

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Electronique**
Spécialité : **Systèmes Electroniques**

Etude d'une chaine de conversion photovoltaïque

Présenté par :

Mahmoudi Abderrezak

Okki Farouk

Sous la direction de :

Dr .Boulsina Fayçal

Juin 2016

REMERCIEMENTS

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir Donné la force et le courage.

A la suite Nous tenons à remercier vivement Mr. DR.BOULSINA FAÏÇAL notre encadreur qui a fourni des efforts énormes, par ses Informations ses conseils et ses encouragements.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour L'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance. Nos vifs remerciements aussi à Mr. Abed Djamel, Mr. Hamdi Rachid, Mr.Boudjahem.J, Mr.younssi.A et Mr .Bourouba.H et Tous les maîtres assistants à l'université De Guelma, pour avoir accepté d'être examinateurs de ce travail. Et tous les professeurs de département de Génie électrique .A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de prés et de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.



16/3320 ✓



With warmest thoughts and wishes on this day and every day.

HAPPY GRADUATION

Best wishes,



Dédicaces

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

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents, que dieu les garde et les Protège pour leurs soutien moral, pour Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes frères, A mes sœurs

A Benhamdi.Z

A tout ma familles

Aux chers amis (es)

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

A tous mes collègues d'études surtout ceux D'électronique.

ABDERREZAK

Table des matières

Remerciement

Dédicaces

Table des matières

Liste des Figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I : Système photovoltaïque: Généralités

I.1-Introduction.....	1
I.2-Historique	1
I.3- de la lumière à l'électricité	1
I.3.1-Le rayonnement solaire	1
I.3.2-Sensibilité spectrale	3
I.3.3-Les composantes de la lumière solaire	3
I.3.4-Le Potentiel Solaire en Algérie	5
I.4-L'effet photovoltaïque	6
I.5- Le système photovoltaïque	8
I.5.1-Générateur photovoltaïque	9
I.5.2-Branchement en parallèle des cellules.....	11
I.5.3-Montage en série des cellules	12
I.5.4- Convertisseur statique continu/continu (DC/DC) contrôlé par la commande MPPT.....	13
I.5.5-Composants de distribution courant continu (DC) ou alternatif (AC) (câbles, connectiques, protections, etc.)	14

I.5.6-Onduleur	14
I.5.7-Système de régulation et supervision et stockage	14
I.5.8-Compteur de production	15
I.6-la notion de puissance-crête	15
I.7-Rendement d'un système photovoltaïque	16
I.8-Typologies de parcs au sol : systèmes fixes et systèmes à tracker	18
I.9-Conclusion	19

Chapitre 2 : Simulation d'un générateur photovoltaïque

II-Introduction	20
II.1-Modelisation d'une cellule PV	20
II.1.1- Model simple (idéal)	20
II.1.1.a-Tension en Circuit ouvert V_{co}	22
II.1.1.b-Courant de court-circuit I_{cc}	22
II.1.3 Point de puissance maximum (MPP)	23
II.1.2- Model précis	23
II.1.3- Influence de la résistance parallèle	23
II.1.4- Influence de la résistance série.....	24
II.2-Recombinaison	26
II.3- Modélisation d'un générateur photovoltaïque	27
II.4-Simulation d'un générateur PV avec Matlab.....	28
II.4.1- les courbes caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ et le point de puissance maximale	29
II.4.2 Effets des variations climatiques sur le générateur photovoltaïque.....	31
II.4.a-Variation de l'éclairement énergétique	31
II.4.2.b-Variations de la de la Température	32
II.5-Conclusion	35

Chapitre 3 : Convertisseurs statiques Commande MPPT

III.1-Introduction	36
III.2- Connexion directe entre la source et la charge	36
III.3-Etage d'adaptation entre une source et une charge.....	37
III.4-Convertisseurs DC/DC	38
III.4.1- Différents types de convertisseurs DC/DC	38
III.4.2-Convertisseur abaisseur « BUCK »	39
III.4.3-Simulation d'un convertisseur Buck	39
III.5-Convertisseur MPPT	41
III.5.1-Classification des MPPT	45
III.5.2-Méthode Perturbe & Observe (P&O).....	46
III.5.3-Simulation de l'algorithme P&O	49
II.6-Conclusion	53

Chapitre 4 : Réalisation d'un suiveur de soleil (tracker) bi-axiale à base d'Arduino

IV.1-Introduction	54
IV.2-Presentation du prototype	54
IV.2.3-Cablage et fonctionnement	55
IV.2.4-Matériels	55
IV.3-Description des composants	56
IV.3.1- Caractéristiques du Panneau solaire	56
IV.3.2-Carte électronique programmable Arduino Mega 2560	57
IV.3.2.a-Qu'est-ce que l'ARDUINO	57
IV.3.2.b-Programmation de la carte	58
IV.3.2.c-Carte mère Arduino Mega 2560	58
IV.3.2.d-Spécifications techniques de la carte Arduino Méga 2560	59
IV.3.3-Servomoteurs	60

IV.3.3.b-Commande d'un servomoteur	61
IV.3.3.c-Connexion d'un servo à un Arduino	62
IV.3.3.d-Déclaration d'un servomoteur dans le logiciel Arduino	63
IV.3.4-Capteurs à résistance variable	64
IV.3.4.a-Caractéristiques des photorésistances utilisées	64
IV.3.4.b-La photorésistance (LDR)	64
IV.3.4.c-Propriété	64
IV.3.5-Batterie 12V DC et Charge continu DC	65
IV.4-La programmation et le codage	65
IV.4.1-Explication du fonctionnement global du code	65
IV.4.1.a-Code détaillé	66
IV.5-Montage de la plaque d'essai	70
IV.5.1-prototype réalisé et finalisé	71
IV.6-Conclusion	71

Conclusion générale

Références bibliographique et webographie

Annexe

Résumé

Liste des figures

Chapitre I : Système photovoltaïque: Généralités

Figure 1.1 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM	2
Figure 1.2 : Spectre électromagnétique.....	3
Figure 1.3 : Les 3 différents types de rayonnement solaire	4
Figure 1.4 : Horizon solaire	5
Figure 1.5 : Potentiel solaire en Algérie	6
Figure 1.6 : Les bandes de valence et de conduction pour le silicium cristallin(c-si).....	7
Figure 1.7 : Le principe de l'effet photovoltaïque.....	8
Figure 1.8 : Schéma synoptique d'un système PV, sans et avec stockage	9
Figure 1.9 : Coupe transversale d'un GPV	10
Figure 1.10 : Les cellules photovoltaïques, les GPV, les champs	11
Figure 1.11 : connexion en parallèle des cellules solaires : le voltage est similaire dans toutes les cellules quand le courant augmente	12
Figure 1.12 : Connexion en série des cellules solaires : le voltage des cellules individuelles sont additionnées en ensembles	12
Figure 1.13 : Modèle d'un dispositif MPPT	13
Figure 1.14 : Point de puissance maximale PPM	13
Figure 1.15 : Principe d'un système photovoltaïque raccordé au réseau	14
Figure 1.16 : Tracker à rotation mono-axiale	18
Figure 1.17 : Tracker à Rotation bi-axiale	18
Figure 1.18 : Parc photovoltaïque	19

Chapitre 2 : Simulation d'un générateur photovoltaïque

Figure 2.1: Circuit électrique équivalent simple d'une cellule photovoltaïque, composé d'une source de courant parallèle à une diode réelle.....	20
Figure 2.2 : Le courant de court-circuit(I_{cc}) et la tension en circuit ouvert (V_{co}).....	21
Figure 2.3 : Courbe caractéristique d'une cellule solaire	23
Figure 2.4 : Circuit équivalent simple d'une cellule PV avec une résistance parallèle	24
Figure 2.5 : Modification du circuit équivalent PV idéal par l'addition d'une résistance parallèle	24
Figure 2.6 : Circuit équivalent d'une cellule PV avec une résistance série	25
Figure 2.7 : Addition d'une résistance série au circuit équivalent d'une cellule Photovoltaïque	25
Figure 2.8 : Un circuit équivalent plus complexe d'une cellule PV inclut des résistances séries et parallèles	26
Figure 2.9 : Les résistances séries et parallèles dans le circuit équivalent PV diminuent la tension et le courant fournis	27
Figure 2.10 : Les cellules PV sont connectées en série pour constituer un générateur PV	28
Figure 2.11 : Différentes caractéristiques de la courbe $I(V)$ du GPV ($1000W/m^2$, $25^{\circ}C$).....	29
Figure 2.12 : Caractéristique $P(V)$ du GPV simulées avec MATLAB ($25^{\circ}C$, $1000W/m^2$).....	30
Figure 2.13 : Caractéristique $I(V)$ de GPV pour différents niveaux d'éclairements($T=25^{\circ}$).....	31
Figure 2.14 : Caractéristique $P(V)$ de GPV pour différents niveaux d'éclairements($T=25^{\circ}$)...	32
Figure 2.15 : Caractéristique $I(V)$ de GPV pour différentes températures ($G=1000W /m^2$) ..	33
Figure 2.16 : Caractéristique $P(V)$ de GPV pour différentes températures ($G=1000W /m^2$)...	33
Figure 2.17: Courbe $I(V)$ du GPV BP 3150B donnée par la fiche technique.....	34

Chapitre 3 : Convertisseurs statiques et commande MPPT

Figure 3.1: Connexion directe entre un GPV et une charge	36
Figure 3.2: Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge	37
Figure 3.3: Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P_{max} du GPV	37
Figure 3.4: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	38
Figure 3.5: Schéma de principe d'un convertisseur Buck et courbes de courant et tension...	39
Figure 3.6: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck	40
Figure 3.7 : Convertisseur Buck durant l'état on	40
Figure 3.8 : Convertisseur Buck durant l'état off	41
Figure 3.9 : Formes d'ondes des tensions V_{pv} et V_{load} dans le cas du convertisseur Buck	40
Figure 3.10 : Modèle de simulation du convertisseur Buck	41
Figure 3.11 : Tension de sortie V_S (V_{Load})	41
Figure 3.12 : Courant de sortie I_S	43
Figure 3.13 : Zoom la tension V_S et les courants I_S , I_D , I_L , et I_C	43
Figure 3.14 : Caractéristiques I-V, P-V et trajectoire de PPM	44
Figure 3.15: Schéma de convergence vers le PPM par P&O	45
Figure 3.16 : Algorithme de base de la méthode P&O	47
Figure 3.17: Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O	48
Figure 3.18 : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC) type Buck	49
Figure 3.19: Modèle SIMULINK de l'algorithme MPPT P&O	50
Figure 3.20: Modèle SIMULINK pour la génération du signal PWM	51
Figure 3.21: Principe du PWM	51
Figure 3.22 : Rapport cyclique D	52
Figure 3.23: Tension de sortie	52

Figure 3.24: Courant de sortie	52
Figure 3.25: Puissance de sortie	54

Chapitre 4 : Réalisation d'un suiveur de soleil (tracker) bi-axiale à base d'Arduino

Figure 4.1 : Schéma synoptique du système PV choisi pour la réalisation.....	54
Figure 4.2 : Schéma de câblage	55
Figure 4.3 : La maquette automatisée.....	56
Figure 4.4 : Panneaux solaire utilisé 2.5 W ,18V	57
Figure 4.5 : Interface logiciel Arduino	58
Figure 4.6 : Carte électronique programmable Arduino Mega 2560	59
Figure 4.7: Servomoteur utilisé MG995	61
Figure 4.8: Chronogramme de commande d'un servomoteur	62
Figure 4.9: Connexion des servomoteurs à un Arduino (broche10 et 11 sur PWM).....	63
Figure 4 .10: Photo d'une photorésistance	64
Figure 4.11: Schéma de câblage	70

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.....	5
Tableau 2-1 : Caractéristiques électriques du GPV prises de la fiche technique	29
Tableau 3.1 : Résumé de fonctionnement de l'algorithme P&O	50

Introduction générale

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.

En vertu du Protocole de Kyoto, l'Union Européenne s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre. En 12 décembre 2015, la conférence de Paris fixe pour but de limiter le réchauffement climatique à moins de 2°C, en visant la barre des 1,5°C. L'un de ses objectifs est la réorientation de l'économie mondiale vers un modèle à bas carbone, ce qui implique un abandon progressif des énergies fossiles. Les énergies renouvelables doivent jouer un rôle important pour atteindre ce résultat. L'Algérie, pays du soleil et de l'espace, peut s'inspirer de ces programmes pour une exploitation à grande échelle de l'énergie solaire.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque.

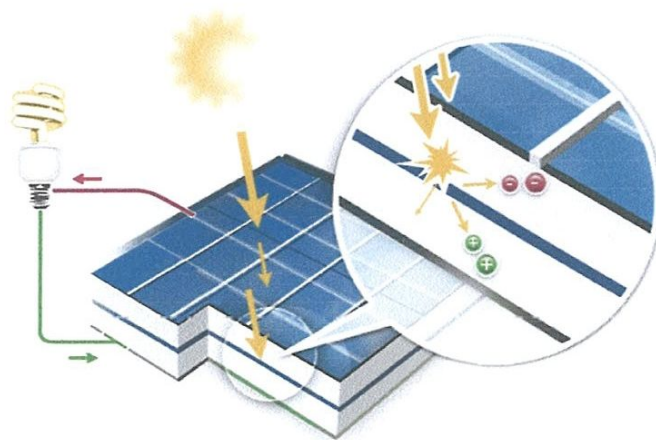
L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV). L'association de plusieurs cellules PV donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV). Les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du GPV sont non linéaire, présentant un point de puissance maximale. De plus, elles dépendent du niveau d'éclairement et de la température. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, un étage d'adaptation entre le GPV et la charge est nécessaire.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude d'un système photovoltaïque, constitué par un GPV, un étage d'adaptation et une charge DC. Il est partagé en quatre chapitres:

- ✚ Le premier chapitre présente des généralités sur le rayonnement solaire et les systèmes PV.
- ✚ Le deuxième chapitre est consacré à l'étude et la simulation du GPV.
- ✚ Le troisième chapitre est consacré à l'étude et la simulation de l'étage d'adaptation.
- ✚ Le quatrième chapitre est consacré à l'étude et la réalisation d'un suiveur de soleil bi-axial à base d'Arduino.

Chapitre 1

Systeme photovoltaïque : Généralités



I.1-INTRODUCTION

L'énergie solaire est une source d'énergie accessible à tous (industriels, collectivités et particuliers). Grâce à celle-ci, il est possible de produire trois types d'énergies : l'énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques et le solaire à concentration thermodynamique.

L'électricité photovoltaïque a dans un premier temps été développée pour des applications autonomes sans connexion à un réseau électrique pour par exemple des satellites de télécommunication ou pour des habitations isolées. On la trouve maintenant dans des applications de diverses puissances comme les calculatrices, les montres et d'autres objets d'utilisation courante.

Ce chapitre donne des notions sur l'énergie solaire et ses caractéristiques. Il présente le principe de la photovoltaïque, la chaîne photovoltaïque et ses éléments, ainsi que les différents types de systèmes photovoltaïques.

I.2-HISTORIQUE

Le terme « photovoltaïque » est composé du mot de grec ancien « photos » (φωτος : lumière, clarté) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

L'effet photovoltaïque, découvert en 1839 par le français Antoine-César Becquerel, désigne la capacité que possèdent certains matériaux, notamment les semi-conducteurs, à convertir directement les différentes composantes de la lumière du soleil (et non sa chaleur) en électricité. [1]

I.3- DE LA LUMIERE A L'ELECTRICITE

I.3.1-Le rayonnement solaire :

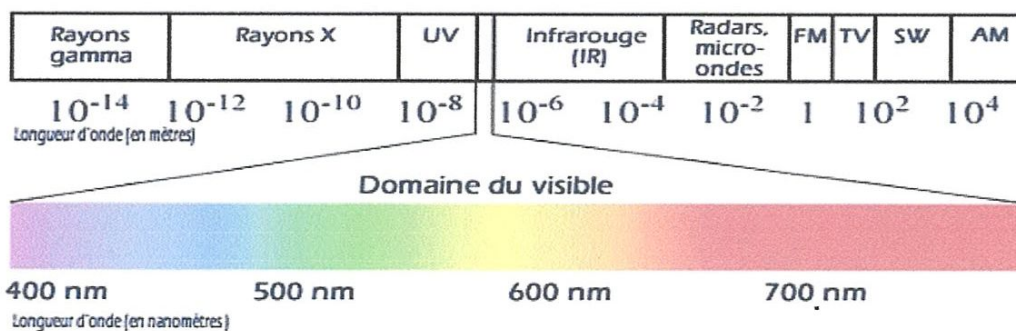
Le Soleil est une grande sphère formée de gaz extrêmement chauds. Il est constitué, par la masse, de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et autres (2%). Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La masse est alors transformée en énergie selon la fameuse formule d'Einstein, $E = mc^2$. Cette réaction maintient la surface du Soleil à une température approximative de 5800° K. [2]

Les panneaux solaires photovoltaïques permettent de profiter de cette énergie gratuite en la transformant en énergie électrique. [3]

I.3.2-Sensibilité spectrale

Le photon est la particule élémentaire du rayonnement électromagnétique. Le rayonnement électromagnétique comprend aussi bien la lumière visible que les ondes radios ou les rayons X et sa particule élémentaire est le photon. Le photon peut avoir des énergies très différentes. A chaque énergie qu'il peut prendre est reliée une longueur d'onde qui lui est inversement proportionnelle. L'ensemble des longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique permet de définir le spectre électromagnétique (Figure 1.2).

Figure 1.2 : Spectre électromagnétique



On appelle le domaine du visible la partie du spectre à laquelle nos yeux sont sensibles, entre 300 nanomètres (nm) -violet- et 800 nm -rouge-. Le rayonnement solaire émet un rayonnement dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (200 nm) à l'infrarouge lointain (250 nm). La majorité des photons qu'émet le soleil se situent dans le visible, autour d'un pic à 500 nm, c'est à dire dans le jaune-vert. [4]

I.3.3-Les composantes de la lumière solaire

La partie du rayonnement solaire exploitée par les systèmes photovoltaïques se limite à la lumière, mais elle peut elle-même être décomposée en trois éléments dont la proportion est variable suivant le lieu et le moment :

- ✦ **Le rayonnement direct** : le plus puissant, qui provient directement du soleil sans subir d'obstacles sur sa trajectoire (nuage, immeubles...). C'est lui qui nous aveugle lorsque l'on cherche à regarder le soleil "droit dans les yeux" par temps découvert.
- ✦ **Le rayonnement diffus** : il provient des multiples diffractions et réflexions du rayonnement solaire direct par les nuages. C'est à lui que nous devons la "lumière du jour" qui nous permet d'y voir clair même quand le temps est couvert.
Bien que son intensité soit moins forte, le rayonnement diffus représente généralement une part significative du rayonnement total, parfois même majoritaire. Il est également important dans les zones intertropicales.
- ✦ **Le rayonnement dû à l'albédo** : il résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct par le sol, qui est d'autant plus important que la surface est claire et réfléchissante (neige, étendue d'eau,...). C'est lui qui peut nous faire attraper des coups de soleil à la montagne ou à la mer sans qu'on les sente venir (Figure 1.3).

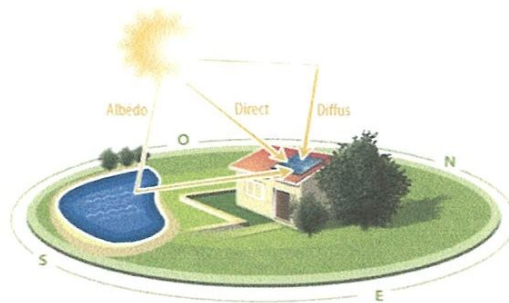


Figure 1.3 : Les 3 différents types de rayonnement solaire

- Plus le soleil est haut dans le ciel (l'été, midi) → Plus l'angle d'incidence de ses rayons par rapport à la terre est fort (proche de 90°) → Plus la distance parcourue de ses rayons est petite → Plus l'intensité du rayonnement est forte.
- Plus le soleil est bas dans le ciel (l'hiver, début et fin de journée) → Plus l'angle d'incidence de ses rayons par rapport à la terre est faible → Plus la distance parcourue de ses rayons est grande → Plus l'intensité du rayonnement est faible (Figure 1.4). [5]

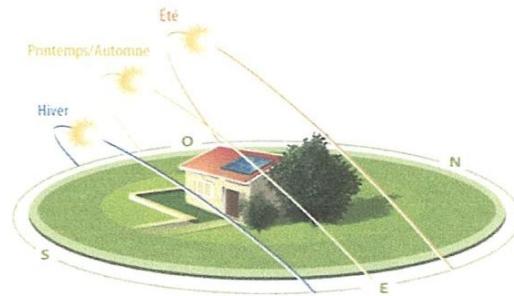


Figure 1.4 : Horizon solaire

I.3.4-Le Potentiel Solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh/an. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{ KWh/m}^2/\text{an}$ au nord et $2263\text{ KWh/m}^2/\text{an}$ au sud du pays (Figure 1.5). Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant [Tableau 1.1] indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.

