

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA
UNIVERSITY



جامعة بادجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE
Département : ELECTROTECHNIQUE
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
Filière : ELECTROTECHNIQUE
Spécialité : COMMANDE ELECTRIQUE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Contribution à l'étude et à la simulation d'un générateur photovoltaïque pour un site isolé

Présenté par : *NASRI SABRINE*

BEN HAMIDA OUISSEM

Encadrant : *Mme. OURICI Amel MCA Badji Mokhtar - Annaba*

Jury de Soutenance :

SOLTANI FATMA	MCB	BADJI Mokhtar - Annaba	Président
OURICI AMEL	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Encadrant
BOUCHIKHA HOUCINE	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

ملخص

يركز هذا العمل على دراسة النظام الكهروضوئي المستقل بقوة يضمن توافر الطاقة المستمر. يعمل هذا النظام بأقصى طاقاته باستخدام محول التيار المستمر / التيار المباشر ويتم التحكم فيه بواسطة MPPT. بعد تقديم و نمذجة النظام، تظهر نتائج المحاكاة للتحقق من صحة الدراسات النظرية. الكلمات المفتاحية: مولد الطاقة الكهروضوئية، البطارية، أقصى تتبع لنقطة الطاقة، قاطع متناوب.

Résumé

Ce travail s'intéresse à l'étude d'un système photovoltaïque énergétiquement autonome assurant une disponibilité d'énergie d'une façon continue. Ce système fonctionne à sa puissance optimale avec l'utilisation d'un convertisseur DC/DC commandé par MPPT.

Après avoir présenté et modélisé le système, les résultats de simulation sont montrés pour valider les études théoriques.

Mots clés : générateur photovoltaïque, batterie, poursuite du point de puissance maximale, Hacheur.

Abstract

This work is interested in the study of an autonomous photovoltaic system storage ensuring an availability of energy continuously. This system works in its optimal power with the use of a converter DC/DC ordered by MPPT.

After having presented and having MODELLED the system, results of simulation are shown to validate the theoretical studies.

Key words: photovoltaic generator, battery, maximum power point tracking, DC/DC Converter.

Remerciement

*Nos remerciements s'adressent en premier lieu à **ALLAH** le tout puissant pour la volonté,*

La santé et la patience qu'il nous a données durant toutes ces longues années.

Nous remercions nos familles et tous nos amis qui nous ont toujours encouragé et soutenu durant toutes nos études.

Ainsi, nous tiens également à exprimer nos forts remerciements à notre encadrante

***Dr : A.OURICI** qui nous apporté une aide précieuse. Je lui exprime mon gratitude*

Pour sa grande disponibilité à tout instant et surtout ses orientations, ainsi que pour sa compréhension et ces encouragements.

Nous remercions les membres de jury qui ont bien voulu accepter d'examiner ce mémoire et à cet égards nous leurs présentons nos profonds respects.

Nous exprimons aussi nos remerciements ou enseignants du département d'Electrotechnique.

Dédicaces

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents **AHMED** et **NASSIMA**, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A mes frères **ACHREF**, **ABD ERRAOUF** et **ARSLEN ABD ERRAHIM** pour leurs appuis et leur encouragement.*

*A ma binôme, ma meilleure amie **OUISSEM** qui est toujours avec moi.*

*A mes copines **RAYEN** et **NIHAD**, mes amis **YOUCEF**, **ILYES**, **ISLEM** et **ZINE EDDINE**.*

A tous ce qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter leur soutien, pendant mes années d'études.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible.

SABRINE

Dédicaces

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents **CHERIF** et **BAHIA**, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A mes sœurs **IKRAM, RANIA, AMIRA** et mon frère **MOHAMED EL AMIN** pour leurs appuis et leur encouragement.*

*A ma binôme, ma meilleure amie **SABRINE** qui est toujours avec moi.*

*A mes copines **RAYEN** et **NIHAD**, mes amis **YOUCEF, ILYES, ISLEM** et **ZINE EDDINE**.*

A tous ce qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter leur soutien, pendant mes années d'études.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible.

OUISSEM

Liste des figures

Chapitre I - L'énergie solaire et les systèmes PHOTOVOLTAÏQUES

Figure.I.1 : panneaux solaires	3
Figure.I.2: Énergie thermique.....	4
Figure.I.3: Énergie solaire photovoltaïque	5
Figure.I.4: Unités de production photovoltaïque	6
Figure.I.5: Trois images de liaison d'un semi-conducteur.....	12
Figure.I.6 : Mouvement d'un trou	13
Figure.I.7 : Caractéristiques de la jonction pn	13
Figure.I.8: Un diagramme montrant la jonction pn.....	15
Figure.I.9: Cellule MONO-CRISTALLINE	15
Figure.I.10: Cellule poly-cristallin.....	16
Figure.I.11: Cellule amorphe	17
Figure.I.12: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéale	18
Figure .I.13: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réelle.....	19
Figure .I.14: Evolution de la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$	20
Figure.I.15: Module photovoltaïque.....	22
Figure.I.16: Panneau photovoltaïque.....	22
Figure.I.17: Centrale photovoltaïque.....	22
Figure.I.18: Groupe de 18 cellules connectées avec NON-OVERLAPED diode	23
Figure.I.19 : Groupe de 18 cellules montées avec OVERLAPED diode	24
Figure.I.20: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	24
Figure.I.21: la caractéristique résultante obtenue en association en série	25
Figure.I.22: la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles.....	25
Figure.I.23: la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.....	26
Figure.I.24: L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	26
Figure.I.25 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	27
Figure .I.26 : Schéma de principe du convertisseur MPPT.....	28
Figure.I.27: Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (a) et la charge R (b)	29
Figure.I.28: Fluctuation du PPM avec l'intensité de la température (c)	29
Figure.I.29: Présentation de l'organigramme amenant le système à un fonctionnement à son PPM.....	29
Figure.I.30: Principe de la première commande MPPT numérique	32
Figure.I.31 : Commande MPPT simple implantée en analogique	34

Chapitre II Stockage d'énergie (accumulateur de batteries)

Figure.II.1 : Etat de charge et profondeur de décharge.....	41
Figure.II.2 : Batterie solaire lithium ion	44
Figure.II.3 : Constitution des éléments Li-ion.....	45
Figure.II.4 : Diagramme de charge des accus lithium-ion	46
Figure.II.5 : Caractéristique de décharge du courant nominal de batterie lithium-ion (Li-Ion)	47
Figure.II.6 : Principe de fonctionnement d'accu Li-ion (charge /décharge)	48
Figure.II.7 : Circuit électronique de protection	49
Figure.II.8 : Modèle de Shepherd de batterie Lithium-Ion	50

Chapitre III Régulateur solaire et commande MPPT

Figure.III.1 : Illustration d'un régulateur solaire	53
Figure.III.2 : Schéma fonctionnel d'un régulateur de charge.....	54
Figure.III.3 : Principes de fonctionnements du régulateur de charge	56
Figure.III.4 : Conception de Régulateur de charge de type shunt	57
Figure.III.5 : Principe de fonctionnement d'un régulateur de type shunt	58
Figure.III.6 : Conception de Régulateur de charge de type série	59
Figure.III.7 : Évaluation de la tension et du courant au cours de charge	60
Figure.III.8 : Schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	61
Figure.III.9 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal.....	63
Figure.III.10 : Schéma représentatif d'un hacheur boost	65
Figure.III.11 : Convertisseur Boost durant l'état ON	66

Liste des figures

Figure.III.11 : Convertisseur Boost durant l'état OFF	66
Figure.III.13 : Organigramme de l'algorithme P&O	68
Figure.III.14 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).....	69
Figure.III.15 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque	71
Figure.III.16 : La caractéristique électrique I (V) dans les conditions Standards (T=25°, G=1000W/m²).....	71
Figure.III.17 : La caractéristique électrique P (V) dans les conditions Standards (T=25°, G=1000W/m²).....	72
Figure.III.18 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V Pour différents Eclairément et une Température T=25°C.....	72
Figure.III.19 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V, pour différentes températures et un éclairément G=1000W/m²	73
Figure.III.20 : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost) connecté à modèle PV avec MPPT	74
Figure.III.21 : Modèle SIMULINK pour l'algorithme MPPT (P&O).....	75
Figure.III.22 : La tension d'entrée V _{pv} et sortie V _{out} de le hacheur avec MPPT	75
Figure.III.23 : le courant d'entrée I _{pv} et sortie I _{out} de le hacheur avec MPPT.....	75
Figure.III.24 : La puissance d'entrée P _{pv} et sortie P _{out} de le hacheur avec MPPT.....	76

Liste des tableaux

Chapitre I - L'énergie solaire et les systèmes PHOTOVOLTAÏQUES

<i>Tableau.I.1: Tableau périodique des éléments</i>	<i>11</i>
<i>Tableau .I.2: Différents modèles électriques de cellule photovoltaïque</i>	<i>18</i>

Chapitre III - Régulateur solaire et commande MPPT

<i>Tableau.III.1 : Les différents types de convertisseurs DC = DC</i>	<i>64</i>
<i>Tableau.III.2 : Comparaison Des Techniques MPPT</i>	<i>67</i>
<i>Tableau.III.3 : Caractéristique électrique de module photovoltaïque.....</i>	<i>70</i>

Liste des symboles

Rs	Résistance série en [Ω]
I_{ph}	Photo-courant en [A]
I_d	Courant traversant la diode en [A]
I_{pv}	Courant photovoltaïque en [A]
I_{cc}	Courant de court-circuit en [A]
V_{pv}	Tension photovoltaïque en [V]
I_s	Courant de saturation inverse de la diode en [A]
V_{co}	Tension de circuit-ouvert en [V]
D	Diodes
R_{sh}	Résistance shunte [Ω]
S	Surface de cellule en [m ²]
I_{sc}	Courant de court-circuit d'une NS cellules en [A]
I_{pcc}	Courant de court-circuit d'une NP cellules en [A]
V_{pco}	Tension de circuit-ouvert d'une NP cellules en [V]
PPM	Point de puissance maximale
α	Coefficient dépendant faiblement de la température en [A/W]
I	Courant de panneau en [A]
V	Tension de panneau en [V]
ev	Electron –volts
P_{max}	La puissance maximale
V_{max}	La tension maximale
I_{max}	Le courant maximum
FF	Le facteur de forme
MPPT	Maximum power point tracking
η	Le rendement
E	Flux incident
Wh	Watheures
Kwh	Kilowatheures
Ahr	Amperes-heures
E₀	Constant de voltage de batterie en v
K	Constant de la polarisation en Ah ⁻¹

Liste des symboles

Q	Capacité maximale de batterie en Ah
i^*	Courant à basse fréquence en A
i	Courant de batterie en A
it	Capacité extrait en Ah
A	Tension exponentielle en V
B	Capacité exponentielle en Ah ⁻¹
VFC	La tension de fin de charge
VRE	La tension de recharge

Abréviations

PV	Photovoltaïque
D	Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens
NP	Nombre des cellules en parallèle
NS	Nombre des cellules en série
NC	Nombre des cellules dans un panneau
GPV	Générateur photovoltaïque
DC/D	Convertisseur continu vers continu
SOC	State of charge, en français `Etat de charge`
DOD	Depth of discharge, en français `Etat de décharge`

Sommaire

Introduction générale :.....	1
<i>Chapitre I L'énergie solaire et les systèmes PHOTOVOLTAÏQUES</i>	
I.1 Introduction :.....	3
I.2 L'énergie solaire :.....	3
I.2.1 Type d'énergie solaire :.....	4
I.2.1.1 Énergie solaire thermique.....	4
I.2.1.2 Énergie solaire photovoltaïque.....	4
I.3 Définition de l'énergie photovoltaïque :	5
I.3.1 La cellule PHOTOVOLTAÏQUE :	6
I.3.1.1 Différents types :.....	6
I.3.1.1.1 Cellules solaires au silicium.....	6
I.3.1.1.2 Cellules solaires à silicium monocristallin.....	7
I.3.1.1.3 Cellules solaires poly-cristallines.....	8
I.3.1.1.4 Cellules solaires à couche mince.....	8
I.3.1.1.5 Cellules solaires au silicium amorphe	9
I.3.1.1.6 Cellules solaires au tellure de cadmium	9
I.3.1.1.7 Cellules solaires de séléniure de gallium et d'indium cuivré	10
I.3.1.2 Matériaux semi-conducteur :.....	10
I.3.1.3 La jonction photovoltaïque :	13
I.3.1.4 Les différentes cellules en silicium :	15
I.3.1.4.1 Cellule au silicium MONO-CRISTALLIN :.....	15
I.3.1.4.2 Cellule au silicium POLY-CRISTALLIN :.....	16
I.3.1.4.3 Cellule au SILICIUM AMORPHE :	16
I.3.1.5 Modélisation d'un système d'énergie photovoltaïque :	17
I.3.1.5.1 Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque :.....	17
I.3.1.5.1 .1 Cas d'une cellule idéale :.....	17
I.3.1.5.1 .2 Cas d'une cellule réelle :.....	18
I.3.1.5.1 .2.1 Résistance série R_S :.....	19
I.3.1.5.1 .2.2 Résistance parallèle R_{Sh} :.....	19
I.3.1.6 Caractéristiques courant-tension	19
I.4 Modules photovoltaïques :	21
I.4.1 Modules photovoltaïques :	21
I.4.1.1 Panneau photovoltaïque	22
I.4.1.2 Centrale photovoltaïque	22
I.4.2 les caractéristiques d'un module photovoltaïque (panneau solaire) :.....	22

Sommaire

I.4.3	Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	24
I.4.4	Association de cellule photovoltaïque :	24
I.4.4.1	Association série	24
I.4.4.2	Association en parallèle	25
I.4.4.3	Association en série/parallèle.....	25
I.4.5	Influence de la température :.....	26
I.5	Commandes MPPT :	27
I.5.1	Principe de la Recherche du PPM.....	28
I.5.2	Techniques de commande MPPT.....	30
I.5.2.1	Méthodes indirectes	30
I.5.2.2	Méthodes directes.....	30
I.5.3	Différents types de commandes MPPT	31
I.5.3.1	Premières commandes MPPT	31
I.5.3.2	Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité.....	32
I.5.3.2.1	Commande en régulation de tension	32
I.5.3.2.2	Commande en régulation de courant.....	33
I.5.3.2.3	Commande en régulation de puissance	33
I.5.3.3	Les MPPT à implantation analogique	34
I.5.3.4	MPPT RCC (RIPPLE Corrélation Control).....	34
I.5.3.5	MPPT basé sur le balayage du courant (CURRENTSWEEP).....	35
I.5.3.6	Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue.....	35
I.5.3.7	Les commande MPPT basées sur les réseaux de neurones	36
I.5.3.8	Méthode incrémentation de conductance	36
I.6	Conclusion :	37
<i>Chapitre II Stockage d'énergie (accumulateur de batteries)</i>		
II.1	Introduction :	39
II.2	Les différents types de batteries:.....	39
II.3	Caractéristiques des batteries :	40
II.3.1	La capacité de stockage :	40
II.3.2	L'espérance de vie :	40
II.3.3	État de charge :	40
II.3.4	La profondeur de décharge :	41
II.3.5	Influence de la température :.....	41
II.4	Batteries solaires :	41
II.5	Critère de Choix de batterie solaire pour une installation photovoltaïque:.....	42
II.5.1	Besoin de stockage énergétique du système :	42
II.5.2	Tension des batteries solaires :.....	42
II.5.3	Durée de vie de la batterie solaire :.....	43

Sommaire

II.5.4 Autonomie nécessaire dans le système PV :	43
II.5.5 Dimensionnement des batteries solaires :	43
II.6 Les technologies lithium-ion innovantes :	44
II.6.1 La cellule de base lithium-ion :	44
II.6.2 Principe de fonctionnement :	45
II.6.2.1 La charge d'accumulateur au Li-ion	45
II.6.2.2 Décharge des accumulateurs au Li-ion	46
II.6.2.3 Les précautions d'utilisation de bases.....	48
II.6.2.4 Le circuit électronique de protection interne	49
II.6.2.5 Stockage des accus au Lithium	49
II.6.2.6 Les Températures de fonctionnement	49
II.7 Modélisation d'une batterie par un circuit électrique :	50
II.8 Conclusion :	51
<i>Chapitre III Régulateur solaire et commande MPPT</i>	
III.1 Introduction	53
III.2 Régulateur solaire (contrôleur de charge)	54
III.3 Les fonctionnalités classiques d'un régulateur solaire	54
III.4 Différents types des régulateurs de charge	56
III.4.1 Le régulateur de charge shunt.....	57
III.4.2 Le régulateur de charge série.....	58
III.4.3 Régulation PWM (Pulse With Modulation)	59
III.4.4 Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking)	60
III.4.4.1 Caractéristiques du régulateur MPPT	61
III.4.4.2 Partie électronique de puissance	63
III.4.4.3 Partie commandes (Technique de la commande MPPT).....	67
III.5 Simulation du système Photovoltaïque-Hacheur avec la commande MPPT.....	70
III.5.1 Simulation du module 1Soltech 1STH-220P.....	70
III.5.1.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque	71
III.5.1.2 Influence de l'éclairement	72
III.5.1.3 Influence de la température	73
III.5.2 Simulation du schéma global.....	74
III.6 Conclusion.....	76
Conclusion générale.....	77
Références bibliographiques	78

Introduction générale

Nous avons assisté ces dernières décennies au phénomène de réchauffement climatique qui a engendré de sérieux dangers sur la terre. Ce phénomène a entraîné la planète dans l'instabilité climatique accompagnée par des catastrophes naturelles (la température élevée, les éruptions volcaniques, les tremblements de terre, les inondations, les ouragans...etc.). Cette perturbation du climat ou « l'effet de serre » est dû à la quantité importante de CO₂ émis dans l'atmosphère. Ajoutant au problème des gaz nocifs émis, les spécialistes se soucient aussi des réserves des énergies fossiles (gaz et pétrole) qui tendent vers l'épuisement. Le monde actuel cherche à trouver des solutions pour réduire la quantité de CO₂ dans l'air par l'utilisation de plusieurs méthodes innovantes. Ces solutions sont les énergies renouvelables. On a trois types des énergies renouvelables, solaire, éolienne et biomasse. Les énergies renouvelables les plus utilisées sont les énergies solaires, éoliennes et hydrauliques. L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen du capteur relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité par effet photovoltaïque, dans notre travail nous allons nous baser sur la production d'électricité par effet photovoltaïque. Dans cette thématique, s'intègre notre projet, qui s'intitule « Contribution à l'étude et à la simulation d'un générateur photovoltaïque pour un site isolé ».

Dans le 1er chapitre nous présentons les généralités sur les systèmes photovoltaïques, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et les différentes technologies de cellules photovoltaïques. La modélisation des éléments d'un système photovoltaïque, on décrit le système à étudier et le modèle électrique d'un générateur photovoltaïque.

Dans le 2em Chapitre nous présentons les batteries de stockage d'énergie solaire, Les différents types de batteries, Caractéristiques des batteries et la modélisation d'une batterie par un circuit électrique.

Dans le 3em Chapitre nous présentons le régulateur solaire, différents types des régulateurs de charge, et nous présentons la simulation du système photovoltaïque avec la commande du point de puissance maximale (MPPT), la commande Perturbation & Observation (P&O) et la simulation du système global.

Puis on termine par une conclusion générale.

***Chapitre I - L'énergie solaire et les
systèmes PHOTOVOLTAÏQUES***

I.1 Introduction :

Aujourd'hui, l'énergie solaire rime avec écologie. Les technologies permettant de mettre à profit les rayons du soleil pour en faire de l'énergie, ont énormément évolué ces dernières années. Le soleil est une source infinie d'énergie et dont nous pouvons bénéficier en abondance. Et ce, pour très longtemps ! Cette énergie passive est simplement captée par des panneaux solaires ou photovoltaïques.

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible.

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « PHOS » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité). [1,2]

I.2 L'énergie solaire :

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.



Figure.I.1 : panneaux solaires.

L'énergie solaire est propre, n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, est gratuite, inépuisable et disponible. Partout dans le monde.

I.2.1 Type d'énergie solaire :

C'est l'énergie produite dans toutes les directions par le soleil grâce au rayonnement solaire. Il existe principalement deux façons d'utiliser l'énergie solaire :

I.2.1.1 Énergie solaire thermique :

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil (figure I. 2), cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau pour les différentes applications (chauffe-eau et chauffage solaires). [3]



Figure.I.2 : Énergie thermique.

I.2.1.2 Énergie solaire photovoltaïque :

En effet le mot " photovoltaïque " vient de " photo " qui signifie la lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827). [4]



Figure.I.3 : Énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules solaires généralement à base de silicium. [3]

I.3 Définition de l'énergie photovoltaïque :

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la terre. Le monde peut utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité. [5]

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée. [5]



(a) Cellule photovoltaïque

(b) Panneau photovoltaïque

(c) Champ photovoltaïque

Figure.I.4 : Unités de production photovoltaïque. [3]

I.3.1 La cellule PHOTOVOLTAÏQUE :

La cellule photovoltaïque est un capteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Cette cellule est l'unité de base du système photovoltaïque. Il se compose d'un matériau semi-conducteur, ce qui rend la plus petite composante du système photovoltaïque. [5]

I.3.1.1 Différents types :

1. Cellules solaires au silicium
2. Cellules solaires monocristallines en silicium
3. Cellules solaires poly-cristallines
4. Cellules solaires à couche mince
5. Cellules solaires en silicium amorphe
6. Cellules solaires au tellure de cadmium
7. Cellules solaires de séléniure de gallium et d'indium cuivré

Les cellules solaires contiennent des matériaux aux propriétés semi-conductrices dans lesquels leurs électrons deviennent excités et transformés en courant électrique lorsqu'ils sont frappés par la lumière du soleil. Bien qu'il y ait des dizaines de variations de cellules solaires, les deux types les plus communs sont ceux faits de silicium cristallin (monocristallin et poly-cristallin) et ceux faits avec ce qu'on appelle la technologie de film mince. [6]

I.3.1.1.1 Cellules solaires au silicium :

La majorité des cellules solaires sur le marché aujourd'hui sont faites d'un certain type de silicium - selon certaines estimations, 90% de toutes les cellules solaires sont

faites de silicium. Cependant, le silicium peut prendre de nombreuses formes différentes. Les variations se distinguent surtout par la pureté du silicium, qui fait référence à la façon dont les modules de silicium sont alignés.

