RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE



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

Énergie renouvelable

Option : Énergie renouvelable en Électrotechnique

Intitulé :

MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE ADAPTÉ PAR LA COMMANDE MPPT

Présenté par :

- Ameri Zahra
- Chaib Imane
- Belhachemi Ahmed

Soutenu le : ... 30/06/2020..... devant le Jury :

Dr. Habchi Yacine	MAA	Centre Universitaire Naâma	Président
Dr. Khessam Medjdoub	MCB	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
Dr. Brahimi Mohamed	MAA	Centre Universitaire Naâma	Examinateur

Naama – Algérie - 2020



Tout d'abord, je tiens à dédier ce mémoire : A mon très cher mère, ma fierté et mon bonheur qui m'a donnée le désir d'apprendre et la savoir-vivre en souhaitant qu'elle soit au paradis et qu'elle soit fier de moi . A mon très cher père, l'homme qui a récolté des épines sur mon chemin pour ouvrir la voie de la connaissance. A mes très chers frères « Salem , bachir , saddam hocin», Mes sœurs « Fadila, fatiha » et toute ma famille. A tous mes amis et surtouts « Imen , kenza , Afaf » «Houdaifa Derbale ». A tous mes collègues de promotion et à tous ceux qui m'ont aidée, de prés ou de loin, à accomplir ce travail

Amori Iahra

Dédicace

Tout d'abord, je tiens à dédier ce mémoire :

A celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse qui s'est sacrifiée pour mon bonheur st ma rassise à ma mère. A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui Reille tout au long de ma vie à m'encourage , à me donner l'aie et à me protège que Allah les protège et les gardes. A celles qui m'ont toujours aidés, écoutés, soutenues et encourages tout au long de mon parcours celle qui ont toujours été présents pour moi, chaib Marwa et mon frère. A touts mes chères amies surtouts « Zahra , kenza , Afaf », «Amine Laradii», et mes collègues de centre universitaire de travail. A tout ceux qui de prés on de loin m'a aidé a réaliser ce travail.

Chaib Iman



Tout d'abord, je tiens à dédier ce mémoire :

A celle qui m'a donné la vie , le symbole de tendresse qui s'est sacrifiée pour mon bonheur st ma rassise à ma mère. A mon père , école de mon enfance , qui a été mon ombre durant toutes les années des études , et qui Reille tout au long de ma vie à m'encourage , à me donner l'aie et à me protège ,que Allah

les protège et les gardes. A celles qui m'ont toujours aidés , écoutés , soutenues et encourages tout au long de mon parcours celle qui ont toujours été présents pour moi , mes sœurs et mon frère .

A touts mes chères amies, et mes collègues de centre universitaire de travail. A tout ceux qui de prés on de loin m'a

aidé a réaliser ce travail.

Ш

Belhachmi ahmed

Remerciement

Nous remercions en premier lieu Allah puissant pour m'avoir donné la force, le courage, et la volonté d'accomplir ce travail. Nous tiens avant tout à exprimer ma profonde gratitude à Dr Khassam Medjedoub, qui a accepté de m'encadrer, et pour sa disponibilité et son suivi sérieux de ce travail, et avoir aidé par ses idées et ses conseils durant toutes les étapes de réalisation de ce travail. Nous remercions vivement tout des membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Nous exprimons aussi ma gratitude à mes collègues du centre universitaire, pour leur soutien et leur aide surtout les membres de l'équipe de formation, je remercie spécialement mes collègues Afaf Touil, Benbrahim Kenza pour leur aide.

Résumé :

La connexion entre un générateur photovoltaïque (GPV) et une charge de type continu reste encore un sujet d'étude. L'adaptation d'impédance entre un générateur PV et une charge de type continu est un problème technologique que signifie essentiellement le transfert du maximum de puissance du générateur PV à la charge. Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de la chaine de conversion photovoltaïque.

L'étude et la simulation des éléments de cette chaine ont montré que l'élément principal de la chaine, le générateur photovoltaïque GPV, ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. Ainsi, afin de poursuivre le point de puissance maximale, l'insertion d'un étage d'adaptation, entre le GPV et la charge est nécessaire. Cet étage a été réalisé dans notre cas en utilisant un convertisseur DC/DC Boost et l'algorithme MPPT (P&O) et INC.

Mots clés : Générateur PV – Convertisseur survolteur – Commande MPPT — Simulation – Algorithme (P&O) et INC .

الملخص لا تزال العلاقة بين المولد الكهروضوئي (GPV) وحمل النوع المستمر محل دراسة. مطابقة الممانعة بين المولد الكهروضوئي والحمل المستمر هي مشكلة تكنولوجية تعني في الأساس نقل الطاقة القصوى من المولد الكهروضوئي إلى الحمل. يتعلق العمل المقدم في هذه الرسالة بدراسة سلسلة التحويل الكهروضوئي. أظهرت دراسة ومحاكاة عناصر هذه السلسلة أن العنصر الرئيسي للسلسلة المولد الكهروضوئي GPV ، يمكن أن يوفر فقط أقصى طاقة لقيم معينة للتيار والجهد. وبالتالي ، من أجل مواصلة نقطة القوة القصوى ، من الضروري إدخال مرحلة التكيف بين GPV والحمل. تم تحقيق هذه المرحلة في حالتنا باستخدام محول DC Boost / DC وخوارزمية MPPT) و MPT. الكلمات المفتاحية : المولد PV - محول تقوية - تحكم MPPT - محاكاة -. خوارزمية MPPT (O&Qو NP)

Abstract :

The connection between a photovoltaic generator (GPV) and a continuous type load is still a subject of study. The impedance matching between a PV generator and a DC load is a technological problem that essentially means transferring the maximum power from the PV generator to the load. The work presented in this thesis concerns the study of the photovoltaic conversion chain. The study and the simulation of the elements of this chain showed that the main element of the chain, the photovoltaic generator GPV, can deliver a maximum power only for particular values of the current and the voltage. Thus, in order to find the point of maximum power, the insertion of an adaptation stage between the GPV and the load is necessary. This stage was realized in our case using a Boost DC / DC converter and the MPPT (P & O), INC algorithm.

Keywords : PV generator - Booster converter - MPPT control - - Simulation - MPPT (P & O), INC algorithm.



Dédicace	Ι
Remerciement	IV
Résumé	V
Sommaire	VI
Liste des Figures	Х
Liste des tableaux	XIII
Liste des symboles	XIV
Liste des abréviations	XV

Introduction Générale

01

CHAPITRE 1 : Généralité sur les systèmes photovoltaïque

I.1 Introduction	02
I.2 Historique	02
I.3 Energie renouvelable en Algérie	03
I.4 Potentiel solaire en Algérie	04
I.5 Généralités sur le soleil	05
I.5.1 Rayonnement solaire	05
I.5.1.1 Rayonnement direct	06
I.5.1.2 Rayonnement diffus	06
I.5.1.3 Rayonnement solaire réfléchi	06
I.5.1.4 Rayonnement global	07
I.5.2 Energie solaire	07
I.5.3 Spectre du rayonnement	07
I.6 Cellule photovoltaïque	08
I.6.1 Cellule solaire	08
I.6.2 Effet photovoltaïque	09
I.6.3 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	11

I.6.4 Rendement énergétique	11
I.6.5 Facteur de forme	11
I.6.6 Rappel sur les propriétés des semi-conducteurs	12
I.6.6.1 Semi-conducteur	12
I.6.6.2 Dopage de silicium	12
I.6.6.2.1 Dopage de type N	12
I.6.6.2.2 Dopage de type P	13
I.6.6.3 Formation de la jonction PN	13
I.6.7 Différents types de cellule solaire	14
I.6.7.1 Silicium monocristallin	14
I.6.7.2 Silicium poly cristallin	14
I.6.7.3 Silicium amorphe	15
I.6.7.4 Cellule Tandem	15
I.6.7.5 Cellule multi-jonction	16
I.7 Générateur photovoltaïque	16
I.7.1 Zones de fonctionnement de module solaire	17
I.7.2 Association des modules photovoltaïques	18
I.7.2.1 En série	18
I.7.2.2 En parallèle	19
I.7.2.3 Association mixte (série/parallèle)	20
I.8 Les systèmes photovoltaïques	21
I.8.1 Définition	21
I.8.2 Types d'un système photovoltaïque	21
I.8.2.1 Système autonome	21
I.8.2.1.1 Système autonome sans batterie	21
I.8.2.1.2 Système autonome avec batterie	22
I.8.2.2 Système hybride	22
I.8.2.3 Système raccordé au réseau électrique	23
I.8.2.3.1 Injection de la totalité de la production	23
I.8.2.3.2 Injection de surplus de production	23
I.8.3 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques	24
I.8.3.1 Avantages	24
I.8.3.2 Inconvénients	24
I.9 Conclusion	24