Regions	Régions cotières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures / an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ($\text{KWh/m}^2/\text{an}$)	1700	1900	2650

Tableau 1.1 : le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, les autres volets solaire, thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental. Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les

rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement.

[2]

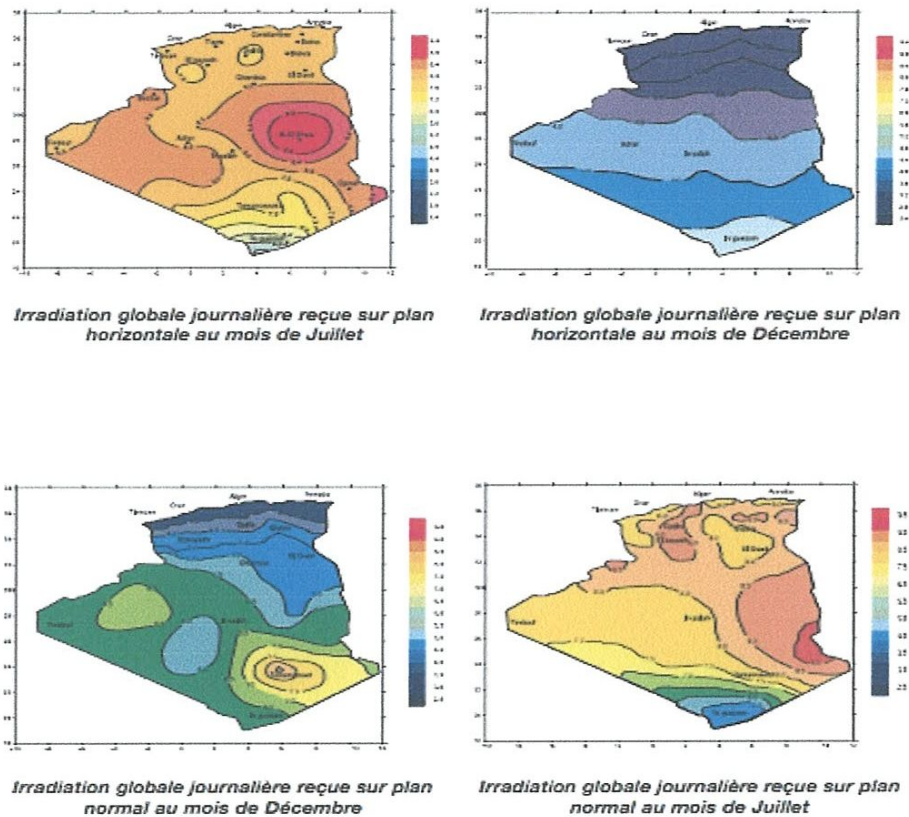


Figure 1.5 : potentiel solaire en Algérie [2]

I.4-L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

Ce phénomène est étroitement lié à la théorie de la diode. Il est donc nécessaire de prendre en compte quelques éléments de la physique des semi-conducteurs.

- ✚ Toute matière est faite d'atomes comportant des électrons (charges négatives élémentaires) qui gravitent autour d'un noyau.
- ✚ Un courant électrique est une circulation d'électrons.
- ✚ Dans un isolant électrique, les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- ✚ Dans un conducteur électrique, les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.

✚ Le semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du « band gap » (bande interdite) exprimé en électronvolt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques.

Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin(c-si), et 1.7 eV pour le silicium amorphe (a-si) (Figure 1.6). [1]

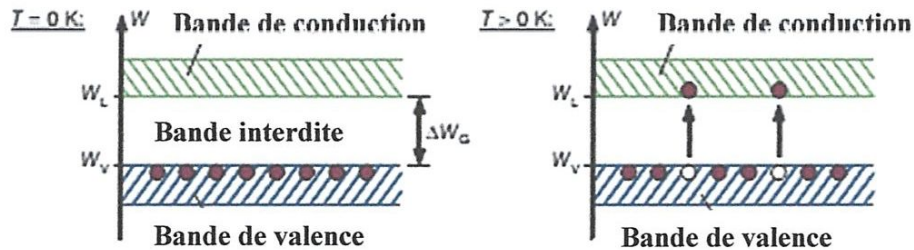


Figure 1.6 : les bandes de valence et de conduction pour le silicium cristallin(c-si) [6]

Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule. Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à celle du band gap vont libérer un électron négatif, laissant un 'trou' positif derrière lui ; pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique \mathbf{E} , de part et d'autre de la cellule.

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du « **dopage** » par des impuretés.

Deux types de dopages sont possibles :

- Le dopage de type **N** (négatif) consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. c'est le cas du phosphore (**P**) dans le silicium (**Si**). dans un matériau de type **N**, on augmente fortement la concentration en électrons libres.
- Le dopage de type **P** (positif) utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. le bore (**B**) est le dopage de type **p** le plus couramment utilisé pour le silicium.

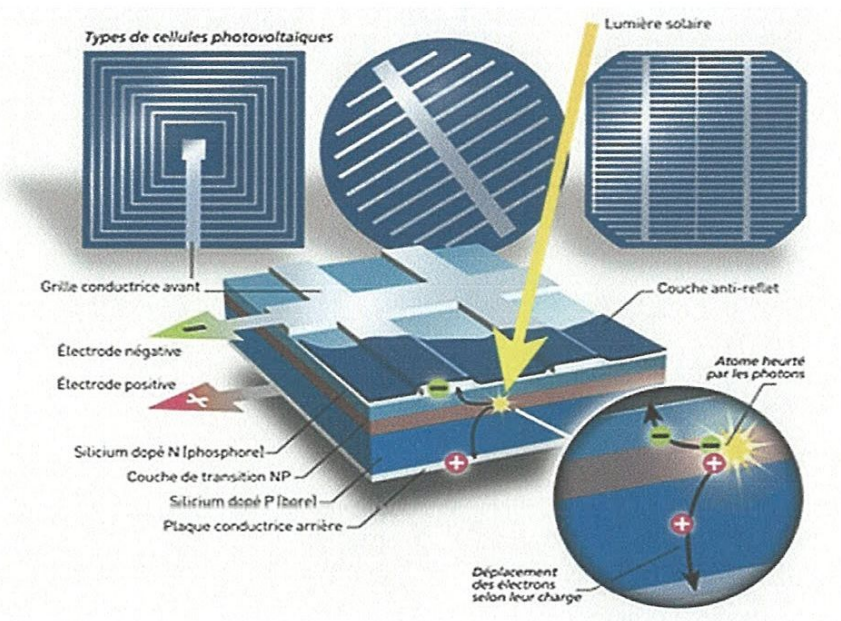


Figure 1.7 : Le principe de l'effet photovoltaïque

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type N et type P) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque. Lorsque l'énergie du band gap augmente ; le courant diminue mais la tension est plus élevée (Figure 1.7). [1]

I.5- LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Le courant continu disponible aux bornes d'un générateur photovoltaïque peut être utilisé de différentes manières en raccordant ces bornes à un circuit électrique qui l'achemine vers un ensemble de composants qui forment un "système photovoltaïque" conçu et dimensionné en fonction de l'application et de l'usage qui est fait de l'électricité produite.

La Figure 1.8 représente symboliquement les divers éléments du système PV le plus général. Dans la pratique, bien sûr, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux conditions locales. [5]

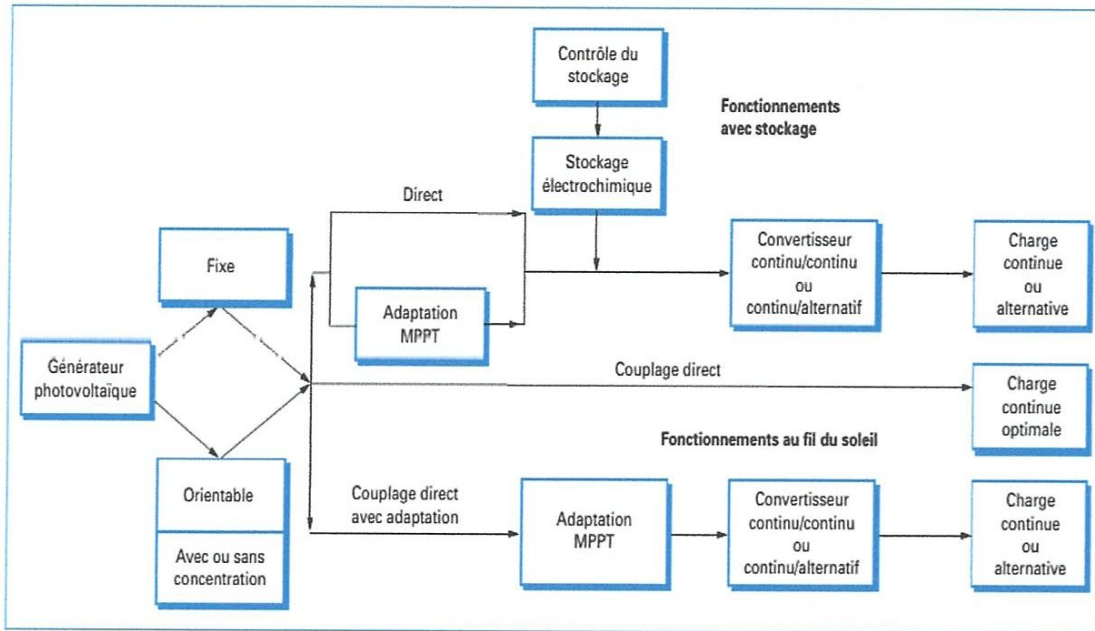


Figure 1.8: Schéma synoptique d'un système PV, sans et avec stockage [7]

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants :

- ✚ un générateur photovoltaïque fixe ou avec un système d'orientation (suiveur de soleil automatisé).
- ✚ un convertisseur statique continu / continu (DC/DC) contrôlé par la commande MPPT.
- Un système de régulation et de stockage (batterie) ; une gestion électronique.
- un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC) : l'onduleur.
- une source auxiliaire d'appoints (réseaux public ou locaux).

Dans le cas d'une centrale photovoltaïque, raccordée au réseau, on trouve généralement les divers équipements suivants :

I.5.1-Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble de cellules interconnectées entre elles pour obtenir le courant et la tension souhaités. La plupart des générateurs PV disponibles avec des cellules cristallin-Si ont 36 ou 72 cellules connectées en série. Un générateur de 36 cellules fournit

une tension appropriée pour charger une batterie de 12V, et pareillement un GPV de 72 cellules est approprié pour une batterie de 24V.

Le générateur connectant 36 cellules a généralement une tension à vide supérieure à 20 V et un point optimal de fonctionnement au voisinage de 16 V à 25 °C. Mais sa température sous rayonnement est souvent supérieure à 40 °C, et les performances des cellules sont réduites. On compte en général par cellule une baisse de 2 mV/°C, soit 72 mV/°C. La tension du GPV tombe alors aux alentours de 14 V ce qui est idéal pour la charge d'une batterie.

Très fragiles à l'état brut, les matériaux photovoltaïques doivent être protégés des intempéries, ce qui est en général réalisé par un verre transparent et solide qui constitue la partie supérieure d'un sandwich étudié pour résister aux agressions de l'environnement pendant plusieurs décennies (Figure 1.9).

La face arrière du sandwich peut être constituée d'un polymère durci spécialement conçu ou d'une deuxième couche de verre autorisant alors une semi-transparence de l'ensemble.

Les générateurs les plus courants sont des panneaux rectangulaires rigides d'une surface comprise entre 0,5 et 3 m², de quelques centimètres d'épaisseur et pesant quelques kilogrammes. Ils peuvent être installés de manière indépendante (châssis au sol ou en toiture-terrasse, en sur imposition de toit en pente ...) ou intégrés dans des éléments de bâti (tuile, ardoise, verrière, façade, allège de fenêtre,...). Leurs performances sont variables selon la technologie utilisée et les caractéristiques définies par le fabricant. [5]

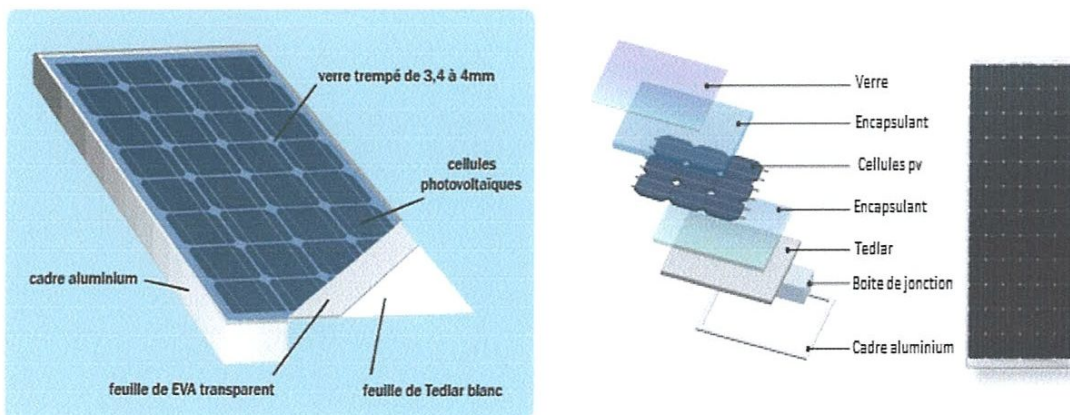


Figure 1.9 : Coupe transversale d'un GPV

Plusieurs GPV peuvent être connectés électriquement entre eux, en série ou en parallèle, de façon à délivrer la puissance et la tension désirée. La puissance totale d'un système

photovoltaïque et donc l'énergie qu'il produira est directement proportionnelle au nombre de GPV et à leur puissance individuelle.

Les GPV qui forment ensemble un champ doivent impérativement être installés dans un même plan (même inclinaison par rapport à l'horizontale et même orientation par rapport au Sud), faute de quoi la productivité de l'ensemble s'alignera à tout instant sur le moins ensoleillé des modules, occasionnant ainsi beaucoup de pertes.

Il est très important dans la conception des systèmes PV de décider combien de GPV doivent être connectés en série et combien en parallèle pour fournir l'énergie nécessaire. Telle combinaison des GPV référés sous le nom d'un champ. La figure 1.10 montre cette distinction entre les cellules, les GPV, les panneaux, et les champs. [2]

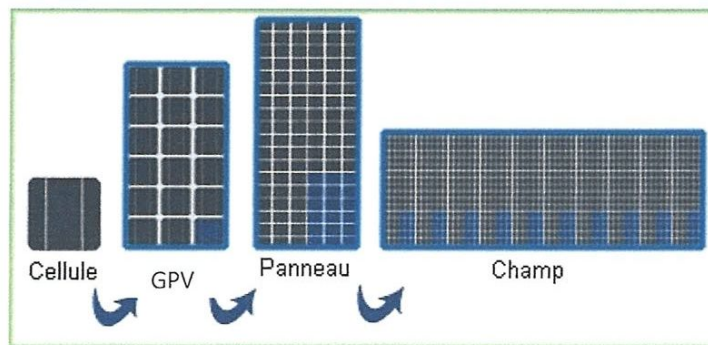


Figure 1.10 : Les cellules photovoltaïques, les GPV, les champs.

Le type de branchement dans les GPV soit en parallèles ou en série a des effets différents, on le montre comme suit.

I.5.2-Branchement en parallèle des cellules

La figure 1.11 montre un GPV qui est composé de trois cellules solaires monté en parallèle. La connexion en parallèle force toutes les cellules d'avoir la même tension. En même temps, les différents courants sont additionnés.

$$V = V_1 = V_2 = V_3 \quad (1.1)$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1.2)$$

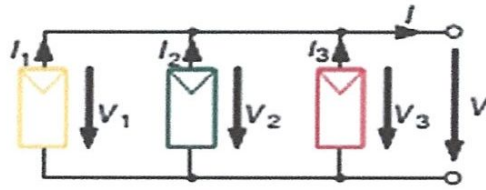


Figure 1.11: connexion en parallèle des cellules solaires : le voltage est similaire dans toutes les cellules quand le courant augmente

Pourquoi ne pas connecter toutes les cellules en parallèle ?

Si toutes les cellules ont été reliées en parallèle le GPV aurait une tension de circuit ouvert de 0,6 V seulement et un courant de court-circuit de, par exemple, 100 A. pour le transport de ce courant il nous faudrait un câble extrêmement épais. De plus, les installations photovoltaïques typiques (en particulier les installations solaires raccordées au réseau) auraient besoin de tensions plus élevées que 0.6V. [6]

I.5.3-Montage en série des cellules

On lie plusieurs cellules en série dans un GPV afin d'atteindre les voltages convenables. La Figure 1.12 montre l'effet de raccordement en série par un exemple de trois cellules: le courant dans toutes les cellules est le même et la tension totale est composée de la somme des tensions individuelles. [6]

$$I = I_1 = I_2 = I_3 \quad (1.3)$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (1.4)$$

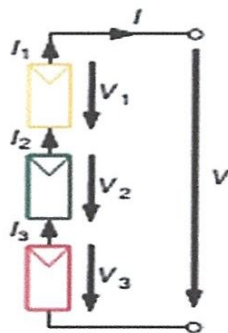


Figure 1.12: connexion en série des cellules solaires : le voltage des cellules individuelles sont additionnées en ensembles

I.5.4-Convertisseur statique continu / continu (DC/DC) contrôlé par la commande MPPT

La conversion DC/DC a pour but d'assurer la fluence d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu. Elle ajuste les valeurs des grandeurs de sortie.

Un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande du convertisseur. Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le panneau photovoltaïque à sa puissance maximale (figure 1.13). [5]

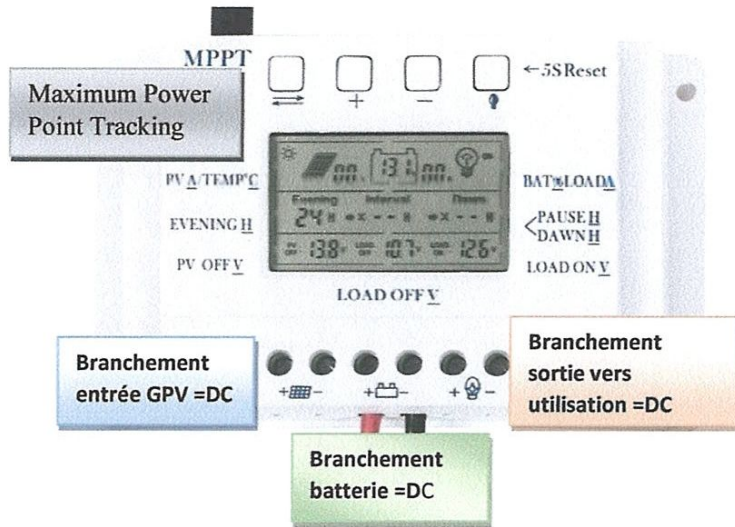


Figure 1.13 : Modèle d'un dispositif MPPT

La méthode de suivi ou "Tracking" connue sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche du maximum de la courbe de puissance (PPM) du panneau photovoltaïque (Figure 1.14).

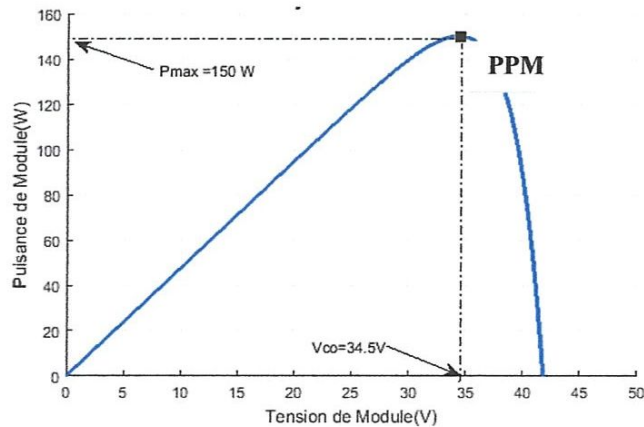


Figure 1.14 : Point de puissance maximale PPM

I.5.5-Composants de distribution courant continu (DC) ou alternatif (AC) (câbles, connectiques, protections, etc.)

