

**République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique**



**Centre Universitaire d'EL-Oued
Institut des Sciences et de Technologies**



**Mémoire de Fin d'Etude
Présenté pour l'obtention du diplôme de**

LICENCE ACADEMIQUE

**Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques**

Thème

***Modélisation d'une chaine photovoltaïque
de production d'énergie électrique***

Rédiger par:

MIDA Dris

Réaliser par:

BEBBOUKHA Abderrazzak

FRIDJAT Mohamed Djemoui

Soutenu le 10 Juin 2012

Remerciements

Nous remercions Dieu tout puissant clément et miséricordieux de m'avoir soigné et aidé.

*Nous tenons, avant tout, à exprimer nos profondes gratitude à monsieur **MIDA Dris**, enseignant au Centre Universitaire D'El-Oued qui a assumé la direction de ce travail. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de nos reconnaissances pour son dévouement, sa patience sa disponibilité, ses conseils et son aide constant qu'il nous apportés tout au long de ce travail.*

Nous remercions vivement les membres du jury pour avoir bien vouloir accepter de faire partie du jury de soutenance. Qu'ils trouvent ici l'expression de nos gratitude respect.

Nous adressons nos vifs remerciements à tous les enseignants du Centre Universitaire D'El-Oued qui ont contribué à nos formations durant toutes nos études.

Nous tenons également à remercier tous nos collègues des études pour leurs soutiens et leur motivation.

Que tous nos amis sans exception, ils sont nombreux, nous ne pouvons tous les citer mais nous ne les oublions.

Enfin, que toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, soient chaleureusement remerciées.

BEBBOUKHA

FRIDJAT

Dédicace

Je dédie ce travail à ma mère et mon père
pour ses encouragements et ses prières tout
au long de mes études, et nous plantent
l'amour de science.

Je le dédie à mes frères et sœurs, et je les
remercie pour leurs encouragements et leurs
aides ainsi que toute ma grande famille.

A tous mes amis sans citer les noms.

BEBBOUKHA Abderrazzak

Dédicace

Je dédie ce travail à ma mère et mon père
pour ses encouragements et ses prières tout
au long de mes études, et nous plantent
l'amour de science.

Je le dédie à mes frères et sœurs, et je les
remercie pour leurs encouragements et leurs
aides ainsi que toute ma grande famille.

A tous mes amis sans citer les noms.

FRIDJAT Mohamed Djemoui

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Sommaire.....	i
Liste des figures	iii
Nomenclatures	v

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEME SOLAIRE

I.1 Introduction	4
I.2. Généralités sur les système solaire.....	5
I.2.1 Définition du système solaire	5
I.2.2 Les différents types d'un système solaire	6
I.2.3 Les principaux composants d'un système solaire photovoltaïque	9
I.2.4 Le principe de fonctionnement d'un système solaire photovoltaïque.....	12
I.2.5 Classification d'un système solaire photovoltaïque.....	16
I.2.6 Utilisation des systèmes solaires	17
I.2.7 Avantages et inconvénients d'un installation PV.....	18
I.3.Conclusion	19

CHAPITRE II :LES SYSTEME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE SANS BATTERIE

II.1 Introduction	21
II.2. Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque	22
II.2.1 La caractéristique courant-tension	22
II.2.2 Paramètres externes d'une cellule solaire photovoltaïque.....	23
II.2.3 Influence des résistances série et shunt.....	26
II. 2.4 Influence de l'éclairement	27
II.2.5 Influence de la température.....	28

II.3. Le générateur solaire photovoltaïque	29
II.3.1 Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque	31
II.3.2 Modélisation d'une cellule solaire photovoltaïque	32
II.4 Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque	34
II.4.1 Modèles électriques des panneaux	35
II.4.1.1 "Modèle une diode"	35
II.4.1.2 "Modèle deux diodes"	38
II.4.1.3 "Modèle polynomial"	39
II.5. Définition et principe de fonctionnement de l'mppt d'un système solaire photovoltaïque	40
II.6. Les différents types d'mppt solaire photovoltaïque	42
II.6.1 Les mppt classifiés selon les paramètres d'entrés	42
II.6.2 Les mppt classifiés selon le type de recherche ou contrôle	43
II.7. Conclusion	44
Conclusion Générale	45
Références Bibliographiques	46

Liste des figures

Figure I.1- Plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur	6
Figure I.2- Bus à basse tension alternative	7
Figure I.3- Convertisseur de type forward alimentant le bus continu	8
Figure I.4- Structure avec un convertisseur de type fly-back	8
Figure I.5- Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé.....	9
Figure I.6- Schéma de principe d'un hacheur série.....	10
Figure I.7- Schéma de principe d'un hacheur parallèle.....	11
Figure I.8- Schéma de principe d'un hacheur série – parallèle.....	11
Figure I.9- Schéma de principe cellules solaires	13
Figure II.1- Schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque	22
Figure II.2- Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire	23
Figure II.3- Schéma d'une cellule élémentaire	26
Figure II.4- Influences des résistances séries et shunts	27
Figure II.5- Courbe I(V) et P(V) pour différents éclairagements	27
Figure II.6- Influences de la température	28
Figure II.7- Association de α cellules solaires photovoltaïques en parallèle et β en série....	30
Figure II.8- Caractéristique de α cellules solaires photovoltaïques en parallèle et β en série.....	31
Figure II.9- Schéma bloc du modèle d'un générateur solaire photovoltaïque	31
Figure II.10- Puissance et courant d'un générateur solaire photovoltaïque en fonction de sa tension	32
Figure II.11- Schéma équivalent simplifié d'une cellule solaire photovoltaïque.....	32

Figure II.12- Schéma bloc du modèle de la cellule solaire photovoltaïque.....	33
Figure II.13- Courant et puissance d'une cellule solaire photovoltaïque en fonction de sa tension.....	33
Figure II.14- Chaîne de conversion photovoltaïque 2 kW crêtes	34
Figure II.15- Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque , Modèle 1 diode	35
Figure II.16- Schéma électrique équivalent d'un groupe de panneaux, modèle 1 diode	36
Figure II.17- caractéristique $I=f(v)$ et $P=f(v)$	38
Figure II.18- schéma électrique du modèle 2 diodes pour un groupe de panneaux.....	38
Figure II.19- Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge quelconque	40
Figure II.20- Le principe d'un contrôleur MPPT.....	41

Nomenclatures

I_d : Courant dans la diode en ampère

R_s : Résistance série en ohm

R_{sh} : Résistance shunt en ohm.

U_s : La tension moyenne de sortie

I_{cc} : La courant court circuit

T : Température de la jonction en K

n : Facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique

V_{co} : Tension de circuit ouvert

P_M : La puissance utile maximale

FF : Facteur de forme

α : Rapport cyclique

η : Le rendement est :

ψ : Flux lumineux

I_{sc} : Courant de court circuit de la cellule photovoltaïque à 25°C et 1000W/m².

E_s : Ensoleillement dans le plan des panneaux (W/m²) .

T_j : Température de jonction des cellules (°C).

I_{ph} : Photocourant en ampère.

q : Charge de l'électron $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ coulomb

k : Constante de Boltzmann $k = 1.381 \cdot 10^{-23} J/K$

n : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

Introduction Générale

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

Nos économies sont basées sur l'utilisation d'énergies fossiles telles que le charbon, pétrole et le gaz l'exploitation des réserves est en progression continue afin de répondre à une consommation toujours plus forte. Pourtant ces sources d'énergie ne sont pas illimitées, la prise de conscience que le pétrole sera bientôt une ressource rare et la perception d'un changement climatique nous oblige à définir une nouvelle stratégie énergétique valorisant les énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables constituent de nouvelles voies pour garantir l'avenir. Face à la déplétion, il faut exploiter ces nouvelles énergies qui sont disponibles et qui constituent une source illimitée. Ce n'est qu'après le premier choc pétrolier de 1973 que les énergies renouvelables sont revenues sur le devant de la scène; l'envolée du cours de pétrole remet alors l'énergie solaire au goût du jour. Mais la chute rapide de l'or noir coupe très vite à cet élan pour le solaire. L'idée s'impose, que l'on dispose, d'énergie fossile pour suffisamment longtemps, Hors les prévisions ne sont plus aussi optimistes et confirment la déplétion. Le nouveau regain d'intérêt pour ces énergies renouvelables est accéléré par les menaces du réchauffement climatique.

Le soleil envoie sur la terre l'équivalent de 78 milliards de réacteurs nucléaires et il ne peut donc qu'être intéressant de convertir cette énergie en chaleur en électricité. Le Soleil peut tout simplement permettre le chauffage de liquide de différentes compositions contenues dans des systèmes permettant aussi une circulation de ce fluide à l'intérieur même d'éléments domestiques tels que le chauffe-eau ou le plancher ce qui permet un chauffage uniforme dans toute la maison. Néanmoins, un tel chauffage n'est pas d'utilisation très répandue du fait qu'il dépend très fortement de l'ensoleillement en journée ce qui induit la présence d'une énergie en parallèle pour répondre au besoin de chauffage à toutes les saisons. Lorsque les photons (particules de lumière) frappent certains matériaux, ils délogent et mettent en mouvement des électrons, provoquant ainsi un courant électrique. Les cellules solaires (ou photopiles) sont constituées de silicium, qui est un élément très répandu dans la nature (28 % de l'écorce terrestre), sous sa forme oxydée (silice).

Aussi pour obtenir la tension désirée (en volts), on monte de nombreuses cellules en série dans des panneaux rectangulaires dits 'modules photovoltaïques', eux-mêmes mis en série. Pour obtenir la puissance souhaitée (en kilowatts), on installe des séries en parallèle. D'autre part, le photovoltaïque est un domaine scientifique encore récent, doté d'un fort potentiel d'amélioration, en particulier en matière de rendement de conversion des cellules et les coûts de fabrication ne cessent de diminuer. Ainsi, l'utilisation de telles cellules pour produire de l'électricité reste du niveau de l'innovation mais des solutions alternatives font l'objet d'étude ou sont pour certaines déjà exploitées. Par exemple, il a été construit des centrales solaires constituées de miroirs afin de concentrer les rayons solaires en un point au niveau duquel est placée de l'eau qui va donc chauffer, permettre la production de vapeur et donc la rotation d'une turbine. Un autre projet (Projet d'une héliocentrale orbitale (Nasa)) consiste en une centrale solaire « spatiale » d'une puissance entre 5000 et 10 000 MW et d'un coût estimé à 60 milliards de dollars. Le rayonnement solaire serait recueilli par deux panneaux photovoltaïques de 3 km × 5 km, fournissant une tension continue de 20 000 volts.

L'effet photovoltaïque a été découvert par Antoine Becquerel en 1839, Einstein expliqua ce phénomène en 1912 (et obtint le prix Nobel de physique sur ses travaux en 1921). En 1954 trois chercheurs américains, Chalmers, Pearson et Prince des laboratoires BELL mirent au point la première cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement de 4%. D'abord une curiosité de laboratoire, les cellules photovoltaïques virent leur première application pour obtenir de l'énergie électrique pour un satellite Vanguard en 1958.

Une première maison alimentée par des cellules photovoltaïques fut construite par l'université de Delaware aux États-Unis en 1973.

En 1983, l'australien Hans Tholstrup construit le "Quiet Achiever", première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourant une distance de 4 000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en début de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

Le présent travail est composé de deux chapitres, le premier donne une généralité sur les systèmes solaires et le deuxième explique la modélisation de la chaîne de production photovoltaïque.

CHAPITRE I

Généralités

Sur Les Systèmes Solaires

I.1 Introduction

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année.

Le solaire photovoltaïque (PV) est une source intermittente d'électricité nécessitant un moyen de stockage ou une liaison avec le réseau électrique. Cette source est limitée actuellement par son coût 3-4 euros par watt crête (Wc), son relativement faible rendement (de l'ordre de 15 % en production), la relativement faible puissance électrique fournie ($P_c : \sim 1,5 \text{ MWc}$ par hectare, P moyen : 0,3 - 0,5 MW par hectare de panneaux solaires), et une énergie électrique annuelle disponible par unité de surface limitée, dépendant, bien sûr, de l'ensoleillement. Cette dernière limitation entraîne un coût d'exploitation élevé. Il est actuellement de 0,3 à 0,5 euros/kWh en se basant sur 25 ans de fonctionnement, ce qui est à comparer au prix de marché de l'énergie qui est de l'ordre de 0,15 euros/kWh. L'implantation des grandes centrales PV exige une surface très grande des terrains, ce qui rend les systèmes PV non compétitifs pour les grandes productions.