CHAPITRE 2 : Modélisation et simulation des éléments d'un système photovoltaïque

II.1 Introduction	25
II.2 Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque	25
II.2.1 Modélisation d'un générateur photovoltaïque	25
II.2.1.1 Cas d'une cellule idéale	25
II.2.1.2 Cas d'une cellule réelle (5P)	26
II.2.1.2.1 Aves résistance shunt	26
II.2.1.2.2 Sans résistance shunt	28
II.2.2 Simulation d'un générateur photovoltaïque	29
II.2.2.1 Caractéristique courant- tension	30
II.2.2.2 Caractéristique puissance- tension	31
II.2.3 Effets climatiques sur le générateur PV	32
II.2.3.1 Influence de la température sur le générateur	32
II.2.3.1.1 Caractéristique (I-V)	32
II.2.3.1.2 Caractéristique (P-V)	32
II.2.3.2 Influence de l'éclairement sur le générateur	33
II.2.3.2.1 Caractéristique (I-V)	33
II.2.3.2.2 Caractéristique (P-V)	34
II.3 Etage d'Adaptation entre un générateur PV et une charge	34
II.4 Modélisation et simulation du convertisseur de puissance BOOST	35
II.4.1 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	35
II.4.1.1 Hacheur dévolteur (Buck)	36
II.4.1.2 Hacheur dévolteur-survolteur	37
II.4.1.3 Hacheur survolteur (Boost)	38
II.4.2 Simulation du convertisseur de puissance (Boost)	39
II.5 Conclusion	41

CHAPITRE 3 : Poursuite du point de puissance maximale

III.1 Introduction	42
III.2 Principe de la commande MPPT	42
III.3 Techniques de commande MPPT	43
III.3.1 Les méthodes indirectes	43
III.3.2 Les méthodes directes	44
III.4 Méthode de perturbation et observation (P&O)	44
III.4.1 Avantages et Inconvénients de P&O	46
III.5 Méthode d'incrémentation de conductance	46
III.5.1 Avantages et Inconvénients d'incrémentation de conductance	49
III.6 Simulation et résultats	49
III.6.1 Système photovoltaïque proposée	49
III.6.2 Simulation de système photovoltaïque avec la commande P&O	50
III.6.3 Simulation de système photovoltaïque avec la commande INC	54
III.6.4 Comparaison	58
III.7 Conclusion	58
Conclusion Générale	59
Références bibliographiques	60
Annexes	65

CHAPITRE 1 : Généralité sur les systèmes photovoltaïque

Figure (I.1) :	La moyenne annuelle de l'irradiation globale en Algérie	05
Figure (I.2) :	Composants du rayonnement solaire	06
Figure (I.3) :	Composante du rayonnement global sur un plan horizontal	07
Figure (I.4) :	Le spectre solaire hors atmosphère	08
Figure (I.5) :	Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant de silicium comme	
	matériau PV (présence d'une jonction PN)	09
Figure (I.6) :	Principe de la conversion photovoltaïque	10
Figure (I.7) :	Dopage de type N	13
Figure (I.8) :	Dopage de type P	13
Figure (I.9) :	Cellule monocristalline	14
Figure (I.10) :	Cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin	14
Figure (I.11) :	Cellule photovoltaïque en silicium amorphe	15
Figure (I.12) :	Cellule photovoltaïque Tandem	16
Figure (I.13) :	Cellule photovoltaïque multi jonction	16
Figure (I.14) :	Composants d'un GPV	17
Figure (I.15) :	Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C	18
Figure (I.16) :	Caractéristique résultante du regroupement de Ns cellules en série	19
Figure (I.17) :	Caractéristique résultante du regroupement de N _p cellules en parallèle	20
Figure (I.18) :	Connexions mixtes des modules photovoltaïques sur la	
	caractéristique I(V)	20
Figure (I.19) :	Exemple d'un système PV autonome sans batterie	22
Figure (I.20) :	Exemple d'un système PV autonome avec batterie	22
Figure (I.21) :	Exemple d'un système PV hybride	23

CHAPITRE 2 : Modélisation et simulation des éléments d'un système photovoltaïque

Figure (II.1) :	Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque	25
Figure (II.2) :	Schéma équivalent d'une cellule solaire	26
Figure (II.3) :	Schéma équivalent d'une cellule solaire sans résistance shunt	28
Figure (II.4) :	Schéma bloc de générateur photovoltaïque	29
Figure (II.5) :	Caractéristique I(V) d'un générateur sans résistance shunt	30
Figure (II.6) :	Caractéristique I(V) d'un générateur avec résistance shunt	30
Figure (II.7) :	Caractéristique P(V) d'un générateur sans résistance shunt	31
Figure (II.8) :	Caractéristique P(V) d'un générateur avec résistance shunt	31
Figure (II.9) :	Caractéristique I(V) pour différentes températures (G=1000W/m ²)	
	sans résistance shunt	32
Figure (II.10) :	Caractéristique P(V) pour différentes températures (G=1000W/m ²)	
	sans résistance shunt	32
Figure (II.11) :	Caractéristique I(V) pour différentes niveaux d'éclairement	
	(T=25°C) sans résistance shunt	33
Figure (II.12) :	Caractéristique P(V) pour différentes niveaux d'éclairement	
	(T=25°C) sans résistance shunt	34
Figure (II.13) :	Etage d'adaptation entre un GPV et une charge	35
Figure (II.14) :	Convertisseurs DC-DC	35
Figure (II.15) :	Circuit d'un hacheur série	37
Figure (II.16) :	Convertisseur dévolteur-survolteur	37
Figure (II.17) :	Schéma de principe d'un convertisseur Boost	38
Figure (II.18) :	Schémas équivalents du hacheur survolteur K fermé	38
Figure (II.19) :	Schémas équivalents du hacheur survolteur K ouvert	38
Figure (II.20) :	Schéma de simulation du hacheur survolteur	39
Figure (II.21) :	Tension de sortie du hacheur survolteur	40
Figure (II.22) :	Courant de sortie du hacheur survolteur	40
Figure (II.23) :	Puissance de sortie du hacheur survolteur	41

CHAPITRE 3 : Poursuite du point de puissance maximale

Figure (III.I): Frincipe general d'une commande MPP1	Figure (III.1) :	Principe général d'une commande MPPT	42
---	------------------	--------------------------------------	----

Figure (III.2) :	Caractéristique puissance-tension du panneau PV	43	
Figure (III.3) :	Caractéristique P _{PV} (V _{PV}) 4		
Figure (III.4) :	Organigramme de la méthode P&O	45	
Figure (III.5) :	Modèle Simulink de l'algorithme P&O	46	
Figure (III.6) :	Schéma bloc d'algorithme P&O	46	
Figure (III.7) :	Signe $\frac{dP}{dV}$ de pour différentes zones de fonctionnement	47	
Figure (III.8) :	Algorithme d'incrémentation de la conductance	48	
Figure (III.9) :	Modèle Simulink de l'algorithme INC	48	
Figure (III.10) :	Schéma bloc d'algorithme INC	49	
Figure (III.11) :	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec		
	convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC)	50	
Figure (III.12) :	Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque		
	avec la commande MPPT (P&O)	50	
Figure (III.13) :	Pulsation de Mosfet	51	
Figure (III.14) :	Tension générée par la GPV pour G=1000W/m ² et T=25°C	51	
Figure (III.15) :	Tension de sortie du système pour G=1000W/m ² et T=25°C	51	
Figure (III.16) :	Courant de sortie du système pour G=1000W/m ² et T=25°C	52	
Figure (III.17) :	Puissance d'entrée et sortie du système pour G=1000W/m ² et		
	T=25°C	52	
Figure (III.18) :	Puissance d'entrée et sortie du système pour G=1000W/m ² et		
	différentes Température [0 25 50 75 100]	53	
Figure (III.19) :	Puissance d'entrée et sortie du système pour T= 25C et		
	différentes irradiation [1000 800 600 400 200]	53	
Figure (III.20) :	Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque		
	avec la commande MPPT (INC)	54	
Figure (III.21) :	Tension générée par la GPV pour G=1000W/m ² et T=25°C	55	
Figure (III.22) :	Tension de sortie du système pour G=1000W/m ² et T=25°C	55	
Figure (III.23) :	Courant de sortie du système pour G=1000W/m ² et T=25°C	56	
Figure (III.24) :	Puissance d'entrée et sortie du système pour G=1000W/m ² et		
	T=25°C	56	
Figure (III.25) :	Puissance d'entrée et sortie du système pour G=1000W/m ² et		
	différentes Température [0 25 50 75 100]	57	
Figure (III.26) :	Puissance d'entrée et sortie du système pour T= 25C et		
	différentes irradiation [1000 800 600 400 200]	57	



CHAPITRE 1 : Généralité sur les systèmes photovoltaïque

Tableau (I.1) : Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie04

CHAPITRE 2 : Modélisation et simulation des éléments d'un système photovoltaïque

Tableau (II.1) : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX60	
Dans les conditions standards «CST»	29
Tableau (II.2) : Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC	36

Liste des Symboles

h	Constante de Planck	6.62*10 ⁻³⁴ Js ⁻¹
С	Vitesse de propagation	3*10 ⁸ ms ⁻¹
FF	Facteur de forme	
η	Rendement énergétique	
Vt	Tension thermique	V
Vco	Tension à circuit ouvert	V
Isc, Icc	Courant de court circuit	А
Vopt	Tension optimal	V
Iopt	Courant optimal	А
Icell	Courant délivré par la photopile	А
I _{ph}	Photo courant	А
Id	Courant de la diode	А
Isat	Courant de saturation	А
I _{Rsh}	Courant shunt	А
A,B	facteur d'idéalité	
Pmax	Puissance maximal	W
Т	Température ambiant	Kelvin
Tref	Température de référence	298.15 kelvin
G	Irradiation	W/m^2
Gref	Irradiation de référence	1000 W/m^2
Ns	Nombre de cellule en série	
NP	Nombre de cellule en parallèle	
Eg	Energie de bonde gap	1.12 eV
Ki	Coefficient de température du court circuit	A/K
K	Constant de Boltzman	1.38*10 ⁻²³ J/K
q	Charge de l'électron	$1.6*10^{-19}$ C
Rs	Résistance série	Ω
R _{sh}	Résistance shunt	Ω
D	Rapport cyclique	