Fonction :

- Raccorder les chaînes de panneaux entre elles
- Protéger les chaînes de panneaux et les intervenants des risques électriques et atmosphériques
- Assurer l'acheminement du courant produit vers les postes de conversion

I.5.6-Onduleur

Cet appareil électronique, géré par un microprocesseur, garantit que le courant produit répond exactement aux normes fixées par le gestionnaire du réseau. Il est responsable de la stabilité du courant (voltage, fréquence, émission d'harmoniques, etc.) et assure la sécurité du système (figure 1.15).

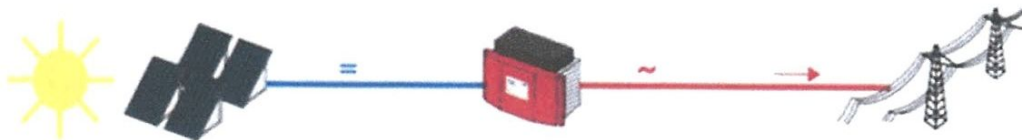


Figure 1.15 : Principe d'un système photovoltaïque raccordé au réseau

Fonction:

- Convertir le courant continu en courant alternatif.
- Protéger les circuits de distribution DC et les intervenants des risques électriques et atmosphériques.
- Générer un courant alternatif de qualité.
- Transformer la basse tension en moyenne tension.

I.5.7-Système de régulation et supervision et stockage

Le système peut aussi être équipé de batteries, destinées à stocker l'électricité.

Fonction :

- Suivre le fonctionnement et la performance de l'installation.
- Permettre d'optimiser la production (détection d'anomalie).
- Emmagasiner l'énergie électrique dans des batteries spéciales.

I.5.8-Compteur de production

Fonction :

- Suivre la production du système. [5]

Les systèmes PV les plus couramment utilisés sont de trois types :

- Les systèmes PV avec stockage électrique (batterie d'accumulateurs électrochimiques) : Ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation : soit directement en courant continu soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Les systèmes à couplage direct sans batterie (fonctionnement dit aussi "au fil du soleil") : Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC.
- Les systèmes connectés au réseau local par l'intermédiaire d'un onduleur piloté à la fréquence du réseau, le réseau servant de stockage.

Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères simplicité, application, environnement, etc.

L'étude des systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge. Elle cherche à optimiser le système pour avoir un meilleur rendement (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum). [8]

I.6-LA NOTION DE PUISSANCE-CRETE

Dès qu'elles reçoivent une certaine quantité de lumière, les surfaces photovoltaïques intégrés dans un GPV se mettent à produire de l'électricité sous forme de courant continu à une tension nominale, dont l'intensité augmente avec la quantité de lumière reçue jusqu'à ce que la puissance délivrée (mesurée en Watts) atteigne la puissance nominale ou "**puissance crête**" (exprimée en Watts-crête, qui est une unité spécifique du photovoltaïque) .

La "puissance-crête" est une donnée normative utilisée pour caractériser les cellules et générateurs photovoltaïques. Elle correspond à la puissance que peut délivrer une cellule, un générateur ou un champ sous des conditions optimales et standardisées d'ensoleillement (1000 W/m²) et de température (25°C).

En pratique, la puissance délivrée par un générateur varie en fonction de l'**énergie solaire** reçue qui dépend du jour, de l'heure, de la météo, de l'orientation du système, etc... et de sa **température**, si bien que la puissance-crête n'est que rarement atteinte par le GPV au cours de sa vie en fonctionnement. Son utilité principale est de permettre la comparaison entre les GPV et les systèmes de conception et ou de fabrication différente. [5]

I.7-RENDEMENT D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Comme tout système de conversion d'énergie, une installation photovoltaïque est caractérisée entre autres par son rendement. Nous allons voir ici comment exprimer ce rendement indépendamment des diverses typologies de systèmes photovoltaïques rencontrées. Le calcul du Ratio de Performance permet en effet de rendre compte de la qualité de fonctionnement d'une installation indépendamment de l'éclairement ou de la puissance crête des GPV.

La production d'une installation photovoltaïque est donnée par l'équation suivante (1.5) :

$$E_{\text{élec}} = H_i \times S \times \eta \quad (1.5)$$

Avec :

- $E_{\text{élec}}$ [kWh/an] : énergie électrique produite en sortie du système sur un an
- H_i [kWh/m².an] : éclairement globale reçue dans le plan des GPV sur 1m² pendant un an.
- S [m²] : surface du champ des générateurs photovoltaïques
- η : rendement global du système

Le rendement global du système inclut l'ensemble des pertes provoquées par ses composants, des GPV jusqu'au point d'injection du courant alternatif sur le réseau de distribution. Il permet de caractériser la fraction de l'énergie lumineuse captée au départ que l'on retrouve sous forme électrique injectée sur le réseau. Il est donc égal au rapport entre l'énergie lumineuse E_{lum} reçue sur les panneaux et l'énergie électrique $E_{\text{élec}}$ de sortie injectée sur le réseau (1.6).

$$\eta = E_{\text{élec}} / E_{\text{lum}} \quad (1.6)$$

Le rendement global peut être séparé en deux composantes (1.7) :

$$\eta = \eta_{\text{stc}} \times \eta_{\text{système}} \quad (1.7)$$

➤ η_{stc} est le rendement des GPV en conditions de tests standards, c'est-à-dire sous une luminosité $G_{\text{stc}} = 1000 \text{ W/m}^2$ à 25°C. Soumis à cette luminosité, les panneaux délivrent une puissance électrique de sortie globale. C'est elle qui caractérise le champ photovoltaïque lors de son installation.

Le rendement η_{stc} permet donc de caractériser l'efficacité de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, avant qu'elle n'arrive au niveau des onduleurs. Il est donc égal au rapport entre l'énergie lumineuse $G_{stc} \times S$ (surface du champ photovoltaïque) reçue sur les panneaux et l'énergie électrique (la puissance crête) P_c de sortie des GPV (1.8).

$$\eta_{stc} = P_c / G_{stc} \times S \quad (1.8)$$

➤ $\eta_{système}$ est appelé ratio de performance et est égal aux autres rendements caractérisant les composants qui suivent les GPV et liés à la typologie de l'installation.

En synthétisant les équations et on exprime la puissance en kWh plutôt qu'en Wc (ce qui permet d'"éliminer" la variable G_{ulu} ($G_{ulu} = 1000 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ kW/m}^2$)), on obtient l'équation (1.9) :

$$E_{elec} = H_i \times P_c \times \eta_{système} \quad (1.9)$$

La production photovoltaïque dépend donc de 3 composantes:

- l'éclairement reçu,
- la puissance crête,
- le ratio de performance ($\eta_{système}$) (PR, dans la littérature anglophone).

C'est le ratio de performance (PR) qui peut être utilisé pour quantifier la performance d'un système. Pratiquement, le ratio de performance s'obtient en effectuant le rapport entre la production réelle et la production théorique, pendant une période de référence. La différence entre les productions théoriques et réelles provient des pertes engendrées par les différents équipements de l'installation (1.10).

$$PR = \text{production réelle (KWh)} / \text{production théorique (KWh)} \quad (1.10)$$

La production théorique est égale à la production idéale en sortie des GPV (1.11) :

$$E_{elec} = H_i \times P_c \quad (1.11)$$

Son utilisation permet d'obtenir un indicateur de performance indépendant de la puissance crête du système, de sa localisation géographique et des orientations et inclinaisons du champ. Lors du dimensionnement d'un système, on s'attachera à maximiser ce coefficient, alors que les autres

termes de la dernière équation (H_i et P_c) seront uniquement affectés par la localisation, l'inclinaison et l'orientation du champ, le type et la surface de GPV employés. [5]

I.8-TYPOLOGIES DE PARCS AU SOL : SYSTEMES FIXES ET SYSTEMES DE SUIVI DU SOLEIL (TRACKERS)

Les parcs photovoltaïques sont constitués de simples alignements de panneaux standards montés sur des châssis, qui peuvent être en bois ou en métal (Figure 1.18). Le fait que les systèmes soient posés sur le sol permet, en s'affranchissant des contraintes techniques et esthétiques liées au bâtiment ou à l'environnement urbain, d'optimiser de différentes manières la production et donc la rentabilité de l'investissement.

Un autre avantage des parcs photovoltaïques au sol, dans l'optique d'amélioration des performances et de réduction des coûts, est d'autoriser l'utilisation de systèmes de suivi du soleil (« tracking »), qui permettent d'augmenter, à puissance équivalente, la production d'électricité notamment dans les régions où la proportion de rayonnement direct est la plus importante. IL existe deux grandes catégories de « trackers »:

- ✦ Tracker à rotation mono-axiale (avec axe horizontal ou incliné) (Figure 1.16) :

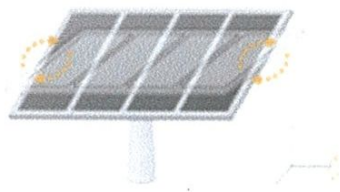


Figure 1.16 : Tracker à rotation mono-axiale

- ✦ Rotation bi-axiale : (Figure 1.17) :

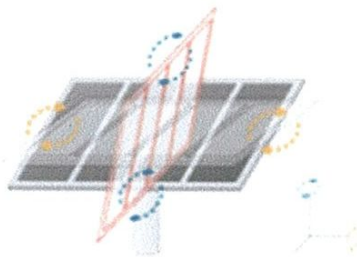


Figure 1.17 : Tracker à Rotation bi-axiale

Les trackers coûtent plus chers à l'investissement et au fonctionnement que les systèmes fixes, et le choix de tel ou tel type de tracker se fait en fonction des paramètres locaux du site tels que la latitude, la proportion entre rayonnement direct et rayonnement diffus et le niveau de rémunération attendu de l'électricité produite. Les trackers bi-axiaux sont indispensables à la mise en œuvre des systèmes à concentration, dont différentes technologies (miroirs, lentilles de Fresnel, ...) sont en cours d'expérimentation avec à la clé des augmentations spectaculaires de la production, pouvant atteindre le double. [5]



Figure 1.18 : Parc photovoltaïque

I.9-Conclusion

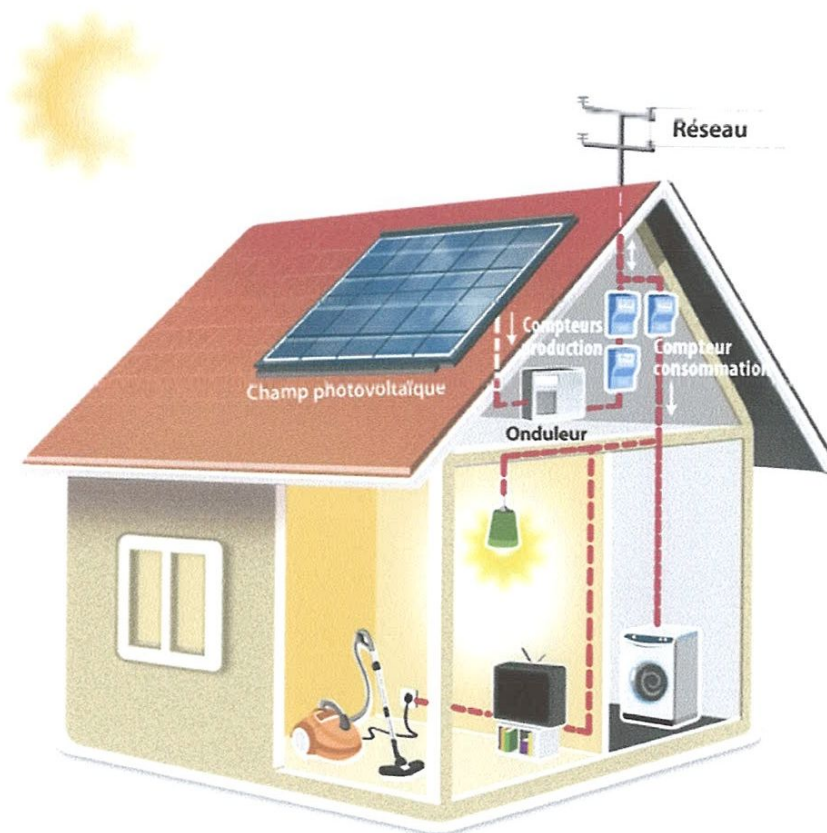
Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques à semi-conducteurs (généralement faites de silicium sous ses différentes formes). Elles convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité courant continu basse tension (effet photovoltaïque). Comme cette énergie est le soleil, on parle alors de cellules solaires.

Dans ce chapitre, On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, ensuite on a décrit les éléments constituant de la chaîne photovoltaïque en définissant chaque block, après on a montré l'effet des branchements en série et en parallèle des cellules PV sur la tension et le courant au niveau d'un générateur photovoltaïque (GPV). Finalement, on a exprimé le rendement d'un système PV et comment calculer la puissance produite afin d'améliorer la production d'énergie électrique. Ainsi les effets résultants des différents installations PV : fixe, orientable, et à tracker.

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

Chapitre 2

Simulation d'un générateur photovoltaïque



II-INTRODUCTION

L'utilisation des cellules solaires comme source d'énergie électrique a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser. Cependant, les coûts élevés de l'expérimentation justifient l'utilisation de la simulation qui constitue une bonne perspective.

Dans ce chapitre, Nous présenterons la modélisation de la cellule photovoltaïque ainsi que du générateur photovoltaïque. Nous montrerons ensuite par la simulation à l'aide de logiciel Matlab l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement d'un générateur photovoltaïque.

II.1-MODELISATION D'UNE CELLULE PV

L'utilisation des circuits électriques équivalents permet la modélisation des caractéristiques d'une cellule PV.

II.1.1- Model simple (idéal)

Un circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque se compose d'une diode parallèle à une source de courant idéal (figure 2.1). La source de courant délivre un courant proportionnel au flux du rayonnement solaire auquel est exposée.

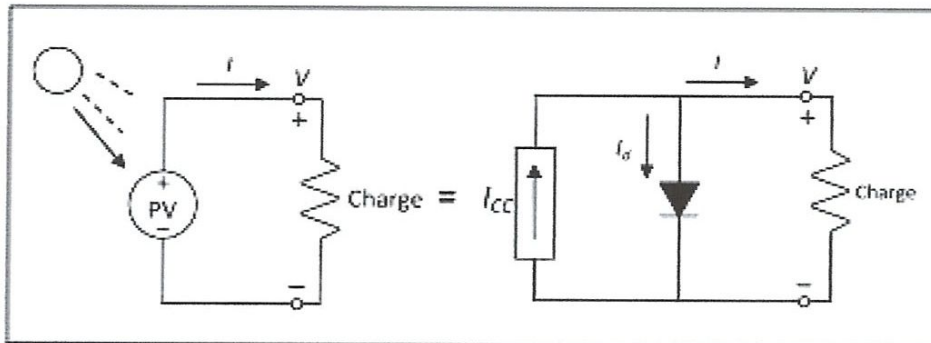


Figure 2.1: Circuit électrique équivalent simple d'une cellule photovoltaïque, composé d'une source de courant parallèle à une diode réelle.

Les cellules PV ont deux caractéristiques d'intérêt particulier, comme la figure (2.2) montre : Le courant qui circule lorsque les bornes sont court-circuitées (courant de court-circuit I_{CC}). [9]

La tension entre les deux bornes lorsqu'elles sont laissées en l'air (tension du circuit-ouvert V_{co}).

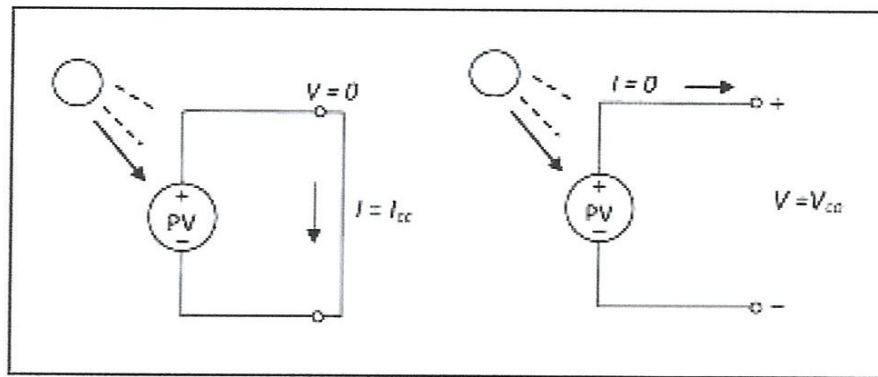


Figure 2.2 : Le courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension en circuit ouvert (V_{co}).

À partir de la figure (2.1) on peut écrire :

$$I = I_{cc} - I_d \quad (2.1)$$

Où :

I_{cc} : Courant de court-circuit égal au photo-courant I_{ph} .

I_{ph} : Courant photonique, il dépend de la température et de l'ensoleillement E comme il est montré par l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + k_i(T - T_{ref})] \times \frac{E}{1000} \quad (2.2)$$

K_i : rapport entre le courant de court-circuit et le coefficient de température (0.0017 A /K)

Le courant I_d circulant dans la diode est donné par l'équation de la diode de Shockly suivante :

$$I_d = I_s \left[\exp \left(\frac{qV_d}{n.k.T} \right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Où :

q : Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} C$),

V_d : La tension aux bornes de la diode (V),

n : facteur d'idéalité de la jonction, Le facteur d'idéalité de la diode (n) est inconnu et doit être estimé. Il prend une valeur entre 1 et 2.

K : Constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23} J/K$),

T : est la température de la jonction en Kelvin (K).

courant I_{cc}) est directement proportionnel à l'éclairement énergétique E :

$$I_{ph} = const \cdot E \quad (2.9)$$

Le courant de court-circuit I_{cc} d'une cellule solaire est donc directement proportionnel à l'éclairement énergétique E . [10]

II.1.3 Point de puissance maximum (MPP)

La cellule solaire fournit des capacités différentes selon le point de travail réel dans lequel il est exploité. Le point de fonctionnement au cours de laquelle la puissance maximale est fournie est appelé le Point de puissance Maximum (MPP). Comme la puissance d'un point de travail correspond toujours à la surface $I(V)$, cette zone doit être au maximum dans le cas de la MPP. Ce cas est illustré à la Figure 2.3. Les valeurs de courant et de tension associées à la MPP sont appelés I_{MPP} et V_{MPP} . [6]

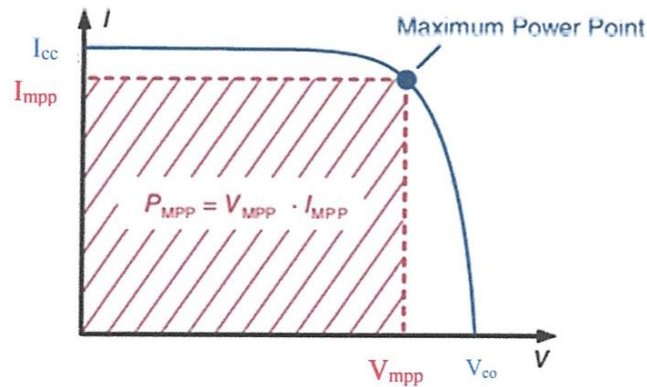


Figure 2.3 : courbe caractéristique d'une cellule solaire

II.1.2- Model précis

Pour une description plus exacte du comportement d'une cellule solaire, deux résistances parasites doivent être prises en considération : Résistance parallèle caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû à la non idéalité de la jonction P-N et des impuretés près de la jonction, et résistance série représentant les diverses résistances de contact et la résistance du semi-conducteur.

II.1.3- Influence de la résistance parallèle

La Figure 2.4 représente un circuit électrique équivalent d'une cellule PV comportant une résistance parallèle R_p . Dans ce cas la source de courant idéal I_{cc} fournit le courant à la diode, à la résistance parallèle, et à la charge:

$$I = (ICC - Id) - \frac{V}{Rp} \tag{2.10}$$

Devient: $I = ICC - Is \left[\exp \left(q \cdot \frac{V}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V}{Rp}$ (2.11)

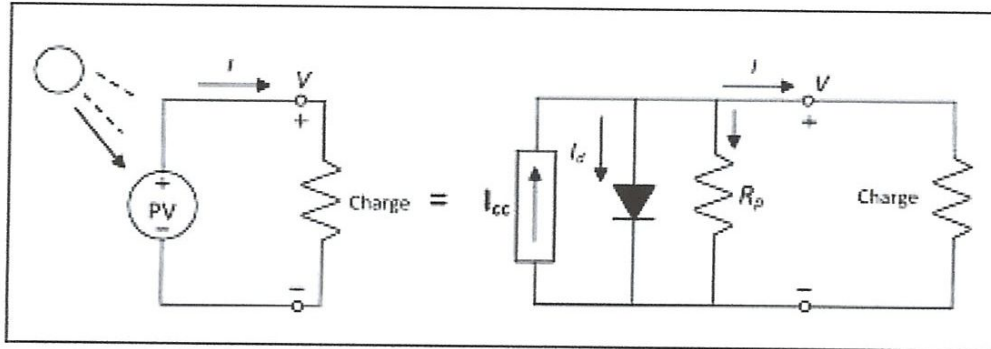


Figure 2.4 : Circuit équivalent simple d'une cellule PV avec une résistance parallèle.