Plus la pureté des molécules de silicium est grande, plus la cellule solaire est efficace pour convertir la lumière du soleil en électricité. La majorité des cellules solaires à base de silicium sur le marché – environ 95 % – sont faites de silicium cristallin, ce qui en fait le type de cellule solaire le plus courant. Mais il existe deux types de cristaux : monocristallin et poly-cristallin.

I.3.1.1.2 Cellules solaires à silicium monocristallin :

Les cellules solaires monocristallines, également appelées cellules "monocristallines" sont facilement reconnaissables par leur coloration. Mais ce qui les rend uniques est qu'ils sont considérés comme étant fabriqués à partir d'un type de silicium très pur. Dans le monde du silicium, plus l'alignement des molécules est pur, plus le matériau est efficace pour convertir la lumière du soleil en électricité. En fait, les cellules solaires monocristallines sont les plus efficaces de toutes ; leur efficacité a été documentée à plus de 20 %.

Les cellules solaires monocristallines sont faites de "lingots de silicium", une conception cylindrique qui aide à optimiser les performances. Essentiellement, les concepteurs découpent quatre côtés de lingots cylindriques pour fabriquer les plaquettes de silicium qui composent les panneaux monocristallins. De cette façon, les panneaux composés de cellules monocristallines ont des bords arrondis plutôt que d'être carrés, comme d'autres types de cellules solaires.

En plus d'être les plus efficaces dans leur production d'énergie électrique, les cellules solaires monocristallines sont également les plus éco énergétiques. Ceci est logique puisque vous auriez besoin de moins de cellules par unité de sortie électrique. De cette façon, les panneaux solaires composés de monocristallins occupent le moins d'espace par rapport à leur intensité de génération. Un autre avantage des cellules monocristallines est qu'elles durent aussi le plus longtemps de tous les types. De nombreux fabricants offrent des garanties allant jusqu'à 25 ans sur ces types de systèmes PV. La supériorité des cellules monocristallines a un prix. En fait, les

panneaux solaires faits de cellules monocristallines sont les plus chers de toutes les cellules solaires, donc du point de vue de l'investissement, les cellules polycristallines et à film mince sont souvent le choix préféré des consommateurs. Une des raisons pour lesquelles les cellules monocristallines sont si chères est que le processus de coupe à quatre côtés finit par gaspiller beaucoup de silicium, parfois plus de la moitié.

I.3.1.1.3 Cellules solaires poly-cristallines :

Les cellules solaires polycristallines, également connues sous le nom de cellules polysilicium et multi-silicones, ont été les premières cellules solaires jamais introduites dans l'industrie, en 1981. Les cellules polycristallines ne passent pas par le processus de coupe utilisé pour les cellules monocristallines. Au lieu de cela, le silicium est fondu et versé dans un moule carré, d'où la forme carrée de polycristallin. De cette façon, ils sont beaucoup plus abordables puisque pratiquement tout silicium est gaspillé pendant le processus de fabrication.

Cependant, la polycristalline est moins efficace que son cousin monocristallin. Typiquement, les systèmes solaires photovoltaïques polycristallins fonctionnent à un rendement de 13-16% - encore une fois, c'est parce que le matériau a une pureté inférieure. En raison de cette réalité, polycristalline est moins peu d'espace, ainsi. Un autre inconvénient de polycristallin est qu'il a une tolérance à la chaleur plus faible que monocristallin, ce qui signifie qu'ils ne fonctionnent pas aussi efficacement dans les températures élevées.

I.3.1.1.4 Cellules solaires à couche mince :

Un autre type de cellule solaire est la cellule solaire à couche mince avec des taux de croissance d'environ 60% entre 2002 et 2007. En 2011, l'industrie des cellules solaires à couche mince représentait environ 5 % de toutes les cellules sur le marché.

Bien qu'il existe de nombreuses variantes de produits à couches minces, elles permettent généralement de réaliser des économies de 7 à 13 %. Cependant, beaucoup de recherche et de développement sont consacrés aux technologies à couches minces et de nombreux scientifiques soupçonnent des gains d'efficacité pouvant atteindre 16 % dans les modèles à venir. Les cellules solaires à couche mince sont caractérisées par les différents types de matériaux semi-conducteurs (y compris le silicium dans certains cas) qui sont superposés les uns aux autres pour créer une série de couches minces.

Le principal attrait des technologies à film mince est leur coût. La production de masse est beaucoup plus facile que les modules cristallins, de sorte que le coût de production de masse des cellules solaires à film mince est relativement bon marché. Le produit lui-même est également flexible, ce qui conduit à de nombreuses nouvelles applications des technologies solaires dans les scénarios où avoir un certain type de matériau flexible est avantageux. Un autre avantage est que la chaleur élevée et l'ombrage ont moins d'impact négatif sur les technologies à film mince. Pour ces raisons, le marché des films minces continue de croître.

Un inconvénient majeur est que les technologies à couche mince nécessitent beaucoup d'espace. Cela les rend moins des candidats idéaux pour des applications résidentielles où l'espace devient un problème. En conséquence, le film mince décolle davantage dans l'espace commercial. Et les cellules solaires à film mince ont une durée de vie plus courte que leurs homologues cristallins, comme en témoignent les garanties plus courtes offertes par les fabricants.

La technologie à couche mince utilise diverses substances photovoltaïques, dont le silicium amorphe, le tellure de cadmium, l'indium de cuivre et le séléniure de gallium. Chaque type de matériau convient à différents types d'applications solaires.

I.3.1.1.5 Cellules solaires au silicium amorphe :

Les cellules solaires à pellicule mince faites de silicium amorphe sont traditionnellement utilisées pour des applications à plus petite échelle, notamment les calculatrices de poche, les lampes de voyage et l'équipement de camping utilisé dans les régions éloignées. Un nouveau processus appelé "empilage" qui implique la création de couches multiples de cellules de silicium amorphe a entraîné des taux plus élevés d'efficacité (jusqu'à 8%) pour ces technologies, cependant, il est encore assez cher.

I.3.1.1.6 Cellules solaires au tellure de cadmium :

Le tellure de cadmium est le seul matériau à couche mince qui a été concurrentiel par rapport aux modèles de silicium cristallin. En fait, au cours des dernières années, certains modèles de cadmium les ont surpassés en termes de rentabilité. Les niveaux d'efficacité se situent dans une fourchette de 9 à 11 %.

I.3.1.1.7 Cellules solaires de sélénure de gallium et d'indium cuivré :

Cuivre Indium Gallium les cellules de sélénure se sont montrées les plus prometteuses en ce qui concerne leurs niveaux d'efficacité qui varient de 10 à 12%, un peu comparable aux technologies cristallines. Cependant, ces cellules sont encore au stade naissant de la recherche et n'ont pas été déployées commercialement à grande échelle. Cela dit, la technologie est surtout utilisée dans des applications plus importantes ou commerciales.

I.3.1.2 Matériaux semi-conducteur :

Semi-conducteur : toute classe de solides cristallins dont la conductivité électrique est intermédiaire entre un conducteur et un isolant.

Les semi-conducteurs sont utilisés dans la fabrication de divers types d'appareils électroniques, y compris les diodes, les transistors et les circuits intégrés. De tels dispositifs ont trouvé une large application en raison de leur compacité, de leur fiabilité, de leur efficacité énergétique et de leur faible coût. En tant que composants discrets, ils ont trouvé une utilisation dans les dispositifs de puissance, les capteurs optiques et les émetteurs de lumière, y compris les lasers à semi-conducteurs. Ils ont une large gamme de capacités de gestion du courant et de la tension et, plus important encore, se prêtent à l'intégration en circuits microélectroniques complexes mais facilement manufacturables. Ils sont, et seront dans un avenir prévisible, les éléments clés de la minorité des systèmes électroniques, au service des communications, du traitement du signal, de l'informatique et des applications de contrôle sur les marchés grand public et industriels.

Matériaux semi-conducteurs : Les matériaux à l'état solide sont généralement regroupés en trois classes : les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs. (À basse température, certains conducteurs, semi-conducteurs et isolants peuvent devenir des supraconducteurs) La figure montre la conductivités σ (et les résistivités correspondantes $\rho = 1/\sigma$) qui sont associées à certains matériaux importants dans chacune des trois classes .Les isolants, tels que le quartz fondu et le verre ,ont des conductivités très faibles, de l'ordre de 10^{-18} à 10^{-10} siemens par centimètre ; et les conducteurs, tels que l'aluminium, ont des conductivités élevées, typiquement de 10^4 à 10^6 siemens par centimètre.

Les conductivités des semi-conducteurs se situent entre ces extrêmes et sont généralement sensibles à la température, à l'éclairage, aux champs magnétiques et aux

quantités infimes d'atomes d'impuretés. Par exemple, l'ajout d'environ 10 atomes de bore (appelé dopant) par million d'atomes de silicium peut multiplier par mille sa conductivité électrique (expliquant en partie la grande variabilité illustrée dans la figure précédente). [7]

Group→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓Period																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			* 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

Tableau.I.1 : Tableau périodique des éléments. [7]

L'étude des matériaux semi-conducteurs a commencé au début du 19e siècle. Les semi-conducteurs élémentaires sont ceux composés d'une seule espèce d'atomes, tels que le silicium (Si), le germanium (Ge) et l'étain (Sn) dans la colonne 4 et le sélénium (Se) et le tellure (Te) dans la colonne 6 du tableau périodique. Il existe cependant de nombreux semi-conducteurs composés, qui sont composés de deux éléments ou plus. L'arséniure de gallium (GaAs), par exemple, est un composé 3-5 binaire, qui est une combinaison de gallium (Ga) de la colonne 3 et d'arsenic (As) de la colonne 5. Les composés ternaires peuvent être formés par des éléments de trois colonnes différentes- par exemple, le tellure d'indium et de mercure (Hgin, Te), un composé 2-3-6. Ils peuvent également être formés par des éléments de deux colonnes, tels que l'arséniure d'aluminium et de gallium (Al x Ga, x As), qui est un composé ternaire 3-5, où Al et Ga sont tous deux de la colonne 3 et l'indice x est lié à la composition des deux éléments de 100 % Al (x = 1) à 100% Ga (x = 0). Pour le silicium est le matériau le plus important pour les applications de circuits intégrés, et les composés binaires et ternaires 3-5 sont les plus importants pour l'émission de lumière.

Avant l'invention du transistor bipolaire en 1947, les semi-conducteurs n'étaient utilisés que comme dispositifs à deux bornes, tels que les redresseurs et les photodiodes.

Au début des années 1950, le germanium était le principal matériau semi-conducteur. Cependant, il s'est avéré inadapté à de nombreuses applications, car les dispositifs constitués de ce matériau présentaient des courants de fuite élevés à des températures seulement modérément élevées. Depuis le début des années 1960, le silicium est devenu de loin le semi-conducteur le plus largement utilisé, supplantant pratiquement le germanium comme matériau pour la fabrication de dispositifs.

Les principales raisons en sont doubles : (1) les dispositifs au silicium présentent des courants de fuite beaucoup plus faibles et (2) le dioxyde de silicium (SiO_2), qui est un isolant de haute qualité, est facile à intégrer dans un dispositif à base de silicium. Ainsi, la technologie du silicium est devenue très avancée et omniprésente, les dispositifs au silicium constituant plus de 95 % de tous les produits semi-conducteurs vendus dans le monde. De nombreux semi-conducteurs composés ont des propriétés électriques et optiques spécifiques qui sont supérieures à leurs homologues en silicium. Ces semi-conducteurs, en particulier l'arséniure de gallium, sont principalement utilisés pour les applications optoélectroniques et certaines radiofréquences (RF).

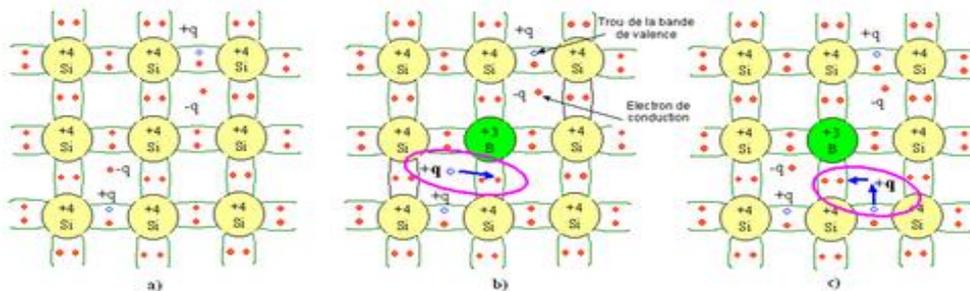


Figure.I.5 : Trois images de liaison d'un semi-conducteur. [7]

Les matériaux semi-conducteurs décrits ici sont des monocristaux ; c'est-à-dire que les atomes sont disposés de manière périodique en trois dimensions. La partie A de la figure montre une représentation bidimensionnelle simplifiée d'un cristal de silicium intrinsèque (pur) qui contient des impuretés négligeables. Chaque atome de silicium du cristal est entouré de quatre de ses plus proches voisins. Chaque atome a quatre électrons dans son orbite externe et partage ces électrons avec ses quatre voisins. Chaque paire d'électrons partagée constitue une liaison covalente. La force d'attraction entre les électrons et les deux noyaux maintient les deux atomes ensemble. Pour les atomes isolés (par exemple, dans un gaz plutôt que dans un cristal), les électrons ne peuvent avoir que des niveaux d'énergie discrets.

Cependant, lorsqu'un grand nombre d'atomes sont réunis pour former un cristal, l'interaction entre les atomes provoque la dispersion des niveaux d'énergie discrets en bandes d'énergie. Lorsqu'il n'y a pas de vibration thermique (c'est-à-dire à basse température), les électrons d'un isolant ou d'un cristal semi-conducteur rempliront complètement un certain nombre de bandes d'énergie, laissant le reste des bandes d'énergie vides. La bande la plus remplie est appelée bande de valence. La bande suivante est la bande de conduction, qui est séparée de la bande de valence par un écart d'énergie (écarts beaucoup plus grands dans les isolants cristallins que dans les semi-conducteurs). Cette bande interdite, également appelée bande interdite, est une région qui désigne les énergies que les électrons du cristal ne peuvent pas posséder. La plupart des semi-conducteurs importants ont des bandes interdites comprises entre 0,25 et 2,5

électron-volts (eV). La bande interdite du silicium, par exemple, est de 1,12 eV et celle de l'arséniure de gallium est de 1,42 eV. En revanche, la bande interdite du diamant, un bon isolant cristallin, est de 5,5 eV.

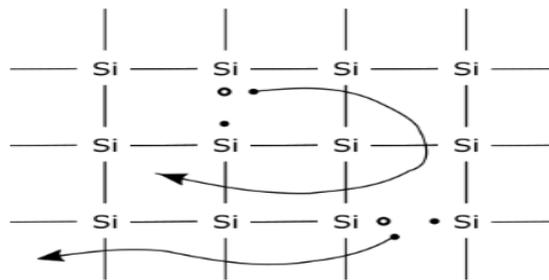


Figure.I.6 : Mouvement d'un trou. [7]

I.3.1.3 La jonction photovoltaïque :

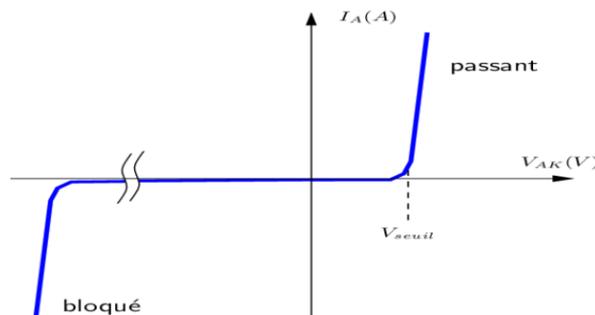


Figure.I.7 : Caractéristiques de la jonction pn. [7]

Si un changement brusque du type d'impureté des accepteurs (type p) aux donneurs (type n) se produit dans une structure monocristalline, une jonction p - n se forme (voir les parties B et C de la figure).

Du côté p, les trous constituent les porteurs dominants et sont donc appelés porteurs majoritaires.

Quelques électrons générés thermiquement existeront également du côté p; ceux-ci sont appelés porteurs minoritaires. Sur le n côté, les électrons sont les porteurs majoritaires, tandis que les trous sont les porteurs minoritaires. Près de la jonction se trouve une région sans porteurs de charge gratuits. Cette région, appelée couche d'appauvrissement, se comporte comme un isolant.

La caractéristique la plus importante des jonctions (p-n) est qu'elles se redressent. La partie A de la figure montre les caractéristiques courant-tension d'une jonction p - n en silicium typique.

Lorsqu'une polarisation directe est appliquée à la jonction (p-n) (c'est-à-dire une tension positive appliquée au côté p par rapport au côté n, comme indiqué dans la partie B de la figure), les porteurs de charge majoritaires se déplacent à travers la jonction de sorte.

Qu'un grand courant peut couler.

Cependant, lorsqu'une polarisation inverse est appliquée (comme dans la partie C de la figure), les porteurs de charge introduits par les impuretés se déplacent dans des directions opposées en s'éloignant de la jonction, et seul un faible courant de fuite circule. Lorsque la polarisation inverse augmente, le courant de fuite reste très faible jusqu'à ce qu'une tension critique soit atteinte, moment auquel le courant augmente soudainement. Cette augmentation soudaine du courant est appelée rupture de jonction, généralement un phénomène non destructif si la dissipation de puissance résultante est limitée à une valeur sûre. La tension directe appliquée est généralement inférieure à un volt, mais la tension critique inverse, appelée tension de claquage, peut varier de moins d'un volt à plusieurs milliers de volts, en fonction de la concentration d'impuretés de la jonction et de l'autre dispositif. Paramètres bien que d'autres types de jonctions aient été inventés (y compris p - n - p et n -p-n), les jonctions (p-n) restent fondamentales pour les dispositifs semi-conducteurs. Pour plus de détails sur les applications de ces propriétés semi-conductrices de base, voir transistor et circuit intégré. [7]

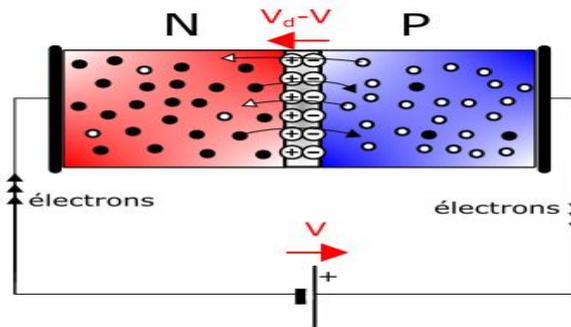


Figure.I.8 : Un diagramme montrant la jonction pn.

I.3.1.4 Les différentes cellules en silicium :

Il existe trois grands types des cellules selon le type de silicium :

I.3.1.4.1 Cellule au silicium MONO-CRISTALLIN : Cette cellule solaire est également reconnue comme une cellule en silicium cristallin unique. Elle est faite de silicium pur et se présente dans une teinte noire foncée. En outre, elle est également peu encombrant et fonctionne plus longtemps que toutes les autres cellules en silicium.

Cependant, elle s'agit de la variante de cellule en silicium la plus chère du marché mais elle a un taux de rendement de 12% à 20%. [5]



Figure.I.9 : Cellule MONO-CRISTALLINE.

❖ **Avantage :**

- Très bon rendement (environ 150 Wc/m²)
- Durée de vie importante (+/- 30 ans)

❖ **Inconvénients :**

- Coût élevé - Rendement faible sous un faible éclaircissement
- Rendement module commercial : 12 à 20%.
- Rendement record en laboratoire : environ 25%.

I.3.1.4.2 Cellule au silicium POLY-CRISTALLIN : Comme son nom l'indique, cette cellule solaire en silicium est composée de plusieurs cellules cristallines. Elle est moins efficace que la cellule monocristalline et nécessite plus d'espace pour l'accueillir. Elles sont plus chères que les cellules amorphes mais elles ont un taux de rendement supérieur, de 11% à 15 %.

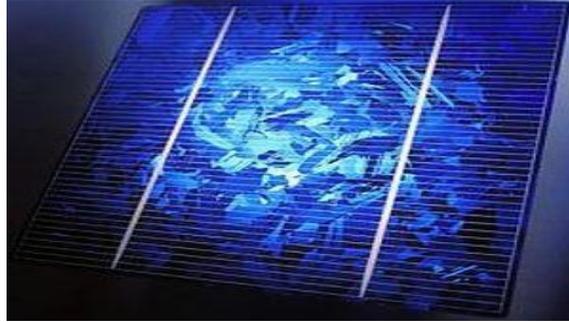


Figure.I.10 : Cellule poly-cristallin.