Liste des abréviations

PV	Photovoltaïque.		
GPV	Générateur Photovoltaïque		
I-V	Courant-Tension		
P-V	Puissance-Tension		
MPPT	Poursuite du point de puissance maximale (Maximum		
	Power Point Tracking		
DC-DC	Continue-Continue		
DS	Diamètre de soleil		
Dt	Diamètre de la terre		
Lts	Distance moyenne soleil- terre		
Ε	Énergie du photon.		
Н	Constante de Planck		
С	Vitesse de propagation		
V	Longueur d'onde		
UV	Ultraviolet		
IR	Infrarouge		
CuO	Oxyde cuivreux		
Se	Sélénium		
Si	Silicium		
GaAs	Arséniure de gallium		
Ν	Couche avec porteurs des charges libres négatives		
Р	Couche avec porteurs des charges libres positives		
К	Couche conductrice		
MOSFET	Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor		
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor		
CST	Conditions de Test Standard		
P&O	Perturbation et Observation		
BV	Bande de valence		
BC	Bande de conduction		
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion		

DC-AC	Continue-Alternatif
PWM	Pulse Width Modulation
FS	Fréquence de commutation
α	Rapport cyclique des impulsions qui commandent
	l'interrupteur
PPM	point de puissance maximale
Gds	Sulfure de cadmium
Cu ₂ S	Sulfure de cuivre



L'énergie solaire est la source d'énergie la plus encourageante (gratuite) et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est le résultat d'une transformation directe de la lumière du soleil en électricité au moyen des cellules photovoltaïque. Elles sont essentiellement constituées d'une jonction PN. Les cellules peuvent être groupées pour former des panneaux. Les panneaux peuvent être regroupés pour former des champs photovoltaïques. Le terme panneau est habituellement utilisé pour décrire un système photovoltaïque (avec plusieurs cellules connectées en série et / ou parallèle).

Dans la plupart des systèmes de production d'énergie photovoltaïque, on trouve une technique ou un algorithme particulier appelé « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) qui se traduit par poursuite du point de puissance maximale.

Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique [commande MPPT (perturbation et observation) et (incrémentation la conductance)] .L'objectif de ce travail est de contribuer à une meilleure compréhension des performances de convertisseur DC-DC adapté par la commande numérique lors qu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peu utiliser comme un générateur d'électricité.

En plus d'une introduction générale et une conclusion générale, qui résume notre étude, le présent travail est subdivisé en trois chapitres organisés comme suit :

Dans le premier chapitre nous avons vu des notions sur l'énergie et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que les différents types de Cellule, Ensuite, nous avons abordé les différents groupements possibles des cellules. (GPV) et défini son rendement, le Facteur de forme et différentes systèmes photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque, Ensuite nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'un générateur photovoltaïque (composé de 36 cellules connectées en série) dans les conditions standard (G=1000 W/m² T=25°C). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la générateur PV, ainsi L'étude des convertisseurs DC-DC (hacheur série) et faire leur simulation.

L'étude commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale sera l'objet du dernier chapitre.

CHAPITRE 1 :



I.1.Introduction

Les énergies renouvelables sont issues des phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires **[1]**. Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque **[2][3]**.

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

En effet le mot "**photovoltaïque** " vient du grec " **photo** " qui signifie lumière et de " **voltaïque** " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité , alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité » [4].

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses caractéristiques ainsi le générateur solaire photovoltaïque.

I.2. Historique

Bien que les bases théorique de l'effet photovoltaïque fussent connues depuis le début du siècle ; ce n'est qu'à partir de **1954**, dans les laboratoires de la Bell Téléphone à **New Jersey**, que la première cellule ayant un rendement raisonnable a été mise au point. Depuis la deuxième moitié du siècle précédent, le processus de purification de monocristaux de silicium a émergé.

En 1956 Loferski publiait différentes tables de conversion de rendement photovoltaïque pour tous les matériaux semi-conducteur. Puis, c'est au début des années 70 que l'on a pu obtenir en laboratoire un rendement de 20 % en travaillant sur des cellules de

monocristal d'arsenic de Gallium (GaAs). Le rendement est sensiblement inférieur lorsque ces cellules se font d'échelle industrielle.

Aussi, des expériences ont été faites avec des cellules composées de deux couches : une de Sulfure de Cadmium (**GdS**) et une autres de Sulfure de Cuivre (Cu_2S). Ces cellules présentent d'avantage d'utiliser très peu de manière active et permettent un processus de fabrication plus simple. Cependant, leur faible rendement ne permet pas de les utiliser à l'échelle industrielle. Ces cellules ont été commercialisées des cellules de Silicium des années **70**. En **1999**, elles occupaient **12%** de marché **[4]**.

Plus tard, apparurent les matériaux poly-cristallins, de fabrication plus économique, mais présentant encore de faibles rendement.

Récemment se sont commercialisées de cellules de Silicium amorphe, utilisées pour des dispositifs de très faible puissance : calculettes, montres, radio portable, etc...

Les premières applications pratiques de l'électricité photovoltaïque se firent dans les véhicules spatiaux, permettant l'alimentation des équipements de commande, de mesure, ou de retransmission de données. Ensuite, la production industrielle de premiers panneaux ayant des applications terrestres domestiques a débuté. Bien qu'au début des années **80** ces panneaux n'aient pas été suffisamment compétitifs pour la production à grande échelle, ils ont tout de même permis l'électrification de logements isolés.

Les recherches pour faire des produits plus efficaces et économiques continuent à bon rythme même s'il existe peu d'entreprise au niveau mondial ayant la capacité de supporter des coûts élevés de recherche **[4][5]**.

I.3. Energie renouvelable en Algérie

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les réalisations algériennes dans le domaine des énergies renouvelables sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution du parc d'énergie renouvelable mondial ou européen, qui a atteint des stades très avancés.

L'utilisation des énergies renouvelables en Algérie n'a pas dépassé le seuil d'expérience durant cinq décennies d'indépendance, malgré la position géographique stratégique du pays qui dispose de l'un des gisements solaire les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures par an, et peut atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m 2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700kwh/m $2 / \alpha n$ au Nord et 2263kwh/m $2 / \alpha n$ au Sud [6][7].

I.4.Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m2 est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m2/an au nord et 2263kwh/m2/an au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie **[8]**

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

Tableau (I.1) : Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [8][9]



Figure (I.1) : La moyenne annuelle de l'irradiation globale en Algérie période 1992-2002[9]

I.5. Généralités sur le soleil

I.5.1. Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement Sa lumière, à une vitesse de 300000km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre. Sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 pm, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [**10**][**11**].

↓ Diamètre de soleil **Ds** =1.39*10⁹ m

- ↓ Diamètre de la terre **Dt** =1.27*10⁷ m
- ↓ Distance moyenne soleil- terre Lts =1.5*10¹¹m

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et $4*10^{-6}$ m .sans la nécessite d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent [1].



Figure (I.2) : Composants du rayonnement solaire[12]

I.5.1.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du Soleil, sans diffusion par L'atmosphère. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre . Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres.[12]

I.5.1.2 Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus (*Dh*) est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions, Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil [1].

I.5.1.3 Rayonnement solaire réfléchi

C'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) [1].

I.5.1.4 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 Pyranomètre ou un Solarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurent le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis [1].



Figure (I.3): Composante du rayonnement global sur un plan horizontal [1]

I.5.2 Energie solaire

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le Soleil disparaîtra un jour). 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, peut être convertie en chaleur ou en électricité. On distingue deux moyens principaux de convertir l'énergie solaire :

- **Conversion en chaleur**: 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 **[13]**.
- Conversion en électricité : 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 [14][15].

I.5.3 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde.

L'énergie de chaque photon est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{E} = \mathbf{H}/\mathbf{V} = \mathbf{H}\mathbf{C}/\mathbf{X} \tag{I.1}$$

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AMO. Sa distribution en énergie est répartie en [16] :

- **↓** Ultraviolet **UV 0.20 < 1 < 0.38 mm 6.4%**
- **↓** Visible **0.38 < 1 < 0.78 mm 48.0%**
- **↓** Infrarouge **IR 0.78 < 1 < 10 mm 45.6%**



Figure (I.4): Le spectre solaire hors atmosphère [17]

I.6. Cellule photovoltaïque

I.6.1 Cellule solaire

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement La lumière solaire en électricité par un processus appelé «effet photovoltaïque» Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés Intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont de fines tranches planes fabriquées à partir de matériaux appelés semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Plus

de 90 % des cellules solaire fabriquées à l'heure actuelle sont en silicium, un semi conducteur, ou métalloïde, présentant à la fois les propriétés d'un métal et d'un isolant.

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en son sein : ainsi, il apparaitra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme une pile.[**18**] Pour cela, on s'arrange pour crée un champ électrique permanent au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N [**17**]. Comparable à une diode utilisée classiquement en électronique, une cellule PV peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) [**19**].Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une batterie de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face de cristal et joue le rôle d'anode. [**18**].