Le terme entre parenthèses de (2.7) est le même courant que nous avons eu pour le simple model.

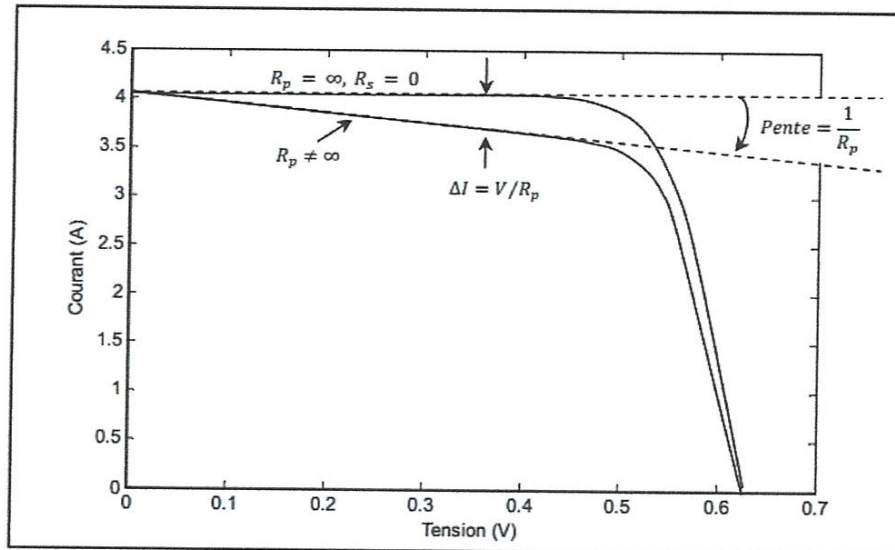


Figure 2.5 : modification du circuit équivalent PV idéal par l'addition d'une résistance parallèle

II.1.4- Influence de la résistance série

Un circuit électrique équivalent réel comporte aussi une résistance série. Avant de développer ce modèle, considérons la figure 2.6 dans laquelle un circuit électrique équivalent original d'une cellule PV a été modifié pour inclure une résistance R_s en série.

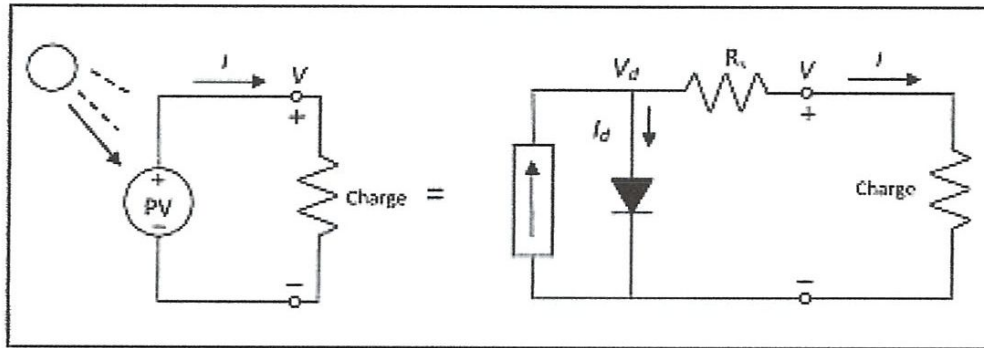


Figure 2.6 : Circuit équivalent d'une cellule PV avec une résistance série.

Pour analyser la Figure. 2.6, on commence par le circuit équivalent simplifié (2.4) :

$$I = I_{cc} - I_d = I_{CC} - I_s \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_d}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (2.12)$$

Puis on ajoute l'effet de la résistance R_s

$$V_d = V + I \cdot R_s \quad (2.13)$$

On remplace 2.13 dans 2.12 On obtient :

$$I = I_{CC} - I_s \left\{ \left(\exp \frac{[q \cdot (V + I \cdot R_s)]}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right\} \quad (2.14)$$

L'équation (2.14) peut être interprétée par la courbe $I(V)$ originale de la cellule PV avec une tension donnée à n'importe quel courant décalée à gauche par $\Delta V = I R_s$ comme le montré la figure 2.7.

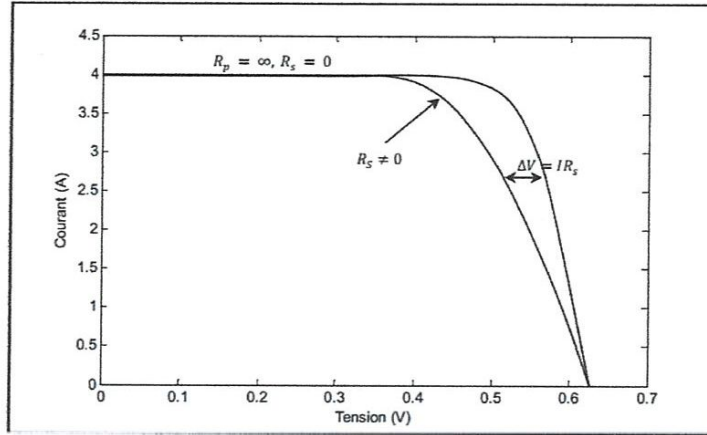


Figure 2.7 : Addition d'une résistance série au circuit équivalent d'une cellule Photovoltaïque

II.2-Recombinaison

Finalement, généralisons le circuit électrique équivalent d'une cellule PV en incluant les résistances parallèles et séries (Figure 2.8).

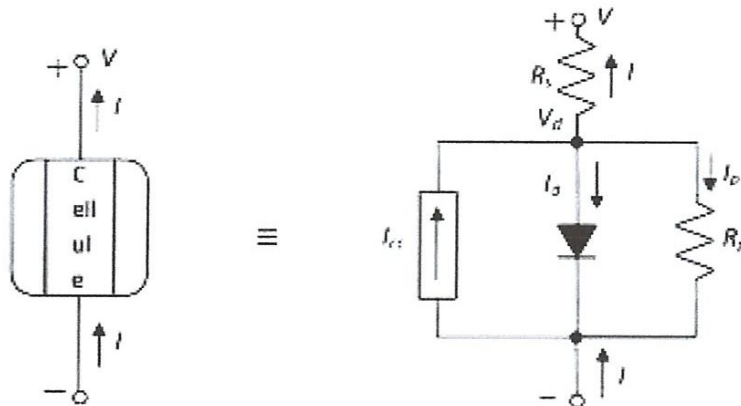


Figure 2.8 : Un circuit équivalent plus complexe d'une cellule PV inclut des résistances séries et parallèles

Nous pouvons écrire l'équation suivante :

$$I = ICC - I_s \left\{ \left(\exp \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right\} - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_p} \tag{2.15}$$

Malheureusement, (2.15) est une équation complexe où il n'y a pas une solution explicite

pour la tension V et le courant I . Une solution incrémentale, est directement utilisée pour tracer facilement la courbe V en fonction du I , l'approche est basée sur l'incrémental des valeurs de la tension aux bornes de la diode V_d dans un tableau, Pour chaque valeur de V_d , des valeurs correspondantes du courant I et la tension V peuvent facilement être trouvées.

La figure 2.9 correspond au tracé de la courbe $I(V)$ pour un circuit électrique équivalent d'une cellule PV avec $R_s \neq 0$ et $R_p \neq 0$, on peut voir que ce graphe est une combinaison entre ceux de la Figure. 2.7 et Figure. 2.9. [12]

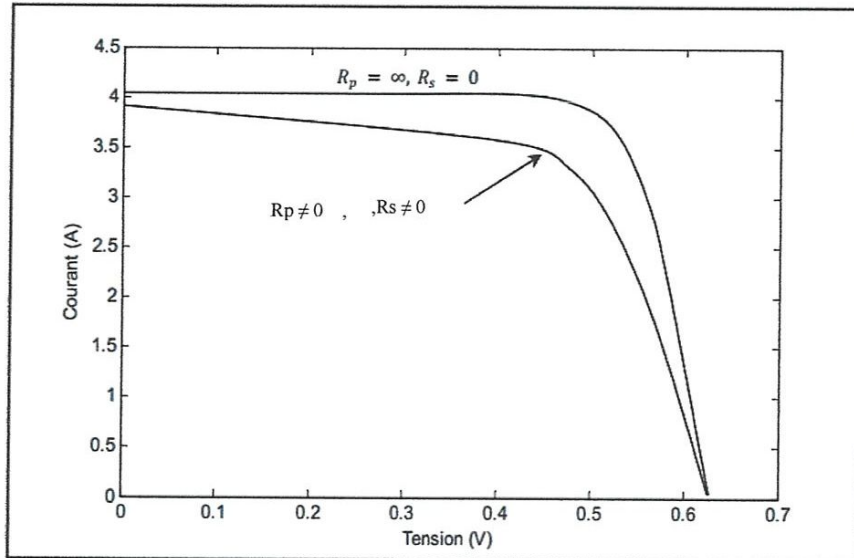


Figure 2.9 : Les résistances séries et parallèles dans le circuit équivalent PV diminuent la tension et le courant fournis

II.3- MODELISATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

D'une manière générale, un générateur photovoltaïque est formé par N_{cp} cellules connectées en parallèle et N_{cs} cellules connectées en série. Supposant que tous les cellules sont soumises aux mêmes conditions météorologiques (ensoleillement et température), le courant et la tension en sortie du groupement série-parallèle des cellules seront liés par la relation (2.16) basée sur la formule (2.11).

$$I = N_{cp} \cdot I_{cc} - N_{cp} \cdot I_s \left[\exp \left(q \cdot \frac{(V + I \cdot R_s)}{N_{cs} \cdot n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (2.16)$$

Les caractéristiques électriques	
La puissance maximale	150W
La tension maximale	34.5V
Le courant maximal	4.35A
La tension du circuit ouvert	43.5V
Le courant du circuit court-circuit	4.75A
Le coefficient de température du I_{cc}	$0.065 \pm 0.015\%/^{\circ}\text{C}$
Le coefficient de température du V_{co}	$-(160 \pm 20) \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$
Le coefficient de température de puissance	$-(0.5 \pm 0.05)\%/^{\circ}\text{C}$
La température nominale opérationnelle de la cellule	$47 \pm 2^{\circ}\text{C}$

Tableau 2-1 : Caractéristiques électriques du GPV prises de la fiche technique

Quand les cellules PV sont connectées en série, le courant de sortie est le même qu'une cellule, mais la tension de sortie est la somme des tensions des cellules, comme la figure 2.10 montre.

II.4.1- LES COURBES CARACTERISTIQUES I(V) ET P(V) ET LE POINT DE PUISSANCE MAXIMALE

La figure 2.11 représente la courbe I(V) du GPV BP 3150B simulé avec MATLAB dans des conditions constantes d'éclairement et de température ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

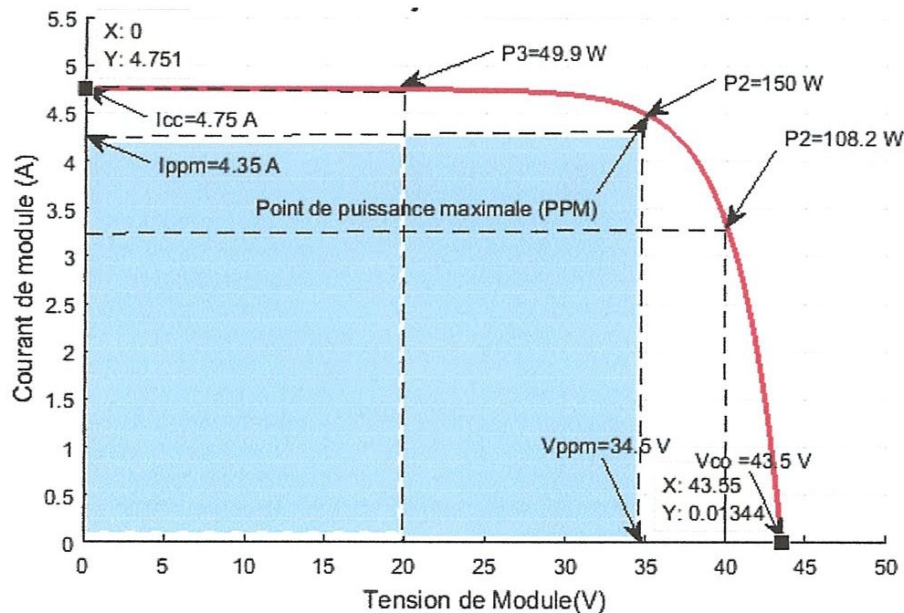


Figure 2.11 : Différentes caractéristiques de la courbe I(V) du GPV ($1000\text{W}/\text{m}^2$, 25°C)

Le courant de court-circuit est $I_{cc} = 4.75$ A, la tension de circuit ouvert est $V_{co} = 43.5$ V. ce résultat peut-être explique par le fait que le GPV compose de 72 cellules connectées en série ce qui donne : $V_{co} = 72 * 0.60 = 43.5$ V = $N_{cs} * V_{co}$; V_{co} est la tension de circuit ouvert de la cellule est égale à 0.6 V. et $I_{cc} = 4.75$ A (I_{cc} est constant).

La courbe de la puissance en fonction de la tension est recouverte sur la courbe $I(V)$ du GPV Comme la figure 2.12 montre. Elle indique que la quantité d'énergie produite par le GPV varie considérablement selon ses conditions opérationnelles, Il y a un seul point sur la courbe $P(V)$ (point de puissance maximale (MPP), auquel le GPV fonctionne avec une efficacité optimale et produit une puissance de sortie maximale.

A ce point $P_{max} = V_{mpp} * I_{mpp} = 150.1$ W, ce qui vérifiée par $MPP = 34.5 * 4.35 = 150.07$ W.

Il est possible de visualiser l'endroit de ce point par l'adaptation du plus grand possible rectangle à l'intérieur de la courbe $I(V)$, et sa surface égale à la puissance de sortie qui est le produit de la tension et du courant. Il est important de faire fonctionner le système au PPM du GPV afin d'exploiter sa puissance maximale. Le prochain chapitre discutera comment le faire.

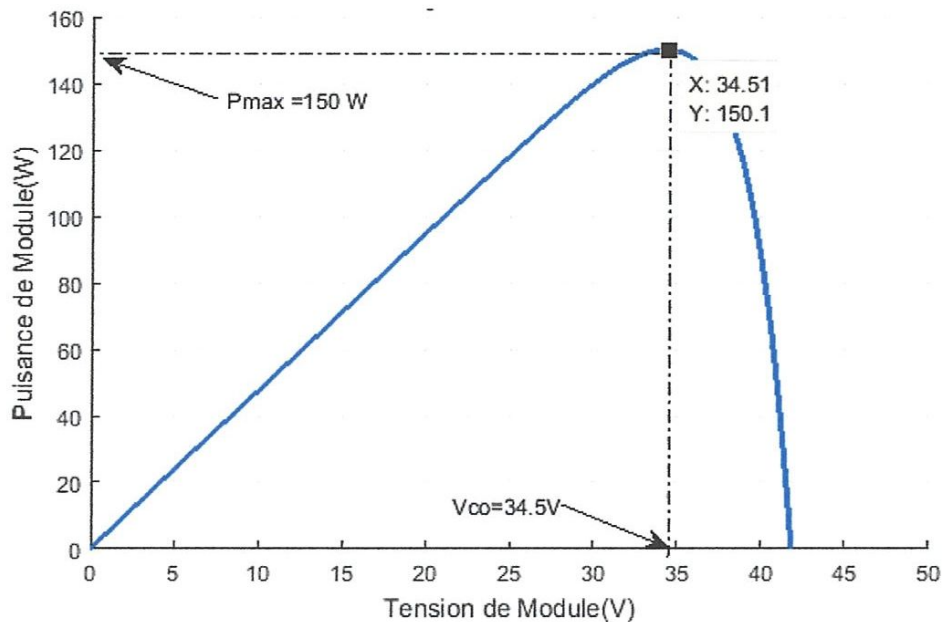


Figure 2.12 : Caractéristique $P(V)$ du GPV simulées avec MATLAB
(25°C, 1000W/m²)

II.4.2 EFFETS DES VARIATIONS CLIMATIQUES SUR LE GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

II.4.2.a-Variation de l'éclairement énergétique

La Figure 2.13 montre la courbe caractéristique I(V) du GPV à une température de cellule de $T = 25^{\circ}\text{C}$ et des éclairements divers (200, 400, 600, 800 et 1000 W/m^2). On observe que :

- ✓ La tension est relativement peu dégradée.
- ✓ Le courant (ainsi que le photo-courant) est directement proportionnel à l'ensoleillement.
- ✓ Le photo-courant (Le courant de court-circuit I_{cc}) est clairement sensible à l'ensoleillement.

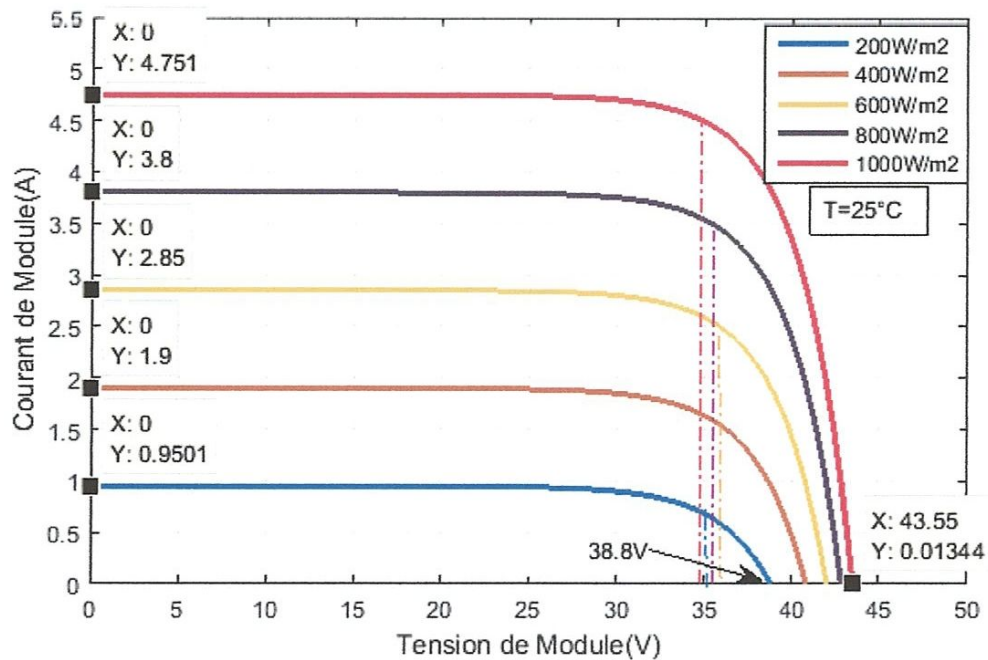


Figure 2.13 : Caractéristique I(V) de GPV pour différents niveaux d'éclairements($T=25^{\circ}$)

Quand l'ensoleillement croît, l'intensité de courant de court-circuit augmente, les courbes caractéristiques se décalent vers des valeurs croissantes, permettant au GPV de produire une puissance électrique plus importante (Figure 2.14).

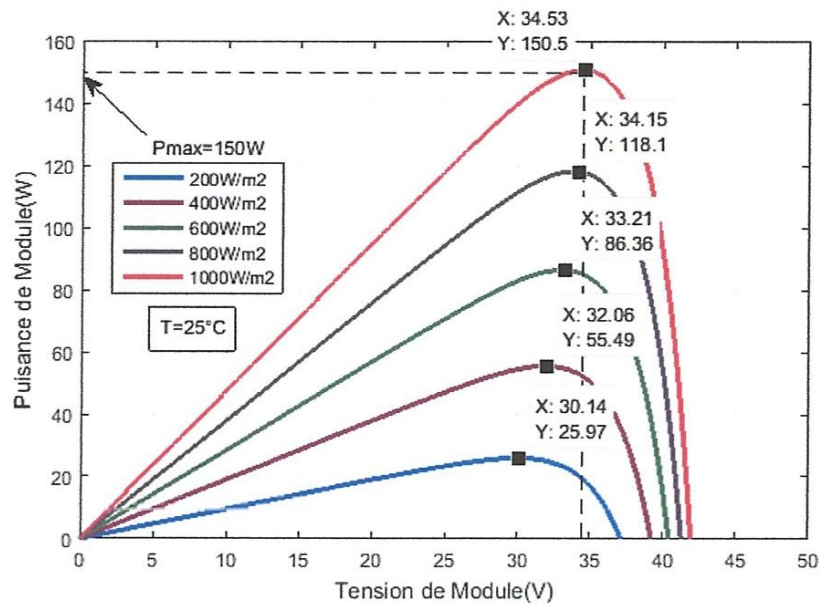


Figure 2.14 : Caractéristique P(V) de GPV 150 pour différents niveaux d'éclairements (T=25°)

Un tracker ou suiveur de soleil porte les panneaux photovoltaïques et suit le soleil tout au long de la journée, ce qui permet d'augmenter la production d'énergie de manière considérable (puisque les panneaux sont toute la journée en position optimale)

Les avantages du suiveur solaire sont multiples :

- ✓ Augmentent la production de jusque 40 %.
- ✓ Apportent une solution lorsque la toiture est mal orientée.