I.2. Généralités sur les systèmes solaires

La transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque est un des moyens d'exploitation du gisement solaire. Elle est réalisée par des cellules photovoltaïques (PV). Il est à noter qu'en début de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans une cellule, ni sous forme chimique ni sous aucune autre forme. Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule sous obscurité totale va se comporter comme un composant passif. La cellule solaire ne peut être assimilée à aucun autre générateur classique d'énergie électrique de type continu. Elle n'est ni une source de tension constante ni une source de courant constant. Elle possède des caractéristiques électriques non linéaires dépendant de l'éclairement.

Actuellement, le rendement de conversion d'énergie solaire en énergie électrique est encore faible (souvent inférieur à 12 %) et sous un ensoleillement nominal de 1000 W/m^2 , 12 m^2 de panneaux PV sont nécessaires pour fournir 1 kW crête. Ce qui induit un coût élevé du watt crête. Ce rendement faible ainsi que le coût élevé de la source photovoltaïque ont incité les utilisateurs à exploiter le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur PV. Ce maximum est généralement obtenu en assurant une bonne adaptation entre le générateur PV et le récepteur associé. Cette adaptation est effectuée à l'aide de convertisseurs statiques contrôlés pour différents modes de fonctionnement. Dans ce chapitre, le principe de la production photovoltaïque sera rappelé et les principales caractéristiques de la source photovoltaïque. Puis, les différents types de systèmes photovoltaïques seront présentés[1]. et en finissent par les avantages et inconvénients des installations PV.

I.2.1 Définition du système solaire

Le système solaire est un système constitué d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie solaire reçue, directement [2,3] ou indirectement [4] en énergie électrique.

Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants:

- un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement).
- une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie).
- un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire.
- un convertisseur DC/AC.
- une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

I.2.2 Les différents types de systèmes photovoltaïques

Il existe deux types de structures de système photovoltaïques :

- Les systèmes à connexion directe au réseau. cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est connecté à l'aide d'un onduleur au réseau électrique. Il existe dans la littérature de nombreux exemples.
- Le système à bus continu intermédiaire , Le générateur photovoltaïque est connecté à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur continu continu. Un onduleur délivre une tension modulée.

Dans la suite de cette partie, différents montages seront décrits, en précisant leurs avantages et leurs inconvénients.

I.2.2.1 Système PV connecté directement au réseau :

I.2.2.1.1 Structure à convertisseur unique :

Le dispositif présenté à la figure (I.1) est le plus simple, car il comporte le moins de composants possible. On associe plusieurs modules photovoltaïques en série pour obtenir une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternative à un hacheur élévateur de tension. La tension continue obtenue alimente directement un onduleur central, qui fournit la tension sinusoïdale désirée (230 V). Il pourrait être avantageux d'insérer un transformateur pour isoler le système photovoltaïque du réseau. L'inconvénient majeur de ce dispositif est l'arrêt total et immédiat de la production d'énergie lors d'un problème survenant en amont de l'onduleur. De plus le contrôle du point de maximum de puissance est approximatif car toutes les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différences de structure interne et d'ensoleillement.

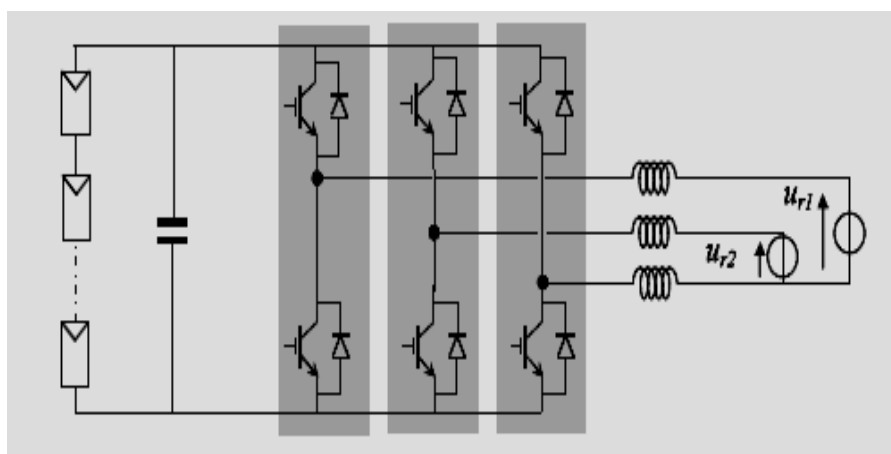


Fig I.1 Plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur

I.2.2.1.2 Structure avec bus à basse tension alternative :

La figure (I.2) montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connecté au module photovoltaïque. La tension en sortie de ce dernier est transformée en une tension alternative de fréquence 50 Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif (20 V - 50 Hz, exemple du schéma) vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré. Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, puisqu'il assure la sécurité du personnel. Cependant, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant important qui traverse les câbles et qui génère des pertes Joules. Il y a un compromis à faire au niveau de la tension du bus alternatif. D'une part, il faut que sa valeur crête soit inférieure à celle délivrée par le module (même avec un faible ensoleillement). D'autre part, une tension faible dans ce bus diminue le rendement.

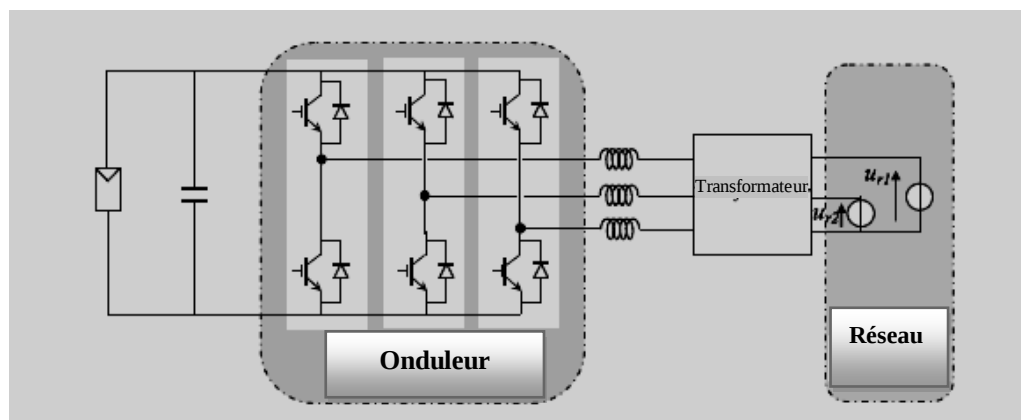


Fig I.2 Bus à basse tension alternative

I.2.2.2 Système à bus continu intermédiaire :

I.2.2.2.1 Structure avec convertisseur forward :

La figure (I.3) présente un convertisseur forward qui est capable d'augmenter la tension en sortie du module photovoltaïque jusqu'à 350 V (tension désirée). L'utilisation d'un transformateur pour la connexion au réseau n'est donc plus nécessaire, la conversion continu-alternatif se fait de façon relativement simple, grâce à un onduleur centralisé. Les inconvénients majeurs de ce montage sont :

- La capacité doit être relativement importante, à cause des ondulations du courant en sortie du module.
- Le bus continu supportera un signal en créneaux qui induira une grande émission d'ondes électromagnétiques et éventuellement des pertes de fuite; l'induction du transformateur compris dans le convertisseur générera des pertes de fuite.

- La tension élevée qui traverse le bus continu réduit la sécurité du personnel d'entretien.

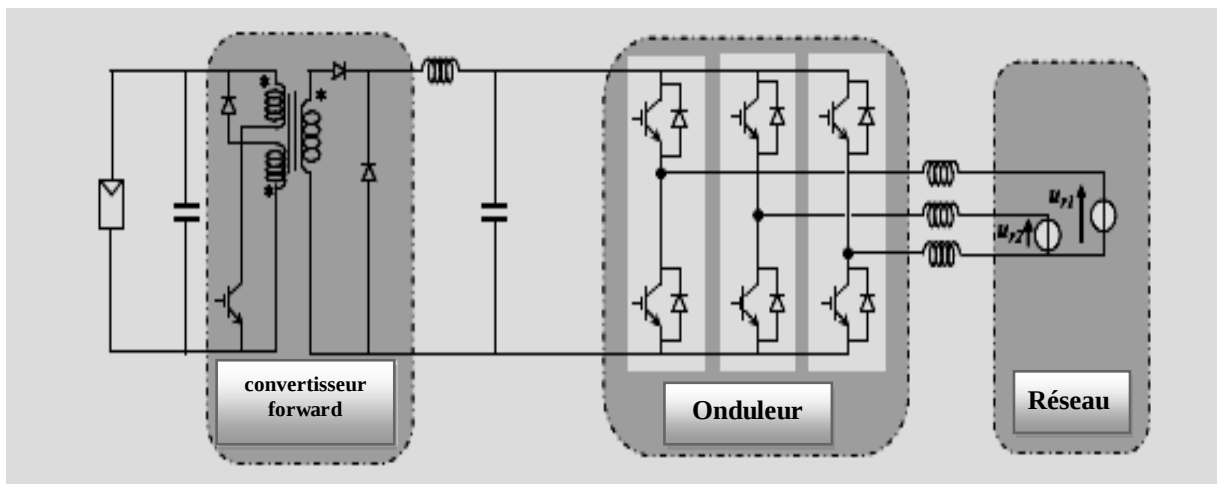


Fig I.3 Convertisseur de type forward alimentant le bus continu

I.2.2.2 Structure avec un convertisseur de type fly-back :

La figure (I.4) montre une structure à base d'un convertisseur de type fly-back qui élève la tension de sortie du module photovoltaïque au niveau de tension désiré. La caractéristique principale du fly-back se situe au niveau du transformateur qui agit comme l'inducteur principal et qui assure l'isolation galvanique. Le hacheur est contrôlé pour obtenir un maximum d'énergie du module photovoltaïque et l'onduleur assure une tension constante V_{ac} et le transfert de puissance vers le réseau. L'inconvénient du transformateur est qu'il génère des pertes et qu'il augmente le coût de l'installation.

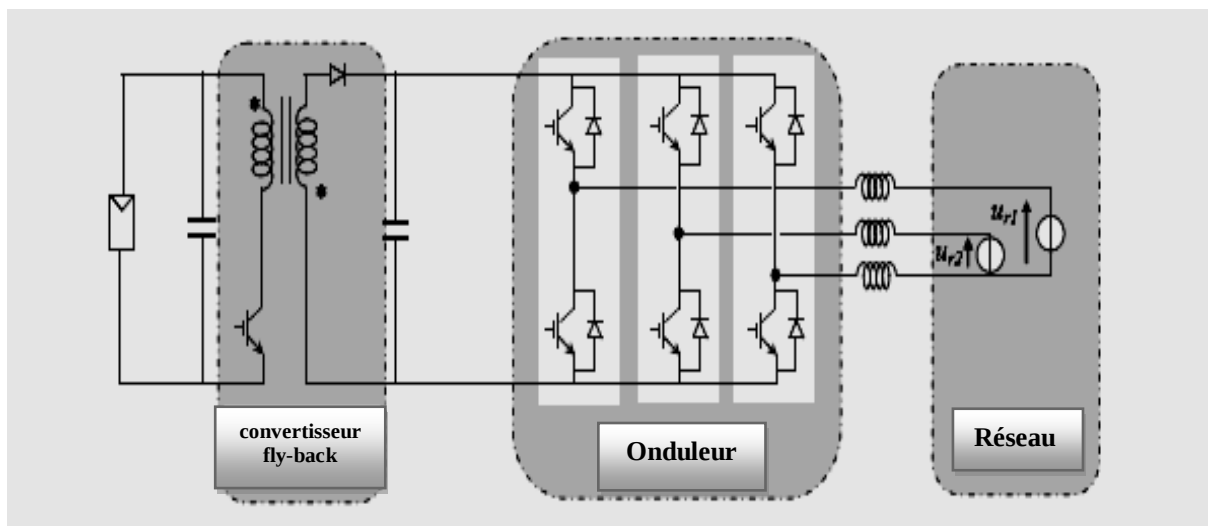


Fig I.4 Structure avec un convertisseur de type fly-back

I.2.2.2.3 Structure avec hacheur et onduleur :

La figure (I.5) représente un hacheur qui élève la tension en sortie du module photovoltaïque en une tension de 100 V délivrée sur le bus continu. Avec le hacheur, il est difficile d'élever la tension de sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On adjoint un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale, puis un transformateur pour élever cette tension au niveau désiré (selon le réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie production et la partie utilisation. L'avantage de ce système est que des batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome.