Figure (I.5) : Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant de silicium comme matériau PV (présence d'une jonction PN) [18]

I.6.2 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) [14].

La photopile ou la cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de semi-conducteurs de différents types, elle constitue l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. Son rôle est

de transformer de manière directe l'énergie reçue par le soleil en énergie électrique avec un certain rendement qui est caractéristique du semi-conducteur utilisé dans la fabrication.

La photopile utilise deux couches de semi-conducteur, une dopée de type N qui est excédentaire en électrons et l'autre dopée P qui est excédentaire en trous. Ces deux couches sont comprises entre deux électrodes métalliques (+) et (-) pour collecter le courant. L'énergie du photon absorbée par le semi-conducteur va servir à arracher des électrons qui vont passer à un état d'énergie supérieur créant un déséquilibre électrique se traduisant par une paire électron-trou. Lorsque les deux couches entrent en contact, les électrons libérés se déplacent de la zone dopée N vers la zone dopée P, de même pour les trous qui se déplacent de la zone P vers la zone N, ceci va créer une jonction P-N et donc un champ électrique. Le champ permet de déplacer les électrons de la zone N vers la surface négative où ils deviennent disponibles pour le circuit électrique. En même temps les trous se déplacent dans la direction opposée, vers la surface positive où ils attendent les électrons entrants. Quand les trous et les électrons rejoignent la jonction P-N, une tension est générée, elle peut varier entre 0,3V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé, de la température et du vieillissement de la cellule **[17][20].**



Figure (I.6) : Principe de la conversion photovoltaïque[20].

I.6.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension $(I_{pv} - V_{pv})$ et par une courbe tension-puissance $(P_{pv} - V_{pv})$. Trois grandeurs physiques définissent ces caractéristiques :

- La tension à vide : V_{co} (tension en circuit ouvert). Cette valeur représente la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Le courant de court-circuit: *I_{cc}*. Cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Le Point de Puissance Maximal: PPM obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt}, I_{opt} (parfois appelés aussi V_{ppm}, I_{ppm}).[21]

I.6.4. 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 :

$$\eta = \frac{Pmax}{Pinc} = \frac{Iopt \, Vopt}{Pinc} \tag{I.2}$$

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

I.6.5. Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fil factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_{ser} et R_{shu} . il est défini par : [22]

$$\boldsymbol{FF} = \frac{Pmax}{Icc\,Vco} = \frac{Iopt\,Vopt}{Icc\,Vco} \tag{I.3}$$

I.6.6. Rappel sur les Propriétés des Semi-conducteurs

I.6.6.1 Semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charge libre est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

C'est l'énergie du «bonde gap», Eg en électronvolt (eV).Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin (c - Si), et 1.7eV pour le silicium amorphe (a -Si). Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons particules de lumière en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera à travers l'épaisseur de la cellule **[23]**.

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande gap vont libérer un électron négatif, laissant un 'trou' positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un Courant électrique, il faut introduire un champ électrique e, de part et d'autre de la cellule **[24]**.

I.6.6.2 Dopage du silicium

Les wafers de silicium obtenus à l'issue de l'étape de sciage sont alors introduits dans un réacteur de croissance dans lequel va se dérouler l'étape de dopage. Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques. Les atomes de Si on quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome Si voisin par une liaison covalente. Le semiconducteur dopé est alors appelé « semi-conducteur extrinsèque ».

Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif).

I.6.6.2.1 Dopage de type N

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative.



Figure (I.7) : Dopage de type N[25].

I.6.6.2.2 Dopage de type P

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive **[25]**.



Figure (I.8) : Dopage de type P[25]

I.6.6.3 Formation de la jonction PN

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo-générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P [26][27].

I.6.7 Différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)

Plusieurs techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, et cela 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), ou le tellurure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication et leur utilisation est en général limitée aux applications spatiales, mais le matériau le plus utilisé reste le silicium.

I.6.7.1. Silicium monocristallin

Elles sont considérées comme la première génération de photopile, elles ont un taux de rendement excellent (12 - 16%) et jusqu'a 24 % en laboratoire) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur. Il présente l'inconvénient d'avoir un mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) [21].



Figure (I.9) : Cellule monocristalline.[21]

I.6.7.2 Silicium poly cristallin

Elles ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 11 - 13% (autour de 18 % en laboratoire). Comme le monocristallin il présente l'inconvénient d'avoir un mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...)[21].





I.6.7.3. Silicium amorphe

Leur coût de production bien plus bas, mais malheureusement aussi, ont un rendement plus bas qui varie entre 8 -10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée). Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0.3 a 1.0 nanomètre seulement (500 nanomètres pour les deux autres types). On peut donc appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du métal, voir du plastique souple par un procède de vaporisation sous vide. C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices, les montres,...

Les cellules amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface (comparé aux cellules cristallin) pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plus rapidement, mais ils ont l'avantage de mieux réagir a la lumière diffuse et a la lumière fluorescente et d'être plus performants à des températures élevées **[21]**.



Figure (I.11) : Cellule photovoltaïque en silicium amorphe[21]

I.6.7.4.Cellule Tandem

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbantes dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines [21].



Figure (I.12) : Cellule photovoltaïque Tandem[21].

I.6.7.5.Cellule multi-jonction

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximal de la quelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. D'un autre côté, en deçà de cette longueur d'onde, le surplus d'énergie véhiculé par le photon est perdu. D'où l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible (en multipliant leur nombre d'autant) de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé, ce qui génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire **[21].**



Figure (I.13) : Cellule photovoltaïque multi jonction[21]

I.7. Générateur photovoltaïque

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel (figure I.14). Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [28].



Figure (I.14) : Composants d'un GPV[28]

I.7.1. Zones de fonctionnement du module solaire

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 (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.15) représente trois zones essentielles :

- <u>La zone (I)</u> : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

<u>La zone (II)</u> : correspondant au coude 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.

- <u>La zone (III)</u> : 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 **[29]**.


Figure (I.15) : Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C[29].

I.7.2 Association des modules photovoltaïques

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

I.7.2.1. En série

La tension délivrée par une cellule photovoltaïque est limitée à la tension du gap du semi-conducteur utilisé, c'est pour cela qu'on connecte plusieurs cellules en série afin d'augmenter la tension de sortie. Ces cellules sont traversées par le même courant et la tension du générateur est proportionnelle à leur nombre [20][30].

En termes d'équations on aura :

$$\begin{cases} V_{CO_{ns}} = N_s V_{CO} \\ I_{CC} = I_{CC_{ns}} \end{cases}$$
(I.4)

Avec

 $V_{CO_{ns}}$: Tension aux bornes de N_s cellules en série

N_s : Nombre de cellules en série

V_{CO} : Tension aux bornes d'une seule cellule
I_{CC} : Courant traversant une cellule

 $I_{CC_{ns}}$: Courant traversant N_s cellules en série



Figure (I.16) : Caractéristique résultante du regroupement de N_s cellules en série[30].

La caractéristique I-V représentée par la figure (I.16) du groupement série est donc obtenue par addition des tensions à un courant donné.

I.7.2.2. En parallèle

Pour l'association en parallèle, on doit vérifier que les tensions des photopiles sont identiques, et le courant obtenu représente le produit entre le courant de la cellule élémentaire et le nombre de ces cellules pour une tension qui reste la même **[20][30].**

$$\begin{cases} I_{CC_{np}} = N_p I_{CC} \\ V_{OC_{np}} = V_{OC} \end{cases}$$
(I.5)

Avec

$$\begin{split} I_{CC_{np}} &: \text{Courant traversant } N_p \text{ cellules en parallèle} \\ V_{OC_{np}} &: \text{Tension aux bornes de } N_p \text{ cellules en parallèle} \\ N_n &: \text{Nombre de cellules en parallèle} \end{split}$$



Figure (I.17) : Caractéristique résultante du regroupement de Np cellules en parallèle[30].

I.7.2.3. Association mixte (En Série et En Parallèle)

Afin d'augmenter la puissance des générateurs photovoltaïque on est obligé à grouper les cellules photovoltaïque en série et en parallèle pour obtenir un générateur mixte équivalent.



Figure (I.18) : Connexions mixtes des modules photovoltaïques sur la caractéristique I(V)

La courbe de puissance d'un groupement série parallèle est analogue à celle d'un générateur photovoltaïque élémentaire tous les paramètres de celle-ci sont appliqués pour un générateur mixte, mais certain conditions doivent être respectée **[31][32].**

S'assuré que les cellules connectées en série ont le même courant de court-circuit. Il faut connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension de circuit ouvert V_{OC} .

I.8. Le Systèmes photovoltaïque

I.8.1. Définition

Le système photovoltaïque est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque), une interface de puissance (les convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie **[22].**

I.8.2. Types d'un système solaire photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en trois catégories : Autonome, hybride et raccordé au réseau électrique.

I.8.2.1. Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans Une zone isolée du réseau électrique. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont actuellement divisés en deux types **[33]**.

I.8.2.1.1.Système autonome sans batterie

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (exemple: calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompage photovoltaïque :le Réservoir d'eau sert de stockage).