❖ **Avantage :**

- Bon rendement (environ 100 Wc/m²).
- Durée de vie importante (+/- 30 ans).
- Meilleur marché que le monocristallin.

❖ **Inconvénients :**

- Rendement faible sous un faible éclaircissement.
- Rendement module commercial : 11 à 15%.
- Rendement record en laboratoire : environ 20%.

I.3.1.4.3 Cellule au SILICIUM AMORPHE : Cette cellule solaire est l'une des variantes à couche mince les plus importantes. Elle peut être utilisée pour diverses applications et a une capacité d'absorption élevée. Elle a une efficacité maximale de 13%, moins que les deux autres types. Cependant, la cellule de silicium amorphe est la moins chère. Mais le rendement ne peut dépasser les 10%.

Elle est idéal pour charger de petits appareils électroniques comme des calculatrices et des montres De plus, il a une conception simple et peut être déposé sur de nombreuses structures comme le verre et les plastiques. [5]



Figure.I.11 : Cellule amorphe.

❖ **Avantage :**

- Fonctionnent avec un éclairage faible.
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules.
- Moins sensible aux températures élevées.

❖ **Inconvénients :**

- Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m^2), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.
- Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps.
- Rendement module commercial : 5 à 9%.
- Rendement record en laboratoire : environ 13,4%.

I.3.1.5 Modélisation d'un système d'énergie photovoltaïque :

I.3.1.5.1 Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque :

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque. On considère deux cas :

I.3.1.5.1.1 Cas d'une cellule idéale :

La cellule photovoltaïque idéale composée d'un générateur à courant et d'une diode en parallèle, ce dernier associé en série avec une résistance R_s . Le circuit équivalent illustré dans la figure suivante [8] :

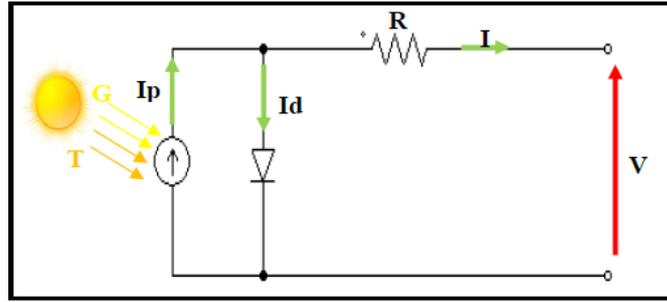


Figure.I.12 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéale.

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.1)$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{CC} avec $V_{PV} = 0$, courant de court-circuit obtenu en courant circulant dans la charge.

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.2)$$

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{q \cdot V_{co}}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

$$I_{ph} = I_{CC} \cdot \left(\frac{G}{1000}\right) \quad (I.4)$$

$$I = \left[I_{CC} \cdot \left(\frac{G}{1000}\right) \right] - I_s \left[\exp\left(\frac{q \cdot V_{co}}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (I.5)$$

Modèle	Schéma	Nombre Paramètres	Précision
Idéal		3	Faible
Une diode		5	Bien
Deux diodes		7	Très bien

Tableau.I.2 : Différents modèles électriques de cellule photovoltaïque.

I.3.1.5.1 .2 Cas d'une cellule réelle :

C'est le modèle le plus classique de la littérature il fait intervenir un générateur de courant I_{ph} pour la modélisation d'un flux lumineux incident, une diode (D) caractérisant la jonction PN et deux résistances [8,9] :

I.3.1.5.1 .2.1 Résistance série R_s : La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière représentant les pertes par effet joule.

I.3.1.5.1 .2.2 Résistance parallèle R_{sh} : rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction. Elle est généralement très supérieure à (R_s).

On peut l'étudier à partir de circuit équivalent illustré dans la figure suivante :

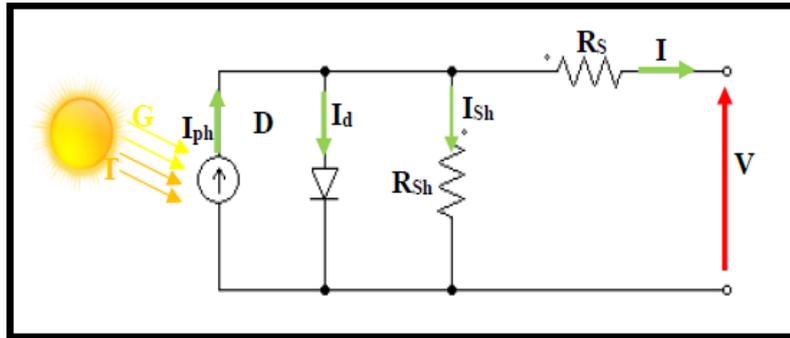


Figure.I.13 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réelle.

$$I_{Ph} = I_d + I_{sh} + I \quad (I.6)$$

$$I = I_{Ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.7)$$

$$I_d = I_S \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (I.8)$$

$$I_S = \frac{I_{cc}}{\left(\exp\left(\frac{V_{co}}{N_{cell} \cdot V_t}\right)\right)} \quad (I.9)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{co} + I_{cc} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (I.10)$$

$$I_{Ph} = I_{cc} \cdot \left(\frac{G}{1000}\right) \quad (I.11)$$

$$I = \left[I_{cc} \cdot \left(\frac{G}{1000}\right) \right] - I_S \left[\exp\left(\frac{q \cdot V + I \cdot R_s}{k \cdot T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}\right) \quad (I.12)$$

I.3.1.6 Caractéristiques courant-tension :

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. La figure suivante montre les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

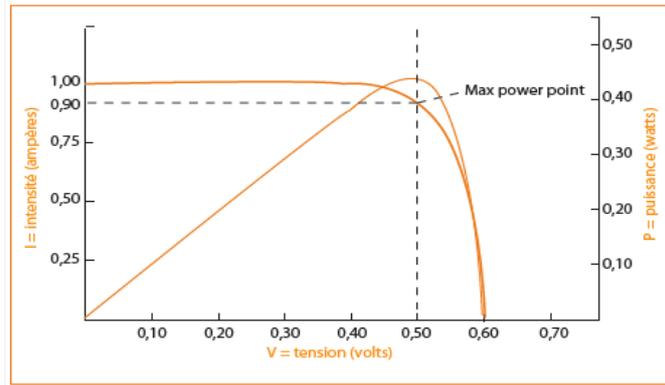


Figure.I.14 : Evolution de la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ [10].

- Le courant de court-circuit I_{cc} : Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée [12].

$$I_{Ph} = I_{cc} - I_s \left[\exp \left(\frac{V_{cell} + I_{ph} R_s}{nV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + I_{ph} R_s}{R_p} \quad (I.13)$$

Où : I_s (A) est le courant de saturation, V_t (V) le potentiel thermodynamique, K (J.K-1) la constante de Boltzmann, T (K) la température effective de la cellule en Kelvin, e (C) la charge de l'électron, n le facteur de non idéalité de la jonction, I_{ph} (A) est le courant fourni par la cellule, V_{cell} (V) la tension à ses bornes, I_{cc} (A) le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'éclairement et la température, R_p (Ω) la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction et R_s (Ω) la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions

- La tension en circuit ouvert V_{co} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [11].

$$V_{co} = V_t \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.14)$$

- La Puissance maximale P_{max} :

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} , correspondrait donc à la tension maximale multipliée par le courant maximum [11].

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad (I.15)$$

- Le facteur de forme FF :

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) [11].

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}}$$

(I.16)

- Le rendement η :

Le rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente [11].

Où

S : Surface de cellule solaire.

E : Flux incident.

$$\eta = \frac{V_{max} I_{max}}{P_{incidente}} \quad \eta = \frac{P_{max}}{E S}$$

(I.17)

I.4 Modules photovoltaïques :

La puissance électrique produite par une cellule industrialisée est très faible typiquement de 1 à 3W avec une tension de moins d'un volt [12].

Une cellule en tant que telle, étant donnée la faible tension à ses bornes ne suffit pas pour constituer à elle seule un générateur PV. Pour élever la tension, les cellules sont commercialisées sous forme des modules photovoltaïques. La plupart des fabricants de modules associent 36 cellules en série

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge.

Le module photovoltaïque est donc un ensemble de cellules connectées en série, en parallèle ou en série parallèle. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

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 endommager les cellules de façon permanente.



Figure.I.15 : Module photovoltaïque.

I.4.1.1 Panneau photovoltaïque :

Les panneaux solaires photovoltaïques qui sont composé d'un groupement de modules élémentaires associés en série et en parallèle suivant la puissance souhaitée.



Figure.I.16 : Panneau photovoltaïque.

I.4.1.2 Centrale photovoltaïque :

Une centrale solaire photovoltaïque est un ensemble destiné à augmenter la quantité de production solaire d'électricité. Elle est constituée de panneaux solaires photovoltaïques reliés entre eux (série et parallèle) et utilise des onduleurs pour être raccordée au réseau [13].



Figure.I.17 : Centrale photovoltaïque.

I.4.2 les caractéristiques d'un module photovoltaïque (panneau solaire) :

En raison de la faible tension générée par une cellule PV (environ 0,5 V) et de sa faible puissance, il est nécessaire de combiner plusieurs cellules. On obtient alors un

panneau solaire. L'association des cellules en série permet l'augmentation de la tension pour une parallèle permet d'augmenter le courant. De cette façon, on peut avoir un générateur PV adapté aux applications souhaitées [14].

Les caractéristiques I-V d'un panneau PV sont fonction de la température et l'irradiance comme dans le cas d'une cellule simple. D'autres facteurs tout aussi importants comme l'environnement, positionnement, l'état de surface et les ombres partielles conditionnent le fonctionnement des panneaux PV [15]. L'intensité du courant de court-circuit ICC et de la tension de circuit ouvert VCO sont plus ou moins grandes selon la configuration des cellules (série ou parallèle).

En général, un module PV est constitué de 36 ou 72 cellules montées en série. Néanmoins, ce nombre peut varier selon les applications. On peut trouver des modules de 40, 54, 72 voire même 96 cellules en série [16] [17].

Les cellules sont connectées entre elles en série pour former un groupe PV. Chaque groupe est connecté en antiparallèle avec diode de BYPASS an de les protéger de fonctionner en inverse (en cas d'ombrage par exemple). L'idéal est de connecter une diode BYPASS par cellule, mais cette technique n'est pas utilisée vu sa complexité et de son coût élevé. Deux différentes configurations sont possibles pour le montage des diodes by-pass [18] [19] comme montré sur les figures I et I.

Lorsque le module PV est partiellement occulté sa tension négative au point de fonctionnement peut être 1=3 de sa tension de circuit ouvert et la puissance consommée peut dépasser 1=3 de sa puissance crête dans le cas des modules PV avec OVERLAPED diodes. Tandis que dans les modules PV avec non OVERLAPED diode, les pertes d'énergie sont causées seulement par la consommation des diodes de BYPASS.

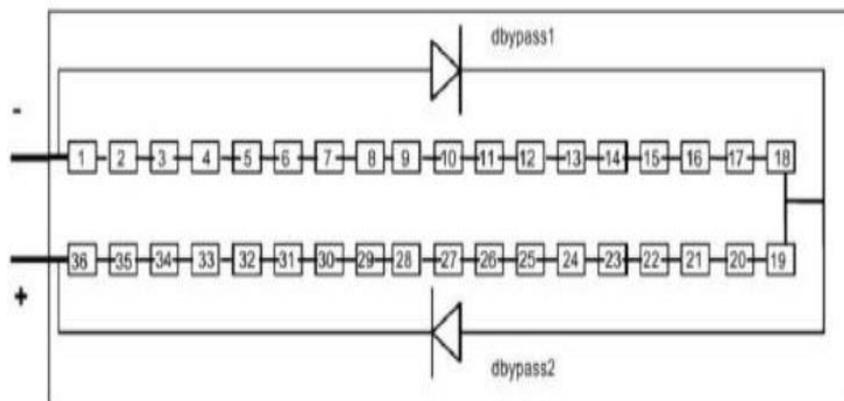


Figure.I.18 : Groupe de 18 cellules connectées avec NON-OVERLAPED diode.

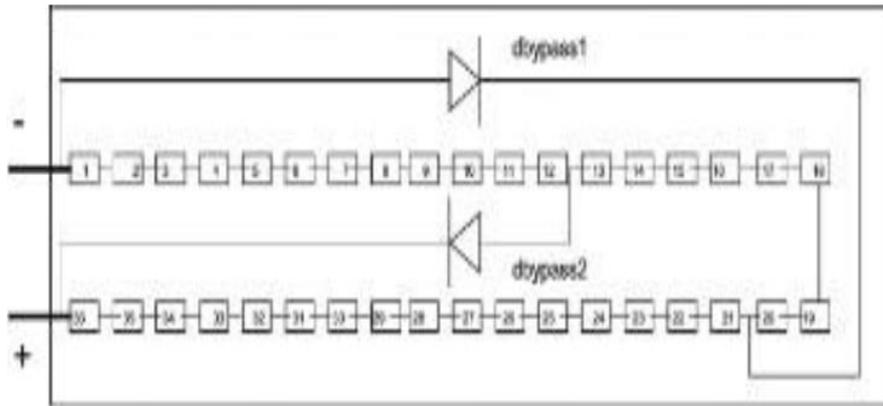


Figure.I.19 : Groupe de 18 cellules montées avec OVERLAPED diode.

I.4.3 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques (ou photopile) sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ». Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. [20]

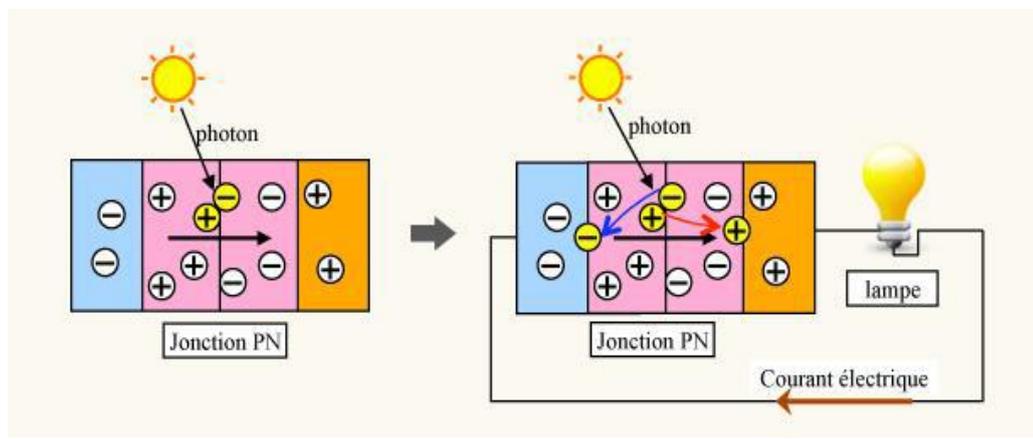


Figure.I.20 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire. [20]

I.4.4 Association de cellule photovoltaïque :

I.4.4.1 Association série :

Dans un groupement de N_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant des cellules reste le même. La (figure1.21) montre la caractéristique résultante (I_{sc} , V_{sco}) avec :

$$I_{sc} = I_{cc} \text{ et } V_{sco} = n_s * V_{co} \text{ [21]}$$

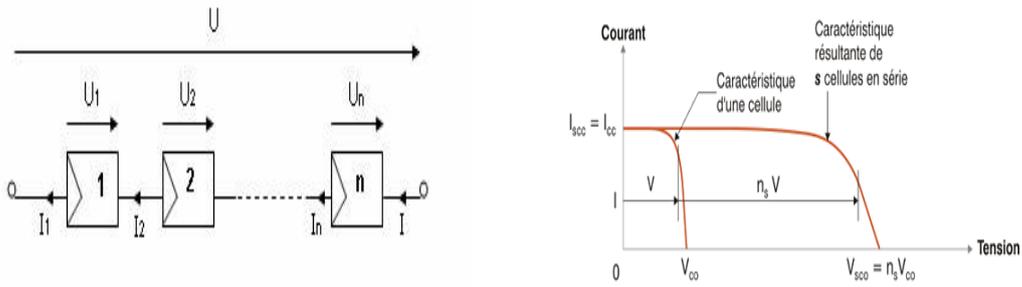


Figure.I.21 : la caractéristique résultante obtenue en association en série.

I.4.4.2 Association en parallèle :

Dans un groupement de N_p cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants. La (figure 1.21) montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) Avec :

$$I_{pcc} = n_p * I_{cc} \text{ et } V_{pco} = V_{co} \text{ [21]}$$

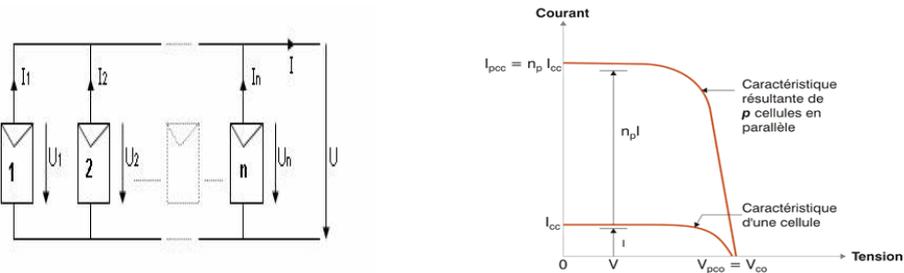


Figure.I.22 : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles.

I.4.4.3 Association en série/parallèle :

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

$$I_{spc} = n_p * I_{cc} \text{ et } V_{spco} = n_s * V_{co} \text{ [21]}$$

n_p : nombre de cellule en parallèle.

n_s : nombre de cellule en série.

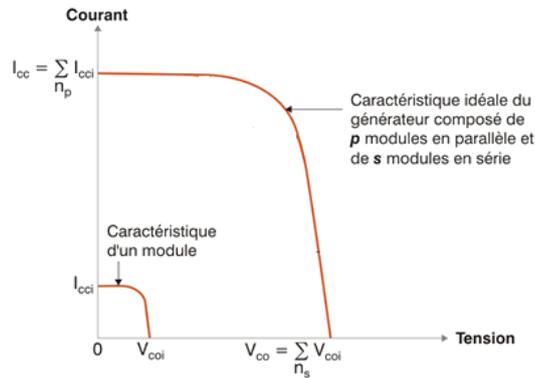


Figure.I.23 : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.

I.4.5 Influence de la température :

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV. Si on considère le réchauffement d'un module PV de 0°C à 75°C et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer l'influence de la température. On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV.

Les graphes suivant représentent des courbes I(V) et P(V) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante.

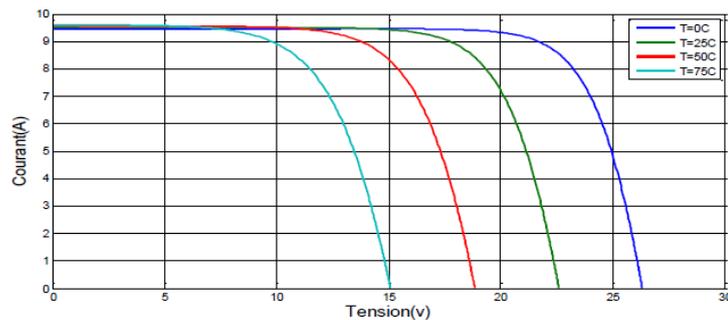


Figure.I.24 : L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V).

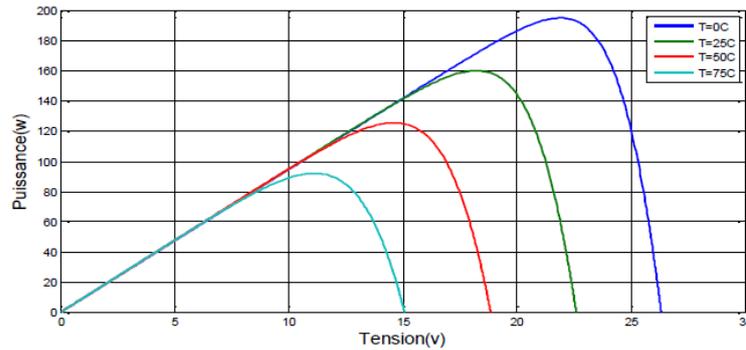


Figure.I.25 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente.

On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C.

I.5 Commandes MPPT :

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point TRACKING) est utilisé pour la commande du hacheur [3].

La technique de suivi du point de puissance maximal (MPPT : Maximum Power Point TRACKING) a été développée depuis 1968, cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque [22].

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque.

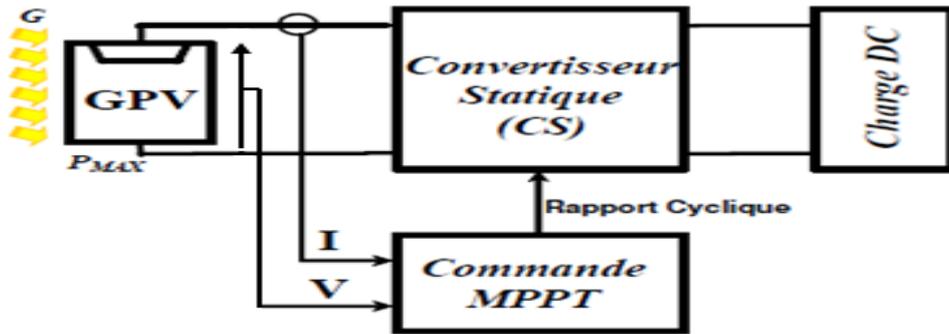


Figure.I.26 : Schéma de principe du convertisseur MPPT [23].