Les suiveurs solaires sont étudiés pour résister à des vents soufflant jusque 150 km/h.

II.4.2.b-Variations de la de la Température

À côté de l'éclairement, le comportement de la température des GPV est également intéressant, les Figures 2.15 et 2.16 montrent respectivement les courbes caractéristiques I(V) et P(V) à éclairement constant et à différentes températures (0°C, 25°C, 50°C, 75°C). On observe:

- ✓ Une diminution nette de la tension de circuit ouvert (V_{co}) : V_{co} varie de 43,5 V à 25 ° C à 36,1 V à 75°C.
- ✓ Une légère augmentation du courant de court-circuit (I_{cc}). Ceci s'explique par une meilleure absorption de la lumière, le gap optique baissant avec l'augmentation de la température. Toutefois, cet accroissement d'intensité étant très faible, il peut être négligé au point de puissance maximale (figure 2.15).
- ✓ Une diminution de la puissance maximale (MPP) : la puissance MPP est réduite de 150 W à 25 ° C à 116 W à 75°C (figure 2.16).

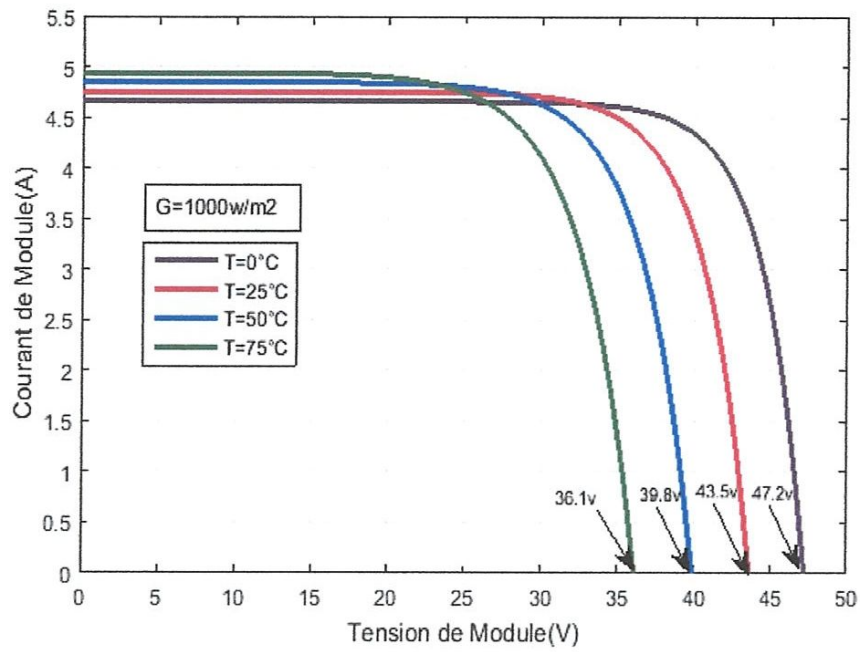


Figure 2.15 : Caractéristique I(V) de GPV pour différentes températures ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$)

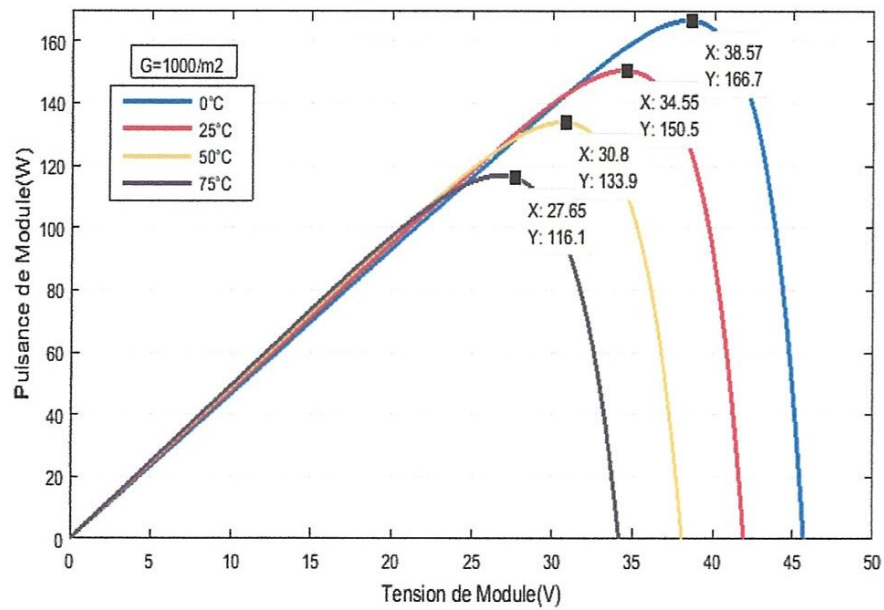


Figure 2.16 : Caractéristique P(V) de GPV pour différentes températures ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$)

Une augmentation de la température diminue les performances et une diminution les augmente. C'est pour cette raison qu'il faut prévoir une bonne ventilation des GPV par l'arrière pour éviter l'augmentation de la température durant les mois les plus ensoleillés et souvent les plus chauds. L'absence de ventilation peut réduire de façon importante la production d'électricité.

Il n'est pas rare d'ailleurs de constater que le record de puissance d'un système photovoltaïque soit atteint durant les mois d'hiver, par une belle journée ensoleillée. L'effet peut être encore plus surprenant avec la réflexion du soleil sur un sol enneigé, ce qui accroît encore la production d'électricité.

La Figure 2.17 représente les courbes des caractéristiques $I(V)$ du GPV (PV BP 3150B) à diverse températures, On voit que les courbes tracées et simulées à l'aide de MATLAB sont superposées aux celles éditées sur la fiche technique du constructeur. La figure montre la bonne correspondance entre les points donnés et les courbes $I(V)$ simulées (figure 2.15). Le modèle de MATLAB atteint la meilleure superposition avec la courbe $I(V)$ pour différents températures sur la fiche technique. [13]

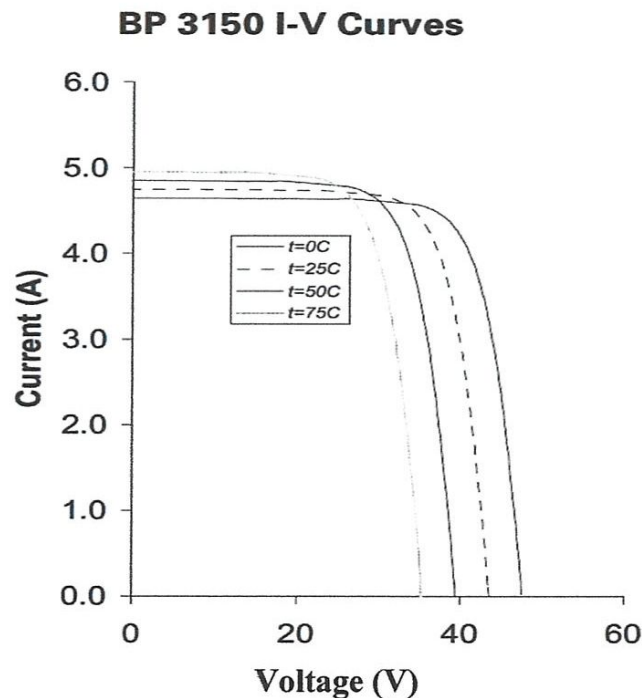


Figure 2.17: Courbe $I(V)$ du GPV BP 3150B donnée par la fiche technique.

II.5-CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation mathématique d'une cellule photovoltaïque ainsi que du générateur photovoltaïque. Ensuite Nous avons procédé à la simulation sous le logiciel Matlab le GPV que nous avons choisi (un générateur composé de 72 cellules connectées en série) afin d'obtenir les caractéristiques électriques : courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ en définissant le point de puissance maximale PPM, et de montrer l'effet des changements climatiques sur l'énergie produite par le GPV et l'influence de température sur le rendement.

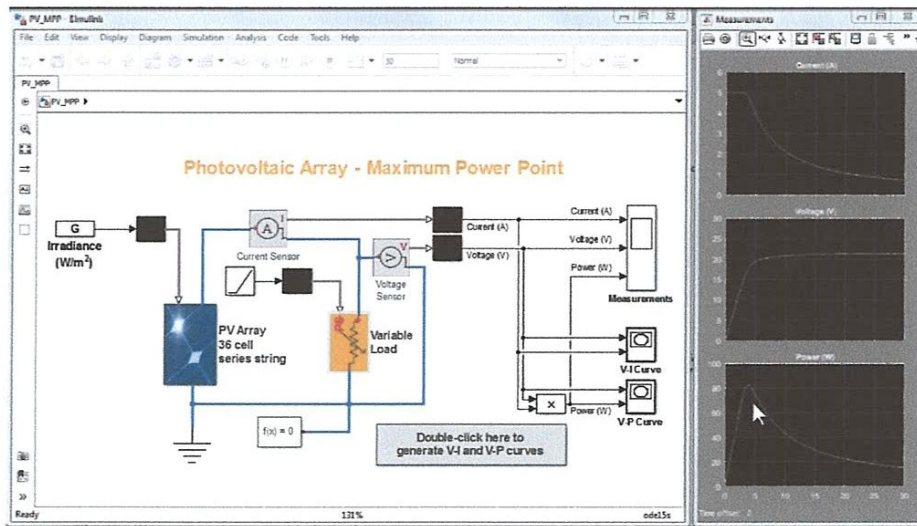
La simulation, nous a permet de voir le comportement de générateur photovoltaïque, et de visualiser le point de puissance maximale MPP qui change sa valeur suivant aux variations importantes en :

- ✚ Diminution quand la température augmente.
- ✚ Et en Augmentation quand l'intensité du rayonnement solaire accroît car l'énergie produite par le GPV est directement proportionnelle à celui-ci.

La variation de la puissance maximale dans un GPV doit être étudié afin de trouver ce point, et chercher le maximum de l'énergie produite ; on l'appelle MPPT (maximum power point tracker) tel que T : Tracker = chercher, en utilisant toujours l'environnement de simulation Matlab, et cela est le but du prochain chapitre.

Chapitre 3

Convertisseurs statiques et Commande MPPT



III.1-INTRODUCTION

Un générateur photovoltaïque (GPV) a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. De plus, son point de fonctionnement dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, un étage d'adaptation entre le générateur et la charge est introduit. Cet étage dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le point de puissance maximale. L'algorithme MPPT joue sur la variation du rapport cyclique d'un convertisseur de puissance continue/continue (DC/DC). L'étude des convertisseurs (DC-DC) et l'MPPT sera l'objectif de ce chapitre.

III.2- CONNEXION DIRECTE ENTRE LA SOURCE ET LA CHARGE

Dans le cas d'une connexion directe, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté.

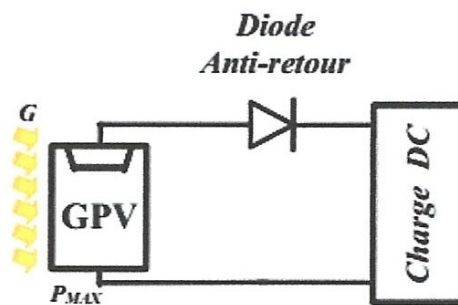


Figure 3.1: Connexion directe entre un GPV et une charge.

La présence de la diode anti-retour est indispensable pour empêcher la circulation d'un courant négatif vers le GPV (Figure 3.1).

La puissance extraite d'un GPV connectée directement à une charge est souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV, comme l'illustre la figure 3.2. Un GPV peut être connecté directement à trois types de charges: une charge de type source de tension continue, une charge de type source de courant continue, ou une charge purement résistive. Trois points de fonctionnement A, B, C respectifs peuvent être identifiés fournissant une puissance P_A , P_B et P_C . Ces cas de figures montrent que le GPV est mal exploité et ne fournit pas la puissance maximale, la différence étant perdue sous forme de chaleur dissipée dans le générateur. [1], [4], [14]

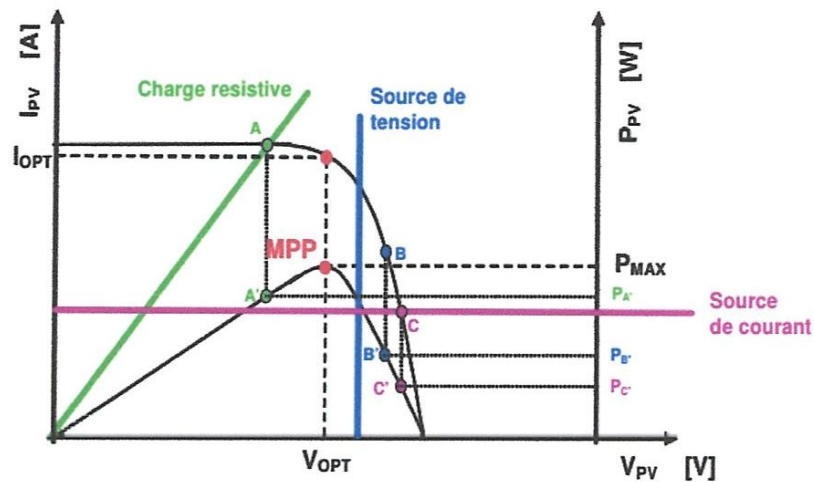


Figure 3.2: Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.

III.3-ETAGE D'ADAPTATION ENTRE UNE SOURCE ET UNE CHARGE

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge (figure 3.3). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{MAX} disponible.

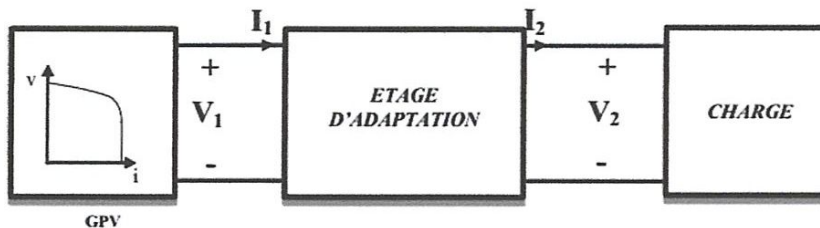


Figure 3.3: Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P_{max} du GPV

L'étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le MPP que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme MPPT joue sur la variation du rapport cyclique d'un convertisseur de puissance continue/continue (DC/DC). [17], [18]

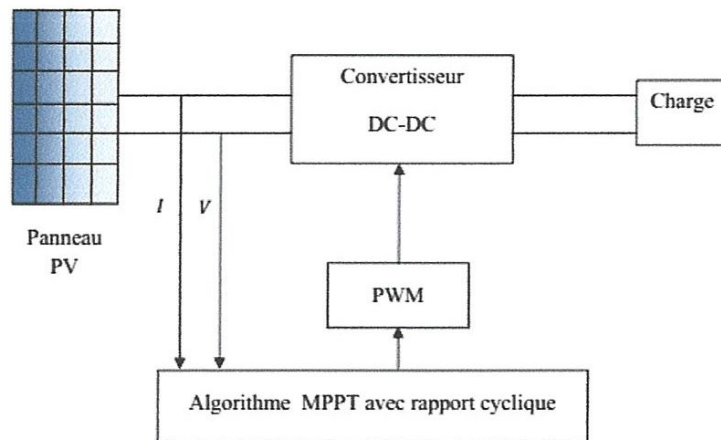


Figure 3.4: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

PWM (Pulse Width Modulation): C'est une méthode pour réguler la tension de sortie afin d'obtenir une tension de sortie moyenne fixe. Elle consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande d'un interrupteur. [11]

III.4-CONVERTISSEURS DC/DC

Un convertisseur DC/DC (hacheur) permet d'obtenir une tension ondulée de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue fixe. Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide d'un interrupteur électronique commandable à l'ouverture et à la fermeture.

Contrairement au cas général où le convertisseur DC/DC est utilisé pour réguler la tension de sortie, dans le cadre du PV c'est plutôt la tension d'entrée qui est régulée. [11]

III.4.1- Différents types de convertisseurs DC/DC

Les convertisseurs DC/DC sont classés en deux types : les convertisseurs non isolés et les convertisseurs isolés de la source.

✚ Les convertisseurs non isolés de la source :

- ✓ Convertisseur abaisseur « BUCK »
- ✓ Convertisseur élévateur « BOOST ».
- ✓ Convertisseur abaisseur-élévateur « BUCK-BOOST ».

✚ Les convertisseurs isolés de la source : Comme le convertisseur Fly back

Notre étude se base sur un convertisseur abaisseur Buck. La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries. [11], [17]

III.4.2-Convertisseur abaisseur « BUCK »

Un convertisseur Buck convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Les GPV sont souvent connectées en série afin d'obtenir une haute tension. Si cette tension doit être réduite, alors un convertisseur Buck est utilisé.

La Figure 3.5 présente un convertisseur Buck dont la liaison entre la source et la charge est réalisé à l'aide d'un interrupteur électronique S . La tension moyenne aux bornes de la charge est donnée par :

$$\bar{V}_2 = \left(\frac{T_{on}}{T}\right) \cdot V_1 = D \cdot V_1 \quad (3.1)$$

Le constant $D = \frac{T_{on}}{T}$ ($0 < D < 1$) est le rapport cyclique (rapport entre la durée T_{on} de conduction et la période T de commutation : $T = t_{on} + t_{off}$).

On peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique D .

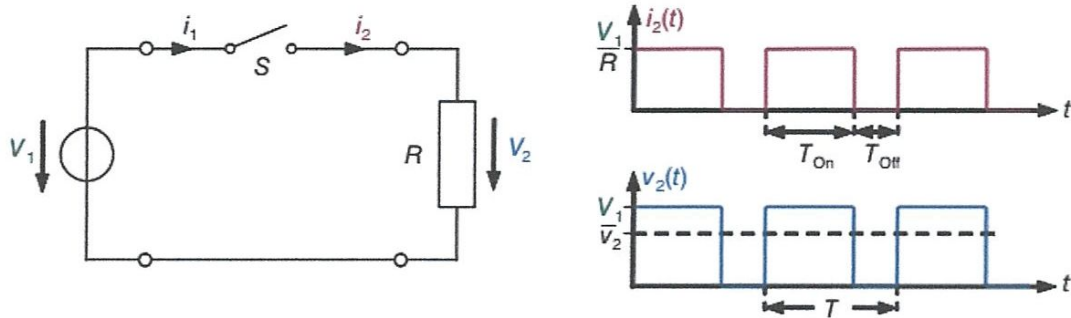


Figure 3.5: Schéma de principe d'un convertisseur Buck et courbes de courant et tension

Dans des applications pratiques, le lissage de courant et de tension doit être ajouté. La figure 3.6 montre le schéma du circuit électrique complet d'un convertisseur Buck.

L'interrupteur S_1 est un dispositif à semi-conducteur en commutation. On utilise généralement, un transistor MOSFET pour son faible temps de commutation afin de minimiser les pertes de puissance. [3], [6], [15]

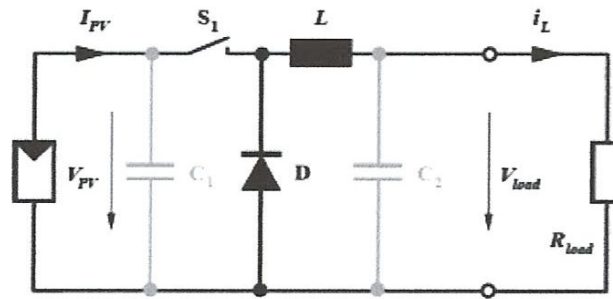


Figure 3.6: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck

Principe de fonctionnement :

Si le commutateur S_1 est fermé à t_0 (Figure 3.7): Un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode D puisqu'elle est inversement polarisée. Le courant n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance L :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{(V_{pv} - V_{Load})}{L} \quad (3.2)$$

Pendant ce temps, l'inductance emmagasine de l'énergie sous forme magnétique.