Le courant d'entrée est relativement lisse, c'est pour cela que la capacité peut être faible.

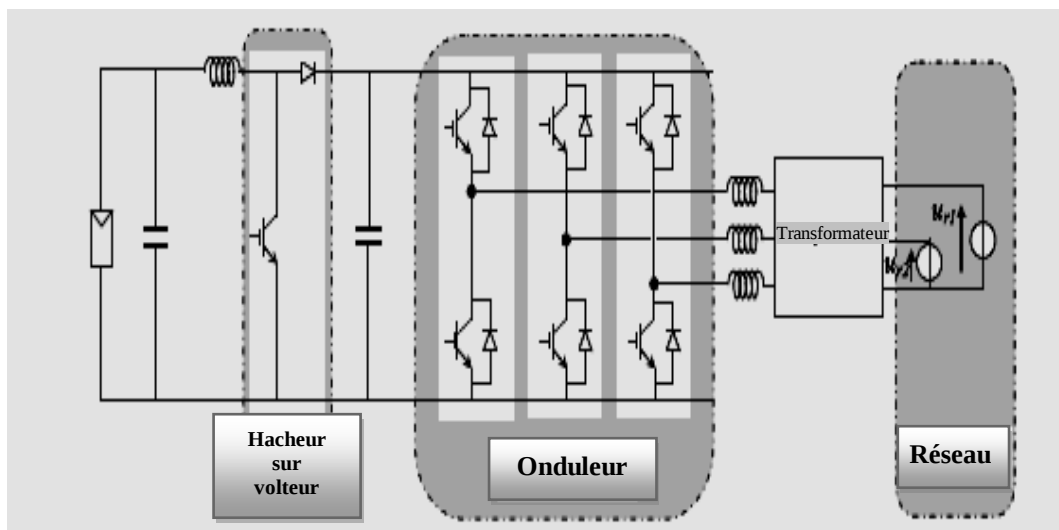


Fig I.5 Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé

I.2.3 Les principaux composants d'un système solaire photovoltaïque :

Un système solaire photovoltaïque est généralement constitué de trois ou quatre éléments Principaux [5, 6] .

I.2.3.1 Le générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque, qui représente l'outil de conversion de l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en courant continu. Il est composé d'un ensemble des panneaux. Le panneau est constitué de plusieurs modules (structurés en série ou en parallèle ou hybride). Le module contient des rangées de cellules (structurées en série ou en parallèle ou hybride) et généralement des cellules à base de silicium.

I.2.3.2 Le stockeur d'énergie :

Le stockeur d'énergie (batterie ou accumulateur), qui a le rôle de stocker l'énergie émise par le générateur photovoltaïque et permet par la suite :

- un déphasage entre la production et la consommation (jour/nuit, mauvais temps)
- une puissance élevée, sur un temps court, compatible avec la production journalière, avec une puissance crête installée faible.

Il faut noter que le stockeur d'énergie n'est pas toujours parmi les composants d'un système solaires photovoltaïque, car il peut être indisponible et cela selon les besoins.

I.2.3.3 Le système de contrôle :

Le système de contrôle (régulateur), qui assure la sécurité et le bon fonctionnement de la batterie (en cas d'un système avec batterie), plus le fonctionnement optimal de tout le système photovoltaïque. Il est composé généralement d'un hacheur (dévolteur, survolteur ou les deux au même temps) et des jeux de contact. Les hacheurs ou les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Les convertisseurs statiques sont constitués de composants actifs et passifs sophistiqués et performants qui admettent cependant un certain nombre de limitations qui ne sont pas sans conséquence sur la synthèse des boucles de commande.

Ainsi, les pertes par commutation limitent la fréquence de commutation, la durée de vie des porteurs impose indirectement des butées de rapport cyclique. Il existe trois types d'hacheurs :

- Hacheur dévolteur (ou série)
- Hacheur survolteur (ou parallèle)
- Hacheur série – parallèle

❖ Hacheur dévolteur (ou série) :

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie U_s est inférieure à celle de l'entrée U_e . Pour un rapport cyclique α donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$U_s = \alpha \cdot U_e \quad (I.1)$$

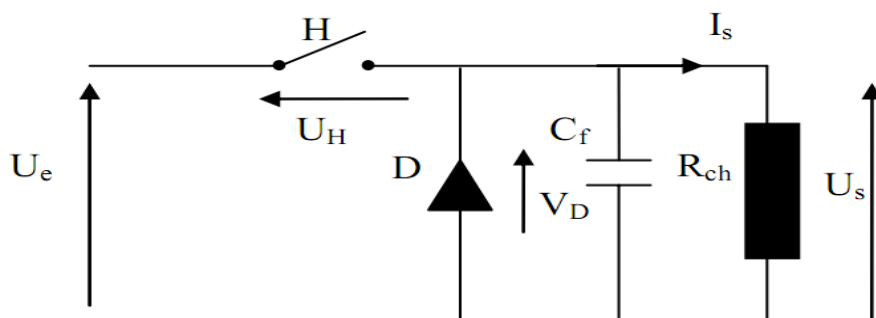


Fig I.6 Schéma de principe d'un hacheur série

❖ **Hacheur survolteur (ou parallèle) :** Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie U_s est supérieure à celle de l'entrée U_e . Pour un rapport cyclique α donné, et en régime de conduction continu la tension moyenne à la sortie est donnée par [7] :

$$U_s = 1 / (1 - \alpha) \cdot U_e \quad (I.2)$$

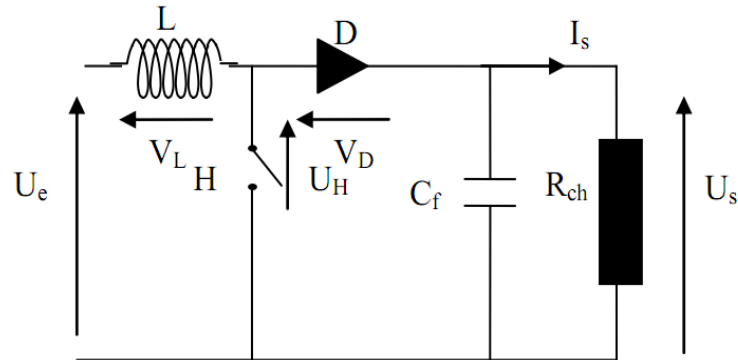


Fig I.7 Schéma de principe d'un hacheur parallèle

❖ **Hacheur série – parallèle :** Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie U_s est inférieure ou supérieure à celle de l'entrée U_e . Pour un rapport cyclique α donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$U_s = U_e \cdot \alpha / (1 - \alpha) \quad (I.3)$$

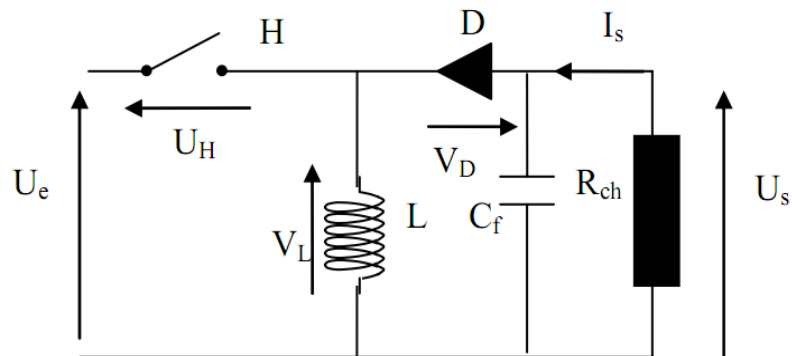


Fig I.8 Schéma de principe d'un hacheur série – parallèle

Le système d'interconnexion, qui relie le générateur photovoltaïque (producteur d'électricité) au consommateur (consommateur d'électricité). C'est un système simple (câbles seulement) ou composé (hacheur, onduleur ou les deux au même temps).

I.2.4 Le principe de fonctionnement d'un système solaire photovoltaïque :

La matière, qu'elle soit solide, liquide ou gazeuse se compose de molécules qui sont des groupements d'atomes. Conventionnellement on représente l'atome comme constitué d'électrons gravitant autour d'un noyau, comme le feraient des satellites autour d'une planète. Le noyau est constitué de protons et de neutrons. La charge électrique du neutron est nulle. Le proton a une charge positive égale en valeur absolue à celle de l'électron qui lui, est négatif. A son état normal un atome est électriquement neutre, le nombre d'électrons étant égal au nombre de protons.

Les électrons, de charge négative, sont répartis par couches. Chaque couche ne peut comporter qu'un nombre limité d'électrons. Par exemple la couche K qui est la plus proche du noyau est saturée avec 2 électrons. C'est sur la couche la plus à l'extérieur (couche de valence) que les électrons ont le moins d'attraction avec le noyau, ce qui permet les liaisons avec les atomes voisins autorisant la cohésion de

la matière. La couche de valence de la plupart des atomes n'est pas complète (sauf pour les gaz rares), elle peut ainsi accepter (provisoirement) des électrons, ou éventuellement en perdre. C'est le cas lors de l'ionisation d'un atome. La figure (1.9) représente dans un plan les 14 électrons d'un atome de silicium gravitant autour du noyau composé de 14 protons et 14 neutrons. Les atomes sont susceptibles de se charger électriquement en gagnant ou en perdant un ou plusieurs électrons : on parle alors d'ions. Si un atome gagne un ou plusieurs électrons, la charge de l'atome devient négative (anion), et s'il en perd, la charge de l'atome devient positive (cation).

Dans le cristal de silicium (un cristal est un solide formé d'atomes régulièrement disposés et fermement liés les uns aux autres), chaque atome est lié à 4 atomes voisins avec lesquels il partage les quatre électrons de sa couche M. La répartition étant régulière on peut considérer qu'un atome est au centre d'un tétraèdre et que ses 4 voisins sont placés au sommet de ce tétraèdre.

Les semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Le silicium est un semi-conducteur.

Conduction intrinsèque : Lorsque la température s'élève, sous l'effet de l'agitation thermique, des électrons réussissent à s'échapper et participent à la conduction. Ce sont les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau qui s'impliquent dans les liaisons covalentes. Dans le cristal, ces électrons se situent sur des niveaux d'énergie appelée bande de valence. Les électrons qui peuvent participer à la conduction possèdent des niveaux d'énergie appartenant à la bande de conduction. Entre la bande de valence et la bande de conduction peut se situer une bande interdite. Pour franchir cette bande interdite l'électron doit acquérir

de l'énergie (thermique, photon...). Pour les isolants la bande interdite est quasi infranchissable, pour les conducteurs elle est inexistante. Les semi-conducteurs ont une bande interdite assez étroite.

L'atome qui a perdu un électron devient un ion positif et le trou ainsi formé peut participer à la formation d'un courant électrique en se déplaçant.. Si l'électron libre est capté par un atome, il y a recombinaison. Pour une température donnée, ionisation et recombinaison s'équilibrent ; la résistivité diminue quand la température augmente. Un semi-conducteur dont la conductivité ne doit rien à des impuretés est dit intrinsèque. En revanche, le fait de rajouter des impuretés (dopage), la conductivité du semi-conducteur est extrinsèque [8].

I.2.4.1 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par A. Becquerel en 1839 il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en explication pratique dans la réalisation d'une PV cellule en silicium.

