, D.T_s]$), le courant dans l'inductance croit progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie. Dès que le commutateur s'ouvre ($t \in [D.T_s, T_s]$), 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 .

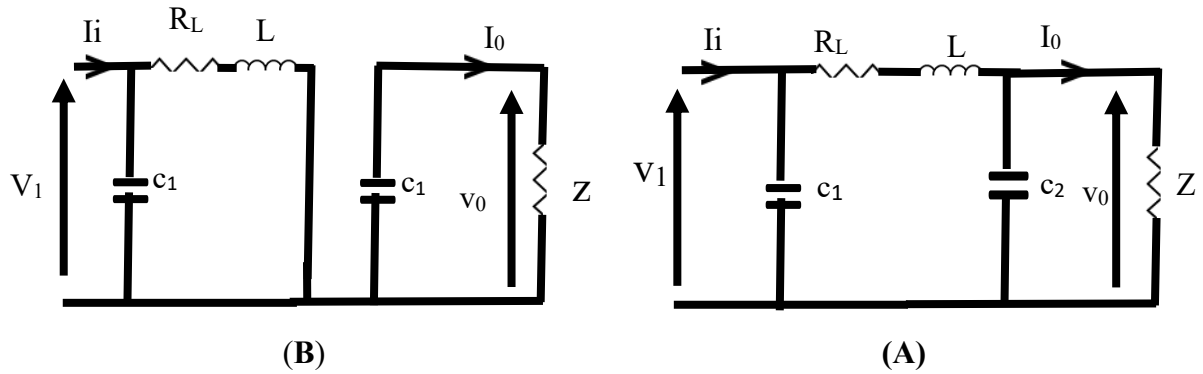


Figure (II.7) : Circuits équivalents du convertisseur Boost pendant une période de commutation(A) et (B).

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

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

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.2.5. 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 [25]. La figure (II.8) illustre son circuit idéal.

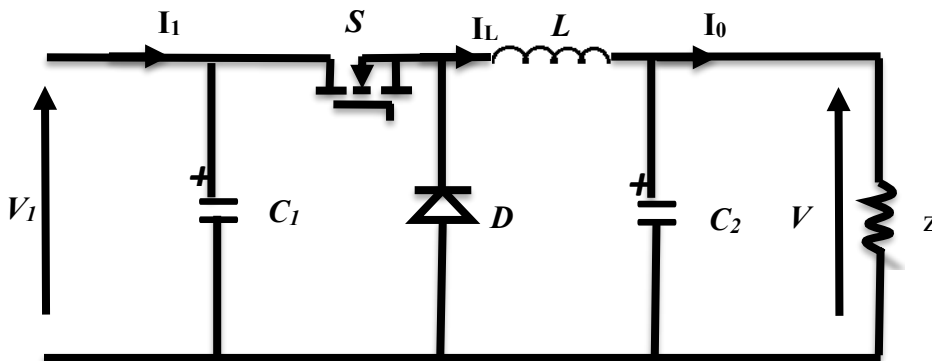


Figure (II.8): Circuit idéal d'un convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost).

La figure (II.9) explique le fonctionnement du convertisseur Buck-Boost durant une période de commutation T_s . Pendant le temps de fermeture ($t \in [0, D.T_s]$), la tension de la source est appliquée à l'inductance qui se charge d'énergie. Durant la période d'ouverture ($t \in [D.T_s, T_s]$), 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.

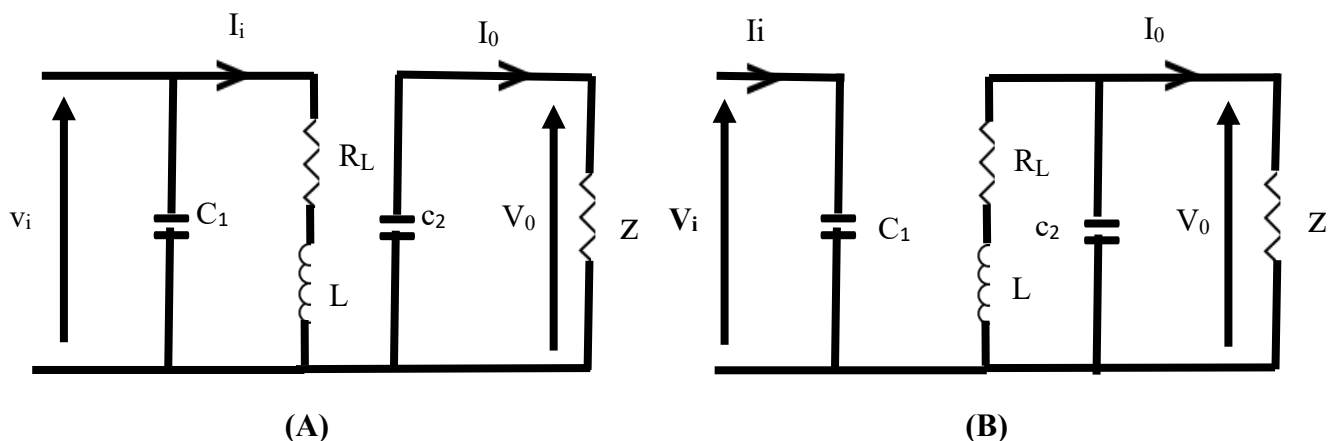


Figure (II.9): Circuits équivalents du convertisseur Buck-Boost pendant une période de commutation (A) et (B).

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

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

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

$$V(D) = \frac{V_0}{V_i} = \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (\text{II.3})$$

II.3. La commande MPPT

II.3.1. 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 [27].

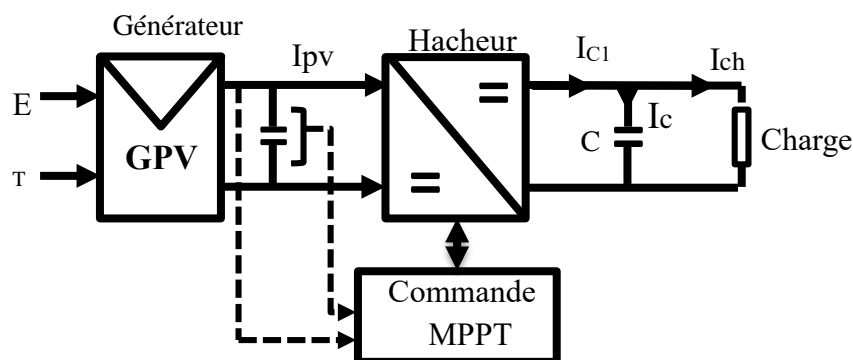
II.3.2. du Suivi de la puissance maximale générateur photovoltaïque

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 eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [28].

II.3.3. 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% [18].

La Figure (II.10) représente le schéma synoptique du ce système PV par une commande MPPT.



La 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.

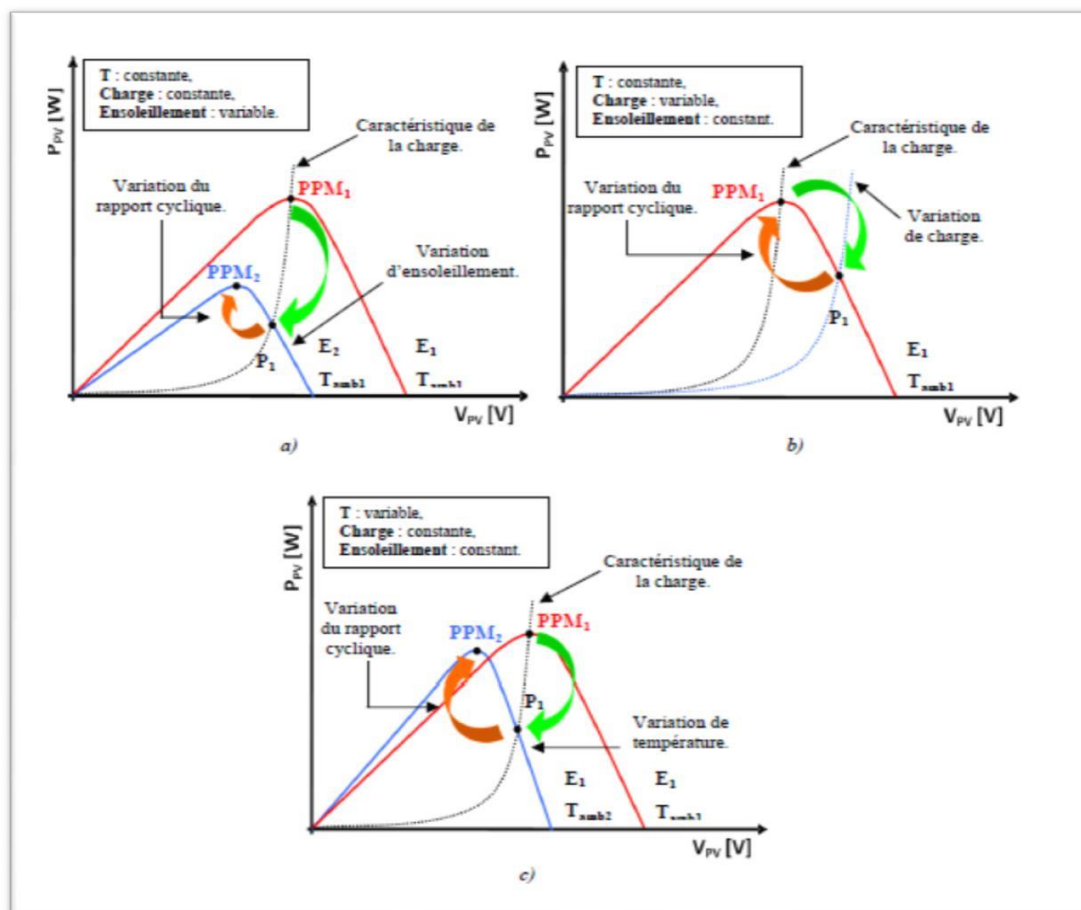


Figure (II.11) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

II.4. 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 micro-processeurs 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 [29]:

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

Chacune de ces techniques a ces propres avantages et inconvénients du point de vue simplicité, efficacité et robustesse.

Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation (P&O), et **Backstepping**.

II.4.1. 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) [8].

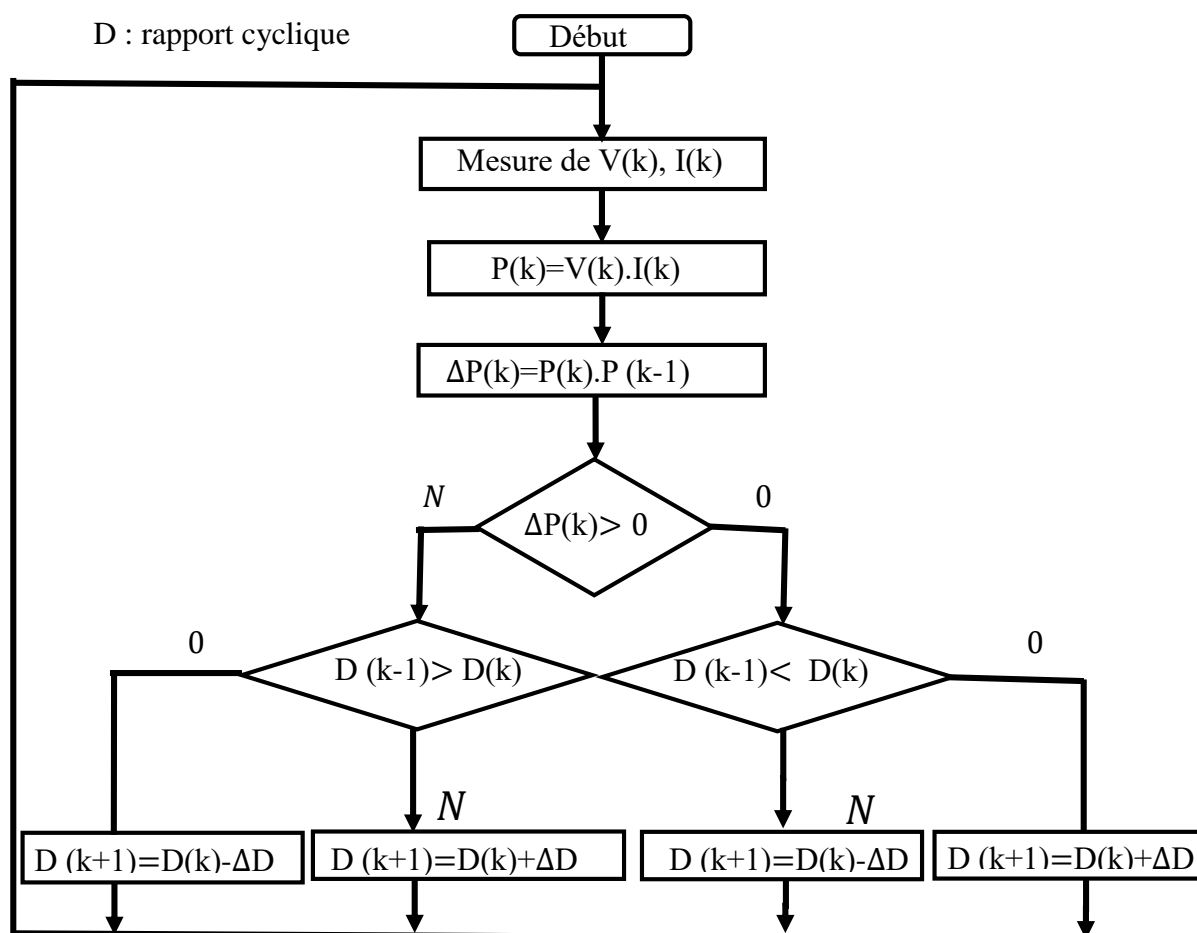


Figure (II.12) : Algorithme de perturbation et de l'observation (P&O).

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'incrémentation 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

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

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

$$D(k+1) = D(k) - \Delta D \quad (\text{II.2})$$

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'incrémentation 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 [30].

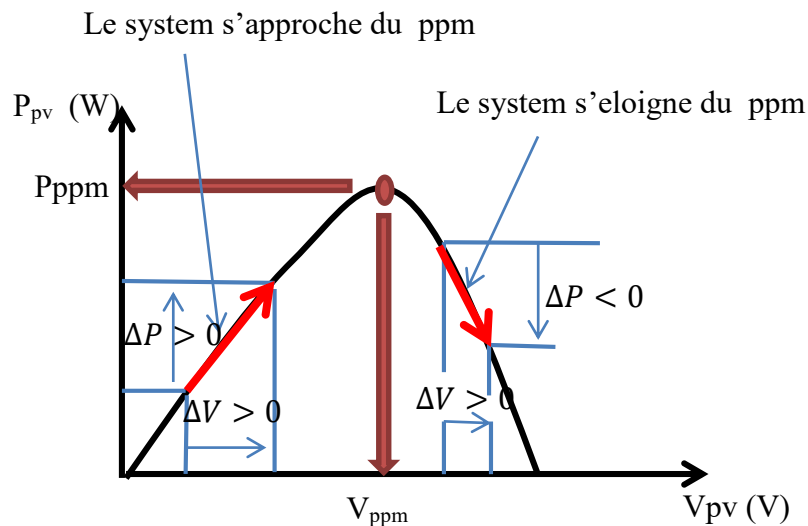
II.4.2. Principe des techniques "Perturbe and Observe" (P&O)

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. [31].



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

II.5.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé brièvement quelques topologies de base des convertisseurs continus-continus. Comme le convertisseur dévolteur, convertisseur survolteur et convertisseur dévolteur-survolteur.

Nous avons présenté aussi la commande MPPT des convertisseurs DC-DC pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement. On a étudié la commande MPPT basées sur l'algorithme de perturbation et observation.

Dans la suite de notre travail nous allons étudier la méthode d'extraction de puissance maximale (MPPT) en utilisant la technique de **backstepping**.et Comparaison des résultats des techniques de commande (backstepping, P&O).

Chapitre III
Simulation de la commande
MPPT par backstepping

III.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

III.2. Le générateur photovoltaïque « GPV »

Le système photovoltaïque est contrôlé par la commande MPPT, il est présenté à la Figure (III.1).

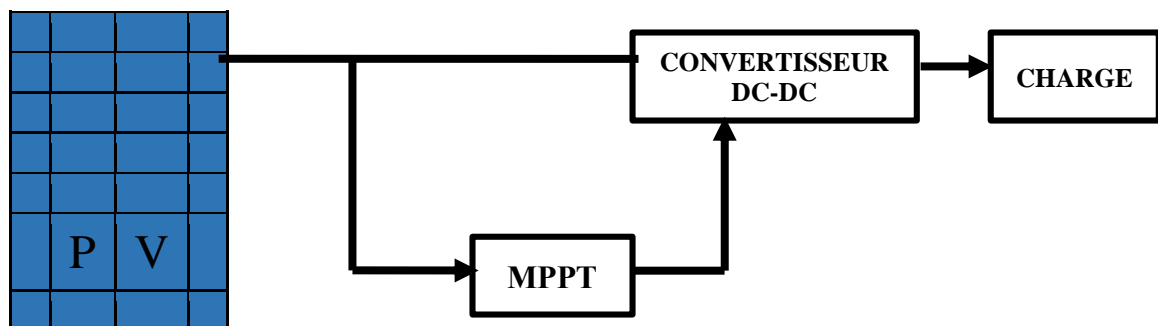


Figure (III.1) : Système photovoltaïque.

III.3. Simulation d'un panneau photovoltaïque (150w)

Dans ce travail, nous avons simulé le module photovoltaïque BP SX 150 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 72 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 150W.

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau (III .1) [32] :

Puissance (P_{max})	150W
Tension à (V_{pmax})	34.5V
Courant à (I_{pmax})	4.35A
Tension à circuit ouvert (V_{co})	43.5V
Courant de court-circuit de référence (I_{ccr})	4.75A
Coefficient de la température de V_{co}	-160±20Mv/°C
Coefficient de la température de I_{cc}	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 III.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 150.

III.4. Caractéristiques électriques des modules photovoltaïques

Il existe plusieurs indicateurs permettant de mesurer les performances des modules PV. La puissance crête (W_c) est un des indicateurs les plus significatifs, elle représente la puissance électrique maximale que le panneau peut fournir dans les conditions de mesures normalisées, c'est-à-dire lorsqu'il est connecté à une charge optimale, lorsque la température à la jonction des cellules est de 25 °C et lorsqu'il reçoit du soleil à une puissance de 1000W/m² (ceci correspond approximativement à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil le midi par temps clair).

La caractéristique courant-tension ($I=f(V)$) illustre la variation du courant de sortie en fonction de la tension de sortie. Elle représente aussi un indicateur important permettant de mesurer les performances des modules PV. A partir de cette caractéristique on peut tracer la caractéristique puissance-tension ($P=f(V)$).

Les conditions idéales conventionnelles sont très rarement remplies dans la pratique, et la variation de ces conditions est aléatoire et imprévisible. Le changement de l'ensoleillement et de la température influe directement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension [12].

III.4.1. Simulation. Effet température et rayonnement

III.4.1.1. Influence de l'Éclairement

Les figures (III.2) et (III.3) présentons un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement:

Nous avons fixé la température pour différents éclairagements.