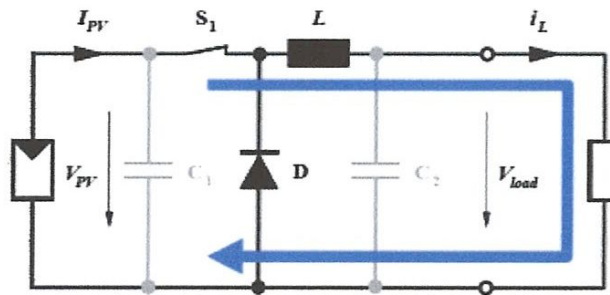


Figure 3.7 : Convertisseur Buck durant l'état on

Si le commutateur S_1 est ouvert après $t = t_1$ (Figure 3.8): la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance L et circule à travers la diode D appelée *diode de roue libre*. Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension. Selon l'équation précédente le courant décroît, puisque :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_{load}}{L} \quad (3.3)$$

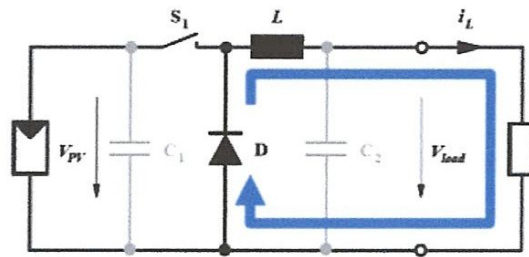


Figure 3.8 : Convertisseur Buck durant l'état off

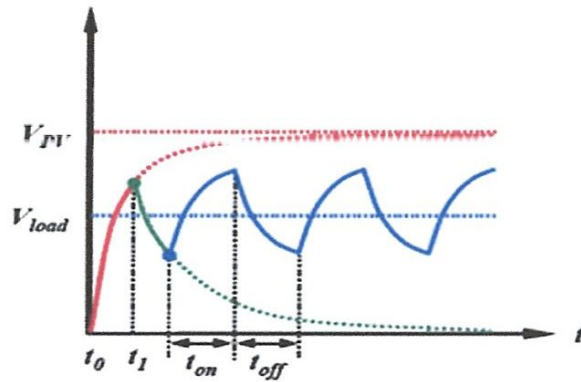


Figure 3.9 : Formes d'ondes des tensions V_{pv} et V_{load} dans le cas du convertisseur Buck

Le condensateur C_1 permet de réduire les pics du courant tiré du GPV, de soutenir la tension d'alimentation V_{pv} et d'atténuer les bruits.

La tension aux bornes de la charge présente une ondulation (Figure 3.9) qui peut être lissée par l'ajout d'un condensateur C_2 .

On considère ici uniquement le comportement du circuit en mode de conduction continue (L'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement. Le courant dans l'inductance ne s'annule pas sur une période de commutation et est donc continu). [3], [11]

III.4.3-Simulation d'un convertisseur Buck

Pour simuler le comportement de ce convertisseur, nous avons utilisé le package SimPowerSystems du Matlab/Simulink Version 2013. Le modèle de simulation du convertisseur Buck est illustré sur la figure 3.10. Les composants utilisés dans ce modèle sont supposés idéaux (chute de tension aux bornes de la diode nulle, résistance série équivalente de l'inductance et du condensateur nulles, pas de pertes par commutation dans les semi-conducteurs).

GPV : Le même GPV utilisé dans le chapitre 2 (GPVBP 150BP) est employé ici. Nous

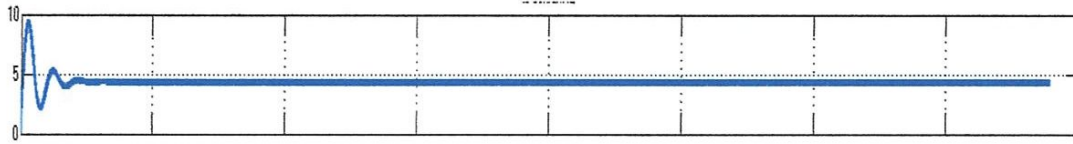
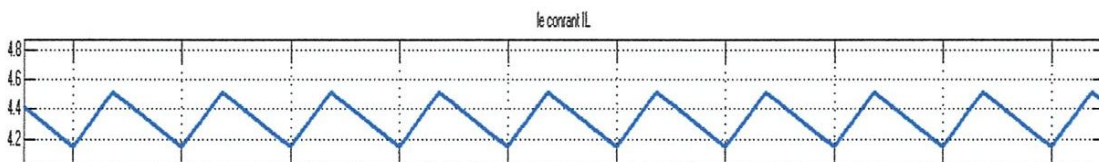
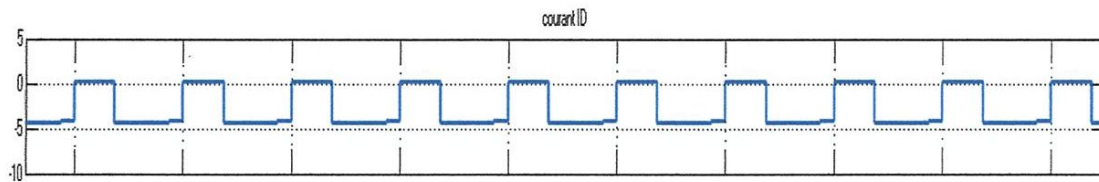
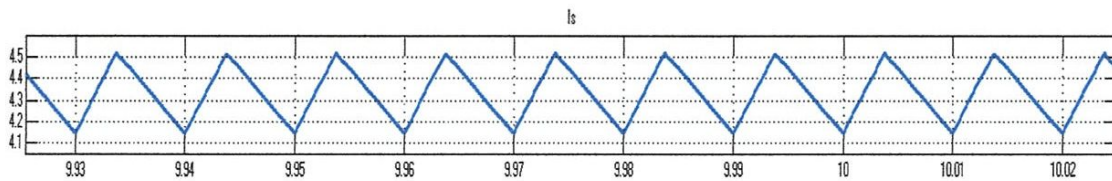
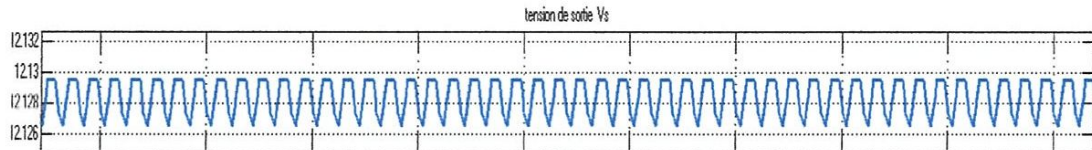


Figure 3.12 : Courant de sortie I_s



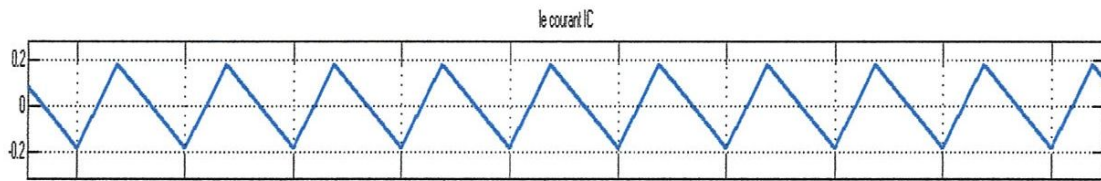


Figure 3.13 : Zoom la tension V_s et les courants I_s, I_D, I_L , et I_C

III.5-CONVERTISSEUR MPPT

La position du MPP d'un GPV dépend du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules, elle n'est jamais constante dans le temps figure (3.14). Un convertisseur MPPT (Maximum Power Point Tracker) doit donc être utilisé afin de suivre ces changements.

Un convertisseur MPPT est un système de conversion de puissance muni d'un algorithme de contrôle approprié permettant d'extraire le maximum de puissance qu'un GPV peut fournir.

[15]

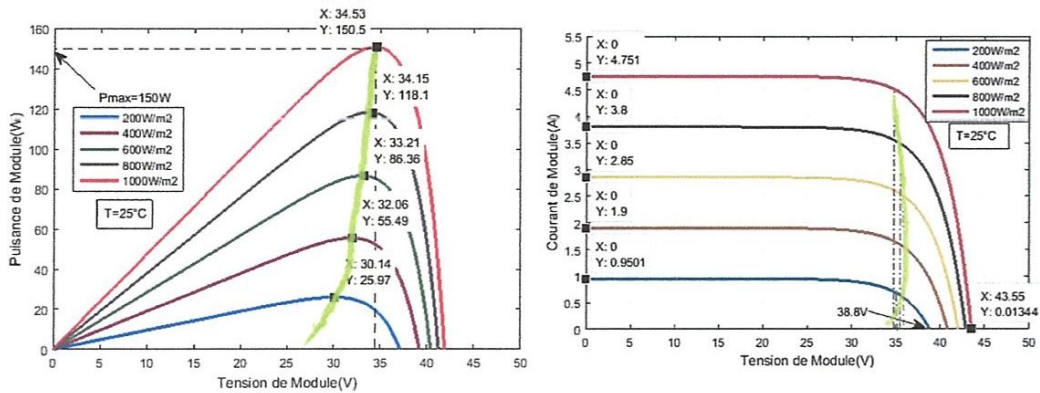


Figure 3.14 : Caractéristiques I-V, P-V et trajectoire de MPP

Principe de base de MPPT : À la sortie (ou entrée) du convertisseur DC/DC la puissance réelle est déterminée au moyen de mesures de courant et de tension. Le point de fonctionnement peut être modifié en faisant varier le rapport cyclique D . [14], [15]

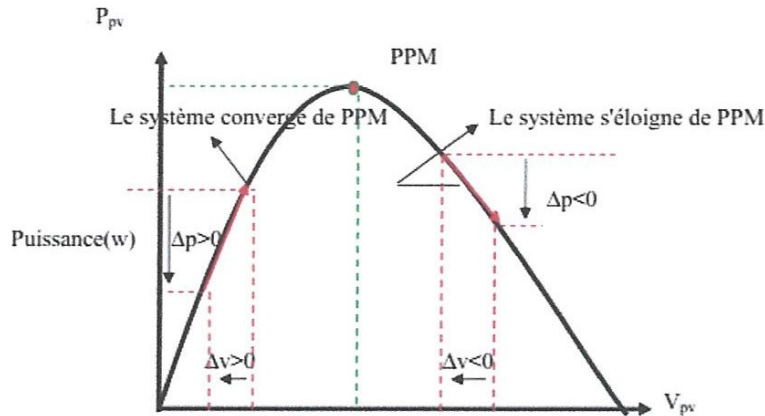


Figure 3.15: Schéma de convergence vers le MPP par P&O

La plupart des MPPT commence le calcul à partir du point de circuit ouvert de la courbe I(V) (Figure 3.16). Tout d'abord la puissance réelle est déterminée et ensuite le rapport cyclique est augmenté. Si la nouvelle puissance est supérieure à l'ancienne valeur, le suivi était correct et le rapport cyclique est augmenté de nouveau. Si le MPP est dépassé alors la puissance mesurée est diminuée et le rapport cyclique est réduit. Le rapport cyclique est donc modifié, en fonction du résultat de calcul de la puissance, jusqu'à l'obtention du MPP. [6], [18]

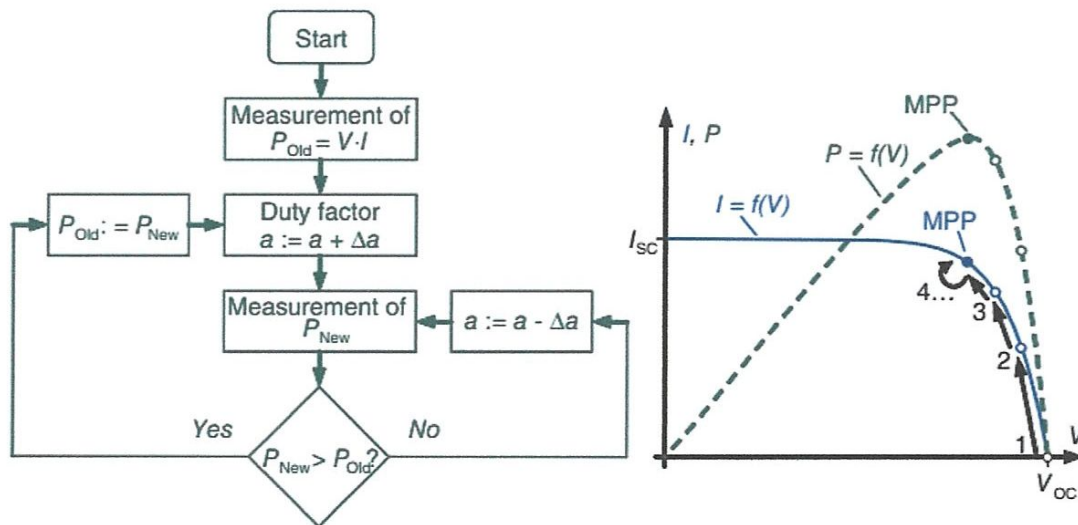


Figure 3.16 : Algorithme de base de la méthode P&O [6]

La figure (3.17) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance à chaque instant. Parfois, le courant est estimé à partir de la tension mesurée, éliminant ainsi le besoin du capteur de courant. [3], [6]

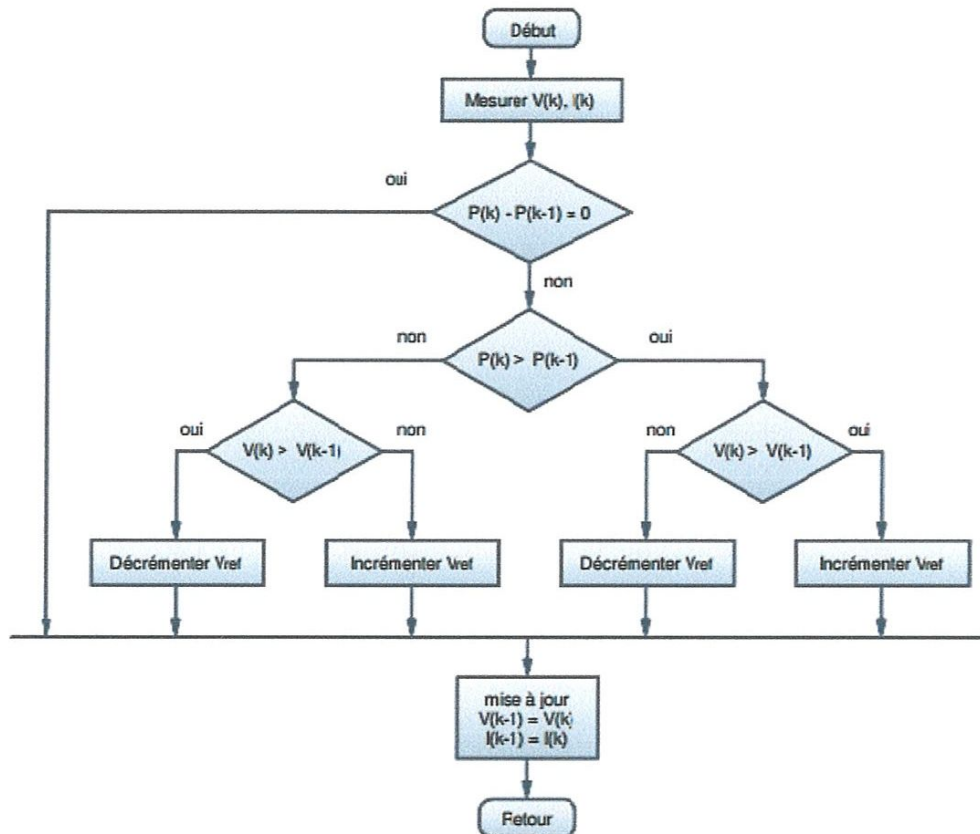


Figure 3.17: Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du MPP qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du MPP doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du MPP, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du MPP. Il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité.

L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés. [10], [11], [12], [16]

III.5.3-Simulation de l'algorithme P&O

En se basant sur l'organigramme de la figure 3.17, nous avons simulé l'algorithme P&O (figure 3.18). Pour ceci, nous avons utilisé le package SimPowerSystems du Matlab/Simulink Version 2013. Le circuit a été simulé aux conditions standards ($T = 25^\circ$ et $G = 1000 \text{ W/m}^2$). On préserve toujours les mêmes paramètres du convertisseur Buck et du GPV BP150BP mentionné précédemment. Le rapport cyclique initial choisi pour la simulation est de 0.3 (choix arbitraire) et la fréquence du MPPT a été fixée à 1kHz. La tension désirée en sortie du convertisseur est de 12V, ce qui correspond à la tension nominale d'une batterie au plomb.

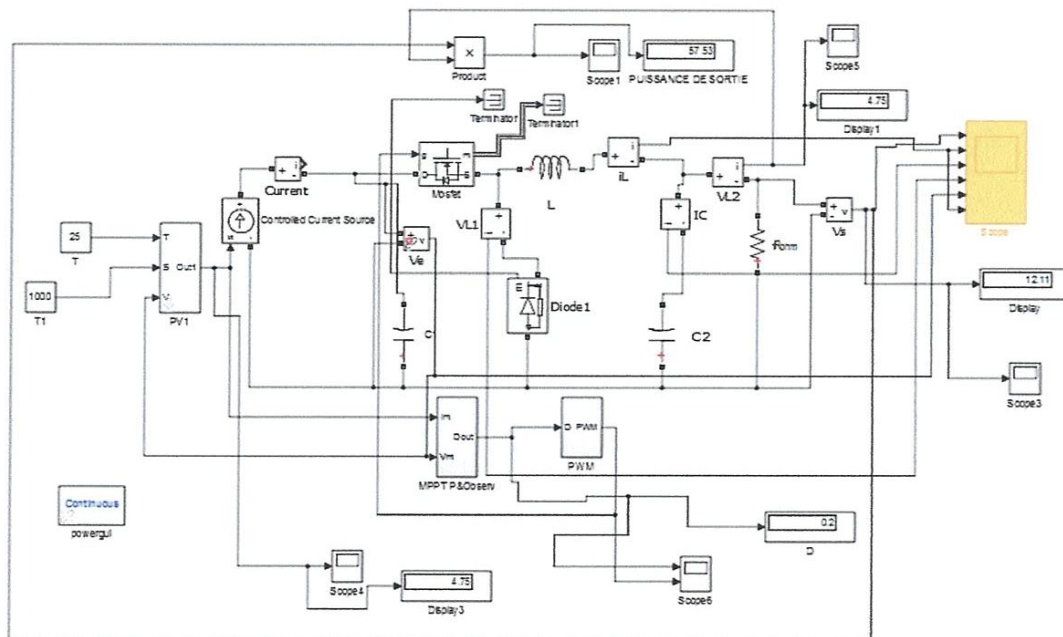


Figure 3.18 : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC) type Buck.

- ✓ Blocs **Transport Delay** : Utilisés pour retarder l'entrée par un intervalle de temps spécifié. Ceci permet de calculer les variations $\Delta P(k) = P(k) - P(k-1)$ et $\Delta V(k) = V(k) - V(k-1)$.
 - ✓ Bloc **Multiport Switch** : permet de traiter les quatre cas résumés sur le tableau 3.1.
 - ✓ Bloc **Constant pas** : Représente le pas de perturbation de la commande MPPT.
 - ✓ Bloc **Saturation** : Assure que le rapport cyclique D reste dans l'intervalle [0,1].
 - ✓ Bloc **Zero-Order Hold** (échantillonneur bloqueur): Permet de maintenir la valeur du rapport cyclique D constante sur un cycle du MPPT.
 - ✓ Bloc **IC** (Initial Condition) : Permet de spécifier le rapport cyclique initial.
 - ✓ Bloc **Memory** : Garde en mémoire la valeur du rapport cyclique pour le cycle prochain.
- Cet algorithme est résumé sur le tableau 3.1. [3]

Perturbation	Changement dans la Puissance	Perturbation suivante
positive	positif	positive
positive	négatif	négative
négative	positif	négative
négative	négatif	positive

Tableau 3.1 : Résumé de fonctionnement de l'algorithme P&O

Bloc MPPT

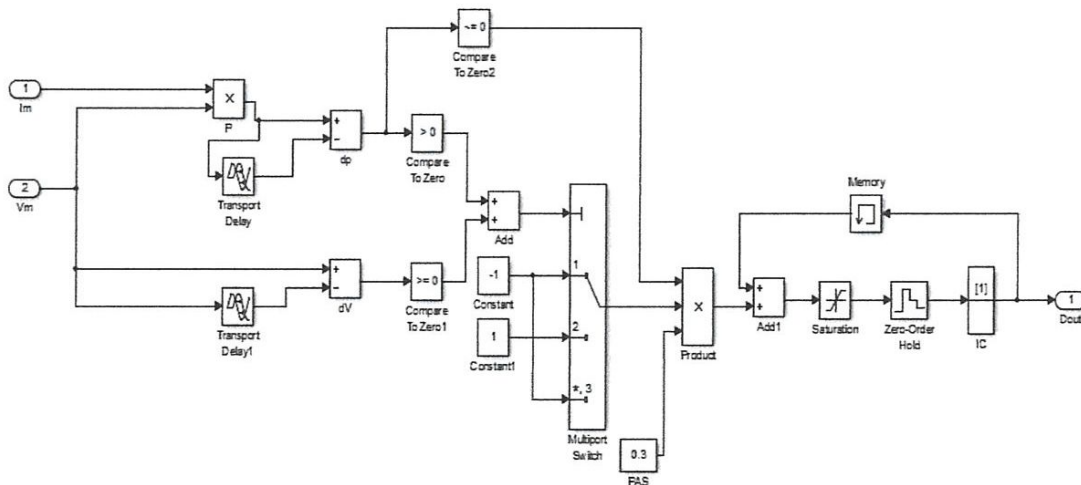


Figure 3.19: Modèle SIMULINK de l'algorithme MPPT P&O

Bloc PWM

Le bloc « PWM » génère le signal PWM nécessaire à la commande du commutateur (figure 3.26).