I.5.1 Principe de la Recherche du PPM :

Ce principe assure que le système sera toujours amené à son optimum de puissance est décrit schématiquement par la (figure I.27. et figure I.28).

Les (figure I.27 et I.28) illustre trois cas de perturbation. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Dans ces cas, pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas I.27(b) pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimal grâce à l'action d'une commande.

Enfin dans le dernier cas I.28 la variation du point de fonctionnement peut se produire lié à la variation de température de fonctionnement du GPV, bien qu'il faut également agir au niveau de la commande.

Dans le cas réel, cette variation est due aux trois cas précédents en même temps.

Charge: constante T: constante L'éclairement: variable	Charge: variable T: constante L'éclairement: constante
--	--

Charge : constante

T : constante

L'éclairement : variable

Charge : variable

T : constante

L'éclairement : constante

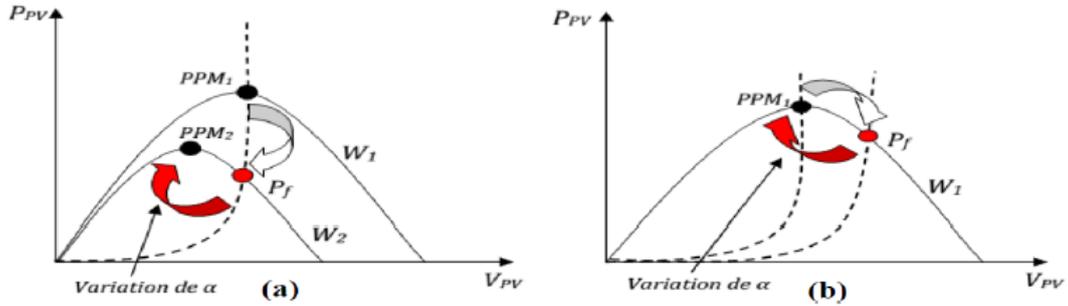


Figure.I.27 : Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairage (a) et la charge R (b).

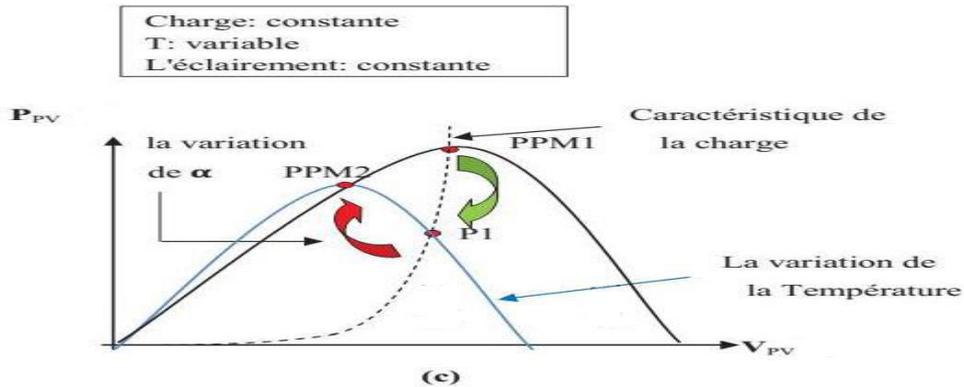


Figure.I.28 : Fluctuation du PPM avec l'intensité de la température (c).

La comparaison des P_a et P_b mesurées respectivement aux instants $(t-1)$ et (t) permet de chercher le point de la puissance maximale, (figure I) en incrémentant ou décrémentant le rapport cyclique α . Si la dérivée est positive ($P_a < P_b$), cela signifie que nous nous rapprochons du PPM en incrémentant α , et si la dérivée de la puissance est négative ($P_a > P_b$), cela veut dire que nous l'avons dépassé PPM nous devons décrémenté α .

Une fois α modifié, on prend sa valeur et on effectue une nouvelle mesure de I_{pv} , V_{pv} pour calculer la nouvelle puissance.

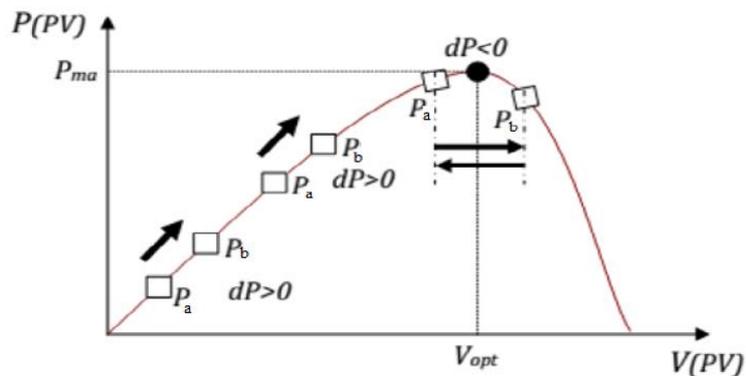


Figure.I.29 : Présentation de l'organigramme amenant le système à un fonctionnement à son PPM.

I.5.2 Techniques de commande MPPT :

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPPT ont été développées. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de l'irradiation ou le changement de température, le matériel nécessaire pour la mise en œuvre, entre autres [24].

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

I.5.2.1 Méthodes indirectes :

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{cc} ou V_{co}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur.

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis pouvant fonctionner dans des zones géographiques où il y'a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc... [25].

I.5.2.2 Méthodes directes :

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal MPP à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV.

Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut

être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une haute puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement.

La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe &

Observe (P&O), l'incrément de conductance, etc.... [25]

I.5.3 Différents types de commandes MPPT :

Plusieurs publications sur les commandes de recherche du point de puissance maximale apparaissent dans la littérature, et ce depuis les années 1970. Ces commandes diffèrent par leur principe de fonctionnement, leur précision et leur rapidité de recherche. Dans ce qui suit, nous allons citer les principales commandes rencontrées dans la littérature.

I.5.3.1 Premières commandes MPPT :

En Janvier 1968, A.F. BOEHRINGER a publié la première loi de commande MPPT adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. La commande, basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permet de maintenir le fonctionnement du système à son point de puissance maximale. A partir des mesures du courant délivré par le panneau photovoltaïque I_{ph} et de la tension V_{ph} , la méthode consiste à calculer la puissance à l'instant T_i et la comparer à la valeur mémorisée à l'instant T_{i-1} . Par la suite, un nouveau rapport cyclique est calculé et est appliqué au convertisseur statique [26].

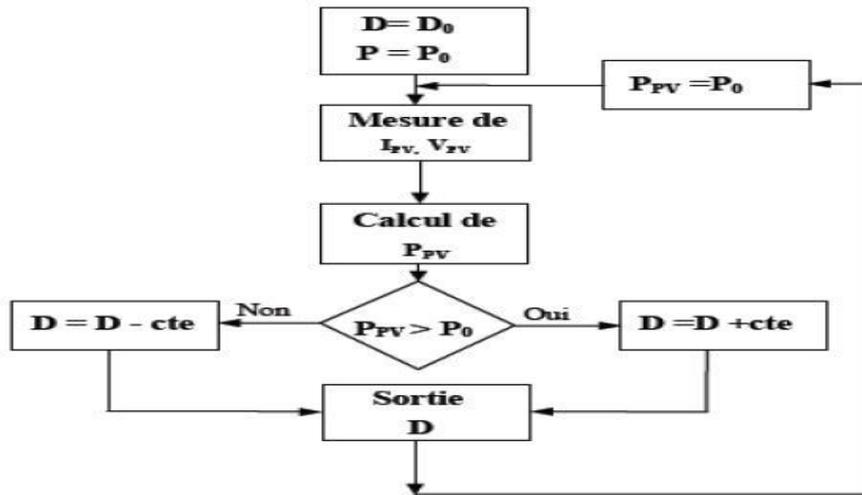


Figure I.30 : Principe de la première commande MPPT numérique.

Ce principe de commande est toujours valable, il est appliqué actuellement sur des algorithmes numériques plus performants, avec un temps de réaction et une précision de recherche PPM améliorés.

I.5.3.2 Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité :

Ces commandes sont basées sur des relations de proportionnalité entre les valeurs optimales du point de puissance maximale (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres à vide et en court-circuit du module PV (V_{co} et I_{cc}). Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension.

I.5.3.2.1 Commande en régulation de tension :

Cette méthode consiste à comparer la tension délivrée par le panneau V_{PV} avec la tension optimale V_{OPT} considérée comme référence. L'erreur entre les deux tensions est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur statique dans le but d'avoir une tension égale à celle de référence. La tension de référence est obtenue à partir de la relation linéaire entre V_{OPT} et V_{co} du module PV :

$$V_{OPT} = KV \cdot V_{co}$$

(I.18)

Où KV est un facteur de tension qui dépend du GPV utilisé, généralement compris entre 0.71 et 0.78 [26].

L'inconvénient de cette technique, elle nécessite d'effectuer la mesure de V_{OC} de temps en temps. La charge doit être donc déconnectée pendant cette mesure, ce qui

provoque une perte de puissance. Cette méthode est simple et robuste mais ne présente pas assez de précisions.

I.5.3.2.2 Commande en régulation de courant :

Concernant cette méthode, le PPM peut être atteinte en comparant le courant de court-circuit I_{CC} Concernant cette méthode, le PPM peut être atteinte en comparant le courant de court-circuit I_{CC} mesuré à un courant de référence égal I_{OPT} . Ce courant est calculé par la relation suivante :

$$I_{OPT} = K_I \cdot I_{CC}$$

(I.19)

K_I étant le facteur de courant qui dépend du GPV utilisé, généralement compris entre 0.78 et 0.92 [26].

Pendant la mesure du courant I_{CC} , il est nécessaire de court-circuiter le GPV, ce qui implique une perte de transfert de puissance.

Ces types de commandes nécessitent un seul capteur, ce qui les rend faciles à mettre en œuvre. Par contre, leur précision est faible à cause des procédés d'estimation des paramètres I_{CC} et V_{CO} . De plus, à chaque mesure de courant ou de tension, un arrêt de transfert de puissance est obligatoire.

I.5.3.2.3 Commande en régulation de puissance :

Le principe de cette méthode est de mesurer les deux composantes principales, le courant I_{PV} et la tension V_{PV} de sortie du panneau. L'évaluation de la puissance instantanée de ce dernier est élaborée par une simple multiplication de ces deux composants $P_{PV} = I_{PV} \cdot V_{PV}$ par un algorithme de recherche itératif qui se charge de trouver et de corriger en temps réel la position du PPM, en effectuant la recherche dans un sens [27].

L'algorithme maintient ce sens si la puissance de sortie augmente constamment et dans le cas contraire il change le sens de recherche, étant donné que l'opération toute entière est numérisée. On peut dire que le PPM à une certaine précision qui n'est jamais atteint, ce qui est dû d'une part aux valeurs arrondies par la carte d'acquisitions, des grandeurs mesurées à la sortie du panneau PV, et d'autre part, au calcul de la dérivée (dP) qui est toujours approchée avec une certaine précision.

$$dP \approx \Delta P(k) = P(k) - P(k-1)$$

I.5.3.3 Les MPPT à implantation analogique :

L'implantation de ce type de commande est effectuée avec des composants logiques et analogiques sans aucun calcul ne soit nécessaire, ceci permet aux commandes d'avoir une grande dynamique et donc d'être très rapides vis à vis des diverses perturbations, les temps de réponse étant limités uniquement par les temps de retard des différents éléments analogiques. De plus, leur principe est souvent moins complexe que l'équivalent en numérique. Ainsi, ce type de commande présente l'avantage de pouvoir fonctionner à des fréquences de découpage plus élevées que dans un circuit numérique classique. Elles peuvent notamment dépasser le MHz. Cela permet de réduire d'autant la taille des composants passifs des convertisseurs statiques assurant la conversion de puissance [27].

Les premiers travaux relatant une implantation analogique performante ont été décrits en 1988 par SALAMEH (figure I.31). Malgré un algorithme performant permettant l'oscillation du système autour du point de puissance maximum dans des conditions de variations lentes d'éclairement, cette commande nécessite d'effectuer un compromis entre rapidité et précision (faible taux d'oscillations et bonne dynamique en cas de changement d'éclairement ou de charge). À cause de cela, l'implantation analogique de ce type de commandes à long temps été exclue.

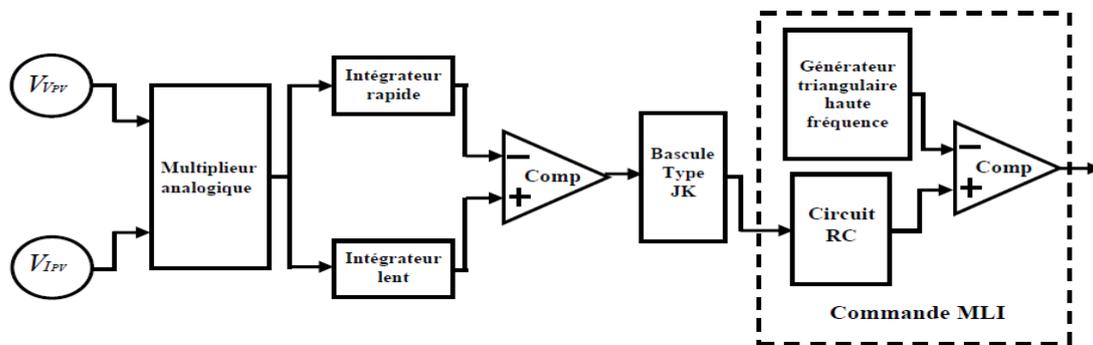


Figure.I.31 : Commande MPPT simple implantée en analogique.

I.5.3.4 MPPT RCC (RIPPLE Corrélation Control) :

C'est une technique qui utilise les ondulations engendrées par le convertisseur statique dans les grandeurs mesurées du GPV (courant –tension et puissance).

Le principe est basé sur la dérivé de puissance par apport au temps ($\frac{dp}{dt}$ au lieu de $(\frac{dp}{dv})$), le point maximum est obtenue directement par la relation analytique du rapport cyclique $\alpha(t)$. P ddt P ddv

Où :

$$\alpha(t) = k \int \left(\frac{dp}{dt} \cdot \frac{dv}{dt} \right) dt$$

(I.20)

La relation montre que cette technique est facile à l'implantation analogique, la constante K dépend du gain du circuit de commande du convertisseur statique.

La réponse dynamique dépend aussi de la fréquence de hachage. Seule la perturbation du point de fonctionnement engendrée par les ondulations de courant ou de tension présente un inconvénient dans cette MPPT [28].

I.5.3.5 MPPT basé sur le balayage du courant (CURRENTSWEEP) :

Cette méthode utilise le balayage du courant *IPV* pour tracer la caractéristique (I, V) dans un intervalle fixe du temps, donc le *Vmpps* sera calculé à travers le tracé de cette courbe. La fonction de balayage est choisie de façon que [28] :

$$f(t) = k \frac{df(t)}{dt} \quad (I.21)$$

La puissance du GPV est donnée par

$$P(t) = v(t) \cdot i(t) = v(t) \cdot f(t) \quad (I.22)$$

Au PPM, $\frac{dp}{dt} = 0$ et, en substituant (I.21) on obtient l'équation suivante :

$$\frac{dp}{dt} = [v(t) + k \frac{dv}{dt}] \frac{df}{dt} = 0 \quad (I.23)$$

Or la solution de l'équation différentielle (I.21) est :

$$F(t) = C \cdot \exp\left(-\frac{T}{k}\right) \quad (I.24)$$

Pour avoir une exponentielle décroissant qui tend vers *Imax* on fait le choix ($C = I_{max}$), l'équation (I.23) peut s'implanté facilement avec un circuit capacitif en décharge.

I.5.3.6 Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue :

Les commandes basées sur la logique floue sont de plus en plus utilisées suite à l'évolution des microcontrôleurs. Dans notre cas, le principe est basé sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie ΔD qui représente la variation du rapport cyclique servant à piloter le convertisseur statique pour chercher le PPM. La valeur de ΔD est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée [26].

Cette méthode est performante surtout pendant le changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est liée à la complexité de la table de vérité employée, d'où la nécessité de choisir un microcontrôleur performant qui tient compte des différents paramètres électriques du panneau.

I.5.3.7 Les commande MPPT basées sur les réseaux de neurones :

Ces dernières années, la technique de réseaux de neurones est de plus en plus utilisée dans divers domaines d'application, permettant de résoudre des problèmes complexes. Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches peut varier selon le degré de précision souhaitée de la commande. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées sont les paramètres caractéristiques d'un GPV associées à des données atmosphériques, la sortie est un signal représentant la valeur du rapport cyclique permettant de commander le convertisseur statique pour fonctionner au PPM [26].

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite un entretien et une maintenance régulière. En effet, pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau, l'apprentissage doit être révisé régulièrement.

I.5.3.8 Méthode incrémentation de conductance :

La méthode par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes : [29]

$$(I.24) \quad \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$$

$$(I.25) \quad \frac{1}{V_{pv}} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{1}{dV_{pv}}$$

On définit la conductance de la source $\frac{1}{V_{pv}}$ et incrémentation de la conductance $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$.

Puisque la tension V_{pv} du panneau est toujours positive, le point de puissance maximale MPP est alors atteint si la conductance de la source égale l'incrément de la conductance de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure il incrémente la conductance et vice-versa, comme suit:

$$\begin{cases} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \text{ si } \frac{1}{V_{pv}} > -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \\ \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \text{ si } \frac{1}{V_{pv}} = -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \\ \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \text{ si } \frac{1}{V_{pv}} < -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \end{cases}$$

(I.26)

I.6 Conclusion :

Ce chapitre est une introduction à notre travail, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques, où on a défini l'énergie et les types solaires ainsi que le principe de fonctionnement. Ensuite on a expliqué brièvement le phénomène photovoltaïque et la composition d'une cellule PV ainsi que son principe de fonctionnement, les caractéristiques des cellules PV et les différentes technologies de cellules photovoltaïques. Enfin, nous avons procédé au suivi du point de puissance maximale (MPPT) qui a un rôle important dans la performance des systèmes d'énergie photovoltaïque.

***Chapitre II – Stockage d'énergie
(accumulateur de batteries)***

II.1 Introduction :

Pour une utilisation optimale d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'avoir un élément de stockage pour stocker l'énergie produite.

En effet, la demande énergétique est une fonction de la charge à alimenter et les appareils utilisés. L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit). Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'électricité. Le système tampon utilisé le plus couramment pour les systèmes photovoltaïques est les batteries d'accumulateurs électrochimiques.

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

- **Autonomie** : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.
- **Courant de surcharge** : une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ Photovoltaïque. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- **Stabilisation de la tension** : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ photovoltaïque et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

Généralement, les batteries solaires sont très coûteuses, elles doivent être utilisées avec prudence afin de prolonger leur vie, et pour cela nous procéderons à une étude sur les différents types de technologies des batteries d'accumulateurs, leurs caractéristiques et leurs principes de fonctionnement. [30]

II.2 Les différents types de batteries:

Les batteries utilisent des couples de matériaux capables d'échanger facilement et longtemps des électrons et des ions positifs, Il existe quatre principaux types de batteries utilisées pour stocker l'électricité produite par les installations solaires photovoltaïques **les batteries au plomb (plomb ouvert, AGM et Gel).**

II.3 Caractéristiques des batteries :

II.3.1 La capacité de stockage :

L'énergie stockée dans une batterie, appelée capacité de la batterie, est mesurée en wattheures (Wh), en kilowattheures (kWh) ou en ampères-heures (Ahr). Elle détermine le volume d'énergie pouvant être emmagasinée par la batterie puis redistribuée dans la maison. [30]

La capacité en wattheures (Wh) d'une batterie se calcule à partir de l'intensité de la batterie (donnée en ampère Ah) et en la multipliant par la tension exprimée en volt.

II.3.2 L'espérance de vie :

La durée de vie d'une batterie est généralement évaluée en nombre de cycles qu'elle peut effectuer avant de ne plus être fonctionnelle, c'est à dire sa capacité à se charger et à se décharger. Chaque batterie réduira lentement sa capacité au fur et à mesure du temps qui passe et de la profondeur quotidienne de décharge. Moins une batterie effectuera de cycles, moins elle s'usera rapidement. On estime qu'une batterie sera bientôt inefficace lorsqu'elle aura perdu environ 20% de sa capacité d'origine. De nos jours, les batteries lithium sont notoirement les plus performantes avec une durabilité pouvant atteindre les 6000 cycles ! [31]

II.3.3 État de charge :

L'état de charge (SOC), exprimé en %, est le rapport entre la capacité résiduelle et la capacité nominale de l'accumulateur. C'est à dire l'énergie restant dans la batterie. La profondeur de décharge (DOD), exprimé en %, est le rapport entre la capacité déjà déchargée et la capacité nominale de l'accumulateur. C'est à dire l'énergie consommée dans la batterie. La somme des valeurs de SOC et DOD donne toujours 100% Exemple : Une batterie qui a une profondeur de décharge de 30% à un état de charge de 70% [31].

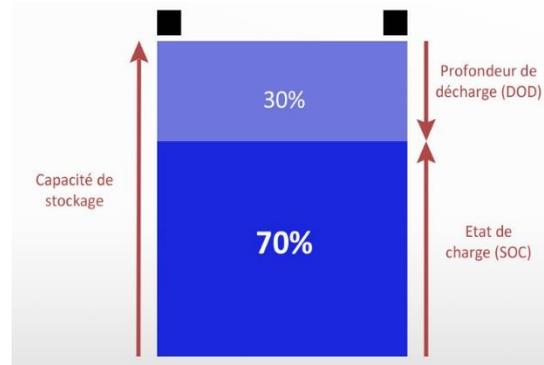


Figure.II.1 : Etat de charge et profondeur de décharge.