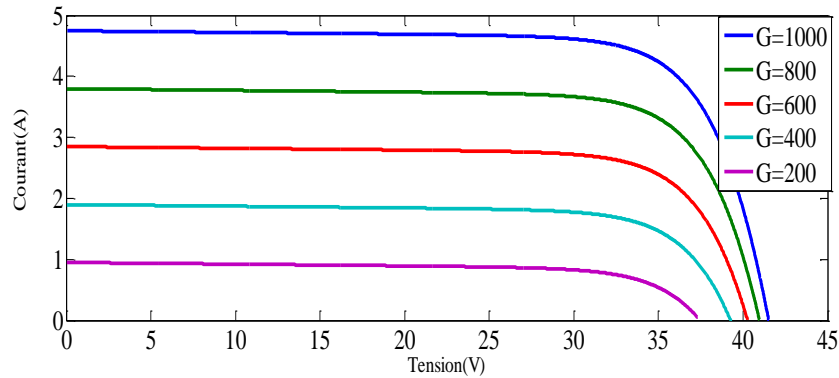


Figure (III.2) : La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement avec $T=25C^{\circ}$ pour un panneau (150w).

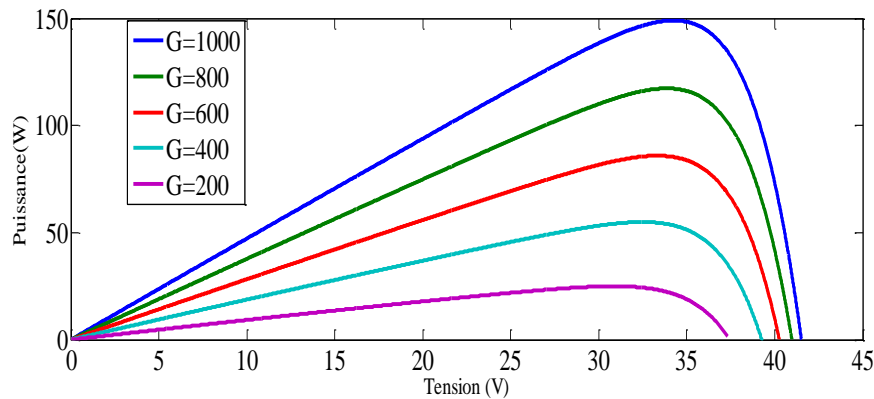


Figure (III.3) : La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement avec $T=25C^{\circ}$ pour un panneau (150w)..

Pour la figure (III.2) on remarque que pour l'éclairement $G=1000 \text{ w/m}^2$ le courant $I_{sc}=4.8A$ et pour $G=800 \text{ w/m}^2$ le courant $I_{sc}=3.84A$ on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant augmente, mais par contre la tension varie légèrement.

Pour la figure (III.3) on remarque que pour l'éclairement $G=1000 \text{ w/m}^2$ la puissance $P=149.8W$ et pour $G=800 \text{ w/m}^2$ la puissance $P=122.3W$ on peut voir que la puissance subit une variation importante, quand l'éclairement augmente la puissance augmente, mais par contre la tension varie légèrement.

III.4.1.2. Influence de la Température

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V figure (III.4) et (III.5) d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures :

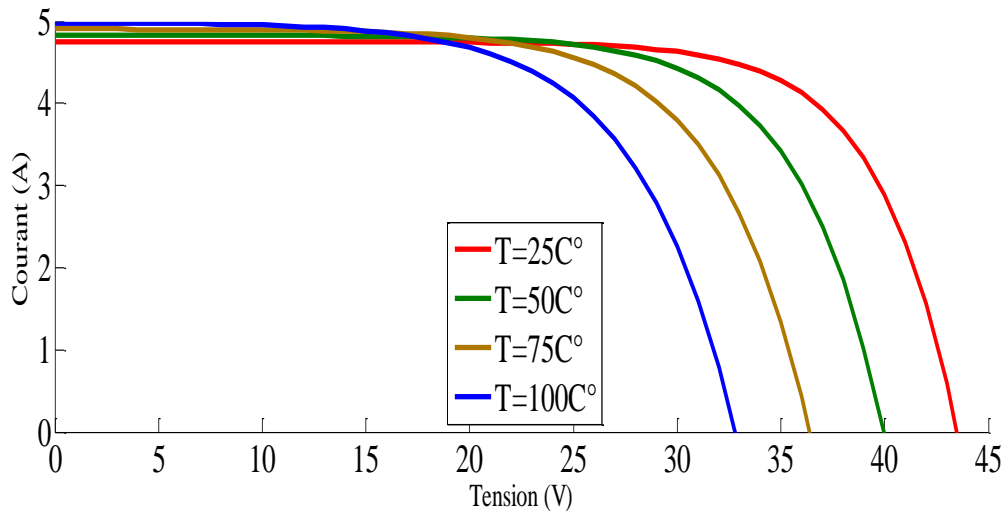


Figure (III.4) : La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température avec $G=1000$ pour un panneau (150w).

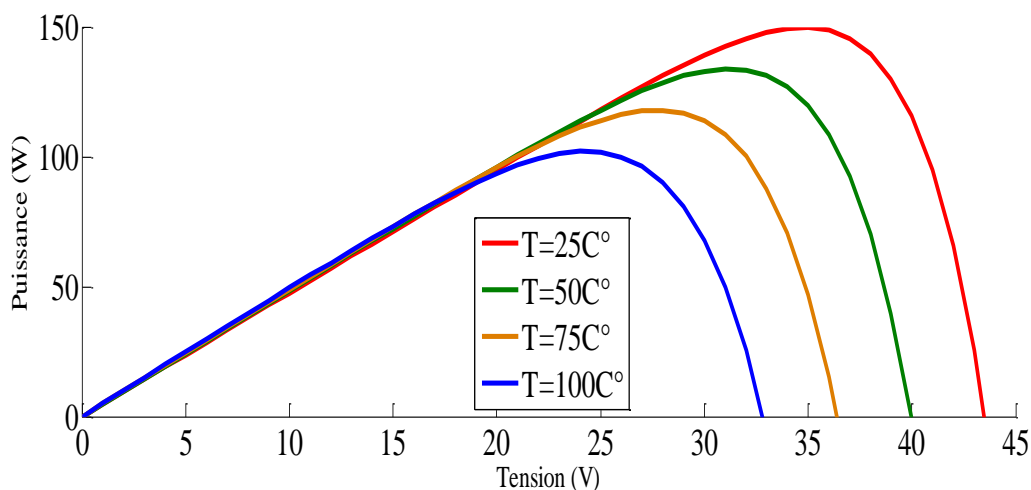


Figure (III.5) : La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température avec $G=1000$.

Pour les figures (III.4) et (III.5) Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le Courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la Température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

III.4.2. Simulation de l'association en série et parallèle

III.4.2.1 Association en série

La caractéristique d'un groupement de n_s modules solaires en série est représentée par les figures (III.6 ; III.7).

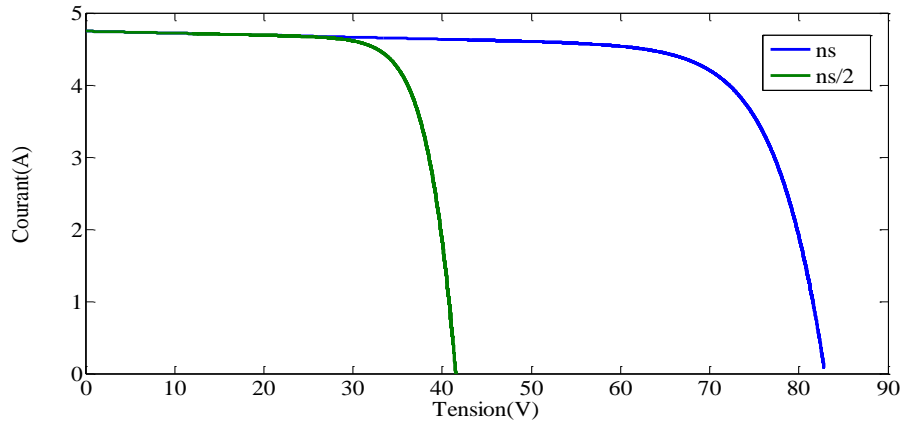


Figure (III.6) : La caractéristique $I=f(v)$ en association série de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000 \text{ w/m}^2$

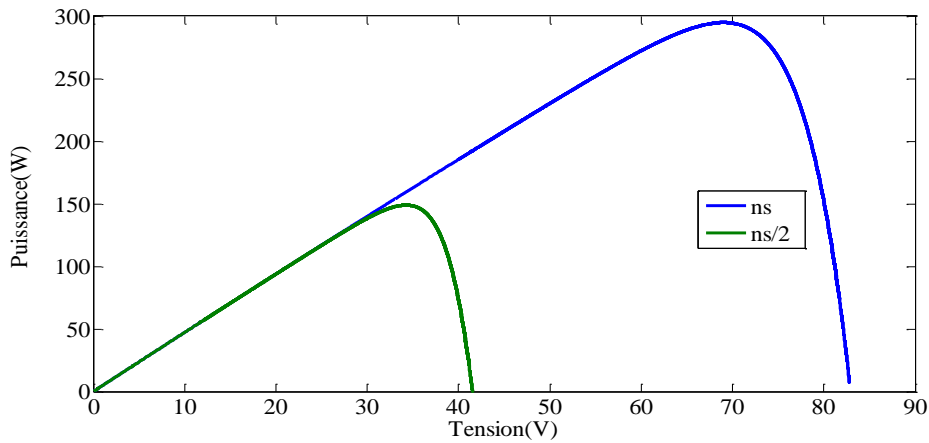


Figure (III.7) : La caractéristique $P=f(v)$ en association série de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000 \text{ w/m}^2$.

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

La figure (III.7) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques.

III.4.2.2. Association en parallèle

La caractéristique d'un groupement de N_p modules solaires en parallèle est représentée par les figures (III.8 ; III.9).