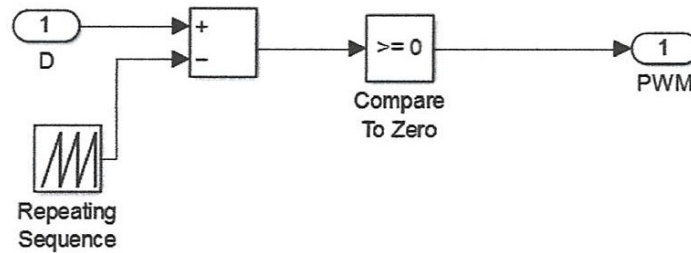


Figure 3.20: Modèle SIMULINK pour la génération du signal PWM

PWM (Pulse Width Modulation): Elle consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur D sans modifier T . Elle consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur. Le signal de contrôle de l'interrupteur S est élaboré par comparaison entre le rapport cyclique D et une tension en dents de scie V_{DS} comme suit :

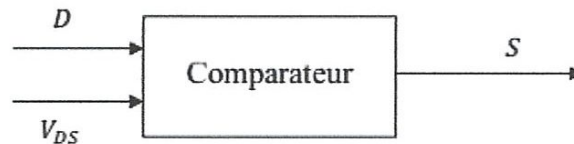


Figure 3.21: Principe du PWM

- Lorsque $D > V_{DS}$: $S = 1$, l'interrupteur S est commandé à la fermeture.
- Lorsque $D < V_{DS}$: $S = 0$, l'interrupteur S est commandé à l'ouverture.

➤ **Resultat de la simulation**

Les résultats de la simulation sont représentés sur les figures 3.22 ,3.23 et 3.24 pour un pas de perturbation de 0.1. Sur la figure 3.23, on constate que la tension en sortie est de 12V. On a donc abouti à notre objectif.

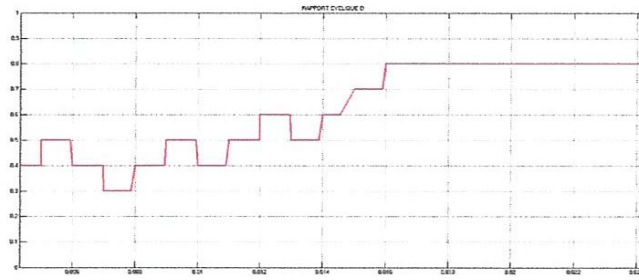


Figure 3.22 : Rapport cyclique D

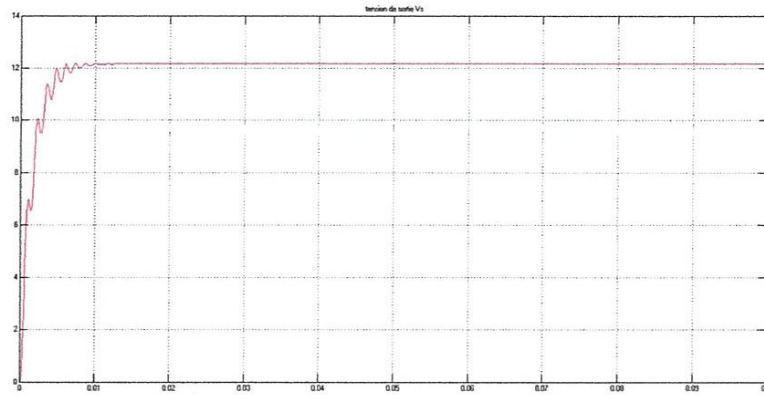


Figure 3.23: Tension de sortie

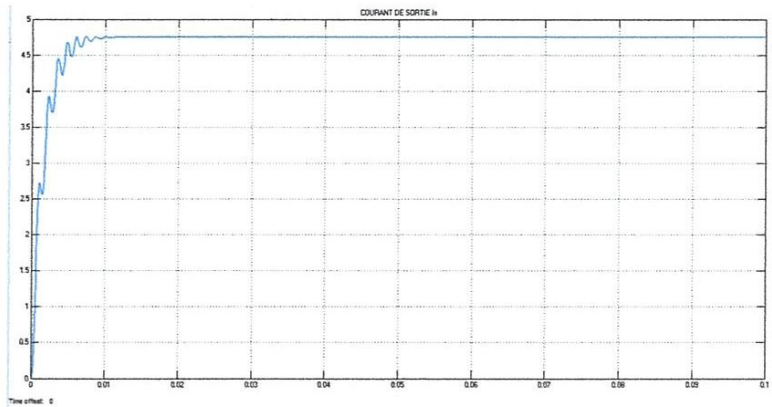
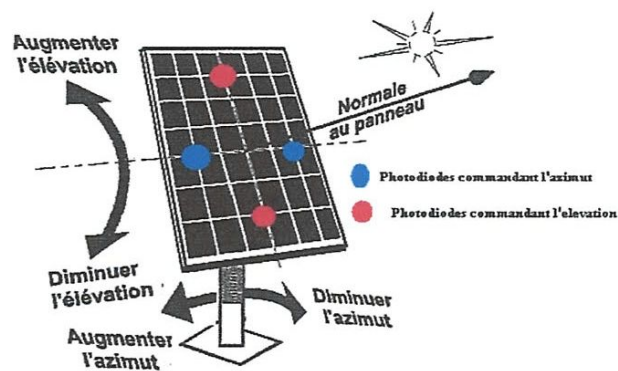


Figure 3.24: Courant de sortie

Chapitre 4

Réalisation d'un suiveur de soleil (tracker) bi-axiale à base d'Arduino



IV.1-INTRODUCTION

L'idée du tracker solaire est que le surplus d'énergie produite grâce à l'orientation des panneaux sera plus important que l'énergie dépensée à orienter les panneaux de façon optimale.

Dans ce chapitre, on va étudier et réaliser un système photovoltaïque simple et direct sans adaptation avec stockage, qui supporte un suiveur de soleil bi-axiale à base d'Arduino (carte électronique programmable).

IV.2-PRESENTATION DU PROTOTYPE

La figure 4.1 montre le schéma synoptique du système PV choisi pour la réalisation.

Il contient trois blocks après le panneau photovoltaïque (GPV) :

1. Suiveur de soleil (tracker) à base d'Arduino,
2. Couplage directe avec stockage (batterie de 12 V)
3. Charge continue (DC), par exemple une ampoule de 12 V.

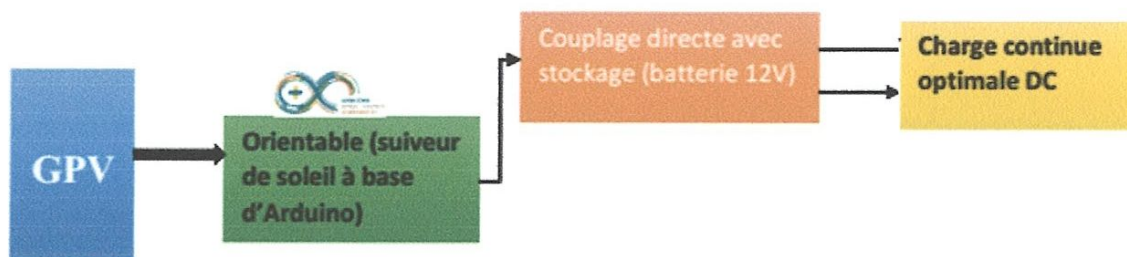


Figure 4.1 : Schéma synoptique du système PV choisi pour la réalisation

La maquette réalisée est capable de suivre une source lumineuse mobile afin d'orienter de façon optimale le panneau solaire en direction des rayons du soleil. Les mouvements de rotation se produisent selon deux axes (un vertical et un horizontal). Deux servomoteurs commandés par une carte électronique Arduino assure la mise en rotation. L'orientation optimale est calculée à partir des données de 4 cellules photorésistantes (LDR).

IV.2.3-Cablage et fonctionnement

Le principe consiste à remarquer que la lumière reçue par les quatre photorésistances est identique dès que le capteur (ensemble des quatre photorésistances) est orienté dans l'axe de la lumière. Il faut donc mesurer la lumière reçue par chaque photorésistance en mesurant la tension à leurs bornes. Cette mesure est réalisée grâce à la connexion des ports pin 1 à 4 de la carte Arduino (ces derniers sont configurés en port analogique) (Figure 4.2).

Le programme compare ensuite ces tensions ordonnant aux servomoteurs de pivoter dans la direction des photorésistances qui reçoivent le plus de lumière. [23]

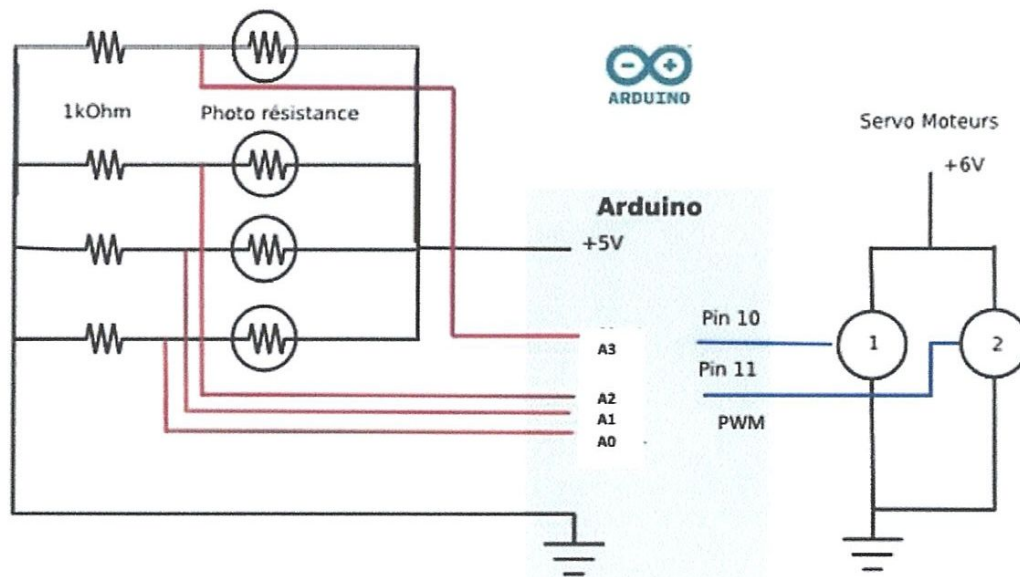


Figure 4.2 : Schéma de câblage

IV.2.4-Matériels

Les principaux éléments sont les suivants:

- ✓ Panneau solaire : 18 V, 2.5 W, 120 x 194 mm,
- ✓ Carte Arduino mega 2560,
- ✓ 2 servomoteurs,
- ✓ 4 Photo Resistances 1 Kohm,
- ✓ Batterie 12V ,2 AH,

- ✓ Une charge continue soit une ampoule ou moteur DC de 12 V,
- ✓ Une Breadboard (plaque d'essai),
- ✓ Un lot de fils pour le câblage,
- ✓ 4 Résistance (1kOhm),
- ✓ Une diode anti retour.
- ✓ Une maquette se compose de deux parties : base et support rotatif, (Figure 4.3).

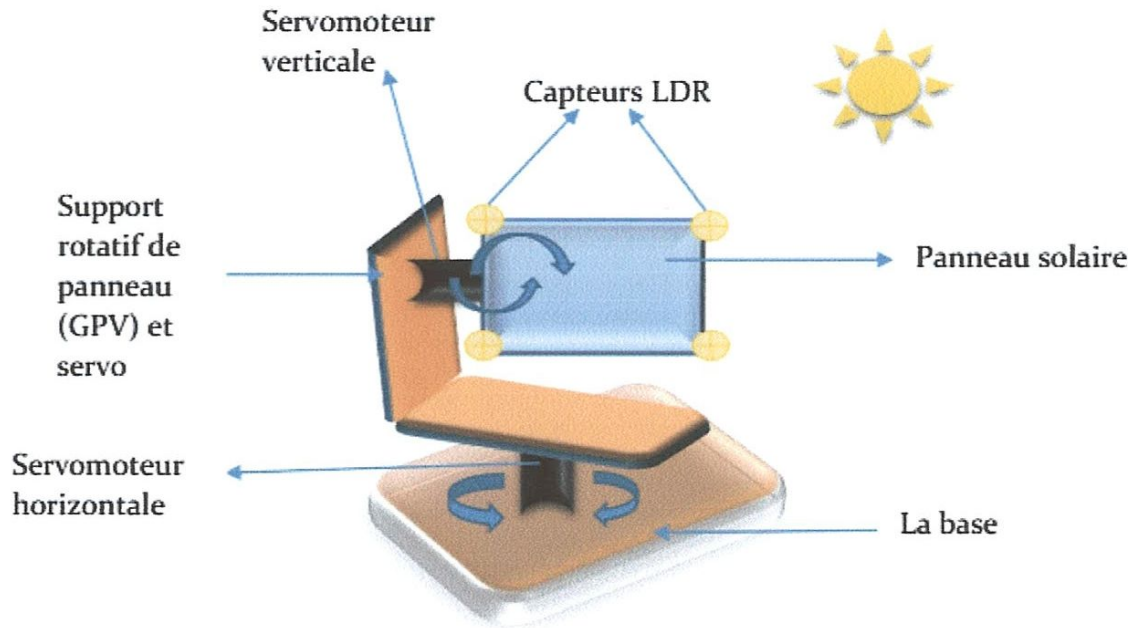


Figure 4.3 : La maquette automatisée

IV.3-Description des composants

IV.3.1- Caractéristiques du Panneau solaire (figure 4.4)

- Max. Puissance: 2.5 W,
- Max. Tension: 18 V. Taille: 19.4 cm x 12 cm x 0.3 cm,
- Max. Courant : 0.14 A.

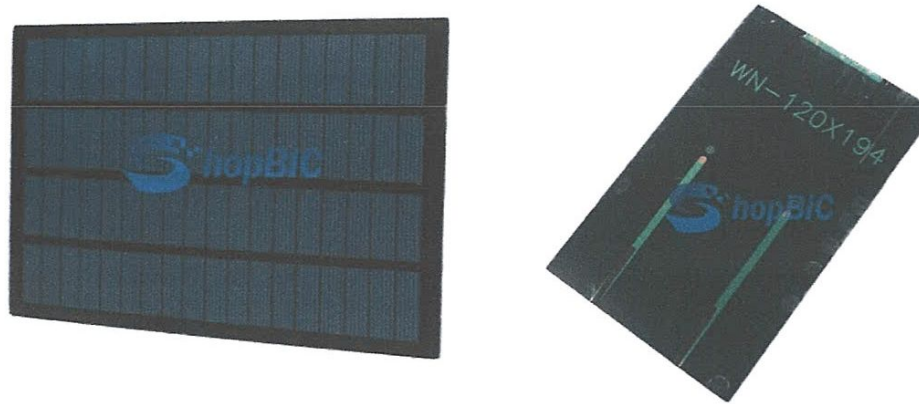


Figure 4.4 : Panneaux solaire utilisé 2.5 W ,18V

IV.3.2-Carte électronique programmable Arduino Mega 2560

IV.3.2.a-Qu'est-ce que l'Arduino

Une équipe de développeurs composée de *Massimo Banzi*, *David Cuartielles*, *Tom Igoe*, *Gianluca Martino*, *David Mellis* et *Nicholas Zambetti* a imaginé un projet répondant au doux nom de **Arduino** et mettant en œuvre une petite carte électronique programmable et un logiciel multiplateforme, qui puisse être accessible à tout un chacun dans le but de créer facilement des systèmes électroniques. [19]

L'Arduino est une carte de circuit imprimé supportant un microcontrôleur et la circuiterie minimum nécessaire pour lui permettre de fonctionner, associée à une interface USB permettant de le programmer. La carte électronique est un support plan, flexible ou rigide, généralement composé d'époxy ou de fibre de verre. Elle possède des pistes électriques disposées sur une, deux ou plusieurs couches (en surface et/ou en interne) qui permettent la mise en relation électrique des composants électroniques. Chaque piste relie tel composant à tel autre, de façon à créer un système électronique qui fonctionne et qui réalise les opérations demandées.

- SRAM : 8 KB
- EEPROM : 4 KB
- Fréquence d'horloge de l'oscillateur à quartz : 16 MHz
- Dimensions : 101,52 x 53,3 mm
- Poids : 37 g. [19], [24]

IV.3.3-Servomoteurs

Ces moteurs fonctionnent en boucle dite 'fermée', c'est à dire qu'à tous moment, on connaît leur position, il est donc facile de les piloter, contrairement à des moteurs pas à pas fonctionnant en boucle 'ouverte'. Les servomoteurs intègrent un mécanisme et un axe qui peut être contrôlé précisément. Les servomoteurs standards permettent de positionner l'axe à différents angles, habituellement entre 0 et 180 degrés (ces servomoteurs permettent de maintenir l'axe à une position précise). Les servomoteurs à rotation continue permettent des rotations de l'axe à différentes vitesses.

On trouve des servomoteurs de toutes les tailles et de toutes les puissances. Les servomoteurs contiennent un petit moteur connecté via des engrenages à un axe de sortie.

L'axe de sortie qui pilote le bras du servomoteur est aussi connecté à un potentiomètre afin de fournir une rétroaction (feedback en Anglais) de la position à un circuit de contrôle interne. [19], [20], [21], [24]

IV.3.3.a-Caractéristiques du servomoteur utilisé (Figure 4.7)

- Fil de connecteur Longueur 295mm
- Vitesse de fonctionnement: 0.17sec/60 degrés (4.8 V sans charge)
- Vitesse de fonctionnement: 0.13sec/60 degrés (6.0 V sans charge)
- Couple de décrochage: 12 kg/cm (6V)
- Tension de fonctionnement: 4.8-7.2 volts
- Consommation : 350mA
- Consommation (coupure): 1500mA
- Type d'engin : ALL METAL Gears
- Couleur: noir
- Taille d'article: 55x20x38mm
- Servo poids: 54g

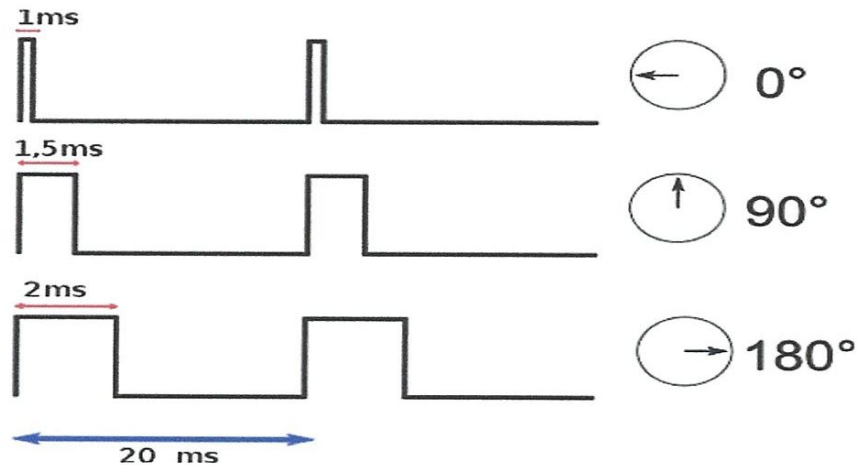


Figure 4.8: Chronogramme de commande d'un servomoteur

IV.3.3.c-Connexion d'un servo à un Arduino

La connectique d'un servomoteur se résume à trois fils : deux pour l'alimentation positive et la masse (rouge et noir) et le dernier pour le signal de commande sous forme d'impulsions (jaune ou blanche). Le servomoteur accepte généralement une plage d'alimentation comprise entre 4.5V et 6V (à 6V il aura plus de couple et sera un peu plus rapide qu'à 4.5V). Si on n'a besoin d'utiliser qu'un ou deux servomoteurs, on peut les brancher sur la sortie 5V de la carte Arduino.