II.3.4 La profondeur de décharge :

En fonction de la technologie utilisée, et afin de prolonger la durée de vie des batteries, celles-ci ne se déchargent jamais complètement. C'est pourquoi les batteries sont largement "surdimensionnées" par rapport à l'installation en place, de façon à ce qu'elles ne se déchargent pas au-delà d'un certain seuil. Si ce seuil est donné par le fabricant à 50% par exemple, alors seulement 50% de la capacité de la batterie peut être utilisée, pas davantage. Cette méthode permet de mieux préserver les batteries sur la durée. [31]

II.3.5 Influence de la température :

La capacité tient compte de la température de l'accumulateur, elle est annoncée en général pour 20 à 25°C. La capacité augmente quand la température augmente et baisse quand la température baisse.

La durée de vie de la batterie va également être liée à cette température d'exploitation. En effet, une augmentation de 10°C au-dessus de 20°C la réduira de moitié.

II.4 Batteries solaires :

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert). Une batterie utilisée avec des panneaux solaires ou une éolienne est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires ou éoliennes.

Son fonctionnement de base est identique à celui des autres types de batteries c'est à dire que l'énergie est stockée sous forme chimique. Des composants réagissent

entre eux à l'intérieure, ce qui permet d'accumuler ou de restituer de l'électricité au moment voulu. Cependant, la façon dont on utilise les batteries solaires n'est pas la même, ce qui implique des technologies différentes. Par exemple, les batteries de voiture sont fortement sollicitées au démarrage, et se rechargent ensuite très vite. A l'inverse, les batteries solaires sont vidées lentement, sur de longues périodes, et sont parfois rechargées quelques jours après seulement. [31]

C'est pour cela qu'elles sont également appelées "batteries stationnaires", ou "batteries à décharge lente". Une batterie de voiture ne peut pas survivre très longtemps à ce traitement. Les batteries des téléphones ou des ordinateurs portables fonctionnent sur le même principe que les batteries solaires, mais la quantité d'énergie stockée n'est pas la même. Une batterie de téléphone stocke quelques Ampères-heures (Ah), alors qu'une batterie solaire peut en stocker plusieurs centaines. [31]

Le terme exact, quand on parle de batterie, est "batterie d'accumulateurs". Elles sont en effet constituées de plusieurs éléments (les accumulateurs) ayant chacun une tension de 2V. Pour obtenir une tension supérieure, ces éléments sont assemblés en série. On peut trouver des batteries solaires de 2V, 6V, 12V (le plus courant), 24V ou même 48V.

II.5 Critère de Choix de batterie solaire pour une installation photovoltaïque:

II.5.1 Besoin de stockage énergétique du système :

- La quantité d'électricité stockable dans une batterie s'exprime en Wattheure (Wh)
- La capacité d'une batterie est accompagnée d'une indication de type C5, C20 ou C100, correspondant respectivement à un temps de décharge de 5h, 20h et 100h.

II.5.2 Tension des batteries solaires :

On augmente la valeur de la tension Afin d'éviter les dispersions d'énergie dans le stockage et le transport. Pour obtenir la tension ou la capacité souhaitée, il est souvent nécessaire d'assembler plusieurs batteries.

- Le montage en série permet d'additionner la tension des batteries (en V), tout en gardant la capacité en Ah d'une seule batterie.
- Le montage en parallèle permet d'additionner la capacité de stockage (Ah), tout en gardant la même tension en V.

II.5.3 Durée de vie de la batterie solaire :

Les batteries doivent pouvoir être chargées et déchargées un grand nombre de fois. C'est ici que la notion de cycle prend toute son importance car c'est l'unité permettant d'estimer la durée de vie d'une batterie solaire. Un cycle est constitué d'une phase de charge et d'une phase de décharge. La durée de vie, ou nombre de cycles, que peut effectuer une batterie varie fortement en fonction du type de batterie et surtout de son utilisation.

II.5.4 Autonomie nécessaire dans le système PV :

Le nombre de jours pendant lesquels les batteries peuvent tenir sans avoir besoin d'être rechargées, L'autonomie moyenne d'une installation en site isolé est de 3 à 5 jours. Pour trois jours d'autonomie, il vous faudra donc une batterie capable de stocker 3000Wh si votre besoin énergétique journalier est de 1000Wh. Avec une tension de 12V, la capacité sera de 250 Ah. Pour respecter la profondeur de décharge maximale de 40%, une capacité de 420 Ah environ sera nécessaire. [32]

II.5.5 Dimensionnement des batteries solaires :

Le calcul de la capacité C du pack de batteries dépend de plusieurs données :

N, le nombre de jours avec un ensoleillement insuffisant. En Afrique de l'Ouest, pour une utilisation annuelle nous prenons 3 jours ou 4 jours de réserve en batteries sont nécessaires en intégrant la saison des pluies.

D, la demande énergétique quotidienne exprimée en Wh/jour. Il s'agit de l'énergie nécessaire pour alimenter vos appareils électriques. D s'obtient en multipliant la puissance de chacun de vos appareils par leur durée d'utilisation quotidienne en heures.

U, la tension en Volt sous laquelle est installée le pack de batteries (12 V, 24 V, 48 V)

L, la profondeur de décharge maximum des batteries.

II.6 Les technologies lithium-ion innovantes :

Bien que le principe en soit connu depuis les années 80 les premiers éléments rechargeables au Lithium n'ont été commercialisés qu'en 1991. Cela à cause du caractère instable du Lithium métallique pendant la phase de charge. Le problème a été résolu en utilisant des ions de lithium pour réaliser l'accu. Le lithium ion (Li-ion) ne présente pas de danger si certaines précautions sont prises lors de la charge. [32]

Attention : les accumulateurs au Lithium ion peuvent présenter un risque d'explosion s'ils sont rechargés dans de mauvaises conditions. Ce sont des éléments très sensibles qui demandent des précautions de mise en œuvre.

Les accumulateurs au Lithium sont aujourd'hui très prisés. En effet ils offrent une densité d'énergie très supérieure aux autres technologies pour un poids inférieur. De plus ils sont dépourvus d'effet mémoire, ils présentent une auto décharge presque négligeable et ils ne nécessitent aucun entretien particulier



Figure.II.2 : Batterie solaire lithium ion.

II.6.1 La cellule de base lithium-ion :

L'élément de base est une cellule qui se présente un peu comme un feuilleté : une plaque d'aluminium servant à collecter le courant, puis la cathode, l'électrolyte, puis l'anode, enfin une plaque de cuivre encapsulé dans un boîtier cylindrique ou prismatique rigide comme ci- dessous.

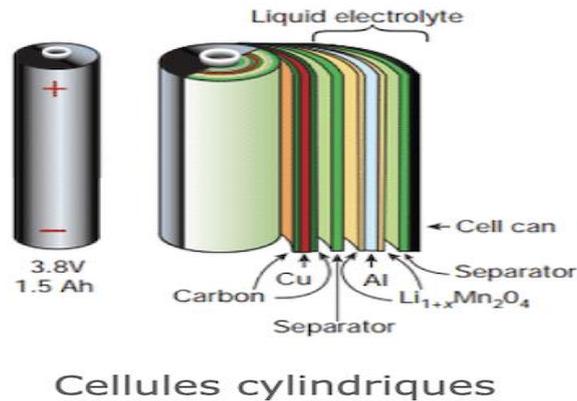


Figure.II.3 : Constitution des éléments Li-ion.

Ces cellules, de quelques volts chacune, sont regroupées en plus ou moins grand nombre selon la puissance recherchée pour alimenter un téléphone portable ou une batterie solaire.

Note : On trouve rarement dans le commerce des éléments Li-ion au détail. Cette technologie étant potentiellement dangereuse (risque d'explosion en cas de mauvaise mise en œuvre) les éléments sont pratiquement systématiquement intégrés dans un boîtier et l'ensemble est équipé d'un ou plusieurs circuits électroniques de protection qui garantissent votre sécurité. [33]

II.6.2 Principe de fonctionnement :

II.6.2.1 La charge d'accumulateur au Li-ion :

Lors de la charge, les ions de lithium Li^+ quittent l'électrode positive (la cathode) relâché par l'oxyde de cobalt et va s'insérer dans l'électrode négative (l'anode) dans la phase graphitique pour être stocker.

Lors de la charge de l'accumulateur, cela se traduit par les équations chimiques suivantes :

À l'électrode (+) :



À l'électrode (-) :



Particularité de la charge des accumulateurs aux li-ion :

- La charge se fait à tension constante et courant limité.
- Ils ne supportent pas la surcharge aussi faible soit elle.
- Il faut respecter le niveau de la tension de charge sinon ça ne charge pas.
- Il faut donc que la tension de charge soit réglée très précisément

La technologies Li-ion a deux niveaux de tensions nominales différents 3,6V et 3,7V qui impliquent des tensions de charges correspondantes :

- Tension nominale 3,6V : Tension de charge 4,1 Volts par élément.
- Tension nominale 3,7V : Tension de charge 4,2 Volts par élément.

Dans ces conditions respectées, la charge dure entre 2 et 3 heures.

- En début de charge et durant toute la première phase de la charge le courant est limité et la tension augmente petit à petit jusqu'à atteindre la tension régulée.
- A partir de là on atteint la deuxième phase dite de remplissage la tension reste parfaitement stable et alors le courant diminue.
- La charge est terminée lorsque le courant passe en dessous du seuil de 0,03C.

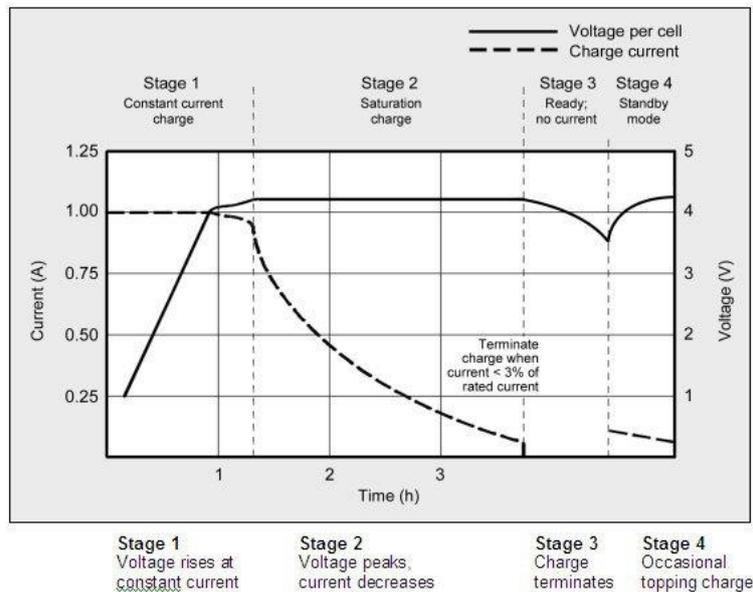


Figure.II.4 : Diagramme de charge des accu lithium-ion.

II.6.2.2 Décharge des accumulateurs au Li-ion :

Quand la batterie se décharge, c'est-à-dire quand elle produit le courant électrique les ions de lithium Li^+ est libéré par une matrice de graphite pour laquelle il a peu

d'affinité et se déplace vers un oxyde de cobalt avec lequel il a une grande affinité l'électrode positive (la cathode). [33]

Lors de la décharge de l'accumulateur, cela se traduit par les équations chimiques suivantes :

À l'électrode (+) :



À l'électrode (-) :



Comme pour les autres technologies les accumulateurs aux Lithium ont une tension minimum de décharge en dessous de laquelle il ne faut surtout pas les décharger sous peine de destruction des éléments.

Particularité de la décharge des accumulateurs aux li-ion :

- La tension basse de destruction est de 2,5 Volts.
- Mais en utilisation il ne faut pas descendre en dessous de 3 Volts

De toute façon entre les deux cela va très vite la courbe de tension en décharge chute rapidement.

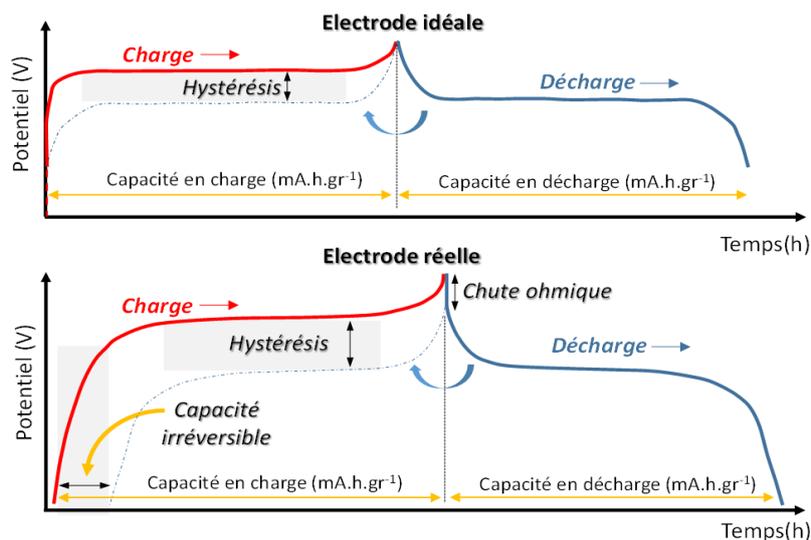


Figure.II.5 : Caractéristique de décharge du courant nominal de batterie lithium-ion (Li-Ion).

- L'autodécharge des accus au Lithium est d'environ 10% par mois.

- L'accumulateur au Li-ion est aujourd'hui capable de débiter de forts courants
- Résistance interne du Li-ion : environ 150 à 250 milli-ohm

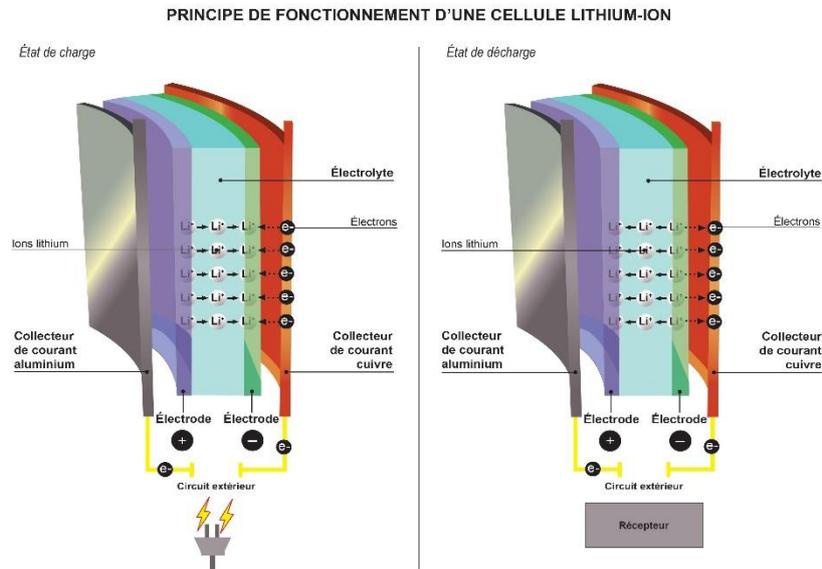


Figure.II.6 : Principe de fonctionnement d'accum Li-ion (charge /décharge).

II.6.2.3 Les précautions d'utilisation de base :

- Ne jamais surcharger un élément.
- Ne pas laisser un accu en charge sans surveillance.
- Ne pas poser un accu en charge sur une surface conductrice.
- Ne pas stocker les batteries en vrac.
- Ne jamais court-circuiter un accu.
- Ne pas exposer les éléments à une source de chaleur importante.
- Ne pas laisser une batterie lithium déchargée, en dessous d'une certaine tension, les dommages sont irréversibles.
- Ne pas maintenir en FLOATING (charge terminée) une batterie lithium-ion, provoque une usure prématurée.
- Le courant de charge ne doit pas excéder 30% de la capacité nominale soit pour une batterie de 100Ah, le courant de charge maximum sera de 30A.

Aujourd'hui pour prévenir ce genre de risque, la plupart des accus au Lithium vendus en pack sont équipés de circuits de protections et notamment d'un fusible, pour protéger des éventuels courts-circuits. [34]

Inutile de vous rappeler que dans ce cas, si le fusible fonctionne, le pack est inutilisable. Il part au recyclage...

II.6.2.4 Le circuit électronique de protection interne :

Pour préserver les utilisateurs du moindre risque, les fabricants de packs d'accumulateur au Li-ion insèrent un circuit électronique de protection dans leurs batteries.

Ce circuit comporte généralement plusieurs éléments :

- Un transistor qui coupe la charge si la tension de charge est supérieure à 4,3V.
- Un fusible thermique qui grille si la température approche 90°C.
- Un interrupteur à pression qui interrompt définitivement le courant de charge si la pression interne monte trop.
- Plusieurs circuits qui surveillent les tensions et qui isolent la batterie si les seuils hauts et bas sont atteints.

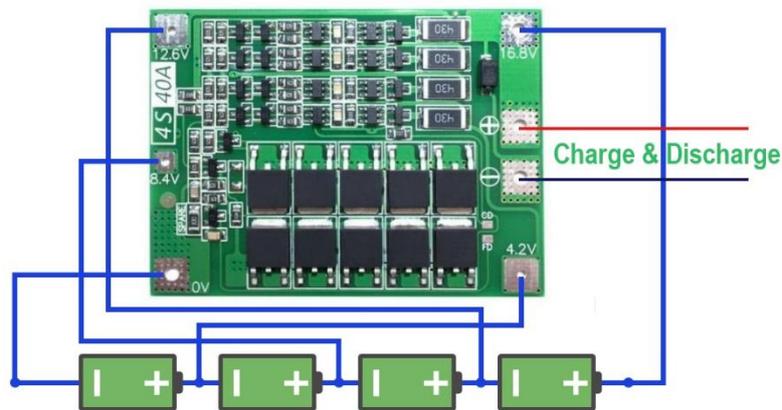


Figure.II.7 : Circuit électronique de protection.

II.6.2.5 Stockage des accus au Lithium :

Les accus au Lithium se stockent à un taux d'environ 40% de capacité restante, pour garder de quoi alimenter le circuit de protection interne. Le stockage se fera de préférence au frais sec. [34]

II.6.2.6 Les Températures de fonctionnement :

Les accus au lithium fonctionnent correctement sur toute leur plage de température allant généralement de -20°C à +60°C.

Evitez malgré tous les charges par température inférieure à 0°C et supérieure à 45°C. Il y a un risque de placage de Lithium sur les électrodes qui peut rendre l'accu instable. Dans tous les cas préférez une charge à 20°C.

II.7 Modélisation d'une batterie par un circuit électrique :

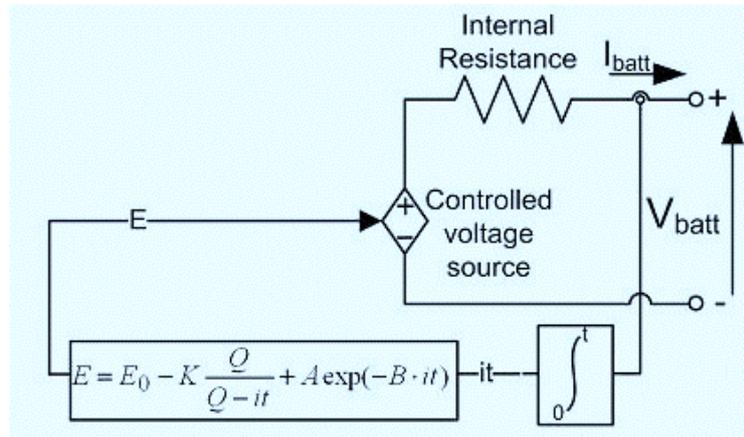


Figure.II.8 : Modèle de Shepherd de batterie Lithium-Ion.

Model de charge ($i^* < 0$)

$$V_{CH} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q + it} + it + A \cdot \exp(-B \cdot it)$$

Model de décharge ($i^* > 0$)

$$V_{DECH} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q + it} + it + A \cdot \exp(-B \cdot it)$$

Avec :

E_0 : constant de voltage de la batterie en v

K : constante de la polarisation en Ah^{-1}

Q : capacité maximale de la batterie en Ah

i^* : courant à basse fréquence en A

i : courant de batterie en A

it : Capacité extraite en Ah

A : tension exponentielle en V

B : capacité exponentielle en Ah⁻¹

II.8 Conclusion :

Les batteries solaires sont essentielles dans un système d'alimentation photovoltaïque, la brancher directement au panneau solaire, pourrait l'endommager et nuire à sa durée de vie. C'est pour cela qu'il est vivement recommandé d'installer un étage d'adaptation entre le panneau solaire photovoltaïque et les batteries solaires pour une utilisation optimale.

***Chapitre III - Régulateur solaire et
commande MPPT***

III.1 Introduction :

La connexion directe d'un générateur photovoltaïque et la charge présentent plusieurs inconvénients et n'offre aucun type de limitation ou de réglage de la tension, Nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

L'introduction d'une interface entre les deux éléments en assurant à travers une action du contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit plus proche de P_{max} Disponible. [35]

L'étage d'adaptation utilisé entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC), La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter soit survolteur ou dévolteur, généralement commandé afin d'effectuer des tâches précises.