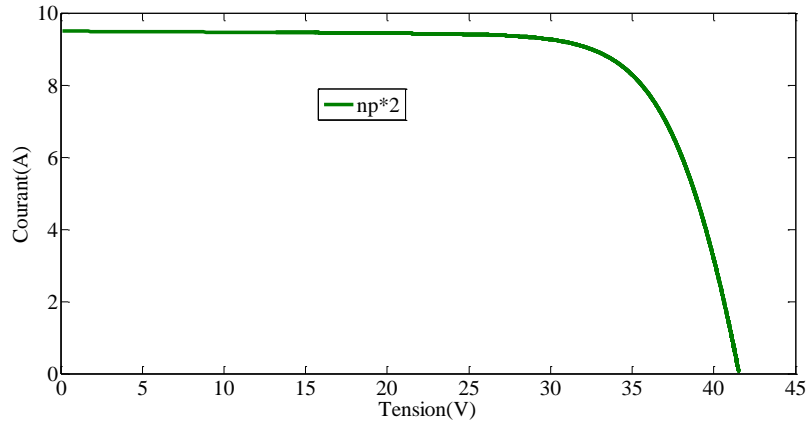


Figure (III.8) : La caractéristique $I=f(v)$ en association parallèle de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000 \text{ w/m}^2$

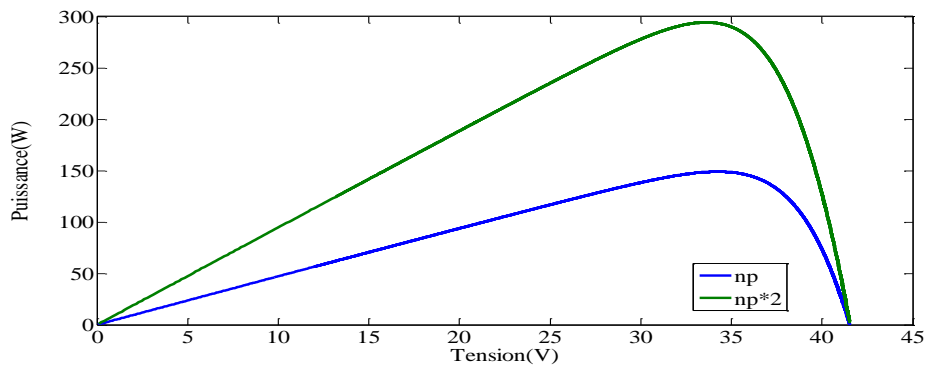


Figure (III.9) : La caractéristique $P=f(v)$ en association parallèle de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000 \text{ w/m}^2$.

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

La figure (III.9) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques.

III.4.2.3. Association série-parallèle

La caractéristique d'un groupement de N_p et N_s modules solaires en parallèle est représentée par les figures (III.10 ; III.11 ; III.12 ; III.13)

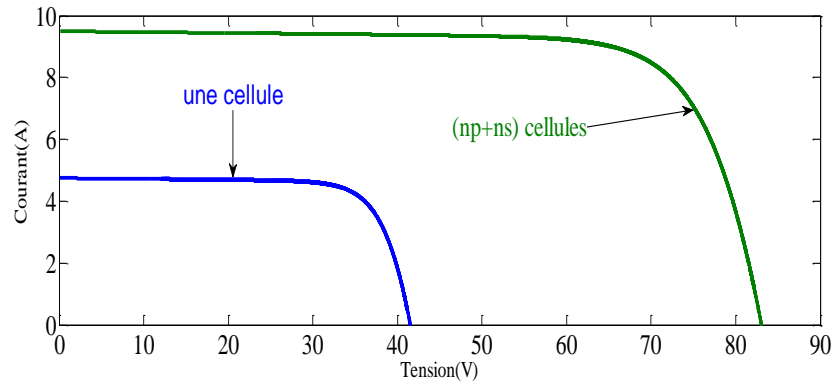


Figure (III.10) : La caractéristique $I=f(v)$ en association série-parallèle de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000 \text{ w/m}^2$.

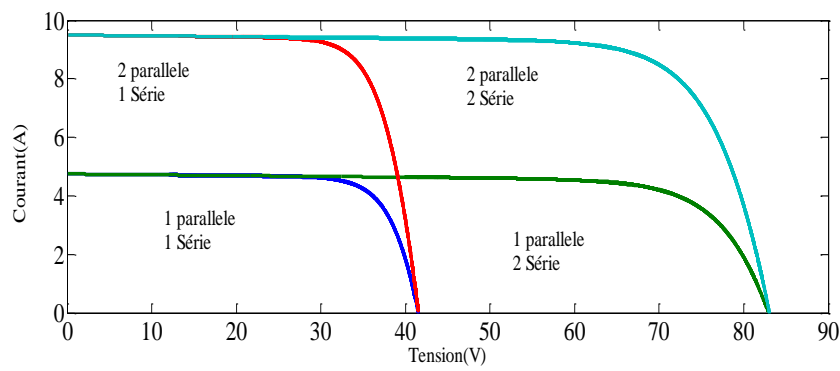


Figure (III.11) : La caractéristique $I=f(v)$ en association série-parallèle de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000 \text{ w/m}^2$.

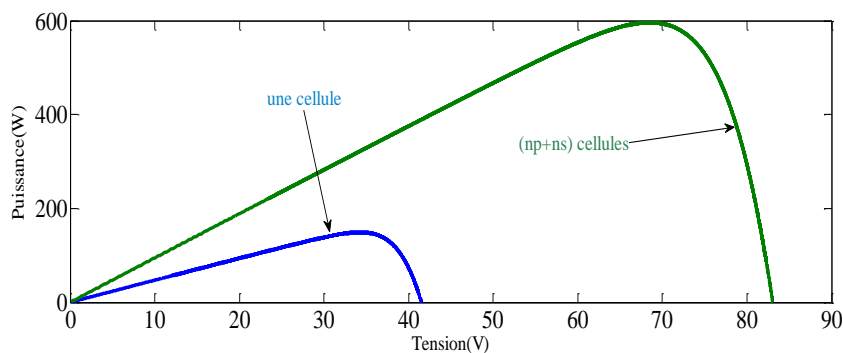


Figure (III.12) : La caractéristique $P=f(v)$ en association série-parallèle de deux modules avec $T=25C^{\circ}$ et $G=1000 \text{ w/m}^2$.

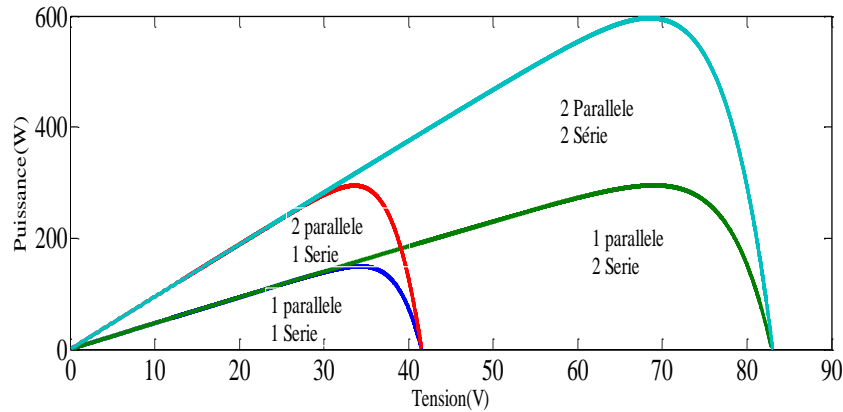


Figure (III.13) : La caractéristique $P=f(v)$ en association série-parallèle de deux modules avec $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{ w/m}^2$.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{oc} sont plus ou moins importantes (figure III.14-III.15). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes).

III.5 Simulation du système photovoltaïque

III.5.1. Programme de simulation de l'algorithme perturbation et observation P&O

La figure(III.14): présente Schéma MATLAB 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.

Dans cette simulation on a utilisé un Module photovoltaïque BP SX 150 de BP, un hacheur Boost caractérisé par : $C1= 10e-3\text{ F}$, $C2= 3e-3\text{F}$, $L= 0.006\text{H}$, $R= 0.01\text{ohm}$, on a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O et une charge $R=100\text{ ohm}$

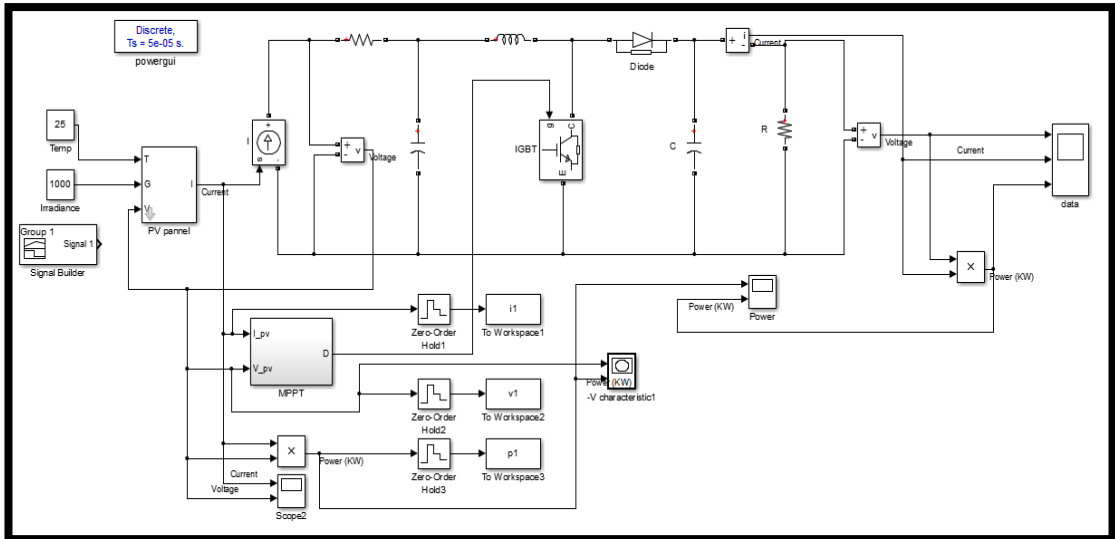


Figure (III.14): Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

III.5.2. Programme de simulation de l'algorithme perturbation et observation P&O

La figure (III.15) présente le schéma Matlab/Simulink assurant la commande MPPT du type P&O.