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous

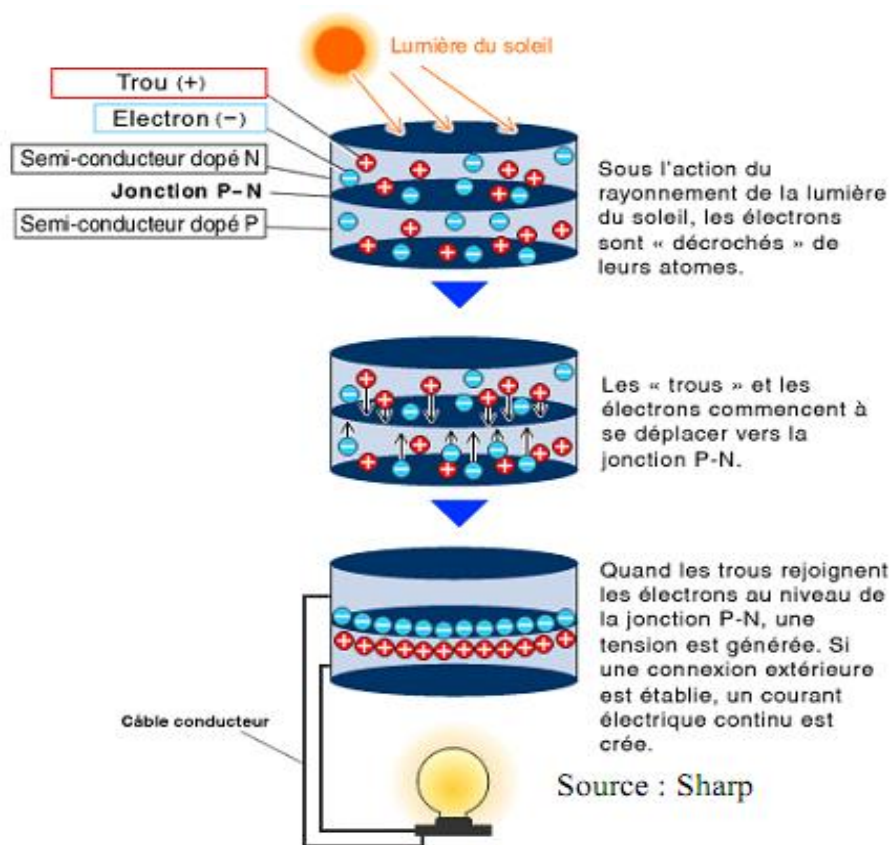


Fig I.9 Schéma de principe cellules solaires

l'effet de la lumière [9]. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p [10]. Une jonction PN a été formée.

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible [10] . Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

Les cellules les plus répandues actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0,6 V).

Le rendement des modules en fonction des différentes technologies fait apparaître des écarts importants qui sont décrits dans le tableau suivant :

technologie	Rendement typique(%)	Rendement maximum obtenir en laboratoire(%)
Mono-cristallin	12-15	24
Poly-cristalline	11-14	18.6
Couche mince: amorphe	6-7	12.7

Tableau I.1 Rendement des modules en fonction des différentes technologies

Une photopile fonctionne comme un générateur de courant dont la tension de fonctionnement dépend du courant absorbé par la charge qui lui est appliquée. Ces pertes de puissance électrique parviennent au niveau d'une cellule photovoltaïque et diminuent ainsi considérablement le rendement. Parmi les causes de ces pertes, on peut citer :

- La réflexion de la lumière sur la face avant de la photopile (40 % pour le Si poli, peut être réduit par des traitements appropriés).
- Le courant réel est inférieur au courant idéal à cause de la recombinaison des paires électron- trou sur les défauts (en particulier sur les impuretés) et des courants de fuite.
- Facteur de forme (ou facteur de courbe) dû aux courants de diffusion et de recombinaison à travers la jonction.
- Résistances série et shunt entraînant des pertes par effet joule.

I.2.4.2 Le silicium

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzeux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement. Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes (wafers). Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en éléments dopants (P, As, Sb ou B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N. La diffusion d'éléments dopants (bore, phosphore) modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes (wafers), ce qui les transforme en cellules sensibles à la lumière.

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de deux ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication . Les cellules monocristallines et poly cristallines sont fragiles. Elles sont donc placées entre deux plaques de verre (encapsulation) afin de former un module. Le matériau de base est le silicium qui est très abondant, mais la qualité nécessaire pour réaliser les cellules doit être d'une très grande pureté et son coût intervient de façon importante dans le coût de revient total.

I.2.4.3 technologies des cellules solaires:

Les technologies des cellules solaires se divisent en deux grandes familles:

I.2.4.3.1 La cellule cristalline (qu'il soit mono ou poly)

Est une technologie éprouvée et robuste (espérance de vie : 30 ans) ,dont le rendement est de L'ordre de 13%. Ces cellules sont adaptées des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. Elles représentent près de 80% de la production mondiale en 2000.

> La cellule monocristalline :

Sont des cellules qui s'approche le plus du modèle théorique ,elles est effectivement composée d'un seul cristal divise en deux couches.

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ,plus onéreux ,il est cependant plus efficace que la cellule poly-cristalline.

> la cellule poly-cristalline:

Ces cellules , grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées: elles représentent 49% de l'ensemble de la production mondiale en 2000. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication, leurs rendements est de 13% jusqu'à 20% en labo.

I.2.4.3.2 La cellule amorphe:

Les coûts de fabrication sont sensiblement meilleur marchés que ceux du silicium cristalline . Les cellules amorphes sont utilisées partout où une alternative économique est recherchée ,ou quand très peu d'électricité est nécessaire (par exemple , alimentation des montres, calculatrices, luminaires de secours) . Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir Cependant , le rendement est plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristalline et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée. Les cellules en silicium amorphe sont actuellement de moins en moins utilisées: 9,5% de la production mondiale en 2000, alors qu'elles représentaient 12% en 1999.

D'autres techniques semblent gagner du terrain aujourd'hui, ce sont les technologies en ruban et les couches minces.

I.2.5 Classification d'un système solaire photovoltaïque :

Le système solaire photovoltaïque peut être classifié selon l'autonomie en deux classes :

I.2.5.1 Le système photovoltaïque autonome : ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique sans l'aide d'aucune autre source électrique, et cela à l'aide des plusieurs composants mais les plus importants ces sont les batteries qui aident à emmagasiner de l'énergie électrique. Il faut mentionner que les batteries les plus utilisées dans le marché actuellement sont :

- Accumulateurs au plomb-acide : L'accumulateur au plomb-acide contient une plaque positive, ou cathode, faite d'oxyde de plomb (PbO_2), et une plaque négative, ou anode, faite de plomb. Ces plaques sont immergées dans un électrolyte, l'acide sulfurique dilué. Quand une charge est connectée entre les deux plaques, l'oxyde de plomb de la plaque cathodique et le plomb de la plaque anodique sont convertis en sulfate de plomb en réaction avec l'acide

sulfurique de l'électrolyte. Cette réaction amène un flux d'électrons entre les deux plaques au travers du circuit externe.

- **Accumulateurs au nickel-cadmium :** Les accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd) sont conçus pour les cas où l'on a besoin d'un dispositif de stockage d'énergie robuste et de longue durée, exigeant peu d'entretien. Le matériau actif de l'électrode positive (cathode) est une plaque d'oxi-hydroxyde de nickel (NiOOH) qui, pendant la décharge, accepte les électrons provenant du circuit externe et passe ainsi à une valence moindre. L'électrode négative (anode) est constituée d'une plaque de cadmium, et l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) à concentration variant entre 20% et 35%. La tension de l'accumulateur est nominale de 1,2 volt.

I.2.5.2 Le système photovoltaïque non autonome : ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec. L'énergie solaire convertie en énergie électrique plus l'aide d'autres sources d'énergie électrique. Il faut noter que les deux systèmes autonome et non autonome sont de même dimension .

I.2.6 Utilisation des systèmes solaires : sont utilisés particulièrement à :

- L'éclairage (autoroutes, arrêts d'autobus....) .
- Les communications (Stations de relais de téléphone, bornes d'appel d'urgences sur autoroutes téléphones mobiles,..)
- La fourniture d'électricité pour des sites éloignés du réseau normal [11] (Forêts montagnes, ..)
- Capteurs isolés (Infos météorologique, enregistrements sismiques, recherche scientifique,..)
- Pour de petites stations de pompage ou d'irrigation .
- Chargement des batteries de voitures (les batteries normales, ou de voitures électriques..)
- Protection contre la corrosion (car les pipes–lines et autres tuyaux enfouis sous terre ou dans l'eau perdent des ions et rouillent, on peut les protéger en appliquant une différence de potentiel donc un courant électrique).
- Evidemment l'utilisation de cellules photovoltaïques est plus efficace dans les régions très ensoleillées [12] , telles que les Etats-Unis ou les pays du sud en général, mais cela ne veut pas dire qu'on ne peut pas les utiliser dans le reste du monde.

I.2.7 Avantages et inconvénients d'une installation PV:

I.2.7.1 Avantages:

➤ **Sans carburant est gratuit :**

Le soleil est la seule ressource dont a besoin un panneau solaire. Et le soleil brillera jusqu'à la fin des temps. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à base de silicium, un matériau abondant et non toxique (deuxième matériau le plus abondant sur Terre).

➤ **L'énergie solaires photovoltaïques ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants :**

L'électricité solaire utilise seulement L'énergie du soleil comme carburant. Elle ne crée aucun co-produit nocif et contribue activement à réduire le réchauffement climatique.

➤ **Les système photovoltaïque sont très sûre et d'une grande fiabilité :**

L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans. Le photovoltaïque est donc une technologie fiable sur le long terme. De plus, la fiabilité des produits est garantie aux consommateurs.

➤ **Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, .. etc) peuvent être réutilisés :**

Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication.

➤ **L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance :**

Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer .

➤ **L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées :**

Les systèmes photovoltaïques apportent une valeur ajoutée aux zones rurales (en particulier dans les pays en développement où il n'y a pas de réseau électrique disponible).

➤ **L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments :** Les modules solaires peuvent couvrir toits et façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique.

➤ **l'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la consommation mondiale pendant une année [21]:** Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale.

I.2.7.2 inconvénients :

Le développement du photovoltaïques est rapide, mais représente encore peu de chose dans le bilan énergétique mondiale .

L'ensemble des modules existant actuellement produit autant d'énergie que 20% d'une tranche nucléaire. Ce n'est notamment pas une solution significative pour répondre immédiatement aux enjeux nationaux actuels .

- La fabrication du modules photovoltaïque relève de la haut technologie et requiert des investissements d'un coût élevé .

- Le rendement réel de conversion d'un module faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristalline est de 28%)

- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée .

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.

- Tributaire des condition météorologiques .

- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issu du générateur PV est unidirectionnelle et de fiable voltage ($<30\text{v}$) , elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.

I.3.conclusion

Ainsi, dans l'ensemble, l'énergie solaire est une source très utile d'énergie renouvelable, qui peut être la réponse à l'avenir pour le pouvoir, ou les besoins en énergie, comme le réchauffement climatique semble pour ramasser rapidement. Donc, nous pouvons tous contribuer à l'environnement en utilisant l'énergie solaire ainsi d'effacer ou de coupe vers le bas les émissions de gaz divers, qui peuvent mettre en danger la terre, à son tour, des millions de personnes à l'intérieur. Mais il ya quelques inconvénients, qui doivent être gardés à l'esprit aussi bien. Mais une chose est sûre, l'énergie solaire est peut-être une des plus anciennes et l'une des sources d'énergie les plus efficaces qui si elles sont utilisées avec précaution, peut nous aider avec insistance.

CHAPITRE II

Les Système Solaire Photovoltaïque Sans Batterie

II.1 Introduction

Une cellule solaire photovoltaïque est assimilable à une diode photo sensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Cette conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, s'effectue donc sans pièce mobile, sans fluide sous pression, sans pollution ni production de déchets. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque (Be querelle 1889). Quand une jonction PN ou une jonction métal-semi-conducteur (diode SCHOTTKY) est éclairée par des photons d'énergie supérieure à la valeur du gap E_g , des paires électron-trou sont générées et séparées sous l'influence du champ électrique interne qui règne dans la zone de transition, dite de charge d'espace. Expérimentalement, il est possible d'étudier cet effet de deux manières:

- a) Lorsque la jonction est utilisée sans polarisation extérieure, une différence de potentiel (ddp) apparaît à ses bornes. C'est le fonctionnement en photopile. Les paires électron-trou créées lors de l'illumination sont collectées dans la zone de charge d'espace, l'existence du champ électrique interne permettant de s'affranchir d'une source extérieure. Les convertisseurs photovoltaïques d'énergie solaire fonctionnent de cette façon.
- b) Lorsque la jonction est polarisée, son courant de saturation est modifié par l'apport de paires électron-trou. C'est le fonctionnement en photodiode.

Plusieurs cellules photovoltaïques sont connectées entre elles afin de fournir au récepteur extérieur une tension et une puissance adéquates. Ces ensembles de cellules sont ensuite encapsulés dans des modules étanches qui les préservent de l'humidité et des chocs. Le courant de sortie, et donc la puissance, sont généralement proportionnels à la surface du module.