Figure (I.19) : Exemple d'un système PV autonome sans batterie[34][35]

I.8.2.1.2.Système autonome avec batterie

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. (Ex. l'éclairage d'une maison dans la nuit).





I.8.2.2.Système hybride

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il

est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries.

Ils sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle **[34][35].**



Figure (I.21) : Exemple d'un système PV hybride[34][35]

I.8.2.3. Système raccordé au réseau électrique

Le système photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif (DC-AC). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même. Il y'a deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire **[24]**.

I.8.2.3.1.Injection de la totalité de la production

L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injections sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.

I.8.2.3.2 Injection du surplus de production:

L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau [24].

I.8.3.Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

I.8.3.1. Avantages

- ➢ Sa gratuité.
- > Pas de pollution.
- ➢ Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- ➢ Sa structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.
- > Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts sucraient pour alimenter la planète entière.

I.8.3.2. Inconvénients

- Le coût élevé de l'installation.
- > Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.

Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement **[36][37][38].**

I.9.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu des notions sur l'énergie renouvelable en Algérie et généralités sur le soleil Ainsi la cellule photovoltaïque et leur caractéristiques électriques, types de cellule.

Ensuite nous avons abordé le générateur photovoltaïque et leurs zones de fonctionnement et association des modules .A la fin nous mentionnons également les différents systèmes photovoltaïques.

CHAPITRE 2 :



II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier la modélisation de la cellule et ses différents cas Puis le générateur photovoltaïque (composé de 36 cellules connectées en série) avec résistance shunt dans les conditions standard (G=1000W/m², T=25°c), nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie de la générateur PV.

Ensuite, 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. On utilise l'outil MATLAB -SIMULINK pour faire la simulation de comportement de générateur PV et de convertisseur survolteur.

II.2. Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque

II.2.1. Modélisation d'un générateur photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques de modules photovoltaïques, ont été développes, Dont le but est l'obtention de la caractéristique Courant-Tension et Puissance-Tension pour L'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques **[39]**.

II.2.1.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise a l'éclairement photovoltaïque peut être schématisée par un générateur de courant __ en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale **[40].**



Figure (II.1) : Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque [40]

• L'équation retenue de ce modèle est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{II.1}$$

• Le courant I_{ph} est assimile au courant I_{cc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit.

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i *(T_c - T_{ref})] * \frac{G}{Gref}$$
(II.2)

Ki: Coefficient de température du court-circuit de la cellule (Ampères / K)

T_c: Température de la cellule en Kelvin

G: L'éclairement absorbe par la cellule

Gref: L'éclairement de référence (1000 w/m2)

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{Vd}{Vt}} - 1 \right) \tag{II.3}$$

 I_0 : Courant de saturation de la diode

$$\boldsymbol{V_t} = \frac{BKT}{q} \tag{II.4}$$

 V_t : Tension thermique

B : Facteur d'idéalité

K: Constant de Boltzmann (1,38*10⁻²³ J/K)

q : Charge de l'électron $(1,6*10^{-19} \text{ C})$ [41]

II.2.1.2 Cas d'une cellule réelle (cinq paramètres 5P)

II.2.1.2.1. Avec résistance shunt

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique *I-V* de la photopile:

- la résistance série est la résistance interne de la cellule; elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles,
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.





Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \tag{II.5}$$

Avec :

Icell : Courant délivré par la photopile.

*I*_{*ph*}: Photo courant.

 I_d : Courant de la diode.

I_{Rsh} : Courant shunt

a. Le photo-courant

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{ph} = \left[I_{cc} + K_i \left(T - T_{ref} \right) \right] * \frac{G}{G_{ref}}$$
(II.6)

Avec :

 I_{cc} [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

 K_i [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

T [K] : Température ambiante.

 $G \left[W/m^2 \right]$: Irradiation sur la surface de la cellule.

 T_{ref} [K] : Température de référence (298.15 K).

 $\boldsymbol{G_{ref}}$ [W/m²] : Irradiation de référence (1000 W/m²).

b. Le courant de saturation I₀

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{Tref}\right)^3 \exp\left[\frac{qEg}{Ak} \left(\frac{1}{Tref} - \frac{1}{T}\right)\right]$$
(II.7)

Avec :

Eg [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

c. Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{rs} = \frac{Icc}{exp(\frac{qVoc}{KAT}) - 1}$$
(II.8)

Où :

Voc [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

A : Constante d'idéalité de la jonction (1<A<2).

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 [\exp\left(\frac{q(Vcell + Rs \, Icell)}{AKT}\right) - 1] - \frac{Vcell + Rs \, Icell}{Rsh}$$
(II.9)

d. Le courant du panneau

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I_{pv} = NpI_{ph} - NpI_0[\exp\left(\frac{q(Vcell + Rs \, Icell\right)}{NsAKT}\right) - 1] - Np \,\frac{Vcell + Rs \, Icell}{Rsh}$$
(II.10)

Où :

Ns : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

Np : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

II .2.1.2.2 Sans résistance shunt

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode. La figure (II.3) illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode. Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles **[42[43].**



Figure (II.3) : Schéma équivalent d'une cellule solaire sans résistance shunt [42]

 $I_{cell} = I_{ph} - I_d$ (II.11) $I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(Vcell + Rs \, Icell)}{AKT}\right) - 1 \right]$ (II.12)

$$I_{pv} = NpI_{ph} - NpI_0 \left[\exp\left(\frac{q(Vcell + Rs \, Icell)}{NsAKT}\right) - 1 \right]$$
(II.13)

II.2.2. Simulation d'un générateur photovoltaïque

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque (avec résistance shunt) sont données dans le tableau Suivant :

Eclairement standard G	1000W/m ²
Température standard T	25℃
Puissance maximale P _{max}	60W
Tension à P_{max} ou tension optimale (V_{opt})	17.1V
Courant à P _{max} ou courant optimale (I _{opt})	3.5A
Courant de court-circuit Isc	3.8A
Tension à circuit ouvert Vco	21.1V
Nombre des cellules en séries	36
Energie de la bande interdite	1.12 eV
Coefficient de température de Isc	65mA/C°
Coefficient de température de Vco	-80mV/C°
Coefficient de température de puissance	(0.5±0.05)%/
	്റ
Courant de saturation Isat	20nA

Tableau (II.1) : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX60Dans les conditions standards «CST»



Figure (II.4) : Schéma bloc de générateur photovoltaïque

Les résultats obtenus de la simulation d'un caractéristique courant –tension I(V) et puissance tension P(V) de la générateur photovoltaïque dans les conditions standards (T= $25^{\circ}c$,G=1000 W/m²)



II.2.2.1. Caractéristique courant-tension

Figure (II.5) : Caractéristique I(V) d'un GPV sans résistance shunt



Figure (II.6) : Caractéristique I(V) d'un GPV avec résistance shunt

On observe que la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque avec et sans résistance shunt sont identiques à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement.





Figure (II.7) : Caractéristique P(V) d'un GPV sans résistance shunt



Figure (II.8) : Caractéristique P(V) d'un GPV avec résistance shunt

On observe que la caractéristique P(V) d'un générateur photovoltaïque dans les conditions de $G=1000 \text{ W/m}^2$ et T=25°c de deux figures ne sont pas identiques.

Avec résistance la puissance maximale Pmax= 62.54 W

Sans résistance la puissance maximale Pmax= 59.85 W

Aussi on remarque que, quand la tension augmente la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale (Pmax) ensuite elle décroit.

II.2.3. Effets climatiques sur le générateur PV

II.2.3.1. Influence de la température sur le générateur

Les figures (II.9) et (II.10) représentent la caractéristique courant – tension I(V) et puissance – tension P(V) dans la même condition de l'éclairement (G=1000 W/m²) et pour différents température (T=0,25,40,60).

II.2.3.1.1.Caractéristique (I-V)



Figure(II.9) : Caractéristique I(V) pour différentes températures (G=1000W/m²). **Sans résistance shunt**

II.2.3.1.2.Caractéristique (P-V)



Figure (II.10) : Caractéristique P(V) pour différentes températures (G=1000W/m²). **Sans résistance shunt**

La tension de circuit ouvert est diminué avec l'augmentation de la température, par contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température et la

puissance maximale diminue. On constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert.

On peut donc tirer la conclusion suivante : générateur photovoltaïque a de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé.

II.2.3.2. Influence de l'éclairement sur le générateur

Les figures (II.11) et (II.12) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'un générateur en fonction de la variation de l'éclairement (G=200.400.600.800.1000 W/m²) à température constants (T= 25° c) :

II.2.3.2.1.Caractéristique (I-V)



Figure (II.11) : Caractéristique I(V) pour différentes niveaux d'éclairement (T=25°C). Sans résistance shunt

Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident. Par contre, la tension de circuit ouvert augmente rapidement pour de faibles niveaux d'éclairement, puis lentement pour des niveaux plus élevés.



II.2.3.2.2.Caractéristique (P-V)

Figure (II.12) : Caractéristique P(V) pour différentes niveaux d'éclairement (T=25°C). **Sans résistance shunt**

II.3. Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec un point de puissance maximum MPP. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme présenté dans la figure (II.13).

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible.

Rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quelques soient l'éclairement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation **[44]**.



Figure(II.13) : Etage d'adaptation entre un GPV et une charge [44]

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC).

II.4. Modélisation et simulation du convertisseur de puissance survolteur BOOST

II.4.1.Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

La figure(II.14) montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.