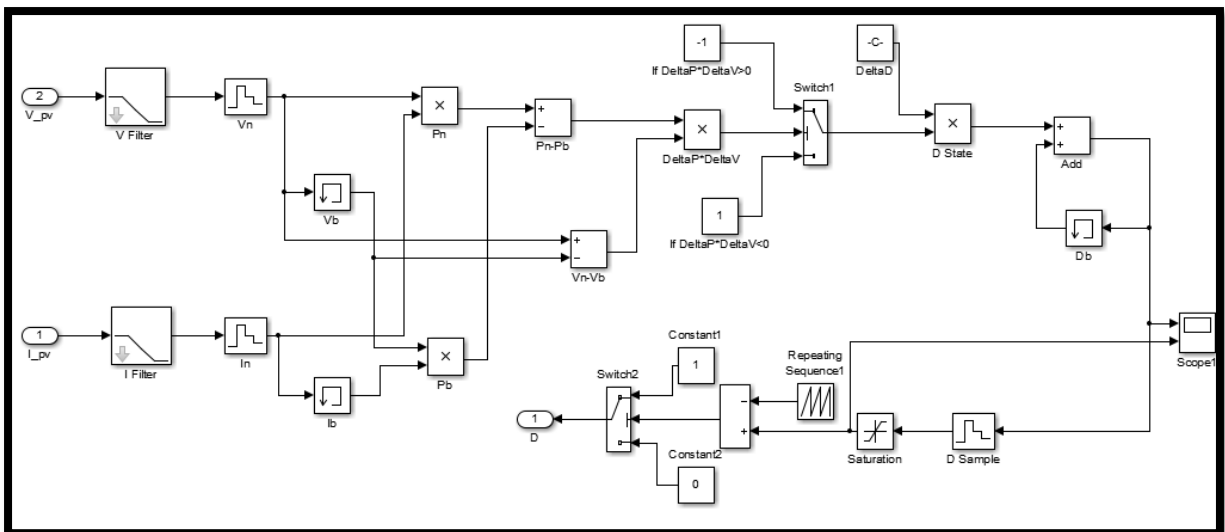


Figure (III.15) Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O).

La figure **suivante** présente allure de puissance en fonction de temps d'un système photovoltaïque (panneau 150w) commandé par un contrôleur P&O dans une température et éclairements constants ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$) :

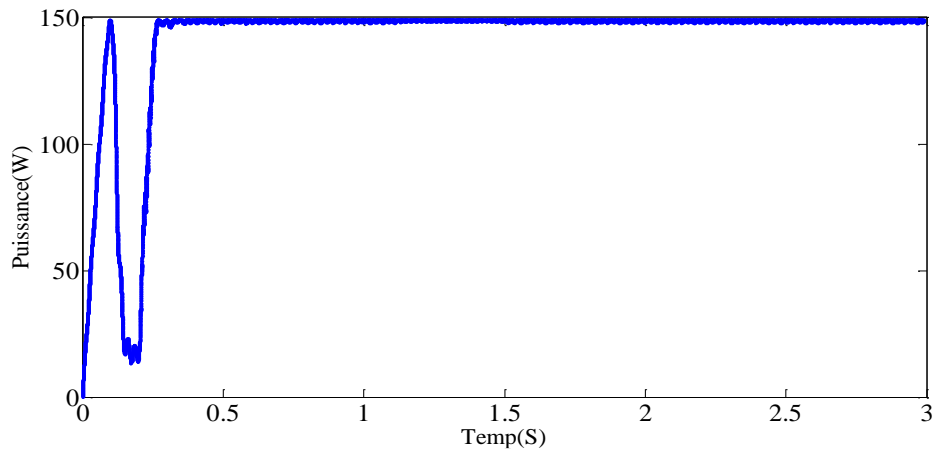


Figure (III.16): Allure de la puissance en fonction de temps pour ($T=25^{\circ}\text{C}$ $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

De la figure (III.16), On remarque que la puissance met un temps d'oscillation de (0.32s) pour se stabiliser à la valeur maximale de la puissance (150W).

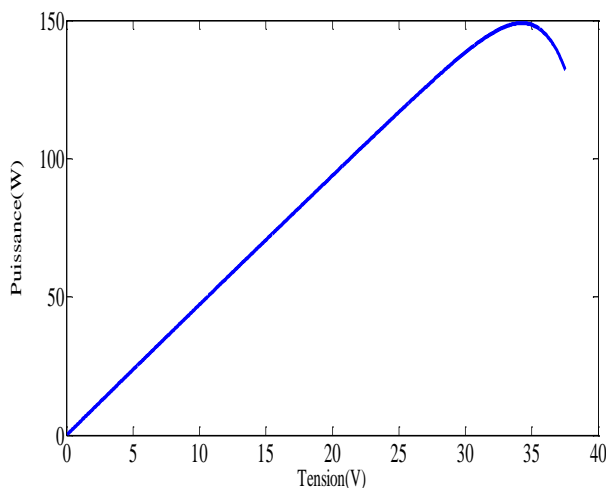


Figure (III.17): Allure de la puissance générée par le panneau photovoltaïque Pour ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$)

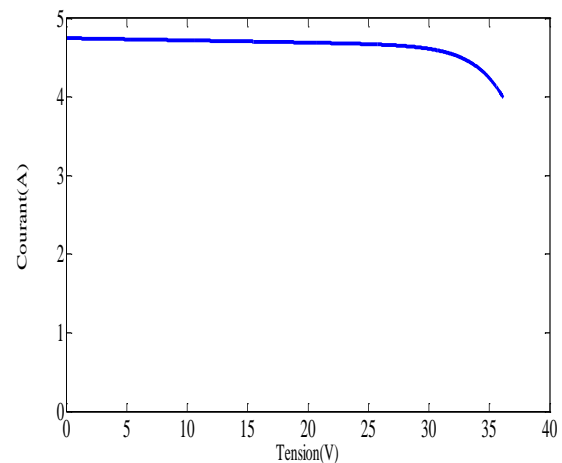


Figure (III.18): Allure de le courant en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

D'après les figure obtenus on remarque pour un rayonnement fixe la puissance oscille au tour de point maximale (PPM), c'est pareille pour la courbe de courant. Cela prouve de l'efficacité de la commande (MPPT).

Les figures **suivante** (III.19), (III.20) 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 ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500$, 800 , $1000\text{W}/\text{m}^2$) :

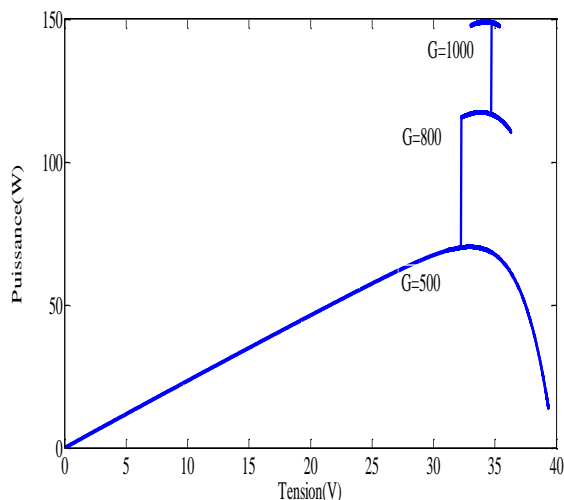


Figure (III.19): Allure de la puissance en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W/m}^2$).

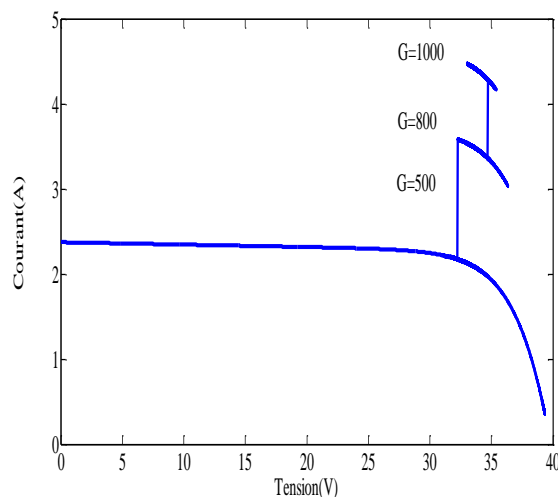


Figure (III.20): Allure de le courant en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W/m}^2$).

D'après les figures (III.19), (III.20) 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.

Les figures **suivantes** (III.21), (III.22) présentent allure de tension et la puissance en fonction de temps d'un système photovoltaïque (panneau 150w) commandé par un contrôleur P&O dans une température constante et différents éclairements ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W/m}^2$) :

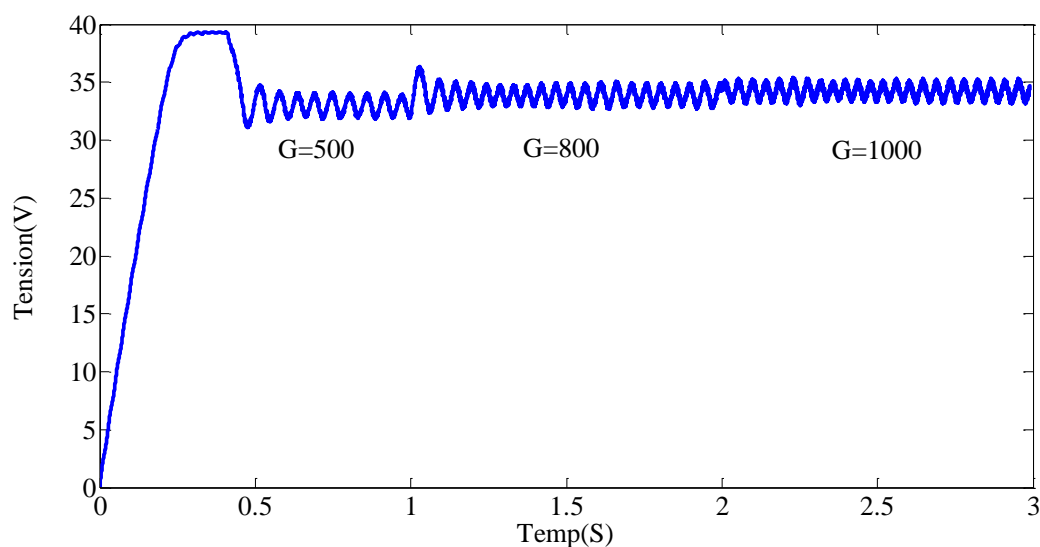


Figure (III.21): Allure de tension en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W/m}^2$).