L'extraction du maximum de puissance d'un générateur photovoltaïque, PV (ensemble de modules) est indispensable pour plusieurs causes (P_{max} pour un coût minect).

Dans ce deuxième chapitre, on va essayer de détailler le système solaire photovoltaïque sans batterie (générateur photovoltaïque) en plus de ses MPPT (Maximum Power Point Trekking).

II.2 Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque:

II.2.1 La caractéristique courant-tension :

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode [13]. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et R_{sh} comme le montre le schéma équivalent de la figure (II.1) [13, 14, 15]. La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts faces avant et arrière. La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule [16].

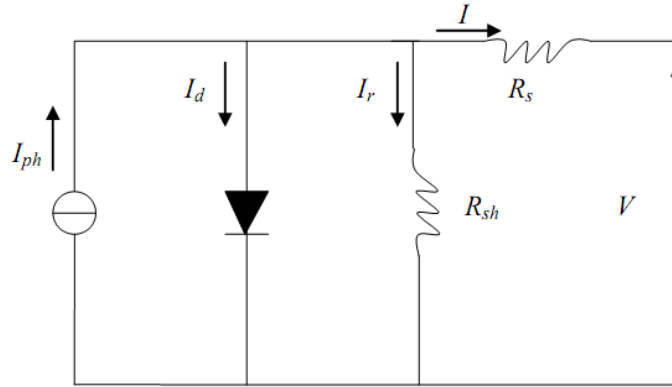


Fig II.1 Schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque.

Le courant de la photopile a pour expression [17, 18]:

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

avec :

❖ $I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{\psi}{1000} \right)$: Photo-courant de cellule, proportionnel à l'éclairement ψ .

Ce courant correspond également au courant court circuit I_{cc} .

❖ $I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right)$: est le courant traversant la diode. On peut faire apparaître le

potentiel Thermodynamique $V_T = \frac{nkT}{q}$.

I_0 : le courant de saturation inverse de la diode .

q : charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

k : constante de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$).

n : facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique .

T : température de la jonction en K) .

❖ $I_r = \frac{V+R_s I}{R_{sh}}$ est le courant dérivé par la résistance shunt.

A partir de ces différentes équations, on peut en tirer l'expression implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque ainsi que sa caractéristique courant-tension .

$$I = I_{sc} \left(\frac{\psi}{1000} \right) - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.2})$$

retrouver l'allure des caractéristiques courant – tension $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire à la figure (II.2)

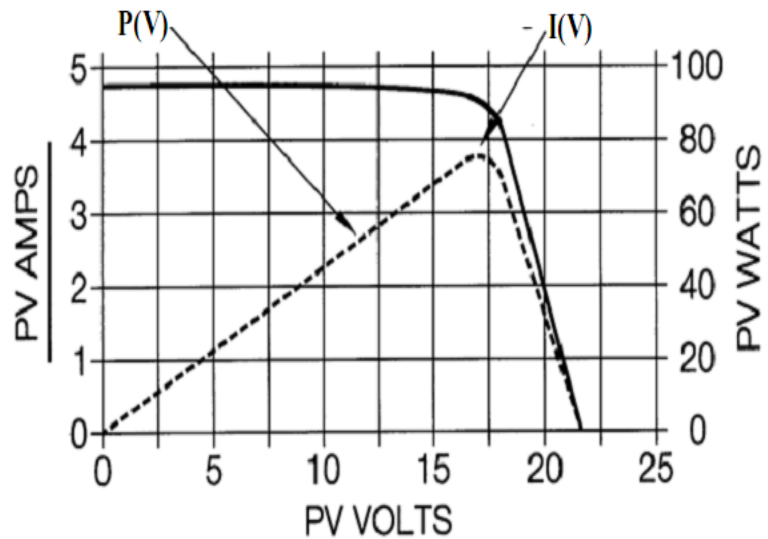


Fig II.2 Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire [19]

II.2.2 Paramètres externes d'une cellule solaire photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant– tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [15,20] :

- **Courant de court circuit** : c'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infini), ce courant se confond avec le photo courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.2), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{R_s I_{cc}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} . \text{ Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est}$$

faible), on peut négliger le terme $I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_S I)}{nkT}} - 1 \right)$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_S}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{II.3})$$

- **Tension de circuit ouvert** : c'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque). $0 = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{co}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}}$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à : $V_{co} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right)$ (II.4)

- **Puissance optimale et facteur de forme** : la puissance utile maximale $P_M = V_M I_M$ s'obtient en optimisant le produit courant tension, soit : $\frac{I_M}{V_M} = - \left(\frac{dI}{dV} \right) M$ (II.5)

Quant au facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (full factor), il est défini par :

$$FF = \left(\frac{V_M I_M}{V_{co} I_{cc}} \right) \quad (\text{II.6})$$

Ce facteur montre la déviation de la courbe courant – tension par rapport à un rectangle (de longueur V_{co} et largeur I_{cc}) qui correspond à la photopile idéale. Les valeurs de $I_M V_M$ s'obtiennent à partir des équations (II.2) et (II.5). Pour cela, on distingue deux cas :

- Si R_{sh} est infinie la dérivation mène à la résolution de l'équation non linéaire en I_M , et permet donc le calcul de V_M .
- Si R_{sh} est considérée finie, la dérivation mène à la résolution d'une équation non linéaire en V_M . La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts-crête. Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de 1000 W/m^2 et à une température de 25°C .

- Le rendement :

Différentes technologies de cellules photovoltaïques sont aujourd'hui utilisées. Elles reposent toutes sur les propriétés photo-électriques des matériaux semi-conducteurs. Afin d'avoir une vision globale de ces technologies du point de vue de l'évolution de leur rendement en fonction des améliorations apportées, Le choix d'une technologie relève d'un

compromis entre rendement énergétique, encombrement associé et coût. Il est possible de distinguer plusieurs grandes familles de cellules PV selon les technologies utilisées :

- **La filière Silicium** : Actuellement c'est la plus utilisée et ce dès les années 50. Elle offre, à l'heure actuelle, l'un des meilleurs compromis rendement énergétique / coût. On peut distinguer diverses technologies de modules selon la synthèse du matériau silicium.
- **Le silicium mono-cristallin** : Le silicium sous cette forme présente une très grande pureté. Si le cristal est obtenu par la méthode dite de Czochralsky, la structure cristalline est parfaite. Pour arriver à ce résultat, la fabrication est complexe et coûteuse en énergie. Les rendements de conversion obtenus sont parmi les meilleurs par rapport à la filière silicium.
- **Le silicium polycristallin** : La pureté du réseau cristallin est moindre que précédemment. Les rendements de conversion alors obtenus sont plus faibles mais le coût de fabrication de ces cellules est moins élevé.
- **Les filières dites « Couches Minces »** : Ces technologies reposent sur des matériaux possédant un fort coefficient d'absorption du spectre solaire, par exemple :
 - Le silicium Amorphe (a-Si) : L'utilisation de silicium à l'état amorphe remonte au début des années 70. Son utilisation en couches minces limitant les coûts forme actuellement des générateurs à moindre coût concurrençant les filières précédentes.
 - Le Tellure de Cadmium (CdTe) : Le rendement de conversion obtenu pour cette filière est nettement plus satisfaisant. Cependant la limite principale au déploiement de grande ampleur de cette technologie reste la toxicité du cadmium.
 - Le Cuivre Indium Sélénium (CIS) : Cette filière plus complexe à maîtriser présente un fort potentiel de développement dans le futur (jusqu'à 20% de rendement en laboratoire). Cependant, les matériaux nécessaires à la fabrication de ce type de cellule ne sont pas disponibles en grande quantité.

D'autres technologies prometteuses comme les matériaux organiques, les matériaux nanocristallins ou les structures multi-jonctions laissent présager d'excellentes performances futures et sont aujourd'hui au stade de la recherche.

la puissance $P = V I$ est nulle en court-circuit et en circuit-ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique $I - V$. Ce maximum P_M peut être déterminé en portant sur la même graphique la caractéristique $I - V$ et les hyperboles de puissance constante. Le point de fonctionnement optimal correspond au point de tangence des deux courbes comme le montre la figure (II.4).

Le rendement est :
$$\eta = \frac{P_M}{P_0} \quad (\text{II.7})$$

Avec P_0 est la puissance incidente. Elle est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. La droite passant par l'origine et le point de puissance maximale a une pente qui correspond à la charge optimale de la photopile comme le montre la figure (II.3)

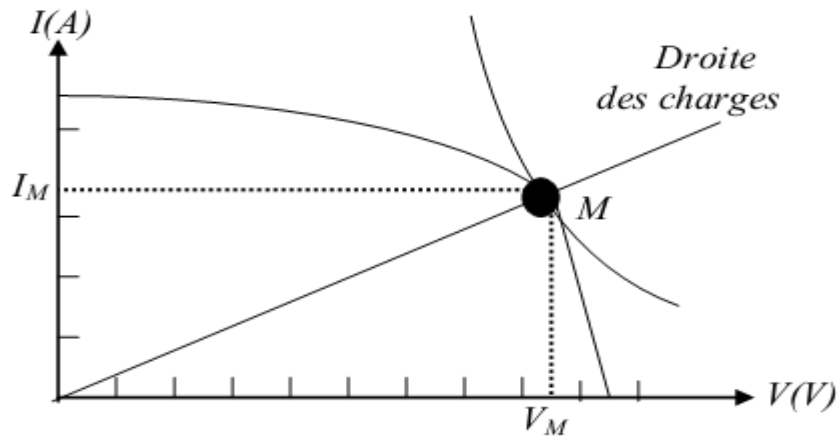


Fig II.3 Schéma d'une cellule élémentaire

II.2.3 Influence des résistances série et shunt :

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible [15]. La figure (II.4.a) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule. La courbe en pointillés correspond à une valeur non nulle de R_s . Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe $I = f(V)$ dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension (à droite du point M de la figure (II.3)). La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule. Quant à la résistance shunt, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs de courant. La figure (II.4.b) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant (à gauche du point M de la figure (II.3)). Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée.

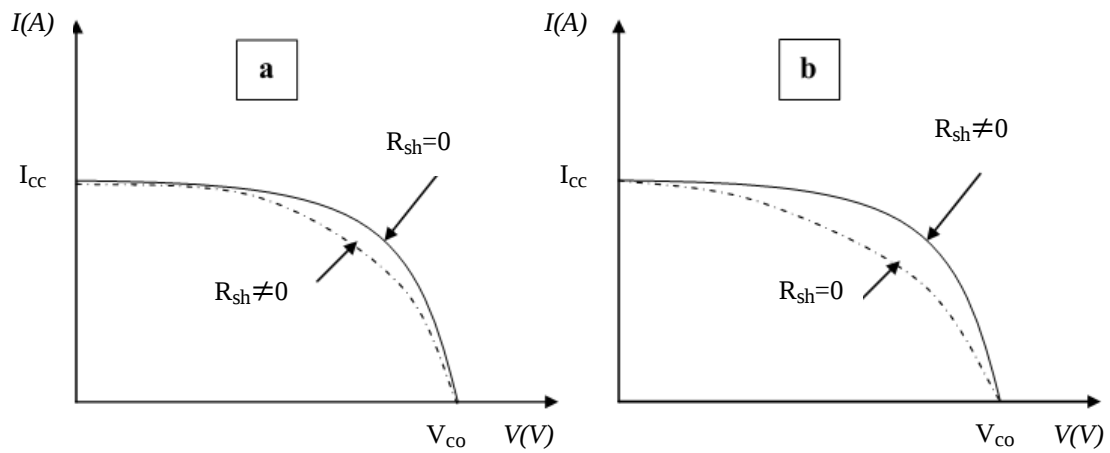


Fig II.4 Influences des résistances séries et shunts.

II.2.4 L'influence de l'éclairement :

Le Photo-courant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou au flux lumineux ψ . Le courant $I_d(V_d)$, étant par définition le courant direct de la jonction sous obscurité, et normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous une faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charges et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement. Le Photo-courant créé dans une cellule solaire photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface S de la jonction soumise au rayonnement solaire ; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée. La figure (II.5) représente les caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque (jonction p-n sur du silicium monocristallin de 57mm de diamètre) à 28°C et sous diverses valeurs de l'éclairement ψ [15].