Dans ce chapitre nous allons identifier et citer les différents types des régulateurs de charge ainsi que leurs fonctionnalités, Ensuite, nous passerons à l'étude des différents types de convertisseur DC-DC le hacheur BUCK et BOOST et sélectionner le premier pour notre système, par la suite on va présenter les algorithmes de la commande MPPT les plus populaires afin de trouver la technique la plus adéquate pour notre réalisation ; nous terminerons ce chapitre par la Simulation du système Photovoltaïque-Hacheur avec la commande MPPT (P &O). [36]



Figure.III.1 : Illustration d'un régulateur solaire.

III.2 Régulateur solaire (contrôleur de charge) :

Le régulateur de charge est un élément essentiel dans l'installation Photovoltaïque, dont son prix et sa consommation électrique restent faibles relativement aux autres éléments. C'est l'élément central du système photovoltaïque, complètement autonome, qui réalise toutes les opérations de mesure correction de la charge de manière automatique, il protège la batterie pour qu'elle ait une durée de vie meilleure, ce qui est important, car cette dernière est très inférieure à celle des panneaux solaires. [36]

La batterie doit être protégée contre les surcharges et les décharges excessives qui peuvent causer une perte d'électrolyte et endommager ses plaques. Ceci est le rôle du régulateur de charge qui maintient la tension de la batterie entre deux seuils et permet ainsi une plus longue durée de vie du système photovoltaïque.

Ce régulateur est caractérisé par un courant maximum de charge (panneaux solaires), un courant maximum de décharge (équipements consommateurs) et par la tension nominale de fonctionnement. Raison Pour laquelle le régulateur doit toujours être installé à côté des batteries. [37]

Figure III-2 illustre ce principe de fonctionnement :

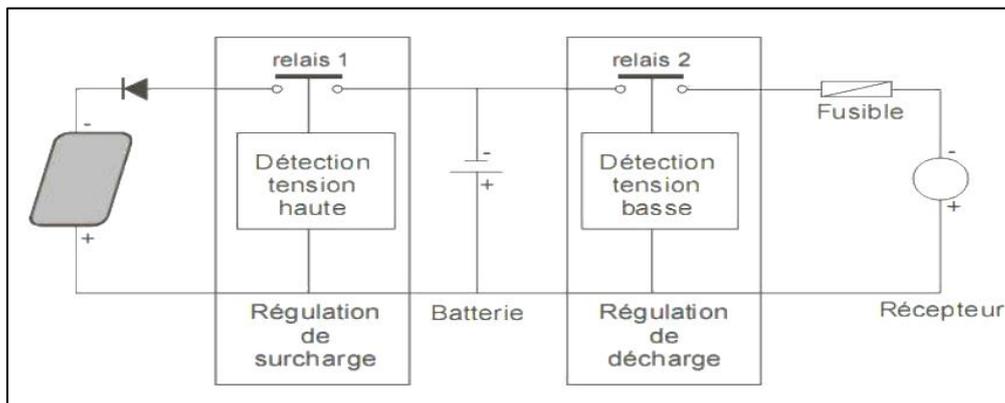


Figure.III.2 : Schéma fonctionnel d'un régulateur de charge.

III.3 Les fonctionnalités classiques d'un régulateur solaire :

- Affichage du niveau de charge.
- Affichage des incidents (surchage, décharge profonde, court-circuit).
- Protection contre les décharges profonde, surcharge, court-circuit.

- Protections des panneaux solaires photovoltaïques (contre les retours de charges électriques).
- Protections thermiques (sonde des batteries).
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ photovoltaïque à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appuiera le régulateur pour assurer sa fonction, Cette dernière mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension pré-régler : seuil haut et seuil bas.

Si la batterie est chargée aux Maximum 13.8 V pour une tension nominale de 12 V par exemple, le régulateur met les modules hors circuit afin de ne pas détériorer la batterie en la surchargeant. Lorsque la tension retombe en dessous du seuil 13.8 V, le régulateur reconnecte automatiquement les panneaux solaires pour recharger la batterie.

Pour ne pas décharger la batterie très profondément, le régulateur interrompt la consommation à 11.4 V pour éviter la sulfatation des plaques. La consommation sera réenclenchée lorsque la recharge de la batterie atteint 12.6 V, pour ne pas démarrer avec une batterie trop peu chargée. [38]

Afin de paramétrer le régulateur de charge, il est nécessaire d'utiliser deux valeurs caractéristiques de la batterie : la tension de fin de charge VFC, et la tension de recharge VRE pour laquelle le processus de charge recommence.

La plupart des régulateurs travaillent en tout ou rien et utilisent ces deux tensions pour arrêter ou recommencer la charge.

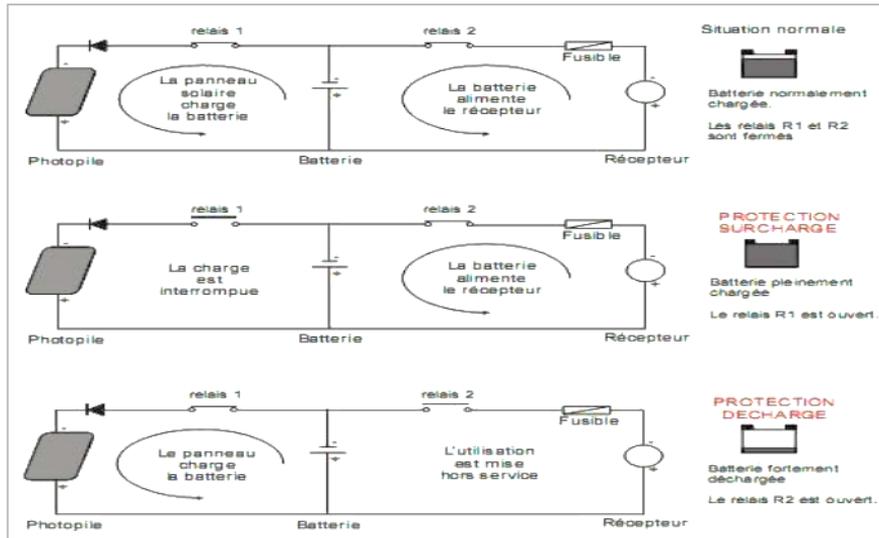


Figure.III.3 : Principes de fonctionnements du régulateur de charge.

III.4 Différents types des régulateurs de charge :

Au début de l'usage du photovoltaïque, deux grandes familles de régulateurs étaient utilisées : les modèles « shunt » et les modèles « série ».

Ces deux technologies reposent en fin de compte sur le même fondement : les modules

photovoltaïques peuvent fonctionner sans que leur électricité soit utilisée, ce qui est pratique lorsque les batteries sont pleines. On peut donc court-circuiter le module (c'est la méthode shunt) ou ouvrir le circuit (c'est la méthode série). [38]

Avec l'utilisation de plus en plus courante de microprocesseurs. Il existe de nombreux modèles de régulateurs à l'intérieur de ces deux technologies, allant du plus élaboré au plus rudimentaire. Les plus simples se contentent d'assurer leurs fonctions de base (anti-surchage, obstacle au courant inverse, protection des modules, contrôle de la température). Mais certains régulateurs solaires plus performants proposent des fonctions avancées intégrées ou en option (enregistreurs de données) :

- Compensation de la température ambiante pour mesurer la charge de la batterie d'information digitale (à la place de LED de signalisation).
- Connexion par fil ou à distance (wifi par exemple) a un pc ou un réseau informatique.
- Enregistrement pour analyse de données issues de régulateur.

- Possibilité de plusieurs modes de charges : charge rapide état de veille etc.
- Déclenchement automatique de sources d'énergie complémentaires aux panneaux solaires photovoltaïques (groupe électrogène ou réseaux électrique Sonaelgaz).

Il limite, et peut même stopper, la charge de la batterie solaire par les modules solaires quand la batterie est complètement chargée.

Il ralentit la décharge par délestage de l'utilisation, et même l'arrêt total, afin d'éviter les décharges profondes risquant d'endommager les batteries. [39]

III.4.1 Le régulateur de charge shunt :

La figure (III-4) montre une structure shunt d'un régulateur solaire, le régulateur shunt contrôle la charge de la batterie en court-circuitant le module photovoltaïque sans aucun risque.

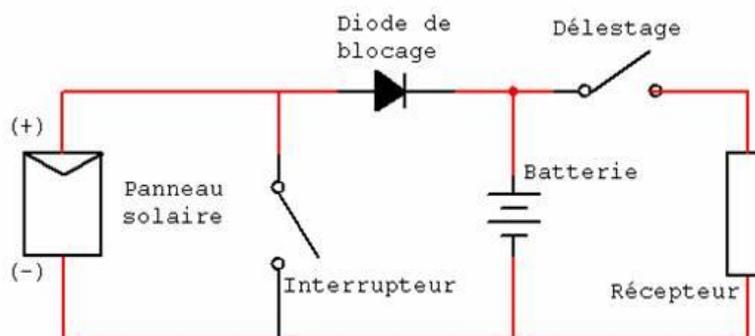


Figure.III.4 : Conception de Régulateur de charge de type shunt.

Tous les régulateurs shunt exigent la présence d'une diode anti-retour en série entre la batterie et l'élément shunt afin d'empêcher le court-circuit de la batterie. [39]

Typiquement le régulateur shunt peut fonctionner selon deux techniques de contrôle :

➤ **La première technique Le régulateur série « tout ou rien »**

Le courant du panneau solaire est envoyé dans un interrupteur en parallèle avec la batterie lorsque celle-ci atteint sa pleine charge.

Le principe de fonctionnement est un simple aiguillage : tout le courant délivré par les panneaux photovoltaïques, passe normalement dans les batteries jusqu'à ce que le seuil de coupure soit atteint.

Alors, le courant est dérivé dans l'interrupteur équipé d'une diode.

Cette diode joue également le rôle de blocage du courant nocturne pouvant « s'écouler » des batteries (pour éviter le court-circuit au niveau de la batterie). L'interrupteur le plus souvent utilisé est un MOSFET à faible résistance de passage, plus intéressant qu'un transistor bipolaire qui dissipe trop d'énergie. Voir figure III-5 (a)

➤ **La deuxième technique Le régulateur shunt linéaire**

Ce type de régulateur maintient une tension constante aux bornes des batteries lorsqu'elles atteignent leur pleine charge.

L'avantage est que la charge totale des batteries est garantie. L'inconvénient, c'est que la puissance non utilisée provenant des panneaux photovoltaïques doit être dissipée par un transistor en parallèle, ce qui limite ce type de régulation aux petits courants. Voir figure III-5 (b)

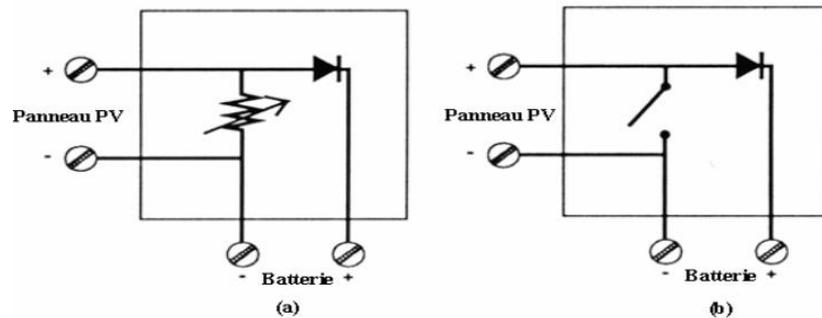


Figure.III.5 : Principe de fonctionnement d'un régulateur de type shunt.

III.4.2 Le régulateur de charge série :

La figure (III-2-3) montre une structure électrique typique d'un contrôleur série. Type de régulateur est très répandu et a supplanté le régulateur shunt.

L'interrupteur de charge est ici en série avec les batteries et il s'ouvre lorsque la fin de charge est atteinte.

La différence avec la technique « shunt », c'est que le relais peut être commutant en laissant passer le courant vers un autre récepteur.

Cette propriété permet d'utiliser la totalité de la puissance solaire en alimentant un récepteur auxiliaire (ventilation, pompage, chauffage en pays froid). [40]

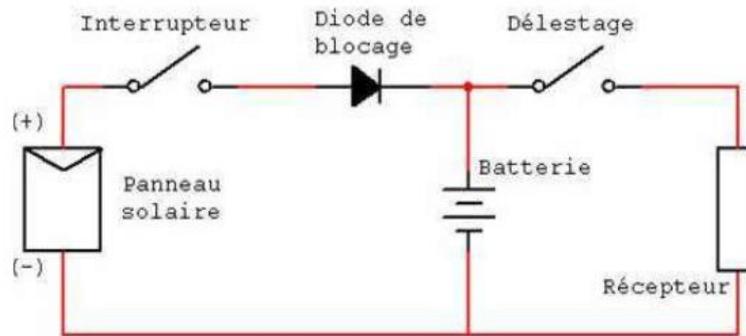


Figure.III.6 : Conception de Régulateur de charge de type série.

III.4.3 Regulation PWM (Pulse WITH Modulation) :

Le régulateur connecte directement le panneau solaire a la batterie, il est composé d'un interrupteur électronique fonctionnant en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) et d'un dispositif anti-retour (diode).

L'ouverture et la fermeture de l'interrupteur électronique s'effectuent à une certaine fréquence, ce qui permet de réguler le courant de charge en fonction de l'état de charge avec précision.

Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de limitation du régulateur, l'interrupteur est fermé, La batterie se charge alors avec le courant correspondant à l'ensoleillement. On est en phase "Buck".

Lorsque la tension batterie atteint un seuil de régulation prédéterminé, l'interrupteur s'ouvre et se ferme à une fréquence fixe pour maintenir un courant moyen injecté dans la batterie. La batterie est chargée, on est en phase "FLOATING". [40]

Remarque : Le régulateur PWM ne peut fonctionner qu'exclusivement avec des modules photovoltaïques 36 ou 72 cellules (12V ou 24V).

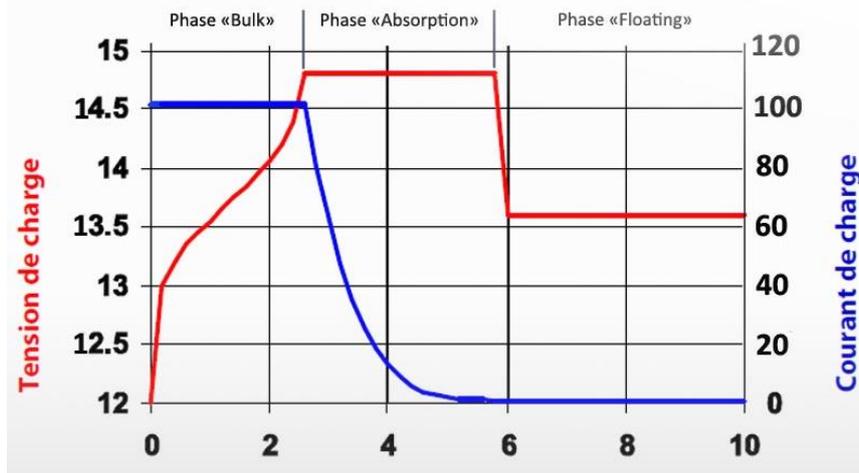


Figure.III.7 : Évaluation de la tension et du courant au cours de charge.

III.4.4 Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

Il existe des lois de commandes spécifiques nommées dans la littérature « commande extrême » pour des dispositifs physiques devant fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques même si, a priori ces points ne sont pas connus à l'avance, ces derniers pouvant même à n'importe quel moment se modifier pour diverses raisons.

Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par la présence d'un à plusieurs Points de Puissance Maximum (PPM). [40]

Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT) lorsqu'il est appliqué aux systèmes énergétiques.

Cette nouvelle technologie permet de tirer les meilleures performances des panneaux solaires photovoltaïques de 15% à 30 % d'énergie en plus.

Doté d'une fonction de balayage, qui parcourt la tension du panneau solaire toutes les deux heures pour trouver le point de sortie de puissance maximum, ainsi il peut adapter la tension délivrée par le panneau à celle que les batteries solaires peuvent absorber.

Ces régulateurs permettent non seulement d'augmenter la production d'énergie d'une installation photovoltaïque. Mais en optimisant la charge des batteries, ils prolongent aussi significativement la durée de vie des batteries. [41]

La figure (III-8) représente une chaîne élémentaire typique de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT fournissant une puissance électrique à une charge DC.

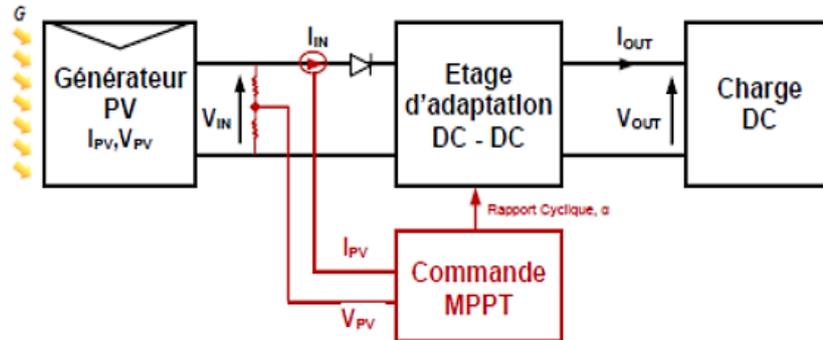


Figure.III.8 : Schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

Comme le montre cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle (convertisseur statique) possédant un à plusieurs degrés de liberté en fonction de sa structure, permettant d'adapter à chaque instant l'impédance du GPV à celle de la charge.

Dans le cas de la conversion de l'énergie solaire en électricité, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un simple convertisseur statique dc-dc à un degré de liberté noté α et correspondant au rapport cyclique, de telle sorte que la puissance fournie par le GPV à son entrée correspond à la puissance maximale (p_{max}) qui peut générer à chaque instant. [41]

De plus cette puissance doit pouvoir être transférée simultanément et totalement directement à la charge. La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement, quelles que soient les instabilités météorologiques ou les variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment. [41]

III.4.4.1 Caractéristiques du régulateur MPPT :

Le régulateur de charge est composé d'un convertisseur DC/DC à découpage de haut rendement qui assure trois fonctions :

- Détection de la puissance maximale du champ photovoltaïque tant que la batterie n'est pas chargée.

- Conversion DC/DC.
- Régulation de la tension de sortie en fonction de la phase de charge (Buck, Absorption et FLOATING)
- Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de régulation, le régulateur fait fonctionner le générateur photovoltaïque à puissance maximale et transfère cette puissance à la sortie.

Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal noté PPM1 vers un nouveau point de fonctionnement noté P'1, plus ou moins éloigné de l'optimum.

Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum qui correspond à PPM2. [42]

Pour une variation de charge (cas b), impliquant une nouvelle caractéristique de la charge, on peut également constater qu'une modification du point de fonctionnement est nécessaire pour rechercher une nouvelle position optimale grâce à la recherche d'un nouveau rapport cyclique.

Un autre cas de variation de point de fonctionnement peut se produire, lié par exemple aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c).

Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande en imposant un autre niveau de rapport cyclique, ce dernier n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents et n'implique aucune contrainte de dimensionnement de la commande.

De façon générale, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher à chaque instant le PPM du GPV sans connaître à priori l'origine de la variation du point de fonctionnement. [42]

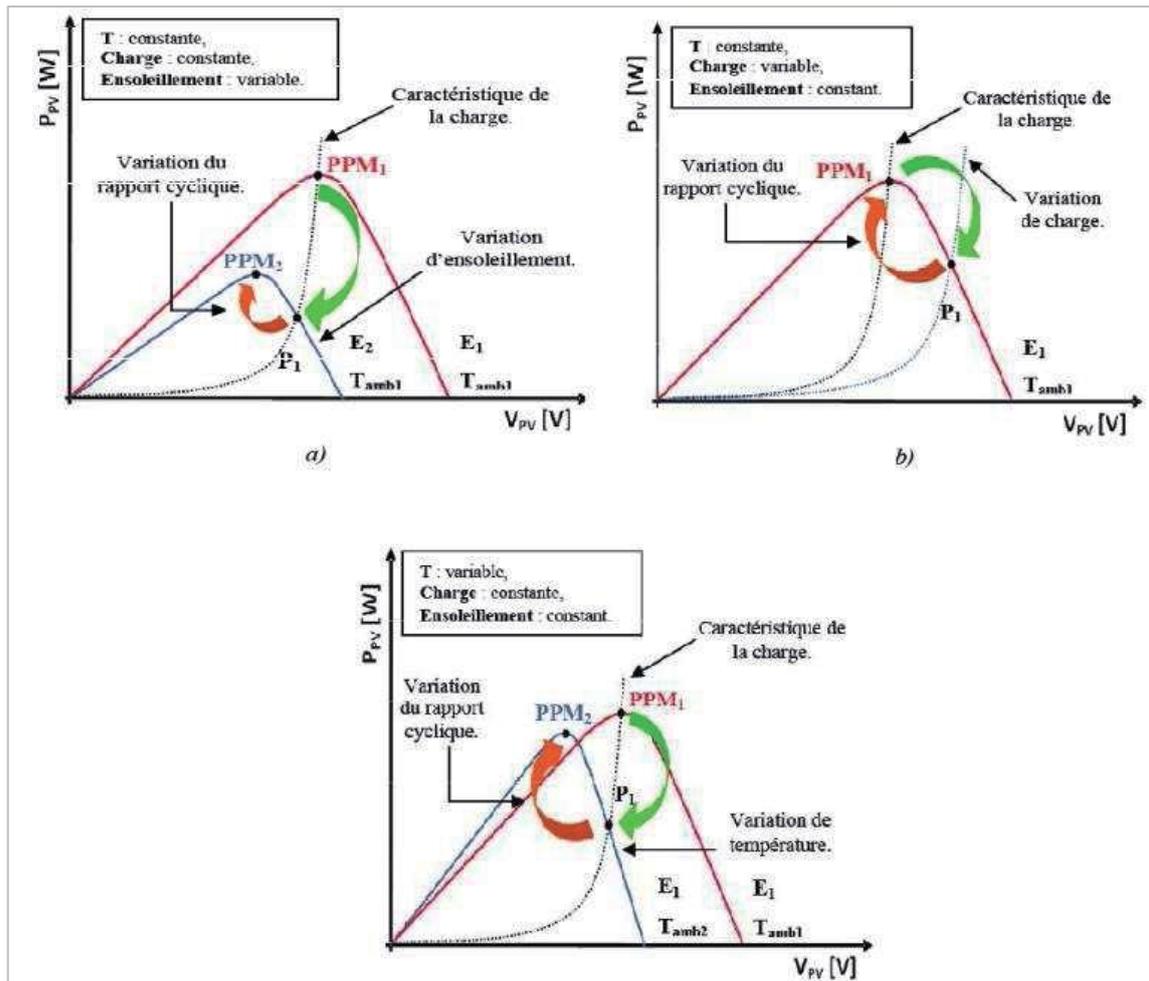


Figure.III.9 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal.