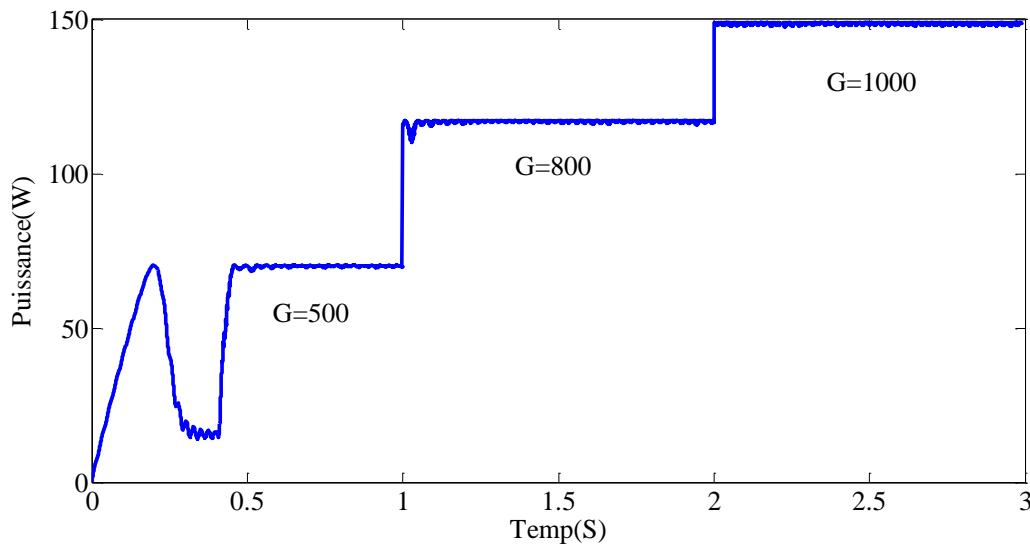


Figure (III.22): Allure de la puissance générée en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W/m}^2$).

Dans un premier temps, nous avons soumis le système à une variation de luminosité ($G=500, 800, 1000\text{W/m}^2$) à l'instant $t=1\text{s}$ avec une température fixe $T=25^{\circ}\text{C}$. Par conséquent, nous constatons dans les Figues. (III.21 ; III.22), une augmentation de la tension qui induit une diminution de la puissance, le point de fonctionnement du système s'éloigne du MPP, après 0.45s. La commande remonte le point de fonctionnement et le stabilise au tour du MPP avec une certaine oscillation qui est causée par l'algorithme de commande.

III.6. Commande MPPT par Backstepping

III.6.1. Introduction

L'idée de base de l'approche Backstepping est stabilisée le système du premier sous-système en stabilisant la fonction connue via une fonction Lyapunov sélectionnée, puis ajouter à son intégrateur d'entrée. La même procédure pour le prochain sous-système accru et ainsi de suite pour les sous-systèmes successifs à enfin atteindre une fonction globale de Lyapunov donnant globalement loi de contrôle qui stabilise le système.

La technique de Backstepping est relativement une nouvelle méthode de contrôle méthode. Il permet séquentiellement et systématiquement, par choisir une fonction de Lyapunov pour déterminer le système loi de contrôle [33].

III.7. La Commande Backstepping

Le terme backstepping signifie que l'on remonte la chaîne d'intégrateurs jusqu'à la commande, en construisant pas à pas la fonction de Lyapunov et la commande par retour

d'état. Cette méthode de backstepping est donc une méthodologie de synthèse récursive conjointe d'une fonction de Lyapunov et de la loi de commande associée [Krstic, 95], [Sepulchre, 97]. Elle met à profit les relations causales successives pour les construire de manière itérative et systématique. Avec cette méthodologie, la construction de la loi de commande de type retour d'état et de la fonction de Lyapunov associée se fait de façon systématique et en même temps. Elle transforme un problème de conception de la commande d'un système complet en une séquence de problèmes de conception pour des systèmes d'ordre inférieur (la plupart du temps scalaire). En exploitant la simplicité et la flexibilité apportées par les systèmes scalaires, le backstepping peut souvent résoudre les problèmes de stabilisation, de poursuite, et les problèmes de commande robuste dans des conditions moins restrictives que celles d'autres méthodes. Ainsi, que la méthode de linéarisation entrée-sortie exige des modèles définis et compense souvent des non-linéarités utiles, la méthode backstepping offre un choix d'outils de synthèse permettant de s'accommoder d'incertitudes et peut éviter des éliminations des non linéarités utiles pour la performance et la robustesse de la commande. Pour que la technique backstepping puisse s'appliquer, le système non linéaire doit être sous forme « strict feedback » (rétroaction stricte), ce qui constitue une restriction de l'approche : la dérivée de chaque composante du vecteur d'état doit être une fonction des composantes précédentes et dépendre additivement de la composante suivante. De plus, et contrairement au bouclage linéarisant, le backstepping offre la possibilité de conserver dans le bouclage les non linéarités stabilisantes. [34]

III.7.1. Synthèse de la commande par backstepping

Appliquer les lois fondamentales qui régissent le fonctionnement du convertisseur élévateur; le modèle moyen est atteint. Figure 5. Représente le schéma du convertisseur.

Les équations dynamiques de ce convertisseur peuvent être exprimées en les suivants

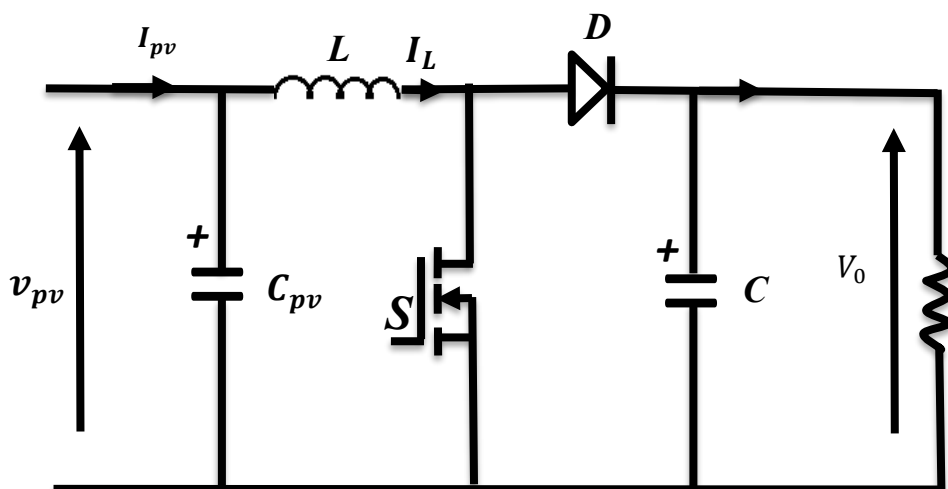


Figure.5: Convertisseur Boost DC-OC.

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{C_{pv}} i_{pv} - \frac{1}{C_{PV}} x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{L} x_1 - \frac{1}{L} (1 - \alpha) V_0 \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Ou $X=[X_1 X_2]^T=[V_{pv} I_L]^T$, et $\alpha \in [0;1]$ est un signal de commutation et M la valeur moyenne de $(1-\alpha)$

$$M=1-\alpha \quad (\text{III.2})$$

Etape 1 :

Les équations modélisant le convertisseur boost requis pour la synthèse du contrôle du **backstepping** sont indiquées dans équations (2)

La première variable d'erreur de tracking est :

$$e_1 = x_1 - v_{ref} \quad (\text{III.3})$$

Le dérivé d'erreur de **tracking** est écrit comme suit:

$$\dot{e}_1 = (\dot{x}_1 - \dot{v}_{ref}) = \frac{1}{C_{PV}} (I_{PV} - x_2) - \dot{v}_{pref} \quad (\text{III.4})$$

La fonction de **lyapunov** suivante est considérée:

$$V_1(e_1) = V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (\text{III.5})$$

La dérivée par rapport au temps en utilisant l'équation (III.4)

$$\dot{v}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 \left(\frac{1}{c_{pv}} (I_{pv} - x_2) - \dot{v}_{pvref} \right) \quad (\text{III.6})$$

Le choix judicieux $\dot{e}_1 = -k_1 e_1$ de permet d'écrire $\dot{v}_1 = -k e_1^2$ Où k est la constante positive qui représente un paramètre de conception du contrôleur de **backstepping**.