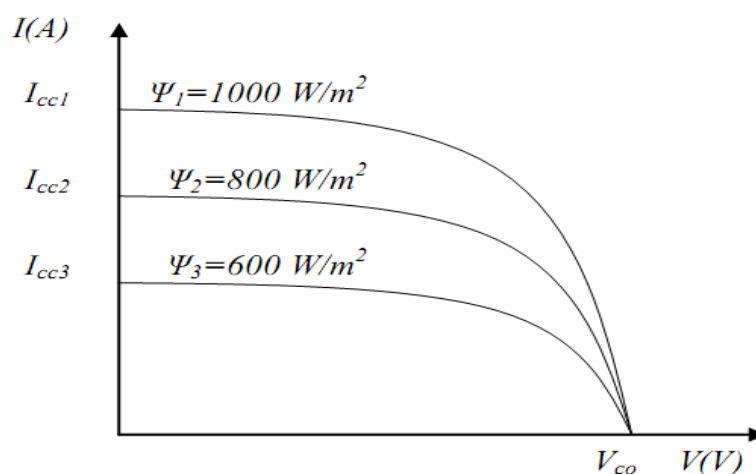


Fig II.5 courbe $I(V)$ et $P(V)$ pour différents éclairements

A chacune de ces valeurs de flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule solaire. Notons aussi la légère diminution de la tension V_{cd} du circuit ouvert suite à une chute du flux lumineux.

II.2.5 L'influence de la température :

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de la jonction au niveau de la surface exposée. Le comportement de la cellule PV en fonction de la température est complexe figure (II.6). Les courbes suivantes représentent l'évolution du courant et de la tension en fonction de la température de jonction de la cellule, les autres conditions extérieures restant fixes :

Lorsque la température [15] augmente, la tension diminue alors que le courant augmente. Dans le cas de cellules au silicium, le courant augmente d'environ $0.025 \text{ mA/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ alors que la tension décroît de $2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. La baisse globale de puissance est d'environ de 0,4% par degré°C. Ainsi, plus la température augmente et moins la cellule est performante.

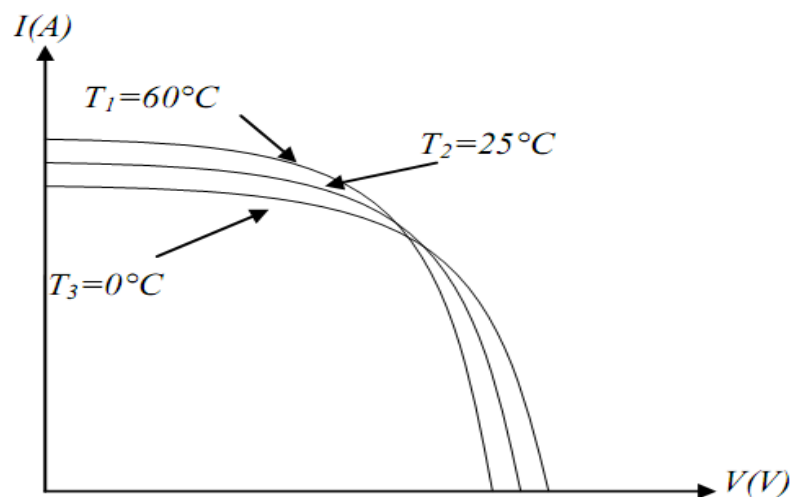


Fig II.6 Influences de la température

Avec l'augmentation de la température, le courant de court-circuit de la cellule augmente, tandis que la tension du circuit ouvert diminue. L'effet de la température sur la puissance est quantitativement évalué en examinant les effets sur le courant et la tension séparément. Soit I_0 et V_0 respectivement le courant de court circuit et la tension du circuit ouvert à la température de référence (25°C).

$$I_{sc} = I_0(1 + \alpha\Delta T) \quad \text{et} \quad V_{oc} = V_0(1 - \beta\Delta T) \quad (\text{II.8})$$

α et β représentent les coefficients de température.

Puisque le courant et la tension de fonctionnement changent approximativement dans la même proportion que la tension du circuit ouvert V_{co} et de courant de court-circuit I_{sc} , la nouvelle formule de puissance est comme suit : $P = V I = I_0(1 + \alpha\Delta T) \times V_0(1 - \beta\Delta T)$ Après simplification on obtient $P = P_0(1 + (\alpha - \beta)\Delta T)$; Pour les cellules typiques à silicium

$$\alpha - \beta \cong 0.0045 ; \text{ La puissance est donc } P = P_0[1 - 0.0045\Delta T] \quad (\text{II.9})$$

Cette expression indique que pour chaque élévation de la Température de fonctionnement au-dessus de la température de référence, la puissance de la cellule de silicium diminue de 0.45 pour cent. Puisque l'augmentation du courant est beaucoup moins dans la figure (II.6) la température faible est réellement meilleure pour la photovoltaïque, car elle développe plus de puissance. Cependant, les quatre valeurs P_{max} ne sont pas à la même tension. Afin d'extraire le maximum de puissance à toutes les températures, le générateur photovoltaïque nécessite la recherche de la MPPT.

II.3 Le générateur solaire photovoltaïque :

La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules (figure (II.7)) pour obtenir des modules de puissance compatible avec le matériel usuel. Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelques Watts-crête et quelques dizaines de Watts-crête ($1m^2$ de cellules PV produit de l'ordre de 100W) [15] Pour obtenir des puissances supérieures, il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules. La courbe de fonctionnement I-V d'un module de base est une courbe se déduisant de la courbe de fonctionnement d'une cellule élémentaire par changement d'échelle sur l'axe des abscisses. Une association série-parallèle de modules solaires aura de même une courbe de fonctionnement semblable à la cellule de base, obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes . Les performances d'un générateur photovoltaïque sont déterminées à partir de ces courbes . La connaissance du profil de ces courbes caractéristiques, pour une gamme d'éclairement la plus large possible, permet d'évaluer les puissances maximales délivrées ainsi que les rendements correspondants. Pour appliquer les caractéristiques courant– tension d'un groupement de cellules qui sera en tout point homothétique de la courbe $I = f(V)$ d'une seule cellule photovoltaïque caractéristique, quelques hypothèses sont nécessaires :

- Tous les panneaux ont les mêmes caractéristiques électriques.
- Aucune occultation partielle .

- Aucune influence thermique .

L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série de β cellules en série et α en parallèle est la suivante [15]:

$$I = \alpha I_{sc} \left(\frac{\psi}{1000} \right) - \alpha I_0 \left(e^{\frac{q(\beta V + \frac{\beta}{\alpha} R_s I)}{\beta n k T}} - 1 \right) - \frac{\beta V + \frac{\beta}{\alpha} R_s I}{\frac{\beta}{\alpha} R_{sh}} \quad (\text{II.10})$$

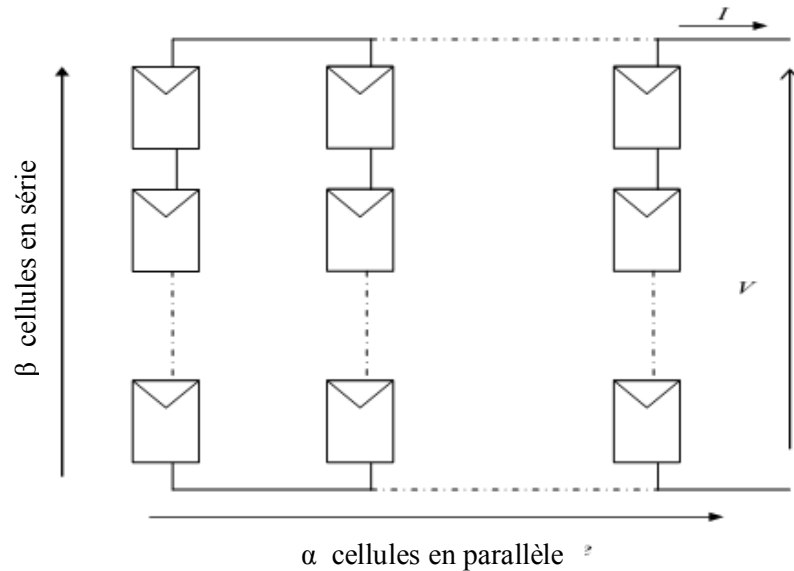


Fig II.7 Association de α cellules solaires photovoltaïques en parallèle et β en série.

La courbe de puissance d'un groupement série-parallèle est donc analogue à la courbe de puissance élémentaire. Ainsi tout ce qui a été dit pour une cellule élémentaire, concernant son comportement en fonction du flux lumineux et de la température ou l'influence des résistances série et parallèle, ou concernant son interaction avec la charge est directement transposable au cas du groupement. Le groupement des photopiles cité ci-dessus obéit à des règles strictes à respecter :

- Il ne faut connecter en série que des cellules ayant le même courant de court-circuit

$$I_{cc} \cong I_{ph}.$$

- Il ne faut connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension de circuit-ouvert V_{co} .

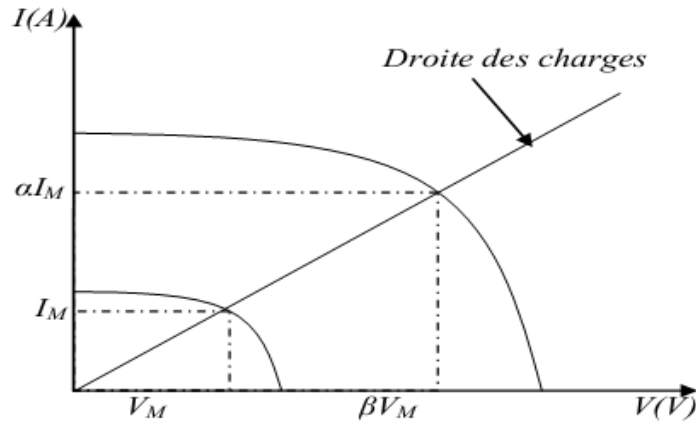


Fig II.8 Caractéristique de α cellules solaires photovoltaïques en parallèle et β en série.

Si les paramètres électriques des photopiles associées sont dispersés et si les règles précédentes ne sont pas respectées, certaines de ces photopiles vont se comporter en récepteur, en polarisation directe ou inverse ce qui entraîne une élévation de la température de ces photopiles et peut entraîner la détérioration du module entier. Pour éviter ce problème, on procède souvent à :

- un tri de cellules avant l'encapsulation des modules photovoltaïques.
- un emplacement des modules photovoltaïques évitant les masques naturels ou artificiels provoquant de l'ombre.
- une protection du réseau photovoltaïque par l'association de diodes.

II.3.1 Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque :

Pour α cellule en parallèle et β cellule en série on aura [14]: $I_G = \alpha \cdot I$ (II.11)

$$V_G = \beta \cdot V \quad (II.12)$$

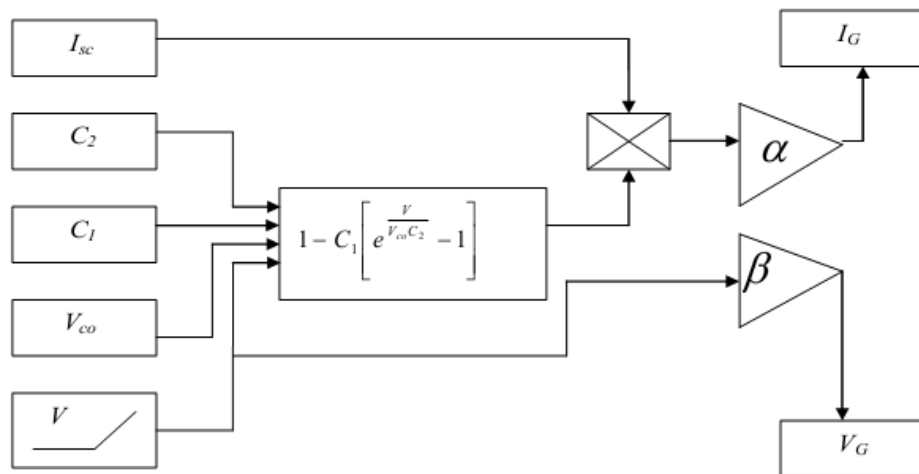


Fig II.9 Schéma bloc du modèle d'un générateur solaire photovoltaïque

Si on suppose que $a = 2$ et $\beta = 11$ on aura les résultats suivants :