Figure(II.14) : Convertisseurs DC-DC [45]

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une tension continue variable à partir d'une source de tension fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance dans le cas idéal, c'est pour cette raison que les hacheurs ont de bons rendements. 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 signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), avec une fréquence de commutation FS fixe et un rapport cyclique α variable [45].

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé **[46].**

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Le tableau suivant donne une idée sur la complexité de chaque type de convertisseur.

Туре	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur /Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur /Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Half forward	Abaisseur /Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Push Pull	Abaisseur /Elévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur /Elévateur	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur /Elévateur	4	4	Oui	Très Forte

Tableau (II.2) : Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC[26].

II.4.1.1. Hacheur dévolteur « Buck »

Le hacheur dévolteur est un convertisseur statique continu-continu son rôle principale est de convertir sa tension d'entrée en tension de sortie inférieure. Le hacheur se compose des condensateurs, d'inductance, de diode et de commutateur. Tous ces dispositifs dans le cas idéal ne consomment aucune puissance. Généralement le commutateur est un transistor MOSFET ou IGBT qui sont des dispositifs semi-conducteur en mode (bloqué-saturé) [15-47].



Figure(II.15) : Circuit d'un hacheur série[48]

On en déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivante :

$$V_s = a^* V \tag{II.14}$$

$$I_{s} = \frac{1}{\alpha} * I_{e} \tag{II.15}$$

Avec :
$$\alpha = \frac{tf}{T}$$
 (II.16)

II.4.1.2.Hacheur dévolteur-survolteur

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma de base est illustré par la figure (II.16) **[48].**



Figure (II.16) : Convertisseur dévolteur-survolteur [48]

Dans notre étude nous présentons le principe d'un convertisseur DC/DC de types Boost, qui est utilisé fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseur n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement.

II.4.1.3 Hacheur survolteur (Boost)

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle, son schéma de principe de base est celui de la figure (II.17). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure **[48]**.



Figure (II.17) : Schéma de principe d'un convertisseur Boost[48]

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figures II.18 et II.19) des deux phases de fonctionnement donne :



Figure (II.18) : Schémas équivalents du hacheur survolteur K fermé [48]



Figure (II.19) : Schémas équivalents du hacheur survolteur K ouvert[48]

Pour la première période d.Ts :

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t)$$
 (II.17)

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV0(t)}{dt} = -i_0(t)$$
 (II.18)

$$V_L(t) = L\frac{diL}{dt} = -V_i(t)$$
(II.19)

Pour la deuxième période (1-d)Ts:

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t)$$
 (II.20)

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t)$$
(II.21)

$$V_L(t) = L\frac{diL}{dt} = V_i(t) - V_0(t)$$
(II.22)

II.4.2 Simulation du convertisseur de puissance (Boost)

Pour la simulation du convertisseur nous utilisons :

-Une source de tension de 230 V continu comme tension d'entrée du convertisseur DC-DC.

- Les paramètres ($R = 22\Omega$, L = 1.8mH, C1 = 2.2mF, $C2 = 220\mu F$)



Figure(II.20): Schéma de simulation du hacheur survolteur

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par les figures (**II.21**) à (**II.23**). Ces figures représentent la tension de sortie d'hacheur survolteur ainsi le courant et puissance de sortie d'hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur

survolteur est supérieure à celle d'entrée. Donc le hacheur survolteur effectue correctement son rôle.



Figure(II.21):Tension de sortie du hacheur survolteur.



Figure(II.22): Courant de sortie du hacheur survolteur



Figure(II.23): Puissance de sortie du hacheur survolteur

II.5.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de différant cellule et le générateur photovoltaïque, Ensuite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier le comportement d'un générateur photovoltaïque (composé de 36 cellules connectées en série) dans les conditions standard (G=1000 W/m², T=25°C). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par générateur photovoltaïque

Enfin, nous avons utilisé l'outil MATLAB-SIMULINK pour simuler le comportement de convertisseur statique DC/DC survolteur.

CHAPITRE 3 :



III.1. Introduction

La puissance délivrée par un générateur PV dépend fortement du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules. C'est donc très imprévisible. Comme nous l'avons déjà vu dans le chapitre précédent, la courbe caractéristique de puissance du GPV présente un point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point) correspondant à un certain point de fonctionnement des coordonnées V_{MPP} pour la tension et I_{MPP} pour le courant (voir figure II.6). La position de ce député varie dans le temps car cela dépend du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules (figure II.9) et (figure II.11). Un adepte de ce tracker de point de puissance maximale (MPPT) doit donc être utilisé de manière à obliger le GPV à opérer au MPP et donc à fournir puissance maximale à tout moment.

Les premisères utilisations des MPPTs remontent à 1968 dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux photovoltaïques.

Dans ce chapitre, on présentera la commande MPPT numérique (perturbation et observation) et la commande d'incrémentation de Conductance.

III.2 Principe De La Commande MPPT

Le principe de cette commande est basé sur la modification automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale pour maximiser la puissance délivrée par le panneau solaire. Pour cette raison, nous présenterons et analyserons ensuite l'algorithme de contrôle de la méthode "perturbation et observation".

La figure (III.1) montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module **[49].** Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.





La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [**50**].



Figure (III.2): Caractéristique puissance-tension du panneau PV

III.3. Techniques de commande MPPT

La classification des algorithmes suiveurs peut être basée sur la fonction des techniques ou stratégies de contrôle utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes.

III.3.1 Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc....[51]

III.3.2.Méthodes directes

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux l'algorithme sont basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV .Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance, etc....[51].

III.4.Méthode de perturbation et observation (P&O)

Dans la littérature, beaucoup de concentration a été mis sur la méthode perturbe et observe (P&O) c'est une méthode itérative permettant d'obtenir le point de puissance maximal.Elle consiste à perturber la tension de la charge d'une faible valeur et d'analyser la variation de puissance délivrée par le générateur photovoltaïque etla comparer à celle du cycle de perturbation précédente (figure III.3). Il peut être vu que l'incrémentation ou la décrémentation de la tension augmente ou diminue la puissance, si la puissance est augmenté, la prochaine perturbation devrait être dans le même sens jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, et si la puissance diminue, la perturbation devrait être inversée[52][53][54][55].



Figure (III.3) : Caractéristique P_{PV}(V_{PV}) [56].



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

Dans l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension, pour ce type de commande, deux capteurs sont habituellement nécessaire (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) pour calculer la puissance à chaque instant **[57][58].** Dans la référence le courant est estimé à partir de la tension photovoltaïque, ceci utile pour éviter la nécessité d'un capteur de courant. son modèle Simulink est donné par la figure ci-dessous **[59]**:

D : rapport cyclique



Figure (III.5) : Modèle Simulink de l'algorithme P&O



Figure (III.6) : Schéma bloc d'algorithme P&O

III.4.1.Avantages et inconvénients de P&O

Avantages

- Structure de régulation simple
- Nombre des paramètres mesures réduit

Inconvénients

• Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques [60].

III.5.Méthode d'incrémentation de Conductance

Dans cet algorithme la dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée d'une autre manière. Elle est calculée en fonction de la tension V et sa différence dV et du courant I et sa différence dI.

Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite [22][61].

La puissance du panneau solaire est donnée par : P = IV

La dérivé partielle $\frac{dP}{dV}$ est donnée par

$$\frac{dP}{dV} = \mathbf{I} + \mathbf{V}\frac{dI}{dV}$$
(III.2)

$$\frac{1}{v}\frac{dP}{dv} = \frac{1}{v} + \frac{dI}{dv}$$
(III.3)

On définit la conductance de la source $\mathbf{G} = \frac{1}{V}$ et l'incrémentale conductance $\Delta G = \frac{dI}{dV}$

Puisque la tension V du panneau est toujours positive, les relations (III.4) expliquent que le point de puissance maximale MPPT est atteint si la conductance de la source G égale l'incrémentale conductance ΔG de la source avec un signe négatif, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance G est supérieure à l'incrémentale conductance ΔG .

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ si } \frac{1}{V} > -\frac{dI}{dV}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ si } \frac{1}{V} = -\frac{dI}{dV}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ si } \frac{1}{V} < -\frac{dI}{dV}$$
(III.4)



Figure (III.7) : Signe $\frac{dP}{dV}$ de pour différentes zones de fonctionnement

(III.1)



Figure (III.8) : Algorithme d'incrémentation de la conductance



Figure (III.9) : Modèle Simulink de l'algorithme INC



Figure (III.10) : Schéma bloc d'algorithme INC

III.5.1. Avantages et inconvénients d'incrémentation de Conductance

L'avantage principal de cet algorithme est qu'il offre un bon rendement même sous un changement rapide des conditions atmosphériques. En outre, il réalise l'oscillation inférieure autour du MPP que la technique de P&O, quoique, quand la technique de P&O est optimisée, les rendements de MPPT de la conductance par incrémentation et de l'algorithme P&O de MPPT soient, essentiellement, identiques.

Néanmoins, l'inconvénient est que le circuit de commande est complexe et très couteux [60].

III.6. Simulations et résultats

III.6.1. Système photovoltaïque proposée

La figure (III.11) est représenté le schéma synoptique d'un système PV alimente une charge résistive ($Rs = 17 \Omega$).