Dans (III.1), x_2 se comporte comme une entrée de commande virtuelle, pour $I_{x_2} = x_{ref}$ on peut trouver la fonction stabilisante:

$$x_{ref} = k_1 c_{pv} e_1 + I_{pv} - c_{pv} \dot{v}_{pref} \quad (\text{III.7})$$

Etape 2 :

La deuxième variable d'erreur qui représente la différence entre la variable d'état x_2 et sa valeur souhaitée x_{ref} est défini par:

$$e_2 = x_2 - x_{ref} \quad (III.8)$$

Alors les équations du système dans l'espace des erreurs (\dot{e}_2) sont: déduit:

$$\dot{x}_{ref} = k_1 c_1 \dot{e}_1 + \dot{I}_{pv} - c_{pv} \ddot{v}_{pref} \quad (III.9)$$

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{ref} = \frac{1}{L}(x_1 - Mv_0) - k_1 c_1 \dot{e}_1 - \dot{I}_{pv} + c_{pv} \dot{v}_{pref} \quad (III.10)$$

La nouvelle fonction de Lyapunov:

$$v_2 = v_1 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (III.11)$$

La dérivé peut être exprimé par:

$$\dot{v}_2 = \dot{v}_1 + e_2 \dot{e}_2 \quad (III.12)$$

$$\dot{v}_1 = -k_1 e_1^2 + e_2 \left(\frac{1}{L}(x_1 - Mv_0) - k_1 c_1 \dot{e}_1 + \dot{I}_{pv} + c_{pv} \ddot{v}_{pref} \right) \quad (III.13)$$

Dans cette étape, la commande \mathbf{M} est choisie de manière à obtenir l'expression suivante:

$$\dot{e}_2 = -k_2 e_2 = \frac{1}{L}(x_1 - Mv_0) - k_1 c_1 \dot{e}_1 - \dot{I}_{pv} + c_{pv} \ddot{v}_{pref} \quad (III.14)$$

D'où l'expression de la commande \mathbf{M} à produire par le contrôleur de **backstepping** :

$$M = \frac{L}{v_0} \left[\frac{x_1}{L} - \frac{e_1}{c_{pv}} \right] + k_2 e_2 - k_1 c_1 \dot{e}_1 - \dot{I}_{pv} - c_{pv} \ddot{v}_{pref} \quad (III.15)$$

Avec $k_2 > 0$ conduit à une dérivée négative de Lyapunov une fonction:

$$\dot{v}_2 = k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 < 0 \quad (III.16)$$

Ce qui assure la convergence des variables d'erreur (e_1 , e_2) asymptotiquement à l'origine, ce qui implique que X_1 converge asymptotiquement à l'origine V_{pvref} , extrayant ainsi la puissance maximale du générateur photovoltaïque est effectuée.[33]

III.7.2. A fin analyses et résultats et commentaires de la simulation

Examiner la validité et l'efficacité des ressources disponibles contrôleurs backstepping, des simulations sont prises pour illustrer leur performance. Le système contrôlé est un boost DC-DC convertisseur Tableau (III.2).

<i>Paramètre</i>	<i>valeur</i>
C_{pv}	3e-4F
L	2e-2H
C_{dc}	2e-4F
R	15 ohms
k1	20
k2	5

Tableau (III.2): Paramètres DC-DC et Backstepping.

Afin de vérifier les performances du backstepping contrôleur MPPT, une étude comparative entre perturb et observer P&O et backstepping est effectué, nous avons commencé tout d'abord avec l'irradiation change rapidement en trois étapes $G = 500, 800$ et 1000 w / m^2 avec maintien de la température constante à 25°C , dans les Figures (III.23 ; III.24).

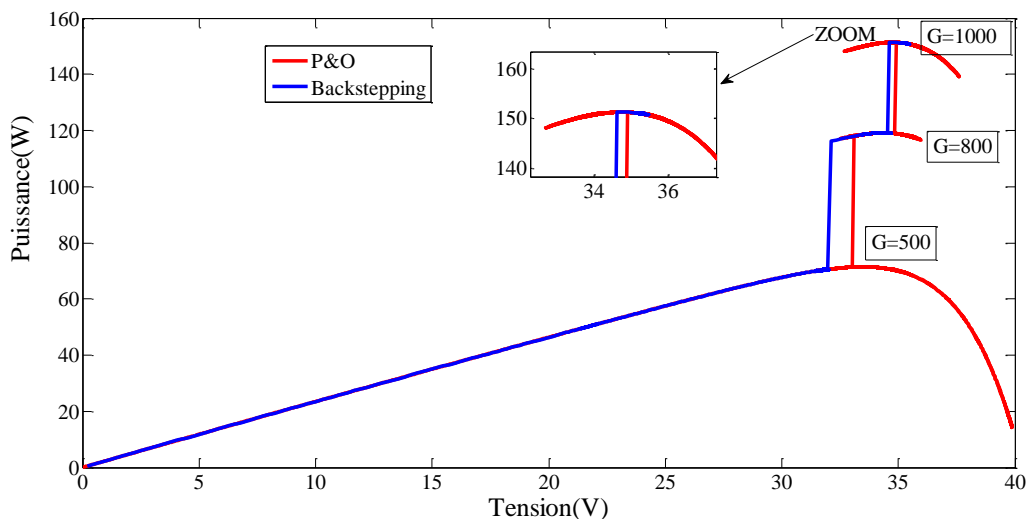


Figure (III.23): Allure de la puissance en fonction de la tension ($T=25^\circ\text{C}$, $G=500, 800, 1000 \text{ W/m}^2$).

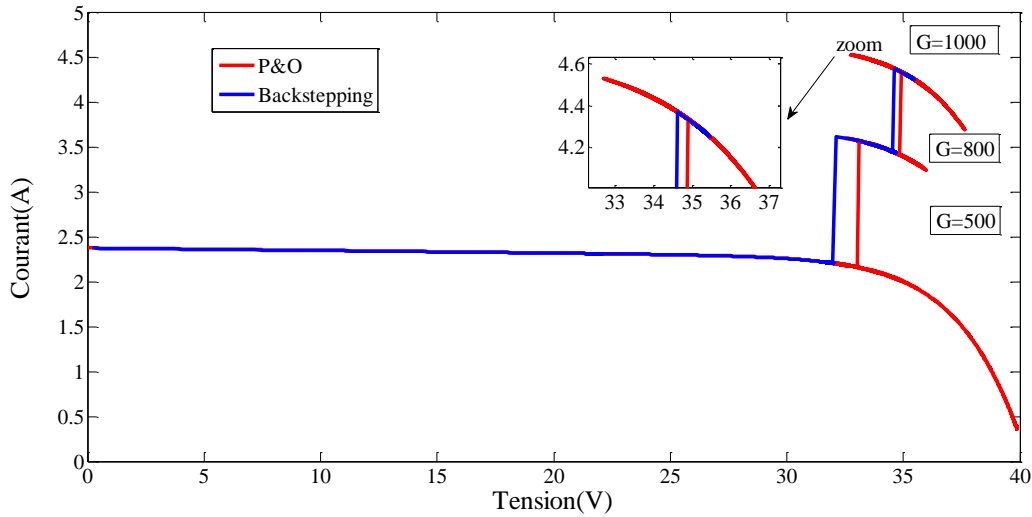


Figure (III.24): Allure de courant en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000$ W/m^2).

Les figures (III.23. III24) montrent les courbes PV et IV avec les changements d'irradiation entre le recul et P & O, les résultats montrent clairement que le recul et P & O suivent le point maximum dans les trois étapes, mais que le recul indique moins d'oscillation autour du point maximum dans les trois étapes qui est clairement dans le zoom dans les deux figures.

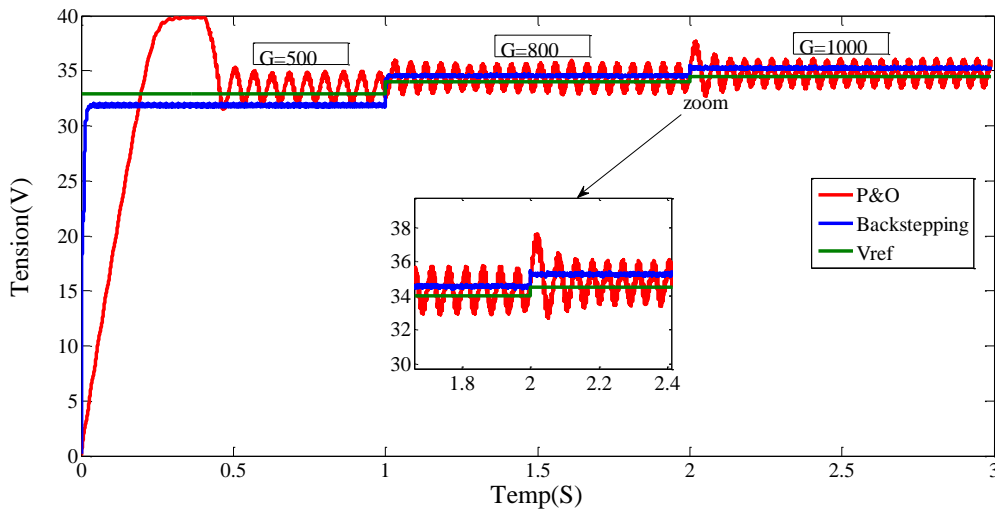


Figure (III.25): Allure de tension en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000$ W/m^2).

La figure (III.25) montre la tension de sortie du panneau photovoltaïque avec backstepping et P&O, il est absolument nécessaire que le MPPT suit toujours la référence de tension, dans ce cas le backstepping suit la référence avec une petite erreur et oscillation et temps de réponse rapide par rapport à P&O qui montre beaucoup d'oscillation et de dépassement dans chaque changement.

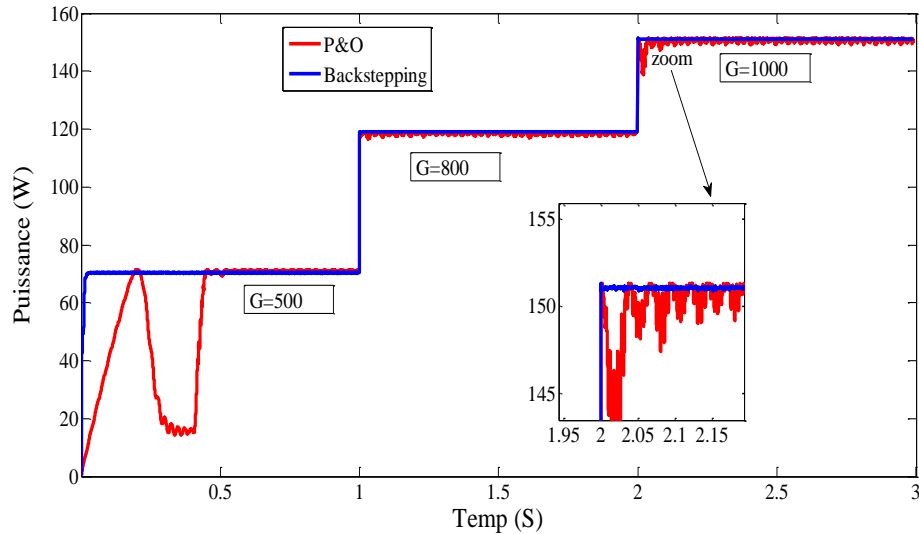


Figure (III.26): Allure de la puissance générée en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000\text{W/m}^2$).