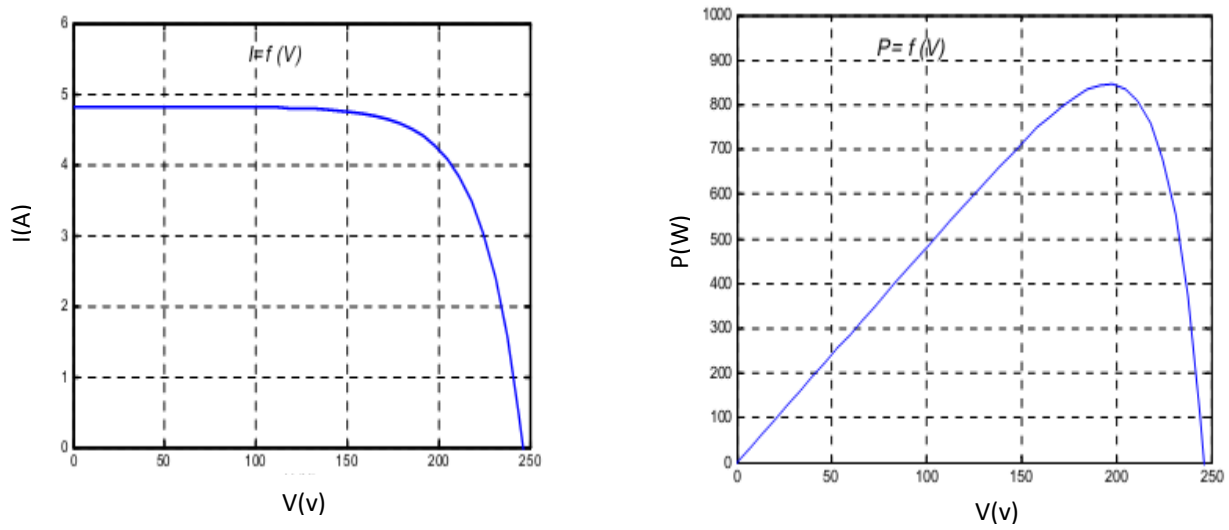


Fig II.10 Puissance et Courant d'un générateur solaire photovoltaïque en fonction de sa tension

II.3.2 Modélisation d'une cellule solaire photovoltaïque :

Selon [14,21], la résistance shunt peut être négligée puisque, habituellement, elle est très grande comparée à la résistance série en particulier pour les cellules monocristallines de silicium. On aura alors le modèle de la figure (II.11) [14].

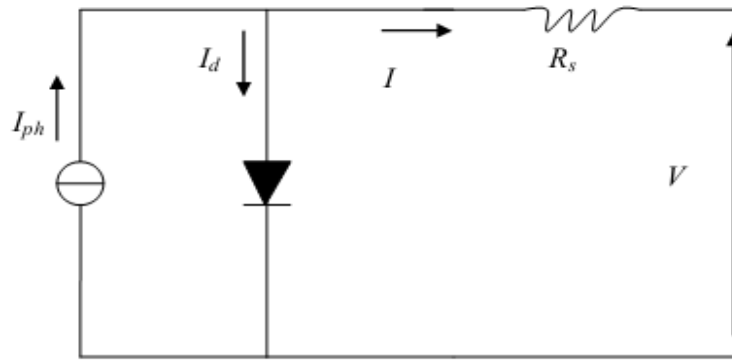


Fig II.11 Schéma équivalent simplifié d'une cellule solaire photovoltaïque.

L'équation (II.2) dévient :

$$I = I_{sc} \left(\frac{\psi}{1000} \right) - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right) \quad (\text{II.13})$$

Selon [14], on peut écrire :

$$I = I_{sc} \cdot \left\{ 1 - C_1 \cdot \left[e^{\left(\frac{V}{C_2 \cdot V_{co}} \right)} - 1 \right] \right\} \quad (\text{II.14})$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_M}{I_{sc}}\right) \cdot e^{\left(\frac{-V_M}{C_2 \cdot V_{co}}\right)} \quad (\text{II.15})$$

$$C_2 = \frac{\left(\frac{V_M}{V_{co}} - 1\right)}{\ln\left(1 - \frac{I_M}{I_{sc}}\right)} \quad (\text{II.16})$$

avec, I et V respectivement courant et tension de la cellule photovoltaïque.

I_M et V_M respectivement courant max et tension maximale que peut générer la cellule photovoltaïque sous 25°C et 1000W/m².

I_{sc} : courant de court circuit de la cellule photovoltaïque à 25°C et 1000W/m².

Le modèle d'un module solaire photovoltaïque peut être donné comme suit :

La Simulation avec MATLAB 7.10.0(R2010a) d'un module PV

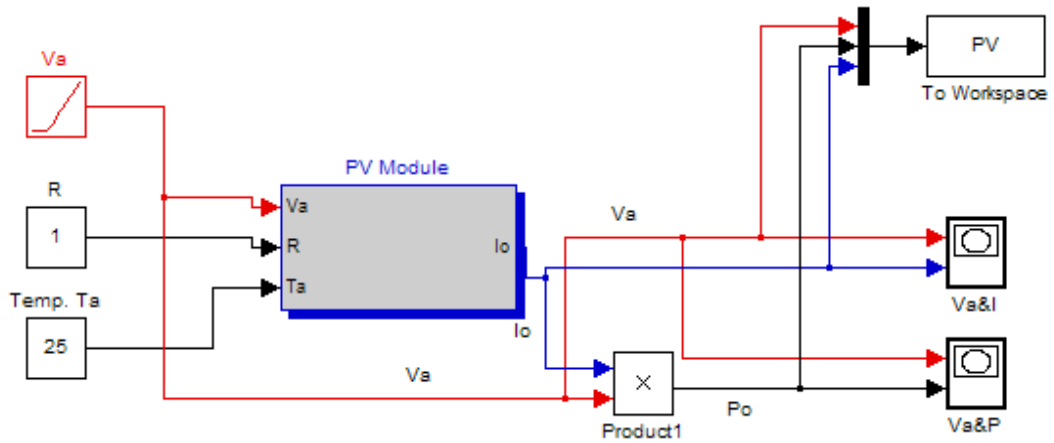


Figure II.12 Schéma bloc du modèle de module solaire photovoltaïque

Le résultat obtenu lors de la simulation sous MATLAB peut être représenté comme suit :

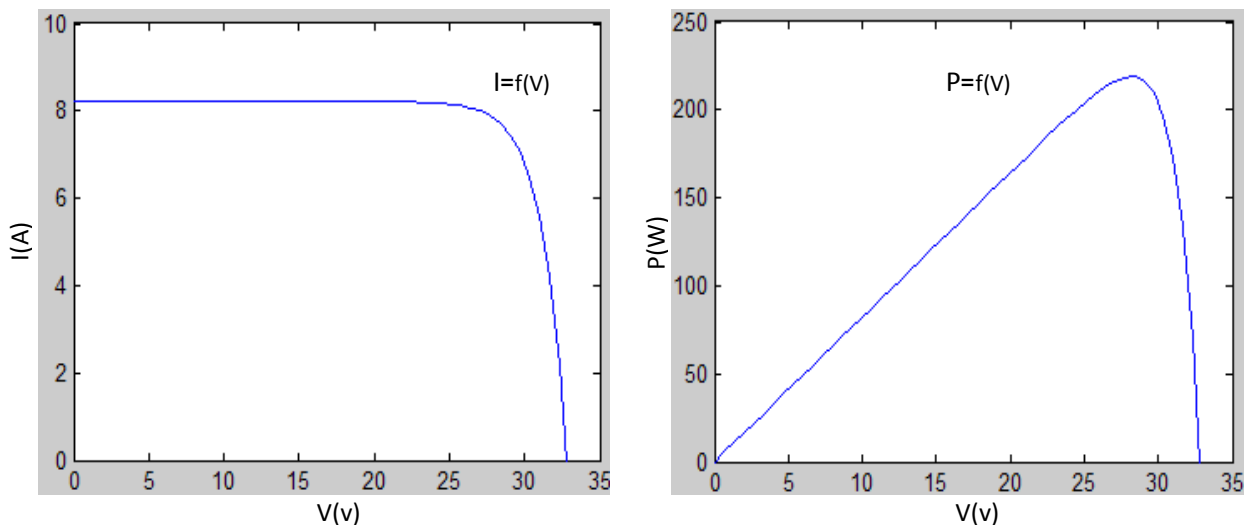


Fig II.13 Courant et puissance d'un module solaire photovoltaïque en fonction de sa tension.

II.4 Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque :

Nous nous intéressons dans cette partie à la chaîne de conversion photovoltaïque, en vue de l'estimation de sa production d'énergie.

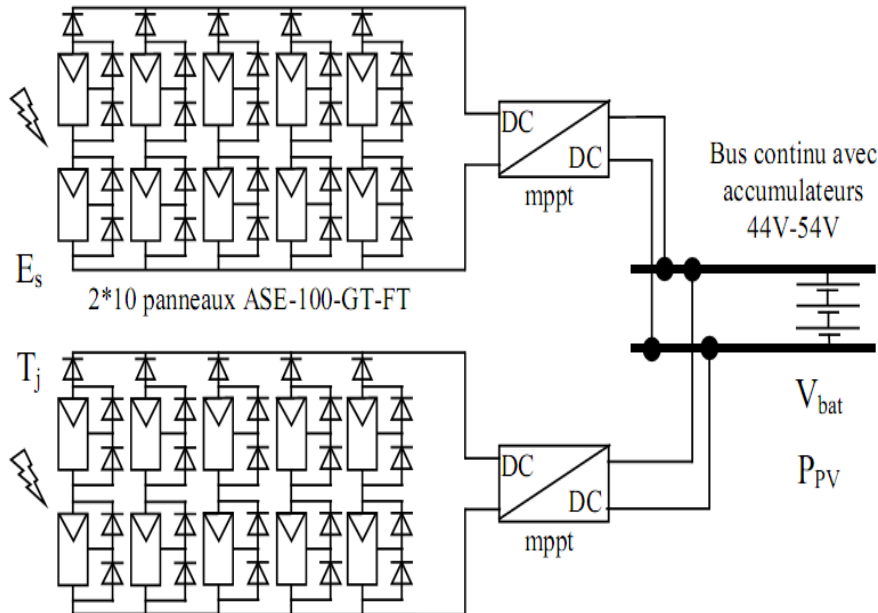


Fig II.14 Chaîne de conversion photovoltaïque 2 kW crêtes

La chaîne de conversion photovoltaïque est constituée comme indiqué à la figure (II 14) .

Le système est organisé en deux groupes de 10 p anneaux, chaque groupe débite dans le bus continu par l'intermédiaire d'un hacheur à commande à puissance maximale MPPT.

L'objectif est d'obtenir la caractéristique de la puissance fournie au bus continu, P_{PV} en fonction des conditions météorologiques et électriques, c'est-à-dire l'éclairement dans le plan des panneaux solaires E_s , leur température T_j , ainsi que le niveau de la tension du bus continu V_{bat} .

Dans un premier temps, nous déterminerons les caractéristiques de puissance de chaque groupe de panneaux. Nous avons utilisé et comparé différents modèles de la littérature. Puis, à partir de relevés expérimentaux , nous évaluerons la caractéristique des convertisseurs DC-DC à pilotage MPPT (MSTE MPT 1000K).

II.4.1 Modèles électriques des panneaux :

Nous souhaitons déterminer la puissance maximale que peuvent fournir chacun des deux groupes de panneaux pour un ensoleillement et une température données. Nous avons utilisé trois modèles différents.

Les deux premiers modèles présentés nous permettent de déterminer les caractéristiques tension/courant à partir desquelles nous pouvons déterminer la puissance maximale que peuvent fournir les groupes de panneaux pour des conditions météo données.

Le troisième modèle nous fournit directement la puissance maximale, théoriquement obtenue grâce au contrôle MPPT.

II.4.1.1 Modèle à une diode :

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

En considérant que la charge est résistive nous présentons le schéma du circuit électrique Figure (II.14) et le Bond graph correspondant figure (II.15).