• Le générateur PV (**MSX60**) est en silicium monocristallin est constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires avec résistance shunt . Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 60 W, un courant de 3.5A sous une tension optimale de (17.1V) :

• Le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie de type survolteur pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 17V.

• La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α à la valeur adéquate de manière à

maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV. On utilisé algorithme P&O et algorithme d'incrémentation de conductance.



Figure (III.11) : schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC)

III.6.2.Simulation de système photovoltaique avec la commande P&O

La figure(III.12) Représente le schéma global d'un système photovoltaïque composé d'un module PV avec un hacheur commandé en MPPT (P&O).



Figure (III.12): Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).



Figure (III.13) : Pulsation de Mosfet



Figure (III.14) : Tension générée par la GPV pour G=1000W/m² et T=25°C






Figure (III.16) : Courant de sortie du système pour G=1000W/m² et T=25°C



Figure (III.17) : Puissance d'entrée et sortie du système pour G=1000W/m² et T=25°C

Puissance d'entrée = 59.96 W

Puissance de sortie = 58.06 W



Figure (III.18) : Puissance d'entrée et sortie du système pour G=1000W/m² et différentes température [0 25 50 75 100]



Figure (III.19) : Puissance d'entrée et sortie du système pour T= 25C et différentes irradiation [1000 800 600 400 200]

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «perturbation et observation » représentent par les figures (III.14) à (III.17). Ces figures représentent la tension et puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

Le hacheur boost fournie une tension à sa sortie ssupérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge.

Les figures (III.18)(III.19) présentent l'évolution de la puissance générée par le système photovoltaique.On note que la puissance augmente avec l'augmentation de température et diminuée avec la diminution de l'éclairement.

III.6.3.Simulation de système photovoltaique avec la commande d'incrémentation de Conductance

La figure(III.20) Représente le schéma global d'un système photovoltaïque composé d'un module PV avec un hacheur commandé en MPPT (INC).



Figure (III.20): Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (INC).



Figure (III.21) : Tension générée par la GPV pour G=1000W/m² et T=25°C



Figure (III.22) : Tension de sortie du système pour G=1000W/m² et T=25°C



Figure (III.23) : Courant de sortie du système pour G=1000W/m² et T=25°C



Figure (III.24) : Puissance d'entrée et sortie du système pour G=1000W/m² et T=25°C

Puissance d'entrée = 60.02 W

Puissance de sortie = 58.87 W



Figure (III.25) : Puissance d'entrée et sortie du système pour G=1000W/m² et différentes température [0 25 50 75 100]



Figure (III.26) : Puissance d'entrée et sortie du système pour T= 25C et différentes irradiation [1000 800 600 400 200]

III.6.4.Comparaison

Deux techniques pour le suivie du point de fonctionnement à puissance maximale (perturbation et observation) est la méthode plus utilisé qui a un organigramme simple à implémenté et qui converge rapidement.

La deuxième méthode (incrémentation de la conductance) s'appuie sur la variation de la conductance du circuit elle a un organigramme plus complexe est qui ne converge pas rapidement et qui influencé par le pas de simulation et celui de variation de rapport cyclique.

III.7.Conclusion

Dans ce chapitre, nous a présenté la commande MPPT pour rechercher le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, sous conditions standards. On a étudié quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémentation de l'inductance et méthode de perturbation et observation (P&O).



Dans notre projet l'étude, On a vu la modélisation et simulation d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande perturbation et observation aussi la commande d'incrémentation de la conductance) pour chercher la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.

D'abord, nous avons vu historique de l'effet PV et Qu'est-ce que énergie renouvelable en Algérie, le principe de fonctionnement d'une cellule PV et leur caractéristiques électriques, rendement énergétique, facteur de forme, Ainsi que le générateur photovoltaïque et différent système PV.

Ensuite, nous avons présenté la modélisation mathématique de différent cas de cellule et le générateur photovoltaïque (MSX60) (composé de 36 cellules connectées en série) dans les conditions standard (G=1000 W/m² T=25°C). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par générateur PV. On a utilisé le logiciel MATLAB.

Puis On a étudié l'adaptation par le convertisseur DC-DC survolteur et on trouve les relations relient les grandeurs du convertisseur et le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur.

Finalement, on a représenté la structure de la commande MPPT numérique (perturbation et observation) et (incrémentation de la conductance) nous avons comparé les deux.

Les principaux éléments de ce travail sont :

- Le courant délivré par le GPV est directement proportionnel à l'ensoleillement par contre la tension aux bornes du GPV est relativement peu dégradée par l'accroissement de celui-ci.
- L'augmentation de la température conduit à une diminution nette de la tension de circuit ouvert, à une légère augmentation du courant de court-circuit, et à une diminution de la puissance maximale.
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles.
 Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.
- .Pour profiter de la puissance maximale délivrée par un panneau solaire, l'utilisation d'un étage d'adaptation entre ce panneau et la charge est nécessaire.
- La commande perturbation et observation converge plus rapidement et présente moins d'oscillations par rapport à la commande d'incrémentation de la conductance



[1] N.Touil, S.Ghenbazi, «Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque », Master académique, Université Echahid Hama Lakhder ,El-Oued ,Septembre 2015.

[2] 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.

[3] M.Adouane, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[4] N.Anbouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Ecole Doctorale Energie renouvelable, Ecole Nationale Polytechnique, Alger,2008.

[5] Y.Djadi, B Ebabaaissa, « Simulation et réalisation d'un MPPT appliqué à un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de fin d'étude ENP Alger, 2012.

[6] A.Ferrai, « Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources Énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Electrique d'un Village», Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.

[7] M.Derbal, N.Debbah, « Étude et Commande d'un Système Hybride Eolien Photovoltaïque Connecté au Réseau avec Stockage. Contribution à l'Amélioration de la Qualité de l'Énergie », Mémoire du projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'Etat en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique, Alger, Juin 2013.

[8] M.R.Yaiche, A.Bouhanik, « Atlas Solaire Algérien », Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique direction générale de la recherche scientifique et du développement technologique centre de développement des énergies renouvelables, dépôt légal 2002

[9] Ministère de L'énergie et des Mines-Guide Des Energies Renouvelables, potentiels national des énergies renouvelables.

[10] S.Zeggaoui, « Stockage de l'énergie Solaire », Master en Electronique, Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hacen Badi, El-Harrach, Alger, Algérie, 2013.

[11] M.N.Mchalikh, CH.Hmada, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2013.

[12] A. Moummi, N. Hamani, N. Moummi & Z. Mokhtari, «Estimation du rayonnement solaire Par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra »,8éme séminaire international sur la physique énergétique, centre universitaire de Bechar, Algérie, novembre 2006.

[13] L.Kemmouche, «Module de fonctionnement d'une station solaire photovoltaïque en prévision de panne », Mémoire de magistère, Université de Constantine, année 2002.

[14] F.Hananou, A.Rouabah, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », Master académique, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 09 /06/2014.

[15] S.Zahra,CH.Makhlouf, « Etude et simulation d'un générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA,2016/2017.

[16] M. Dahbi, « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », Mémoire de magister, option physique énergétique, 2007.

[17] C.Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse du doctorat, Université TOULOUSE III – PAUL SABATIER, 15 Décembre 2008.

[18] K.Tabet, «Etude, Modélisation et optimisation des systèmes Photovoltaïques », Mémoire de Magister ,2011.

[19] L. Protin, S. Astier, « Convertisseur photovoltaïques», Techniques de l'Ingénieur, Ref : D 3360, (1997).

[20] A.Bisker, M.Chiri, « Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau», Projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'État en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique, Juin 2012.

[21] A. Labouret, M. Villoz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.

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

[23] B.Robyns, P.Bastard, «Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques», La revue 3EI n°39, Décembre 2004.

[24] S.Belakehal, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», Thèse Doctorat, Université de Constantine, 10/06/2010.

[25] Home Energy, «Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques», Rapport de stage de fin de D.U.T. Mesures Physiques, Université Paris VII 2, place Jussieu 75005 PARIS, Mai 2006/Juillet 2006.

[26] F.Slama, «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques Interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas UFAS, Sétif, ALGERIE, 01/04/2011.

[27] O.Benseddik, F.Djaloud, «Etude et optimisation du fonctionnement d'un Système photovoltaïque », Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla, 27/06/2012.

[28] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud Et I. Youm, « Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque », revue des énergies renouvelables vol. 11 n°3 Sénégal, 2008

[29] T.Bouguerra, «Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif», Mémoire Magister, Université Mentouri de Constantine 1, 30/06/2014.

[30] A. Learrta « Réalisation de commande MPPT numérique », Rovira & Virgili, 2006.

[31] R. Mukund, Ph.D Patel, « Wind and Solar Power Systems », edition CRC PRESS.

[32] B.Mehimmed, «Application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque», Mémoire de Magister, Université Mantouri de Constantine, 2007.
[33] D.Morales, «Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications», Mémoire Master en électronique, Technology, Université de Aalto Finlande, 2010.

[34] B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007,

www.itismajo.it/fff/.../Energie_solaire_photovoltaique.pdf, consulté janv. 2014

[35] F. Kandouli, « Modélisation et commande des machines électriques », Juillet 2007,

[36] H.Boukli, «Conception et Réalisation d'un Générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique», Thèse de magister, Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen, 2010/2011.