La figure (III.26) montre que le backstepping fournit une réponse rapide temps inférieur à 15 ms pour suivre le point de puissance maximale avec une grande stabilité et moins d'oscillation par rapport à P&O qui montre beaucoup d'oscillation dans les trois étapes, Ce résultat confirme comment le backstepping peut transporter le député avec beaucoup performance.

III.8. Comparaison entre le « P&O et Backstepping »

- Pour ces deux contrôleurs, nous remarquons l'effet de l'augmentation de la puissance produite par le système PV, causée par une augmentation de l'éclairement G si la température est fixe.
- Dans les deux cas, le temps de convergence ou temps de réponse du contrôleur "Backstepping" est plus rapide que celui du contrôleur "P&O".
- Le contrôleur "P&O" présente des oscillations autour du PPM, tandis que le contrôleur "Backstepping" reste assez stable.

Discussion

L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En générale, cet algorithme dépend fortement des conditions initiales et il présente des oscillations autour de la valeur optimale. L'inconvénient majeur de cet algorithme est son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement (nuages).

L'algorithme basé sur le Backstepping est un algorithme robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations. En outre, il est caractérisé par un bon comportement en état transitoire. Cependant, l'implémentation de ce type

d'algorithme est plus complexe que les algorithmes classiques. De plus, l'efficacité de cet algorithme dépend énormément du tableau d'inférence.

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et analysé un système photovoltaïque, dont la charge est adaptée par l'intermédiaire d'un hacheur de type Boost. La régulation est assurée par deux types de commande MPPT : La commande classique "Perturb and Observ" et une commande découlant de l'intelligence artificielle de type «Backstepping».

Les résultats auxquels nous avons abouti, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer de manière considérable et efficace le rendement des installations photovoltaïques.

Les comparaisons effectuées entre les deux types de commandes confirment que l'utilisation du contrôleur « Backstepping » présente meilleure performance.

D'un autre côté, il permet d'améliorer le rendement η_{MPPT} du contrôleur MPPT ce qui a pour objectif de diminuer les fluctuations du régime transitoire. Cela augmente l'efficacité du contrôleur MPPT de type "Backstepping" et assure une nette amélioration de la stabilité autour du PPM.

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches ont conduit à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.[34].

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

En effet, pour la conception des systèmes photovoltaïques, la donnée la plus utile est rayonnement solaire reçu par le panneau photovoltaïque solaire, donne des généralités sur les systèmes PV, l'effet PV, principe de cellule PV, Ainsi, les avantages et les inconvénients. Nous avons étudiés à un convertisseur DC/DC de type buck et boost qui fournit une tension continue. Le modèle du MPPT est basé sur un convertisseur DC /DC et un algorithme de recherche de point de puissance maximal, Ainsi, approfondie sur les différents algorithmes des techniques de poursuite de point de puissance maximale basés sur contre réaction (tension courant puissance), algorithme perturbation et observation algorithme incrémentation.

Le choix du convertisseur élévateur (BOOST) après l'analyse mathématique de la différente configuration des convertisseurs DC-DC nous a facilité la tâche de développement d'un modèle de recherche du MPPT en Simulink.

On a étudié la modélisation et simulation d'un système photovoltaïque. Pour ce-là, on a étudié d'abord la modélisation du générateur PV **BP SX 150** de BP solaire par la résolution de l'équation caractéristique non linéaire d'une cellule PV.

Puis, on a représenté la structure de la commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Finalement, nous avons présenté le Backstepping et leur architecture puis nous montrons les résultats de simulation d'un système PV avec le contrôleur Backstepping-MPPT et la comparaison entre P&O et Backstepping.

Les résultats de simulation obtenue ont montré que le rendement d'un système photovoltaïque dépend essentiellement du rayonnement mais aussi les dispositifs de commande. Malgré l'efficacité de la techniques d'extraction à savoir P&O mais elles présenté quelques inconvénients (les oscillations. Améliore le temps de réponse, suivi) pour cette raison a fin d'améliorer les performances d'un système photovoltaïque nous avons

introduit le Backstepping. Les résultats obtenus par le Backstepping ont montré une meilleure efficacité.

Le travail présenté dans ce mémoire peut être amélioré par la validation expérimentale. Ainsi par la combinaison de l'intelligence artificielle.

- [1] : **R. Jimmy et al.** Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999.
- [2] : **B. Flèche & D. Delagnes**, Energie solaire photovoltaïque, juin 2007.
- 3] : **R. Badreddine et O. Souhila**, « modélisation et commande du système photovoltaïque par les réseaux de neurones » Mémoire de Master Académique 2017.
- 4]: **Dossier technique «Eolienne et photovoltaïque».**
- [5] : **K.Touafek**, "Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique", mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2005.
- [6] : <https://www.prime-energy-technics.ch/actualites/histoire-du-photovoltaïque>.
- [7] : **M.N.Mchalikh et CH.Hmada** "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau " Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [8] : **A. Fortin**, Analyse numérique pour ingénieurs, 2eme édition, Presses internationales Polytechnique, 1996.
- 9] : **O.BENSEDDIK et F.DJALOU** " Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque "Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 2012.
- [10] : **Mr. ADIL** « Création d'une entreprise d'installation des panneaux solaires» mémoire fin d'études master Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen. 2014.
- [11] : **M. Hatti**, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.
- [12] : **K.Amara**, «Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyen tension », Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, 2015.
- [13] : **M.L.Louazane** "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla "Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna 2008.
- [14] : **K. Helali** "Modélisation d'une cellule photovoltaïque Etude comparative " Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi –Ouzo 2012.
- [15] : **M.L.Louazane** "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla "Mémoire de Magister Université El Hadj LakhdarBatna 2008.

Bibliographie

- [16] : **CH. Maher** "Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque" Mémoire Master Université Sfax 2008.
- [17] : **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.
- [18] : **M. Belhadj** "Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome " Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.
- [19] : **S. M. Ait-Cheikh**, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [20] : **C.Lerouge**, Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis, Science physique, 2006.
- [21] : **M.L.Louazane** "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla "Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna 16/06/2008.
- [22] : **W.Bensaci**" Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT " Mémoire de Master Université Kasdi-Merbah-Ouargla 2012.
- [23] : **J. Labbe** « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour système photovoltaïque isolés », thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 21 décembre2006.
- [24] : **F.Chekired**, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [25] : **A.N.Sahraou**. «Étude d'une chaine de convertisseur photovoltaïque», Mémoire de magistère Université de Msila, 2010
- [26] : **W. Boucheritte**, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau», Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mohamed Khider, Biskra, 2013.
- [27] : **M.S.Fateh**. Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011. , 2008.
- [28] : **K. Merabet**, «commande MU d'un onduleur triphasé basée la dispersion de la tension triphasée », Mémoire de Magister en Génie Electrique, Université du Québec ,2011.

Bibliographie

- [29] : **M. Hatti**, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.
- [30]: **Trishan Efram**, Student Member, IEEE, and Patrick L. Chapman, Senior member, IEEE. Compariason Photovoltaic array maximum power point tracking techniques Techniques", iee transactions on energy conversion, 2006
- [31] : **Bernard**, énergie solaire, calculs et optimisation, édition 2004
- [32]: **M.Sabir, B.Assam, Z.Abderrahim** « Backstepping MPPT for photovoltaic system ».Faculty de Technology University de M'sila ,Algeria
- [33]:**J.M. Enrique** , E. Durán, M. Sidrach-de-Cardona, J.M. Andújar , "Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies", *Solar Energy*, Vol. 81, Issue 1, 2007, pp. 31-38.
- [34] :**B. Jean-Luc**, "Réseau de Neurones Artificiels pour la classification des fontes Arabes et la distinction entre la langue Arabe et les langues Latines", Thèse de Doctorat, Université de Fribourg, Suisse, Juin 2003.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME

DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE : RESEAUX ELECTRIQUES

Année Universitaire : 2018 / 2019

Proposé par : **Pr. MESSALTI Sabir**

Mr. BOUDIA ASSAM

Présenté par : - **ROUBI HOUDHEYFA**

- **AIB HICHEM**

Thème :

**Amélioration de la commande MPPT d'un système
Photovoltaïque**

ملخص :

في هذا العمل قدمنا في البداية عموميات حول الطاقة الشمسية, كما قمنا بمحاكات للوح شمسي ذو استطاعة (150 واط) واستعملنا بعدة تقنيات مراقبة مثل تقنية الاضطراب والمراقبة التي لاحظنا أن لديها سلبيات تحتاج الى تحسين ولهذا قدمنا الباك ستيبينغ لتحسين هذه السلبيات وفي الاخير عملنا مقارنة بين التقنيتين.
كلمات مفتاحية: نظام الطاقة الشمسية , لوغاريتمية الاضطراب والمراقبة , الباك ستيبينغ

Résumé :

Dans ce document, nous avons présenté en premier temps généralités sur le système PV, puis nous avons procédé la modélisation du panneau PV de (150W) et nous avons utilisé plusieurs techniques du contrôle de MPPT à savoir P&O et nous avons constaté qu'il présente que cette méthode présente toujours des inconvénients nécessitent des améliorations pour cela nous avons introduire le backstepping afin de limiter les inconvénients de la méthode P&O, Finalement, nous avons fait une comparaison entre les deux techniques présentées et analysées. Les résultats de simulation obtenus ont montré la supériorité de la méthode Backstepping par rapport à la méthode P&O.

Mots clés : Système photovoltaïque, MPPT, l'algorithme perturbation et observation (P&O), backstepping.

N° d'ordre :