- (a) Suite à une variation d'ensoleillement au niveau du GPV.
- (b) Suite à une variation de consommation de charge.
- (c) Suite à une variation de température au niveau du GPV.

III.4.4.2 Partie électronique de puissance :

a. Convertisseurs statiques :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donnée, dans les systèmes photovoltaïques on le trouve soit entre le champ photovoltaïque et la charge (sans stockage avec charge en continu, il

portera le nom de convertisseur continu/continu ou hacheur), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif).

b. Convertisseur Continu–Alternatif :

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension ou de fréquence différente.

c. Convertisseurs continus-continu :

Le hacheur est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés qui permet d'alimenter une charge sous une tension continue réglable, à partir d'une source de tension continue constante avec un rendement élevé, présentant la partie essentielle dans le dispositif de commande d'un générateur photovoltaïque. [42]

Le tableau (III-1) donne les différents types des convertisseurs DC-DC. Les trois premiers sont les plus fondamentaux, ils sont largement utilisés à cause de leur faible complexité.

Type	Fonction	Inductance	Interrupteur de Puissance	Diode	Transformateur	Complexité
BUCK	Abaisseur	Oui	1	1	Non	Faible
BOOST	Élévateur	Oui	1	1	Non	Faible
BUCK- BOOST	Élévateur Abaisseur	Oui	1	1	Non	Faible
FLYBACK	Élévateur Abaisseur	Non	1	1	Oui	Moyenne
HALF FORWARD	Élévateur Abaisseur	Oui	1	1	Oui	Moyenne
Push pull	Élévateur Abaisseur	Oui	2	2	Oui	Forte
Demi-pont	Élévateur Abaisseur	Oui	2	4	Oui	Forte
Pont	Élévateur Abaisseur	Oui	4	4	Oui	Très forte

Tableau.III.1 : Les différents types de convertisseur DC = DC.

d. Convertisseur BOOST :

Un convertisseur BOOST ou élévateur comme son nom l'indique sert à la conversion d'une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure il se compose essentiellement d'un interrupteur à base de matériau semi-conducteur placé en parallèle avec la source de type continue, d'une diode D, une inductance et un condensateur, La figure (III-10) montre le schéma équivalent d'un hacheur parallèle. [43]

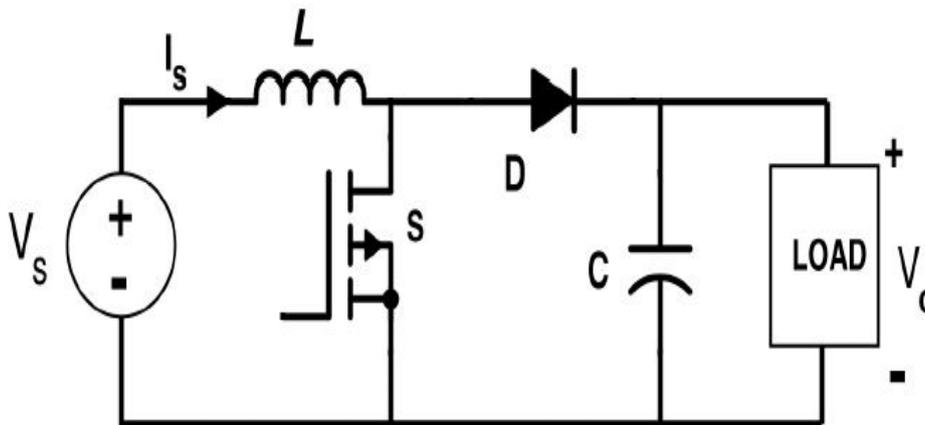


Figure.III.10 : Schéma représentatif d'un hacheur BOOST.

- **Phase une du fonctionnement :**

A $t = 0$, L'interrupteur est fermé, cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, suivant l'équation (III.1), la diode D est bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation comme le montre la figure (III-11).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_e}{L} \quad \text{III.1}$$

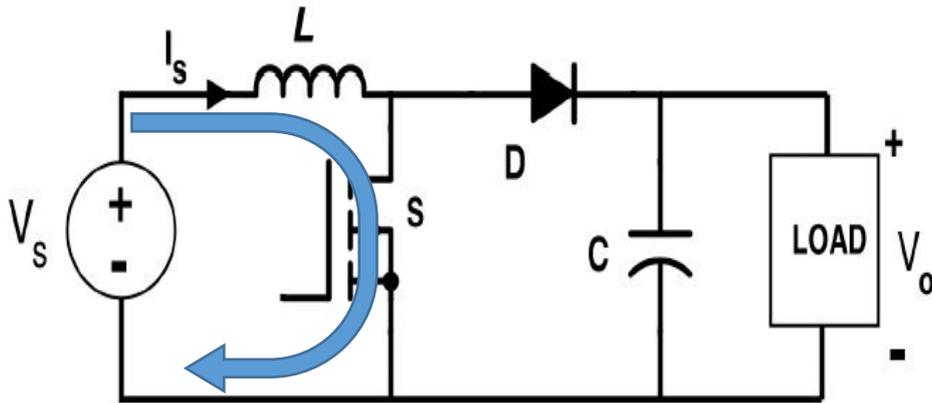


Figure.III.11 : Convertisseur BOOST durant l'état ON.

- **Phase deux du fonctionnement :**

A l'instant $t = \alpha T$, L'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur, le courant I_L traversant l'inductance, la diode D, le condensateur C et la charge.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} \quad \text{III.2}$$

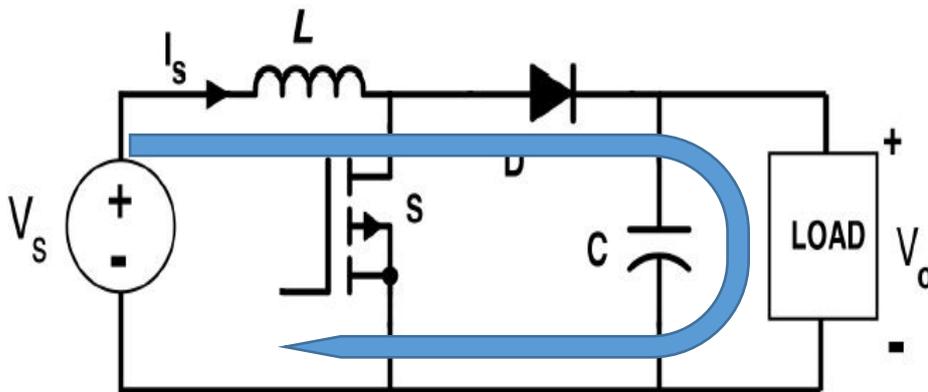


Figure.III.12 : Convertisseur BOOST durant l'état OFF.

La valeur moyenne de la tension de sortie V_s est donnée par l'équation (III.3).

$$V_s = \frac{1}{1-D} V_e \quad \text{III.3}$$

Le rapport cyclique D est entre 0 et 1 donc la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

III.4.4.3 Partie commandes (Technique de la commande MPPT) :

Le point où l'annulation de la dérivée par rapport à une variable donnée est la définition mathématique de l'optimum d'une fonction, les algorithmes de calcul du point de puissance maximum consultés se basent sur ce principe-là. [43]

➤ **Les algorithmes MPPT**

- 1- Algorithme perturbation et observation (P&O).
- 2- Algorithme incrémental de la conductance (INC).
- 3- Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction de la Tension Voc (FCO).
- 4- Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction du Courant Icc(FCC).
- 5- Algorithme à Base de la Logique Floue.

Dans notre application nous utiliserons l'algorithme PERTURB & OBSERV (P&O) :

MPPT	P&O	INC	FOC	FCC	LF
Type de capteurs	Courant Tension	Courant Tension	Tension	Courant	Courant
Identification Des paramètres du panneau PV	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Complexité	Basse	Moyenne	Très Basse	Très Basse	Haute
Nombre d'itérations	45	48	35	41	27
Vitesse de convergence	Moyenne	Moyenne	Rapide	Rapide	Très Rapide
Précision	95%	98%	94%	94%	99%

Tableau.III.2 : Comparaison Des Techniques MPPT.

Dans notre application nous utiliserons l'algorithme PERTURB & OBSERV (P&O) :

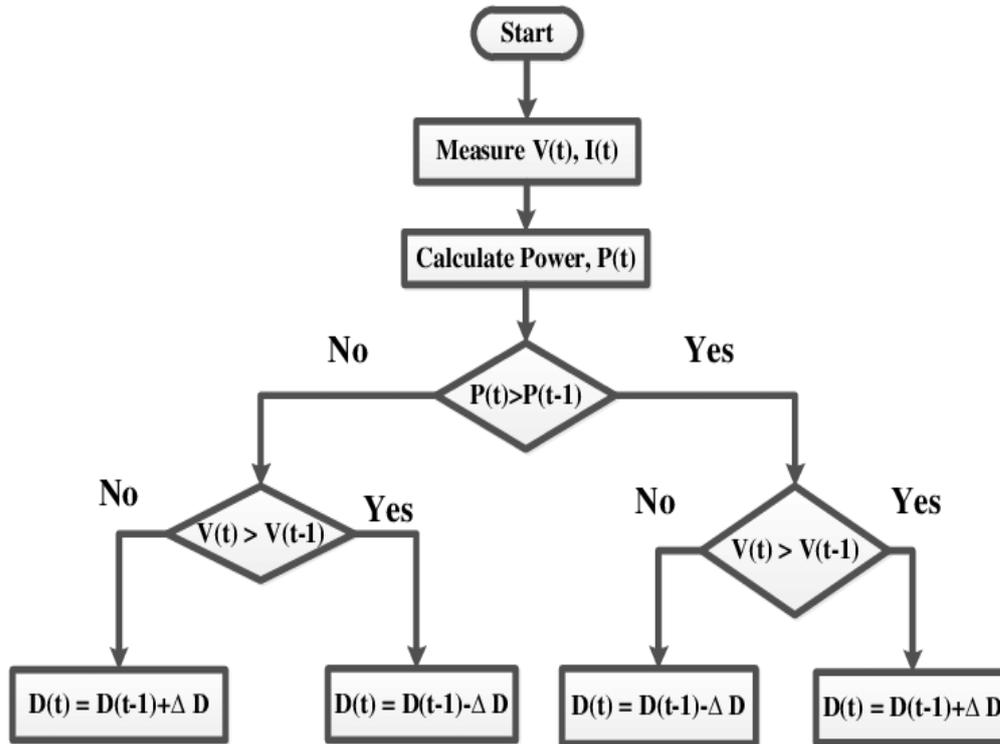


Figure.III.13 : Organigramme de l’algorithme P&O.

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l’indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l’observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$)

Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d’un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

Le principe de cet algorithme est d’effectuer une perturbation sur la tension du panneau

PV tout en agissant sur le rapport cyclique α . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l’instant k , puis on la compare à la précédente de l’instant $(k-1)$ Si la puissance augmente, on s’approche du point de puissance maximale et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même

sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique.

La Figure (III-19) montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. [44]

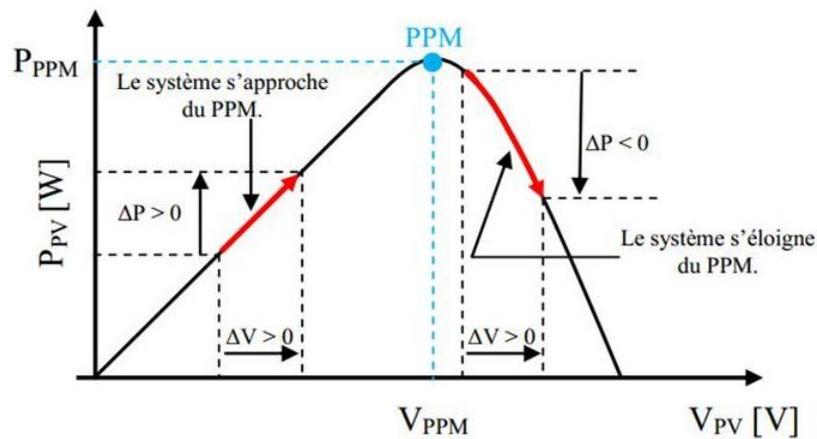


Figure.III.14 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires

pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés. [45]

III.5 Simulation du système Photovoltaïque-Hacheur avec la commande MPPT :

III.5.1 Simulation du module 1Soltech 1STH-220P :

Pour réaliser cette modélisation, Nous avons choisi le module photovoltaïque 1Soltech 1STH-220P. Le module est composé de 60 cellules solaires multi cristallines en silicone de 41.4 V connectées en série pour produire une puissance maximale de 255.024Wc.

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

1Soltech 1STH-220P	
Température aux conditions standards, T	25° C
Eclairement aux conditions standard, E	1000W/m²
Tension de circuit ouvert, V_{co}	36.6 V
Courant de court-circuit, I_{cc}	7.97 A
Puissance maximale, P_m	220 W
Tension au point de la puissance maximale, V_m	29.3 V
Courant au point de la puissance maximale, I_m	7.47 A
Nombres des cellules	60

Tableau.III.3 : Caractéristique électrique de module photovoltaïque.

On peut présenter le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc figure (III.15) comportant quatre paramètres.

Deux variables d'entrées qui sont :

L'irradiation G (W/m²) et la température de jonction des cellules T_j (°C) et deux variables de sortie : courant fourni par le GPV I_{PV} (A), tension aux bornes du GPV V_{PV} (V).

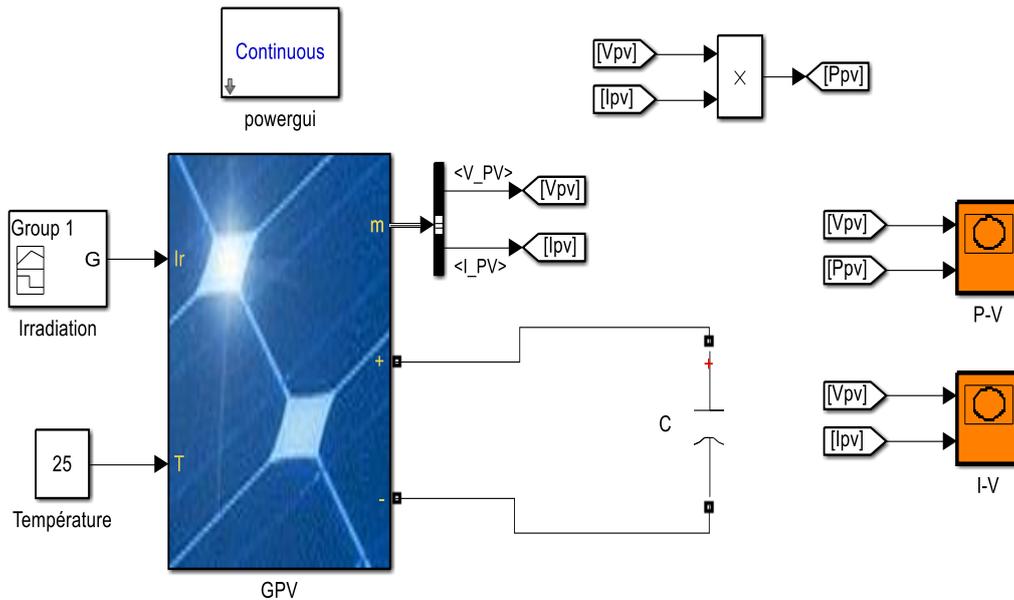


Figure.III.15 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

III.5.1.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque :

a. Caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque à l'allure de la figure (III.16)

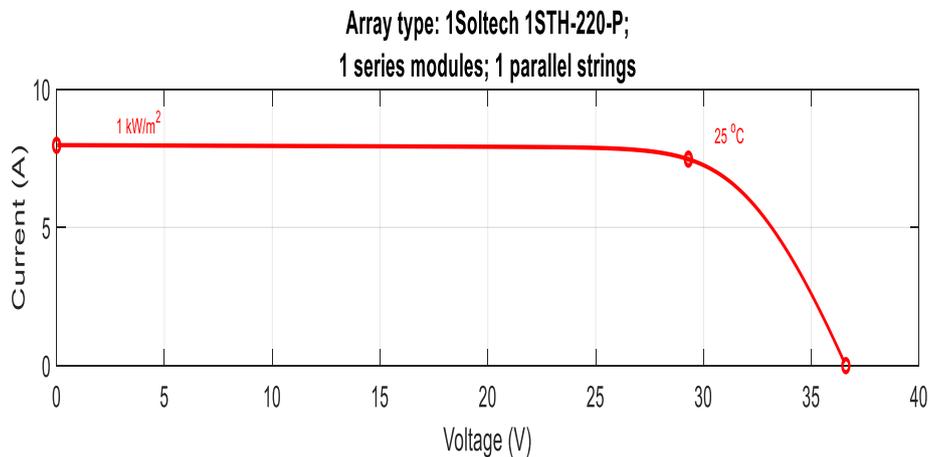


Figure.III.16 : La caractéristique électrique I (V) dans les conditions Standards ($T=25^{\circ}$, $G=1000W/m^2$).

b. Caractéristique Puissance-tension

La caractéristique puissance- tension d'un module solaire à l'allure de la figure (III.17)

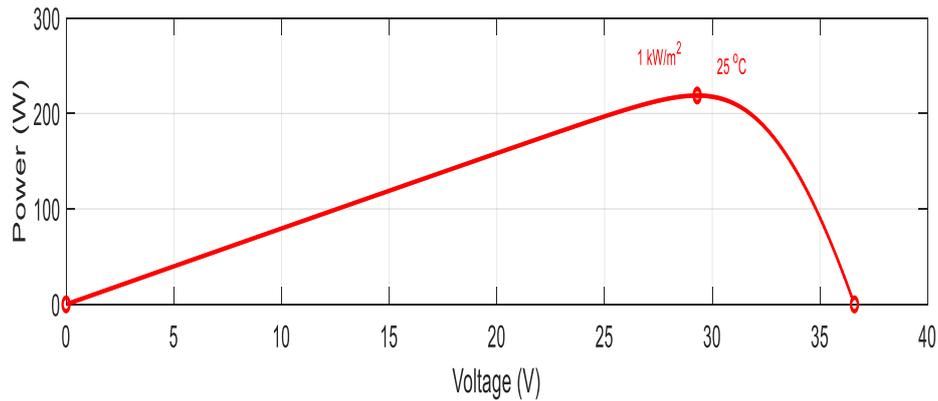


Figure.III.17 : La caractéristique électrique P (V) dans les conditions Standards ($T=25^{\circ}$, $G=1000W/m^2$).

III.5.1.2 Influence de l'éclairement :

La figure (III.18) montre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V. A une température constante ($T=25^{\circ}C$) en fonction de la variation de l'éclairement ($G=1000, 700, 500, 300 W/m^2$).

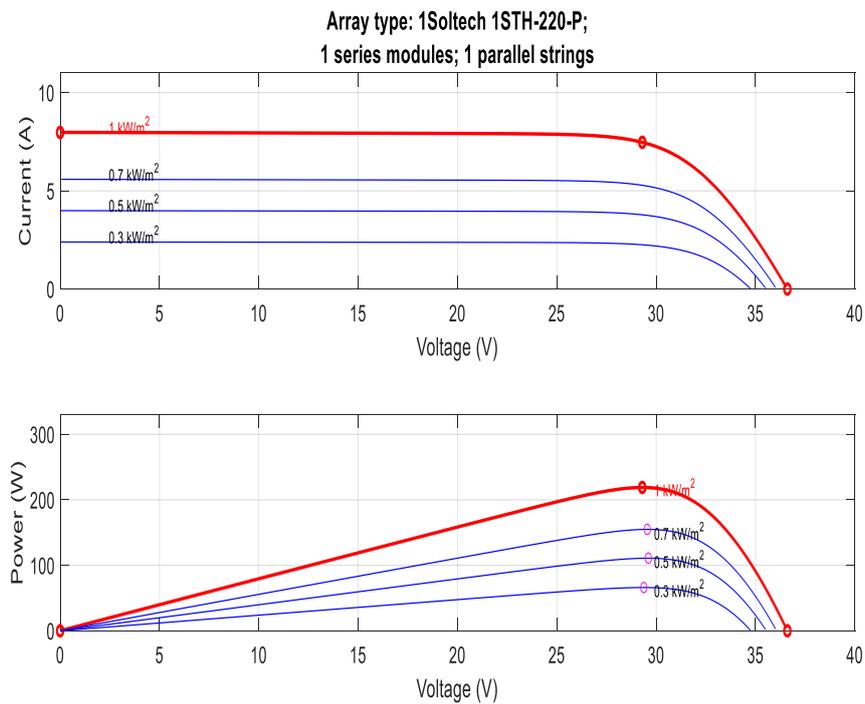


Figure.III.18 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V Pour différents Eclairements et une Température $T=25^{\circ}C$.