[37] A. Luque ,S. Hegedus, «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering», John Wiley , Sons Ltd, 2003

[38] F. Kininger, « Photovoltaic Systems Technology », University of Kassel, 2003

[**39**] KH.Bouzid, « Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino uno », Mémoire Master, Universite Kasdi Merbah, Ouargla, 2016.

[40] M.Z.F.Z.Zerhoun, « Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique » Revue des énergies renouvelables, vol. 11, N°1, p. 41–49, 2008.

[41] A.Saadi, « Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.

[42] J.A. Roger, « Theory of the Direct Coupling between DC Motors and Photovoltaic Solar Arrays », Solar Energy, 23, p. 193, 1979.

[43] W. Anis, H.M.B. Metwally, « Dynamic Performance of a Directly Coupled PV Pumping System », Solar Energy, 53, 3, 1994.

[44] A.Bilbao, « learreta réalisation de commandes mppt numériques », Diplôme ingénieur technique industriel, septembre 2006.

[45] K.Neche, « Aide à la mise au point d'un bande test photovoltaïque », Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER.

[46] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation », Paris, France, DUNOD, 1999.

[47] A.Raphaël, CH. Yvon, E. Bernard, Equipe de recherche des Convertisseurs Statiques du LEEI, « Convertisseurs continu-continu non isolés »,Institut Nationale Polytechnique de Toulouse
[48] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[49] C. Alonso, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie», Thèse de HDR,Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2003.

[50] H.Abbes, H.Abid, K. Loukil, A.Toumi, M.Abid, «Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 435 – 445, Tunisie, 2014.

[51] M.Belkacem, «Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT) », Mémoire de Master, Université de Tlemcen , 2015.

[52] B. L. Grossman, E. F. Lyon, N. E. Rasmussen and L. L. Buciarelli, «The energy balance associated with the use of a MPPT in a 100 Kw peak power system », in IEEE photovoltaic.Spec.conf, pp 523–527, 1980.

[53] W. Xiao, W. G. Dunford, «A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems », in 35th annu. IEEE power electron. Spec. conf, 2004, pp. 1957-1963.

[54] O. Wasynczuk, «Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems," IEEE trans.power app.syst., vol. 102, no. 9, p. 3031–3037, Septembre 1983.

[55] T. Iida, L. Chen, N. Kasa, «Flyback inverter controlled by sensorless current MPPT for photovoltaic power system," *IEEE* trans. ind. electron, Vol. 52, no. 4, p. 1145–1152, Aout 2005.

[56] A.B.G Bahgat, N.H.Helwab, G.E. Ahmad and T.El Shenwyb, « Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks », Renewable Energy. Vol. 30, pp. 1257–1268, 2005.

[57] T. Senjyu, K.Uezato, M.Veerachary, « Maximum power point tracking control of IDB converter supplied PV system », in *IEEE proc. elect. power applicat*, PP. 494-502, 2001.
[58] P. J. Wolfs, L. Tang, "A single cell maximum power point tracking converter without a current sensor for high performance vehicle solar arrays," in *36th annu. IEEE power electron. spec.conf*,pp.165-171,2005.

[59] T. Iida, H. Iwamoto, N. Kasa, «Maximum power point tracking with capacitor identifier for photovoltaic power system », in *conf. power electron. variable speed drives*, p. 130–135, 2000.
[60] H. Bouzeria, « Modélisation et commande d'une chaine de conversion photovoltaïque », Doctorat 3ème cycle LMD en Électrotechnique, Université de Batna, 2016.

[61] M.Moulay-Amar ,M.loghouini, « Etude et réalisation d'un système de poursuite de point maximale a base de microcontrôleur des destiné a une installation photovoltaïques» ,Mémoire d'ingéniorat université de Ouargle Algérie, 2005



La série MSX de BP Solar est une gamme premium de modules PV avec une garantie de performance de 25 ans, des paramètres électriques étroitement contrôlés et un étiquetage indiquant les caractéristiques électriques testées de chaque module. Le MSX 60 pr oxides

60 watts de puissance maximale nominale, et est bien adapté aux applications traditionnelles du photovoltaïque telles que les télécommunications, les villages émotifs et les cliniques, le pompage et les aides terrestres à la navigation. Son joli cadre anodisé bronze lui convient également bien pour les applications architecturales.

Matériaux et construction éprouvés

- Le quart de siècle d'expérience sur le terrain de BP Solar montre dans tous les aspects de la construction et des matériaux de ces modules:
- 36 cellules solaires au silicium multicr ystalline configurées en deux chaînes de 18 cellules;
- Les cellules sont stratifiées entre des feuilles d'éthylèneacétate de vinyle (EVA) et du verre trempé à haute teneur en fer de 3 mm à faible transmissivité;

• La structure du cadre dépasse les exigences des organismes de certification;



Cadre universel en bronze anodize Boîte de jonction polyvalente haute capacité

La boîte de jonction est étanche (IP54) et accepte les raccords de conduit ou de câble PG13,5 ou 1/2 "nominal. Son volume (411 cm3, 25 pouces cubes) et son bloc de connexion à 6 bornes permettent la plupart des connexions de la matrice du système (modules de montage) en série ou parallèle) à réaliser directement dans la boîte de jonction.

Les options comprennent:

· diodes de blocage et de dérivation;

 un bornier surdimensionné qui accepte des conducteurs jusqu'à 25 mm2 (AWG # 4); les bornes standard acceptent jusqu'à 6 mm2 (AWG # 10);

 un régulateur de charge Solarstate ™. Expédiés en configuration 12V, les modules peuvent facilement être commutés en configuration 6V en déplaçant les fils dans la boîte de jonction. Les modules à six volts sont destinés à prendre en charge des charges de 6 V et ne sont pas recommandés comme éléments en série dans des réseaux à tension plus élevée Qualité et sécurité

 Fabriqué dans des usines certifiées ISO 9001;

- Certifié par PowerMark Corporation;
 Répertorié par Underwriter's
- Laboratories pour la sécurité électrique et anti-incendie (classe de résistance au feu de classe C);
- Certifié par le TÜV Rheinland comme équipement de classe II;

• Approuvé par Factory Mutual Research pour une application dans les zones dangereuses NEC Classe 1, Division 2, Groupes C et D;

• Conforme aux exigences de la CEI 61215, notamment:

° cyclisme répétitif entre

-40 ° C et 85 ° C à 85% relatif humidité;

 impact simulé d'une grêle de 25 mm (un pouce) à la vitesse terminale;

° un test de «chaleur humide», consistant en 1000 heures d'exposition à 85 ° C et 85% d'humidité relative;

 ° un test de «point chaud», qui détermine la capacité d'un module à tolérer l'observation localisée (qui peut provoquer un fonctionnement polarisé en inverse et un chauffage localisé);

° charge statique, avant et arrière, de 2400 pascals (50 psf); chargement frontal (p. ex. neige) de 5400 pascals (113 psf).

Garanties limitées

Puissance de sortie pendant 25 ans;
Absence de défauts de matériaux et de fabrication pendant 5 ans.
Consultez notre site Web ou votre représentant local pour les conditions completes de ces guaranties.



BP MSX 60

Testé et étiqueté individuellement

Chaque module testé et étiqueté avec sa sortie réelle - tension, courant et puissance au point de puissance maximale (Pmax) - dans des conditions de test standard et des conditions de fonctionnement standard.



Caractéristiques électriques 1

	BP MSX 60	BP MSX 64 ⁴
Puissance maximum (P _{max}) ²	60W	64W
Tension a P _{max} (V _{mp})	17.1V	17.5V
Courant a P _{max} (I _{mp})	3.5A	3.66A
Minimum P _{max}	58W	62W
Courant de court-circuit (I _{SC})	3.8A	4.0A
Tension en circuit ouvert (V _{oc})	21.1V	21.3V
Coefficient de temperature of I _{SC}	(0.065±0.015)%/°C	
Coefficient de temperature of V_{OC}	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT ³	47±2°C	
Tension maximale	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	
Calibre de fusible série maximum	20A	

Calibre de fusible série maximum

Notes

1. Ces données représentent les performances des modules MSX 60 et MSX 64 typiques, mesurées à leurs bornes de sortie, et n'incluent pas l'effet d'équipements supplémentaires tels que les diodes ou les câbles. Les données sont basées sur des mesures effectuées conformément à la norme ASTM E1036 corrigée en SRC (Standard Reporting Conditions, également connu sous le nom de STC ou Standard Test Conditions), qui sont:

• illumination de 1 kW / m2 (1 soleil) à distribution spectrale d'AM 1,5 (irradiance spectrale globale ASTM E892);

• température de cellule de 25 ° C.

2. Pendant le processus de stabilisation qui se produit au cours des premiers mois de déploiement, la puissance du module peut diminuer d'environ 3% par rapport à la Pmax typique.

3. Les cellules d'un module éclairé fonctionnent plus chaud que la température ambiante e. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) est un indicateur de cette différence de température, et est la température de la cellule dans des conditions de fonctionnement standard: température ambiante de 20 ° C, irradiation solaire de 0,8 kW / m2 et vitesse du vent de 1 m / s.

4. La puissance des cellules solaires varie au cours de la production normale; le MSX 64 est assemblé en quantités limitées en utilisant des cellules de puissance légèrement plus élevée que le MSX 60.



MSX 64 I-V Curves



Mechanical Characteristics