Si on veut en utiliser plus, il serait bon d'envisager une alimentation externe car le régulateur de l'Arduino n'est pas fait pour délivrer trop de courant, on risque dans ce cas de le cramer. La bibliothèque Servo supporte 48 servomoteurs sur l'Arduino Mega. Sur la Mega, jusqu'à 12 servomoteurs peuvent être utilisés sans interférer avec la fonction PWM (càd avec l'instruction (`analogWrite`)); utiliser de 12 à 23 servomoteurs désactivera les impulsions PWM sur les broches 11 et 12, (Figure 4.9). Dans ce cas, si seulement un servomoteur est utilisé, l'autre broche ne peut pas être utilisée pour générer une sortie PWM normale avec l'instruction `analogWrite()`. [19], [24],[25],[26]

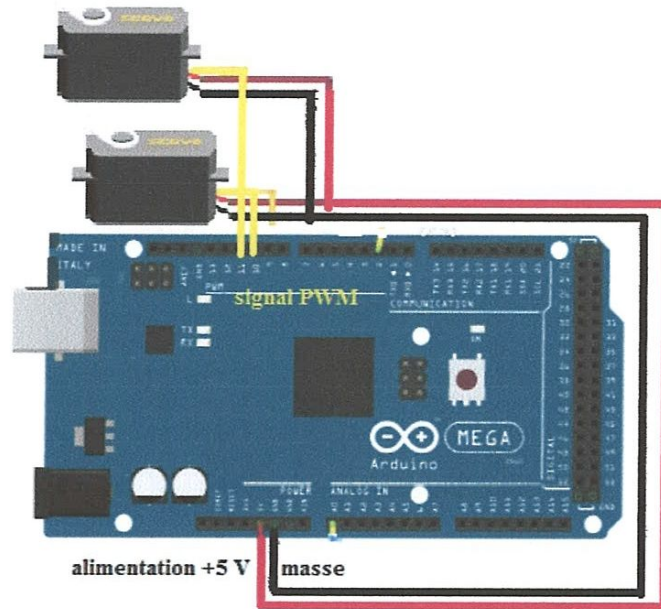


Figure 4.9 : Connexion des servomoteurs à un Arduino (broche 10 et 11 sur PWM)

IV.3.3.d-Déclaration d'un servomoteur dans le logiciel Arduino

Tout d'abord, on inclut la librairie. écrire au début du code `#include <Servo.h>` ou on clique sur *library* dans la barre de menu puis sur « Servo » pour que s'écrive automatiquement et sans faute la ligne précédente. Ensuite, on crée un objet de type Servo pour chaque servomoteur utilisé. Par exemple on écrit le mot « mon Servo » de la manière suivante : `Servo monServo;`. Nous devons lui indiquer la broche sur laquelle est connecté le fil de commande du servo en utilisant la fonction `attach()` de l'objet Servo créé. Cette fonction prend 3 arguments:

- Le numéro de la broche sur laquelle est relié le fil de signal (on a choisi les broches 10 et 11 sur PWM).
- La valeur basse (angle à 0°) de la durée de l'état haut du signal de PWM en microsecondes (optionnel, défaut à 544 μ s)
- La valeur haute (angle à 90°, 180°, 360°, etc.) de la durée de l'état haut du signal de PWM en microsecondes (optionnel, défaut à 2400 μ s). [19], [24]

IV.3.4-Capteurs à résistance variable

IV.3.4.a-Caractéristiques des photorésistances utilisées

- Photorésistance GL5528 LDR.
- Tension maximale : 150 V DC.
- La dissipation de puissance maximale : 100 mW.
- Température ambiante :-30 C°.....+ 70C°.
- Crête spectrale: 540 nm.

IV.3.4.b-La photorésistance (LDR)

La photorésistance LDR (Light Dependent Resistor) est un composant électronique qui est de type transducteur. Il est donc capable de donner une image de la grandeur physique mesurée, la lumière ou précisément la luminosité, grâce à une autre grandeur physique, la résistance. (Figure 4.10).

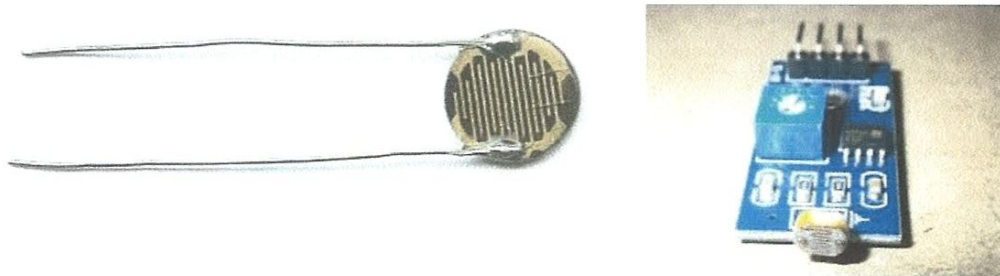


Figure 4 .10 : Photo d'une photorésistance

IV.3.4.c-PROPRIÉTÉ :

La photorésistance suit une relation toute simple entre sa résistance et la luminosité (4.1):

$$R = f (E) \quad (4.1)$$

Avec:

- **R** : Résistance en Ohm (Ω)
- **E** : Intensité lumineuse en lux (lx)


```

str1[0]='b';
}
if (moyR>moyL) Si le côté gauche reçoit plus de lumière que le côté droit, on
{ stocke 'l' dans le deuxième tableau.
maxLR=moyL;
str2[0]='l';
}
else Sinon on stocke 'r' dans ce même deuxième tableau.
{
maxLR=moyR;
str2[0]='r';
}

```

f) Mouvements en conséquence

`switch(str2[0])` Dans le cas où le deuxième tableau contient...

```

{
case 'l': - 'l', alors :

poshor --; 1) on décrémente la variable poshor
if (poshor<55) poshor=55; 2) dans le cas où la butée est atteinte, on rectifie.
myservo.write(poshor); 3) on déplace le moteur à l'angle de valeur poshor.
Serial.print("haut"); (pour identifier un éventuel problème).
break;

case 'r': - 'r', alors :

poshor ++; 1) on incrémente la variable poshor
if (poshor>100) poshor=100; 2) idem
myservo.write(poshor); 3) idem
Serial.print("bas"); idem
break;

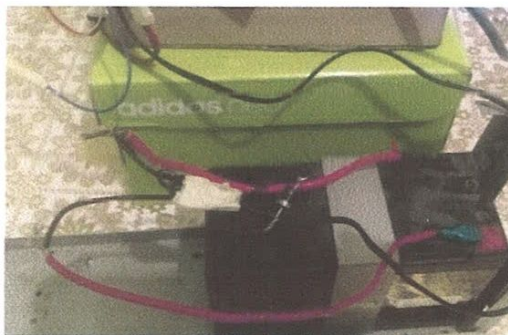
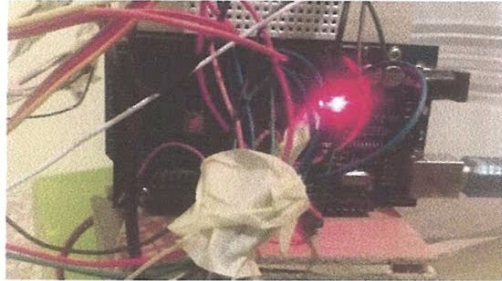
default:
Serial.println("erreur"); Dans le cas où le tableau ne contient ni 'r', ni 'l', pour

```

```
} identifier un problème
switch(str1[0]) Même fonctionnement que pour l'autre tableau, avec la

{ variable posver
case 't':
posver --;
if (posver<0) posver=0;
myservoer.write(posver);
Serial.println("gauche");
break;
case 'b':
posver ++;
if (posver>180) posver=180;
myservoer.write(posver);
Serial.println("droite");
break;
default:
Serial.println("erreur"),
}
delay(10); Fixe le délai à 10ms.
}
```

IV.5.1-prototype réalisé et finalisé



IV.6-CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons monté et fait fonctionner un suiveur de soleil bi-axial (à base d'Arduino). L'objectif de celui-ci est de suivre les trajectoires de lumière afin d'en récupérer le maximum. Son principe consiste à récupérer les valeurs des photorésistances, de les comparer et d'actionner le servo pour que ces valeurs tendent à l'identique.

Il nous semble important de signaler que nous n'avons pu réaliser la globalité de nos objectifs prévus à cause du manque des composants électroniques.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire avait comme objectif l'étude d'une chaîne de conversion photovoltaïque. Notre approche a débuté par un aperçu sur le rayonnement solaire et les systèmes photovoltaïques. Par la suite, nous avons étudié et simulé un générateur photovoltaïque GPV. Après, nous avons étudié et simulé une commande MPPT constitué par un convertisseur DC/DC de type Buck et l'algorithme MPPT Perturb & Observer.

A la fin de ce travail, nous avons monté et fait fonctionner un suiveur de soleil bi-axial à base d'Arduino, l'objectif de celui-ci est de suivre les trajectoires de lumière afin d'en récupérer le maximum.

Les principaux éléments auxquels ce travail a abouti sont:

- ✚ La tension aux bornes du GPV est relativement peu dégradée par l'accroissement de l'ensoleillement.
- ✚ Le courant délivré par le GPV (ainsi que le photo-courant) est directement proportionnel à l'ensoleillement.
- ✚ L'augmentation de la température conduit à une diminution nette de la tension de circuit ouvert, à une légère augmentation du courant de court-circuit, et à une diminution de la puissance maximale.
- ✚ Pour profiter de la puissance maximale délivrée par un panneau solaire, l'utilisation d'un étage d'adaptation entre ce panneau et la charge est nécessaire. L'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.
- ✚ Arduino est un mini automate programmable, innovante, plus pratique et facile à utiliser.

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives comme suite de cette étude dont on peut citer:

- ✚ Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT;
- ✚ Introduction d'autres types de convertisseurs DC/DC;
- ✚ Application dans les domaines de pompage et de production de l'énergie électrique.

Références bibliographiques et webographie

- [1]- **Petibon Stéphane**, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, l'université Toulouse iii - Paul Sabatier ,2009.
- [2]- **Labassi & Mazhoud**, « Etude et réalisation d'un système de caractérisation d'un champ photovoltaïque » Mémoire de master, esstt- inrst, Tunis ,2006.
- [3]- **Boukli Hacene Omar**, « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique », Thèse de Magister, Université Abou Baker Belkaid, Tlemcen, 2011.
- [4]- **Angel cid Pastor** « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse.2006
- [5]- **Anne Labouret et Michel Villos** « Energie solaire photovoltaïque », Livre 4^e édition Dunod : www.dunod.com, paris ,2009.
- [6] **Konrad Martens**, "Photovoltaics: fundamentals, technology and practice", livre first edition john Wiley & sons, ltd. by john Wiley & sons, ltd, published 2014.
- [7]- **Pierre-eymeric Janolin**, « De l'effet photovoltaïque aux cellules photoélectriques » Article issu de sciences fondamentales | physique chimie © techniques de l'ingénieur | réf : af6240(SNDL). 10 juillet 2013.
- [8]- **Stéphan Astierdate**, « Conversion photovoltaïque, de la cellule aux systèmes » Article issu de : énergies | convertisseurs et machines électriques © techniques de l'ingénieur réf.d3936(SNDL) ,10 mai 2008.
- [9]- **H.othmani, D.Mezghani, A.Mami**, « Etude d'un système photovoltaïque », 2ème conférence Internationale des énergies renouvelables, International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET), Vol.3-pp.111-115, 2015.
- [10]- **Hamza Azzedine**, « Modélisation et commande d'un système photovoltaïque », Mémoire de Magister en automatique, université Badji Mokhtar Annaba, 2014.

[11]- **Djeriou Salim**, « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone », Mémoire de magister en électrotechnique option : machines électriques, université Ferhat Abbas de Sétif le, **2011**.

[12]- **Sofiane Abada**, « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic », Mémoire pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Se.), Faculté des études supérieures et postdoctorales faculté des sciences et de génie université Laval Québec, **2011**.

[13]- <http://www.photovoltaik-web.de>, Catalogue du module PV BP 3150B.BP Solar **2003**.

[14]- **Othmane Benseddik Fathi Djaloud**, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque», Mémoire de Master, Spécialité : Génie électrique et électronique Option : Automatique, Université kasdi merbah- Ouargla ,**2012**.

[15]-**Hananou Fatiha et Rouabah Aicha**, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » Mémoire master Académique Domaine : Sciences et technologies Filière, Electrotechnique Spécialité : Electrotechnique industrielle ,**2014**.

[16]-**Hannes Knopf**, "Analysis, Simulation and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle". Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in electrical and computer engineering, Portland State University, **1999**.

[17] **Ayache khedidja**, « Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque couplé à un réseau électrique» Mémoire de magister, commande des machines électriques, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras, **2014**.

[18]- **Alain Bilbao Learreta**, « Réalisation de Commandes MPPT Numériques » Diplôme Ingénieur Technique Industriel, Rapport de Stage Projet Fin d'Etudes, universitat rovera i vlrçili ; Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica Cabal (LAAS-CNRS), Septembre / **2006**.

[19]-**Christian Tavernier**, « Arduino, maitriser sa programmation et ses cartes d'interface (shields), Livre zeme édition, Dunod, Paris, **2014**.

[20] -**Rick Anderson and Dan Cervo**, "Pro Arduino, Arduino expert topics and

techniques” Livre, tia, Technology in Action friendsof, Apress, 2015.

[21]-Michael McRoberts, “Beginning Arduino” Livre, tia, Technology in Action friendsof, Apress, (SNDL), 2015.

[22]-Jon Lazar, “Arduino and LEGO projects” Livre, tia, Technology in Action friendsof, Apress, (SNDL), 2015

[23]- François Decq, Baptistin Roussel, Marie Lemagnant et Nelcis Zora, « Tournesol photovoltaïque, suivi solaire par panneaux photovoltaïques » rapport de projet, institut national des sciences appliquées de Rouen département sciences et techniques pour l’ingénieur, saint Étienne du Rouvray, référence du projet : stpi/p6/-n°12,2014.

[24]-<https://www.arduino.cc/>

[25]-<http://pybar.fr/index.php?page=tracker>

[26]<http://www.pearltrees.com/stizdddl/tracker-solaire/id11129670#item108532845>

Annexes

- La fiche technique GPV BP 3150B



BP 3150

150 Watt Photovoltaic Module

High-efficiency photovoltaic module using silicon nitride multicrystalline silicon cells.

Performance

Rated power (P_{max})	150W
Power tolerance	$\pm 5\%$
Nominal voltage	24V
Limited Warranty ¹	25 years

Configuration

B BP 3150B	Bronze frame with output cables and polarized Multicontact (MC) connectors
S BP 3150S	Clear universal frame with output cables and polarized Multicontact (MC) connectors
L BP 3160L	Unframed laminate version of BP 3150S
U BP 3160U	Clear universal frame with standard junction box

Electrical Characteristics²

	BP 3150
Maximum power (P_{max}) ³	150W
Voltage at Pmax (V_{mp})	34.5V
Current at Pmax (I_{mp})	4.35A
Warranted minimum P_{max}	142.5W
Short-circuit current (I_{sc})	4.75A
Open-circuit voltage (V_{oc})	43.5V
Temperature coefficient of I_{sc}	$(0.065 \pm 0.015)\%/^{\circ}\text{C}$
Temperature coefficient of V_{oc}	$-(160 \pm 20)\text{mV}/^{\circ}\text{C}$
Temperature coefficient of power	$-(0.5 \pm 0.05)\%/^{\circ}\text{C}$
NOCT (Air 20°C; Sun 0.8kW/m ² ; wind 1m/s)	$47 \pm 2^{\circ}\text{C}$
Maximum series fuse rating	15A (E, L); 20A (U)
Maximum system voltage	600V (U.S., N.E.C. & I.E.C. 61216 rating) 1000V (TUV Rheinland rating)





**Mechanical Characteristics**

Dimensions	B,S,U	Length: 1593mm (62.8")	Width: 790mm (31.1")	Depth: 50mm (1.97")
	L	Length: 1580mm (62.2")	Width: 783mm (30.8")	Depth: 19mm (0.75")
Weight	B,S,U	15.0 kg (33.1 pounds)		
	L	12.4 kg (27.3 pounds)		
Solar Cells	B,S,L,U	72 cells (125mm x 125mm) in a 6x12 matrix connected in series		
Output Cables	B,S,L	RHW AWG# 12 (4mm ²) cable with polarized weatherproof DC rated Multicontact connectors; asymmetrical lengths - 1250mm (+) and 800mm (+)		
Junction Box	U	Standard junction box with 6-terminal connection block; IP 54, accepts PG 13.5, M20, 1/2 inch conduit, or cable fittings accepting 6-12mm diameter cable. Terminals accept 2.5 to 10mm ² (8 to 14 AWG) wire.		
Diodes	B,S,L,U	Three 9A, 45V Schottky by-pass diodes included		
Construction	B,S,L,U	Front: High-transmission 3mm (1/8" inch) tempered glass; Back: Tedlar; Encapsulant: EVA		
Frame	B,S,U	Anodized aluminum alloy type 6063T6 Universal frame; Color: bronze (B); silver (S,U)		

1. Warranty: Power output for 25 years. Freedom from defects in materials and workmanship for 5 years. See our website or your local representative for full terms of these warranties.
2. These data represent the performance of typical BP 3150 products, and are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (STC.)
3. During the stabilization process that occurs during the first few months of deployment, module power may decrease by up to 3% from typical P_{max} .

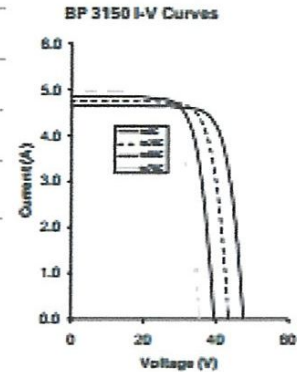
downloaded from www.photovoltaik-web.de

Quality and Safety

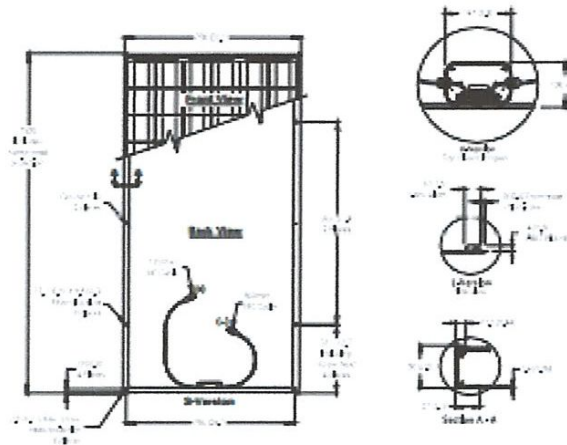
ESTI	Module power measurements calibrated to World Radiometric Reference through ESTI (European Solar Test Installation at Ispra, Italy)
	Manufactured in ISO 9001-certified factories; conforms to European Community Directives 89/337/EEC, 73/23/EEC, 93/68/EEC; certified to IEC 61215
	Framed modules certified by TÜV Rheinland as Safety Class II (IEC 60364) equipment for use in systems up to 1000 VDC
	Listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating)
	Approved by Factory Mutual Research in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations (U)

Qualification Test Parameters

Temperature cycling range	-40°C to +85°C (-40°F to 185°F)
Humidity freeze, damp heat	85% RH
Static load front and back (e.g. wind)	50psf (2400 pascals)
Front loading (e.g. snow)	113psf (5400 pascals)
Hailstone impact	25mm (1 inch) at 23 m/s (52mph)



Dimensions in brackets are in inches. Unbracketed dimensions are in millimeters. Overall tolerances $\pm 3\text{mm}$ (1/8")



Included with each module: self-tapping grounding screws, instruction sheet, and warranty document.

Note: This publication summarizes product warranty and specifications, which are subject to change without notice.

RESUME

À l'ère du développement durable, la technologie photovoltaïque a montré son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de la chaîne de conversion photovoltaïque.

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

Les trackers solaires sont aussi étudiés, et un suiveur de soleil bi-axial à base d'Arduino, visant une gestion énergétique optimale, a été réalisé.

Mots-clefs :

Simulation. Générateur photovoltaïque (GPV). Convertisseur BUCK. Algorithme MPPT (P&O). Suiveur de soleil. Arduino.