III.5.1.3 Influence de la température :

La figure (III.19) ci-dessous représente la caractéristique I-V et P-V dans la même condition de l'éclairement ($G=1000 \text{ W/m}^2$) et pour différentes températures ($T=25, 40, 50, 60^\circ\text{C}$).

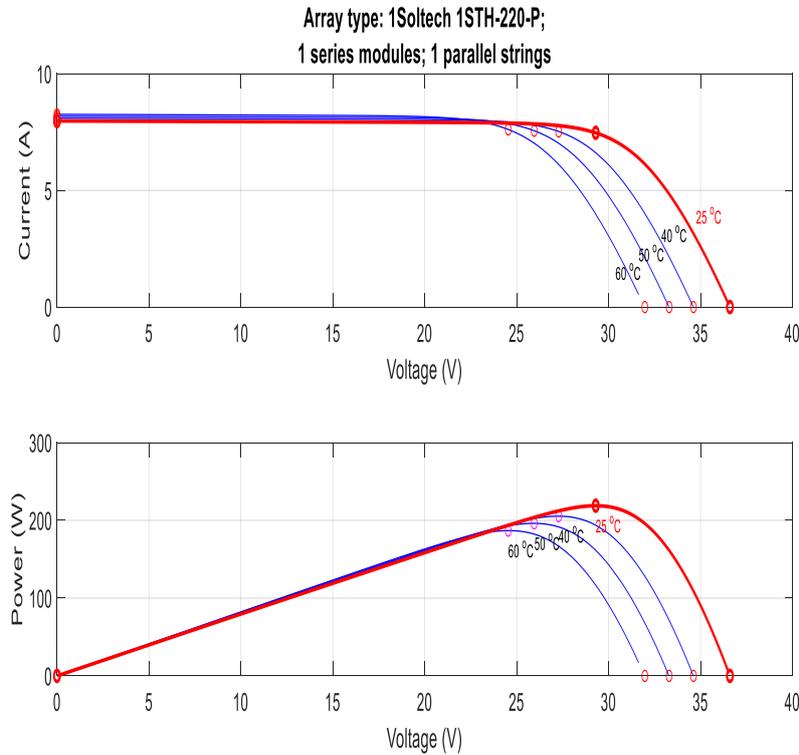


Figure.III.19 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V, pour différentes températures et un éclairement $G=1000\text{W/m}^2$.

Interprétations des Résultats :

La figure (III.18) montre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques du courant et de puissance en fonction de la tension.

- On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle au rayonnement, par contre la tension varie légèrement et l'augmentation de l'éclairement se traduit aussi par une augmentation de la puissance maximale disponible.

La figure (III.19) montre l'influence de la température sur les caractéristiques du courant et de puissance en fonction de la tension.

- On remarque que la tension de circuit ouvert est diminuée 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.
- Le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert augmentent relativement quand le nombre de cellule en série/parallèle augmente, alors la puissance augmente aussi.

III.5.2 Simulation du schéma global :

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

Dans cette simulation on a utilisé un GPV et un hacheur série caractérisé comme nous avons cité précédemment, avec une commande MPPT de type P&O.

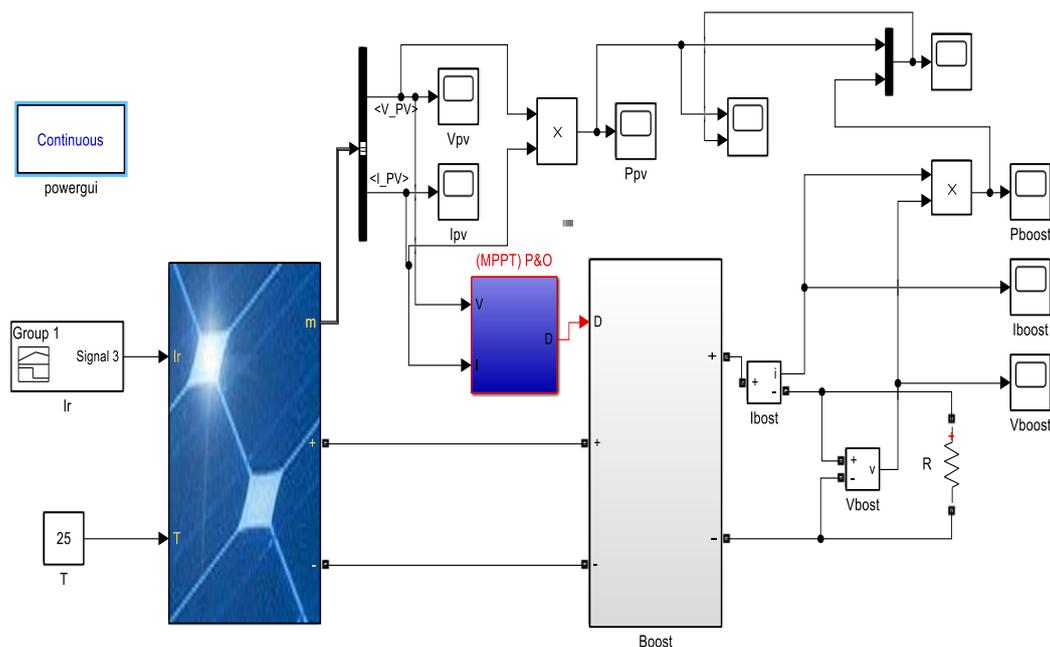


Figure.III.20 : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type BOOST) connecté à modèle PV avec MPPT.

- Bloc MPPT (méthode P&O)

La figure (III.21) représente le block MPPT dans SIMULINK :

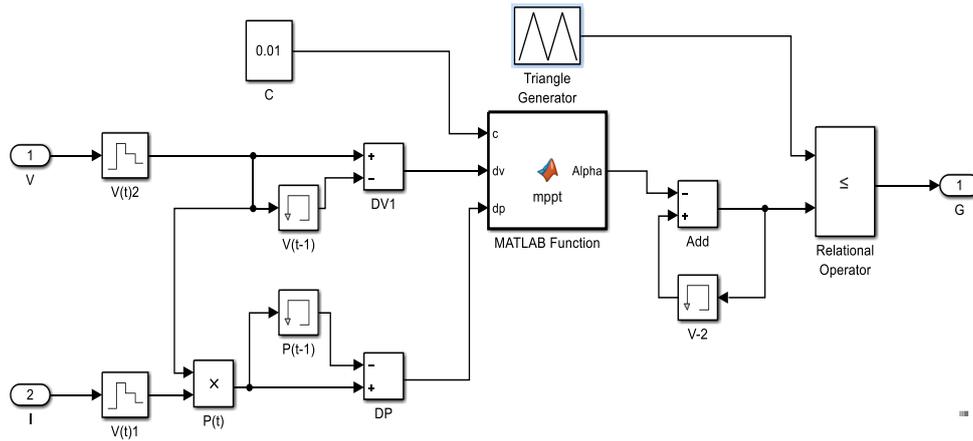


Figure.III.21 : Modèle SIMULINK pour l’algorithme MPPT (P&O).

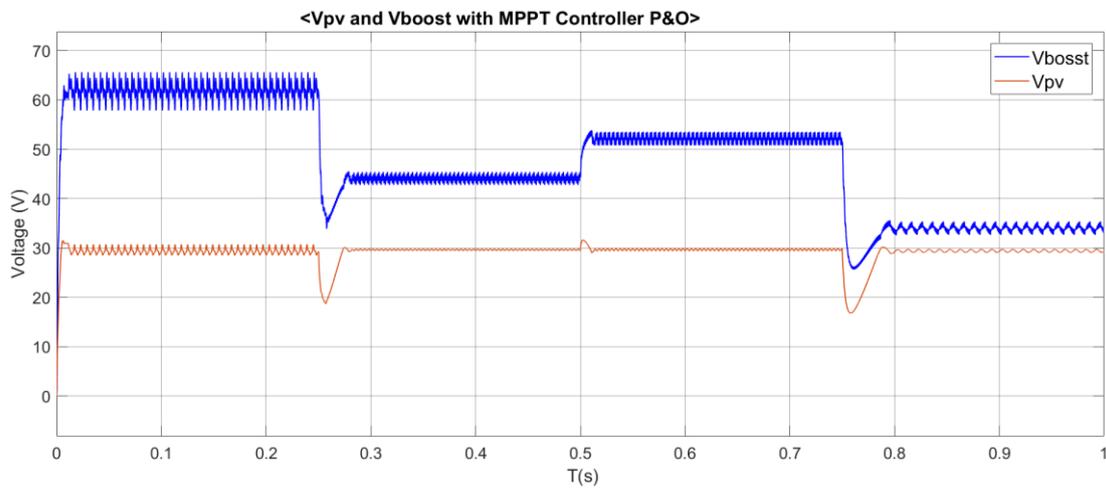


Figure.III.22 : La tension d’entrée V_{pv} et sortie V_{out} d’hacheur avec MPPT.

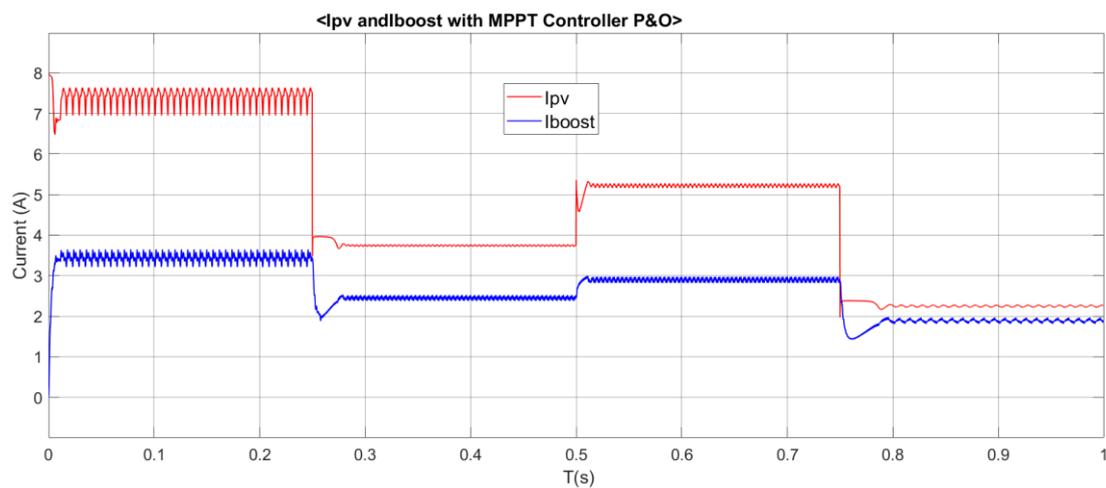


Figure.III.23: le courant d’entrée I_{pv} et sortie I_{out} d’hacheur avec MPPT.

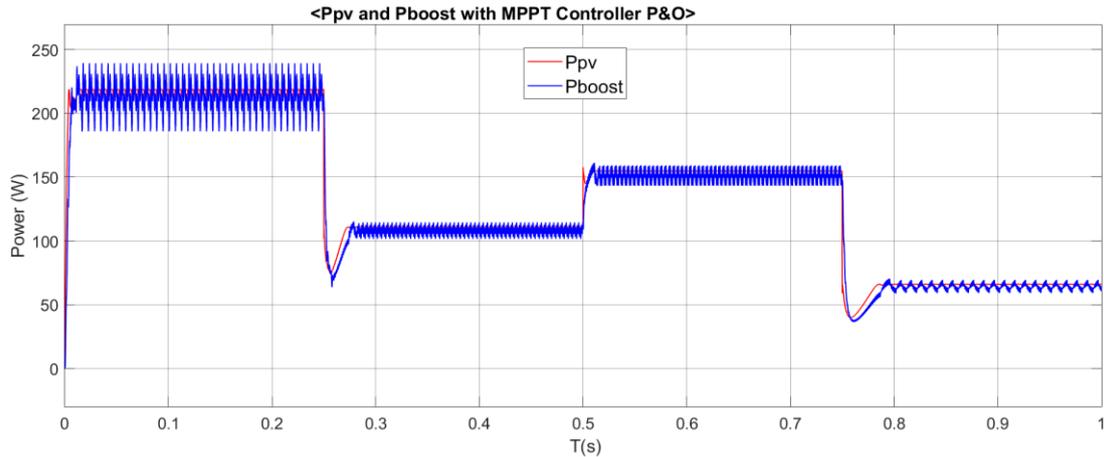


Figure.III.24 : La puissance d'entrée P_{pv} et sortie P_{out} d'hacheur avec MPPT.

Interprétations des résultats :

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

- La tension de sortie d'hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée.
- 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 : figure (III.22).
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV : figure (II.24).

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le régulateur solaire est la pièce maitresse d'un système photovoltaïque autonome, il assure un meilleur rendement de l'exploitation des panneaux solaires ainsi que la sécurité des accumulateurs électrochimique (batteries).

Et aussi nous avons présenté le fonctionnement du hacheur série DC-DC (BOOST) et la commande MPPT, Le convertisseur BOOST et l'algorithme (PERTURB & OBSERVE) sont simulés en utilisant la boîte outil Sim Power System du MATLAB/Simulink. D'après les résultats obtenus, on remarque que le convertisseur DC-DC (Buck) et la commande MPPT effectuent correctement ses rôles d'atteindre le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire traite l'étude d'un système photovoltaïque énergétiquement autonome. Ce système fonctionne à sa puissance optimale avec l'utilisation d'un convertisseur DC/DC commandé par MPPT.

Nous avons rappelé dans le premier chapitre le principe de la conversion photovoltaïque, quelques généralités sur la production de l'énergie photovoltaïque,

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre les différents systèmes de stockage d'énergie électrique, et en particulier les batteries et leur principe de fonctionnement, les caractéristiques des batteries, ainsi que les différents modèles de batteries existant dans la littérature.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude, le dimensionnement et la simulation d'un système photovoltaïque, fonctionnant en MPPT qui assure le stockage au moyen de batteries afin de répondre à l'exigence de puissance demandée par la charge.

Références bibliographiques

- [1] José Miguel Navarro, Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [2] L. de SCHOULEPNIKOFF et Gymnase Auguste Piccard, Quelle source d'énergie pour les vingt prochaines années ? Travail de maturité Alexandra CATANA, 3M7, 2009.
- [3] P. Boulanger, P. MALBRANCHE, « Conversion de puissance et gestion d'énergie dans les systèmes photovoltaïques : état de l'art », colloque GEVIQ'2002, Marseille 12-13 juin 2002, pp.60-65.
- [4] M. Z. F.Z. ZERHOUNI, "Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique," Revue des Energies Renouvelables, vol. 11, no. N°1, p. 41–49, 2008.
- [5] F. HEROGUEL, "les cellules photovoltaïques," École Normale Supérieure, Lyon Epreuve de projet, 2007.
- [6] <https://www.homeowner.com/solar/solar-cells-guide>.
- [7] <https://www.britannica.com/science/semiconductor>.
- [8] K. HELALI, " Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative", Mémoire de Magister université de MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 25 Juin 2012.
- [9] S. AOUIFI, " Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS -SETIF-1, 28/09/2014.
- [10] Ressources pour les STIED, Septembre- Octobre 2011.
- [11] NARIMEN DEBILI, « Etude et optimisation en environnement MATLAB/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », mémoire de magister, université Constantine 1, 2015
- [12] : C. Bernard, J.CHAUVIN, D. Lebrun, J.F MURAZ, P. STASSI « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection l'observatoire Pierre Auger ».2006.
- [13] Y. PANKOW, "Étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque," École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Thèse de Doctorat, 2004.
- [14] [June et al. 2012] June, M., Pachpande, S. G., Elec, M. E. S. Y., et Jalgaon, S. C. O. E. (2012). Studying The Effect of Shading on Solar Panel using MATLAB. International Journal of Science and Applied Information Technology, 1(2278) :46-51.
- [15] [Estibals, 2010] Estibals, B. (2010). Contribution à l'Amélioration des Chaînes de Conversion Photovoltaïques par l'Introduction d'Architectures Distribuées. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [16] [El-FERGANY, 2015] El-FERGANY, A. (2015). E-CIENT Tool to Characterize Photovoltaic Generating Systems using Mine Blast Algorithm. Electric Power Components and Systems, 43(8-10) :890-901.
- [17] [Bun, 2011] Bun, L. (2011). Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV. Thèse de Doctorat, Laboratoire G2ELAB Université de Grenoble France.

- [18] [E. Díaz-Dorado, A. Suárez-García, C. Carrillo et Cidrás, 2010] E. Díaz-Dorado, A. Suárez-García, C. Carrillo et Cidrás, J. (2010). Influence of the Shadows in Photovoltaic Systems with different Configurations of Bypass Diodes. In International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pages 134-139.
- [19] [Silvestre et al. 2009] Silvestre, S., Boronat, A., et Chouder, A. (2009). Study of Bypass Diodes Configuration on PV Modules. Applied Energy, 86(9):1632-1640.
- [20] B. Pradhan, A. J. Pal, Solar Energy Materials & Solar Cells, 81, 469 (2004).
- [21] : S.ABOUDA. «Contribution à la commande des systèmes Photovoltaïque » Thèse. Université de Reims Champagne-ardenne.2015
- [22] : H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », Revue des Energies renouvelables vol.17 N: 3 (2014) 435-445, Tunisia.
- [23] : Éric Schiller« le pompage photovoltaïque» .Manuel de cours, Université d'Ottawa, Canada.
- [24] : S. Sumathi, « Solar PV and wind Energy conversion systems », Springer, Switzerland 2015.
- [25] : M. Belkacem, «Etude et optimisation d'un transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance Maximale», Mémoire Master, Université de Tlemcen ,2015.
- [26] : S. Abouda, « contribution à la commande des systèmes photovoltaïques application aux systèmes de pompage », Thèse doctorat, Université de Sfax, 2015.
- [27] : W. Issaadi, «gestion d'une station de base d'un réseau mobile à l'aide d'un système photovoltaïque », mémoire de magister, Université de Bejaïa, 2013.
- [28] : M. Amarouayache, «contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque», thèse doctorat, Université de Constantine 1,2014.
- [29] : K. Ouabdelkader, H. Mersel, «Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau», Mémoire master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2014.
- [30] Toumi djaafar. "Comparaison de P&O et du contrôleur de logique floue dans MPPT pour applications photovoltaïques (PV) à l'aide de MATLAB Simulink" mémoire de magister
- [31] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005
- [32] K.Sobaihi " étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance maximale (MPPT) à contre réaction " Mémoire de Magister Ecole National, polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.
- [33] Planete-Energies, La batterie lithium-ion : comment ça marche ? [en ligne]. Consulté le 17 Mai 2020. Lien : <https://www.planeteenergies.com/fr/medias/decryptages/la-batterie-lithium-ion-comment-ca-marche>

- [34] S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: applications aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat, cotutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015.
- [35] Saima Siouane, Slavisa Jovanovic, Philippe Poure « Service Continuity of PV Synchronous Buck/Buck-Boost Converter with Energy Storage>>
- [36] Boukli-hacene Omar. Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique. Thèse, Université Abou Bakr Belkadi, Tlemcen. 2011 p.41-50
- [37] Pernet, Pascal. Développement de cellules solaires en silicium amorphe de type "n-i-p" sur substrats souples. Thèse. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2001 p.22
- [38] Isidor Buchmann, L'histoire des accumulateurs [en ligne]. Consulter le 10 juillet 2020. Lien : <https://nicd.net/wpnicd/index.php/lhistoire-des-accumulateurs/>
- [39] Zonetronik.com. Définition d'une batterie solaire [en ligne]. Consulter le 10 juillet 2020. Lien : <https://www.zonetronik.com/definition-dune-batterie-solaire/>
- [40] Solaris-store.com. Principe de fonctionnement d'une batterie solaire [en ligne]. Consulter le 10 juillet 2020. Lien : <https://www.solaris-store.com/content/43-principe-de-fonctionnement-d-une-batterie-solaire>
- [41] Tarfaya Yazid Siad Heythem. Réglage et stabilisation de la tension d'une batterie dans un système PV. Mémoire. Université Badji Mokhtar Annaba, 2019 p-35-42.
- [42] Lepanneausolaire.net. Les différentes technologies des contrôleurs de charge [en ligne]. Consulter le 10 juillet 2020. Lien <https://www.lepanneausolaire.net/lesdifferentes-technologies-controleurs-charge.php>
- [43] Dualsun.com. Qu'en est-il du « temps de retour énergétique » des panneaux photovoltaïques ? [En ligne]. Consulter le 28 Aout 2020. Lien : <https://news.dualsun.com/technologie-solaire/temps-retour-energetiquepanneaux-photovoltaïques/>
- [44] A.Fouillé, "Electrotechnique à l'usage des ingénieurs-Tome 3 ", 10^{ème} édition, 1980
- [45] Touzani Youssef, " Commande aléatoire du convertisseur BUCK-BOOST triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant", thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand, 10/07/2006