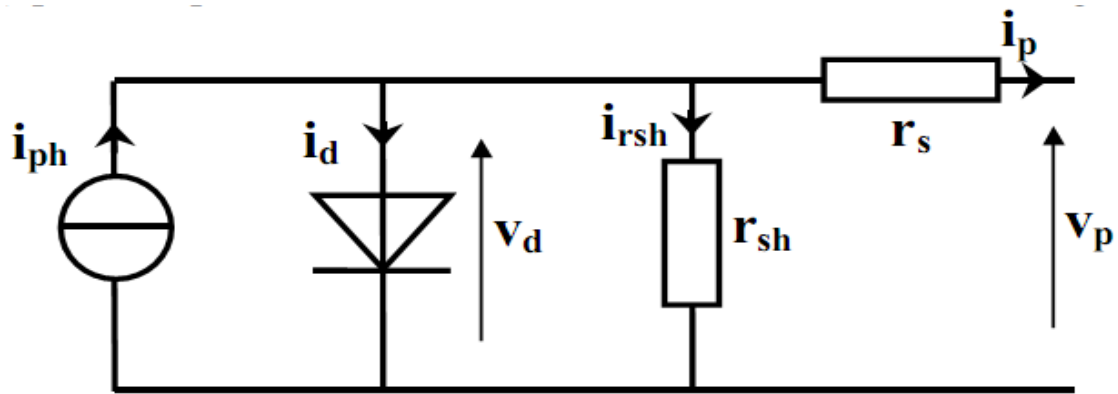


Fig II.15 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque, Modèle 1 diode

Chaque groupe de panneaux est une association série/parallèle de $n_s \cdot n_p$ cellules élémentaires, n_s étant le nombre de cellules en série sur une branche et n_p le nombre de branches en parallèles. Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le générateur photovoltaïque de la figure (II.16).

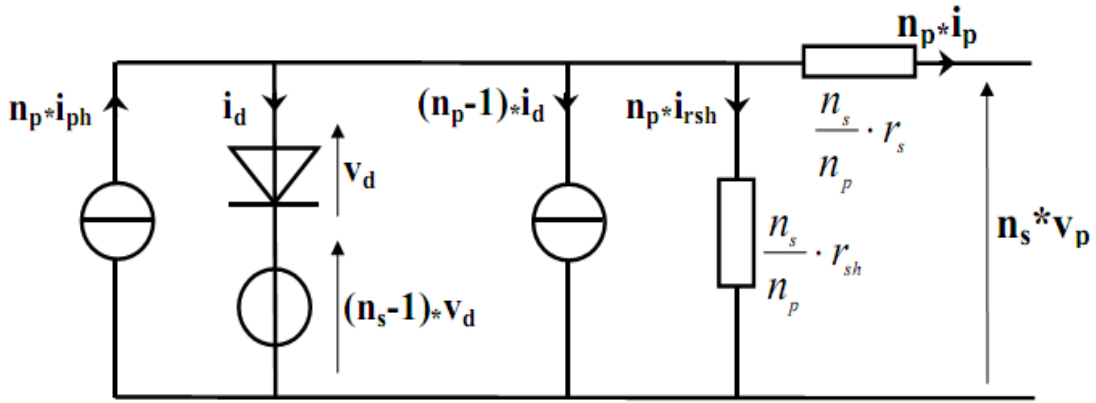


Fig II.16 Schéma électrique équivalent d'un groupe de panneaux, modèle 1 diode

Nous utiliserons dans ce qui suit les notations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ph} = n_p \cdot i_{ph} \\ I_G = n_p \cdot i_p \\ I_d = n_p \cdot i_d \\ I_{rsh} = n_p \cdot i_{rsh} \\ V_d = n_s \cdot v_d \\ V_G = n_s \cdot v_p \end{array} \right. \quad (II.17)$$

$$R_s = (n_s / n_p) \cdot r_s$$

$$R_{sh} = (n_s / n_p) \cdot r_{sh}$$

Ce modèle comporte quatre variables. Les deux variables d'entrées sont :

- E_s ensoleillement dans le plan des panneaux (W/m^2) .
- T_j température de jonction des cellules ($^{\circ}C$).

Les deux variables de sorties sont :

- courant fourni par le groupe de panneaux (A) .
- tension aux bornes du groupe (V).

Nous obtenons alors l'équation caractéristique pour un groupe de panneaux PV déduite du schéma électrique équivalent de la figure (II.14)

$$I_G = I_{ph} - I_d - I_{rsh}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(q \frac{(V+R_S I)}{nkT} \right)} - 1 \right] - \frac{(V+R_S I)}{R_{sh}} \quad (\text{II.18})$$

V, I Tension (V) et courant (A) de sortie du panneau.

I_{ph} : Photocourant en ampère.

I_d : Courant dans la diode en ampère.

R_s : Résistance série en ohm.

R_{sh} : Résistance shunt en ohm.

q : Charge de l'électron $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ coulomb

k : Constante de Boltzmann $k = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

n : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

L'équation de la caractéristique $I = f(V)$ (II.18). Est résolu par des méthodes d'itération simple généralement la méthode de newton raphson est choisie pour la convergence rapide de la réponse. La méthode de newton est décrite comme suit :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{II.19})$$

Ou $f'(x_n)$ représente la dérivé de la fonction $f(x_n)$

La réécriture de l'équation (II.19) donne la fonction suivante :

$$f(I) = I_{ph} - I - I_0 \left[e^{\left(q \frac{(V+R_S I)}{nkT} \right)} - 1 \right] = 0 \quad (\text{II.20})$$

L'application de la méthode de newton raphson donne l'équation récursive suivante, le courant de sortie I est calculé itérativement.

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_n - I_0 \left[e^{\left(q \frac{(V+R_S I_n)}{nkT} \right)} - 1 \right]}{-1 - \left(\frac{q}{nkT} \right) R_S I_0 e^{\left(q \frac{(V+R_S I_n)}{nkT} \right)}} \quad (\text{II.21})$$

simulation avec MATLAB l' Algorithme en question à été simulé sur MATLAB

7.10.0(R2010a) les résultats sont les suivant :

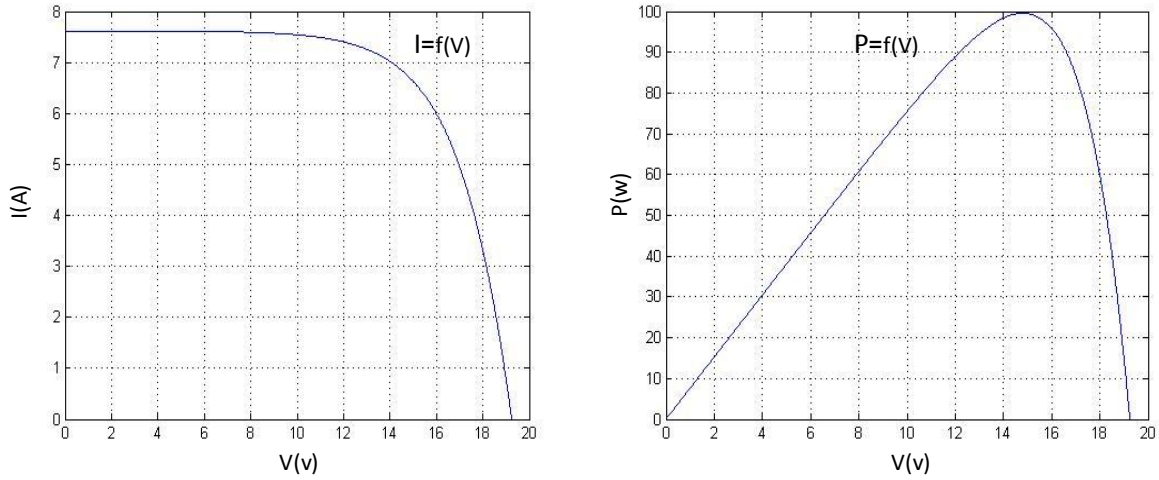


Fig II.17 a) caractéristique $I=f(V)$

b) caractéristique $P=f(V)$

II.4.1.2 Modèle deux diodes :

nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN . Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériaux et d'autre part dans le volume du matériau.

Le schéma du générateur photovoltaïque déviant dans ce cas celui de la figure (II.17):

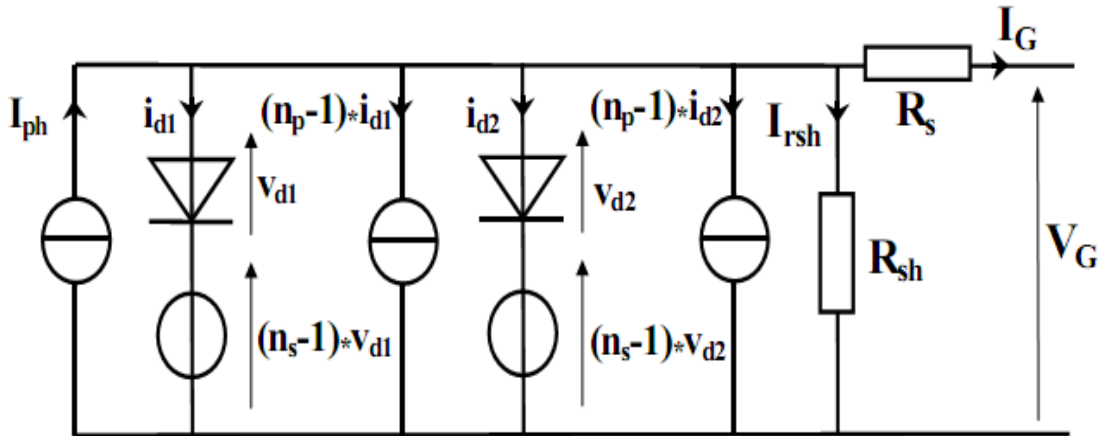


Fig II.18 schéma électrique du modèle 2 diodes pour un groupe de panneaux.

Nous avons :

$$I_G = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{rsh} \quad (II.22)$$

Avec I_{ph} et I_{sh} qui gardent les memes expressions que précédemment. Pour les courants de recombinaison, nous avons :

$$I_{d1} = I_{sat1} \cdot \left[e^{\left(\frac{q}{k.A.n_s.T_j} (V_G + R_s I_G) \right)} - 1 \right] \quad (II.23)$$

$$I_{d2} = I_{sat2} \cdot \left[e^{\left(\frac{q}{2.k.A.n_s.T_j} (V_G + R_s I_G) \right)} - 1 \right] \quad (II.24)$$

Les courants de saturation sont : $I_{sat1} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left(-\frac{E_g}{k.T_j} \right)}$ (II.25)

$$I_{sat2} = P_5 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left(-\frac{E_g}{2.k.T_j} \right)} \quad (II.26)$$

Nous pouvons alors écrire l'équation finale :

$$\begin{aligned} I_G = & P_1 \cdot E_s \cdot \left[1 + P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref}) \right] - \frac{V_G}{R_{th}} - \\ & P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k.T_j}\right) \left[\exp\left(\frac{q}{k.A.n_s.T_j} (V_G + R_s I_G)\right) - 1 \right] - \\ & P_5 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2.k.T_j}\right) \left[\exp\left(\frac{q}{2.k.A.n_s.T_j} (V_G + R_s I_G)\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (II.27)$$

avec 8 paramètres $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, A, R_s, R_{sh}$ a déterminer

II.4.1.3 Modèle polynomial:

La documentation constructeur nous fournit, pour la puissance maximale, P_{G_MAX} , la caractéristique suivante :

$$P_{G_MAX} = P_1 \cdot E_s \cdot \left(1 + P_2 \cdot (T_j - T_{jref}) \right) \quad (II.28)$$

avec:

- P_1 compris entre 0,95 et 1,05 (0,095 a 0,105 pour un panneau) représente la dispersion de caractéristiques des panneaux .
- $P_2 = -0,47\%/^{\circ}\text{C}$ est la dérive en température des panneaux.

Nous avons pu constater, de manière empirique, qu'en rajoutant un paramètre (P_3) à la caractéristique du fabricant, nous obtenons des résultats bien plus satisfaisants :

$$P_{G_MAX} = P_1 [1 + P_2 \cdot (T_j - T_{jref})] (P_3 + E_s) \quad (II.29)$$

Ce modèle simplifié nous permet de déterminer la puissance maximale fournie par un groupe de panneaux pour un ensoleillement et une température de panneaux données, avec seulement 3 paramètres constant déterminer, P_1 , P_2 et P_3 et une équation simple à résoudre.

II.5 Définition et principe de fonctionnement de l'Mppt d'un système solaire photovoltaïque:

L'MPPT d'un système solaire photovoltaïque peut être définie comme étant une commande qui fait varier le rapport cyclique d'un convertisseur statique de telle sorte que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque soit le P_{max} disponible à ses bornes [21,22].

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher la puissance maximale mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le point de puissance max en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du convertisseur statique (I et V) [13].

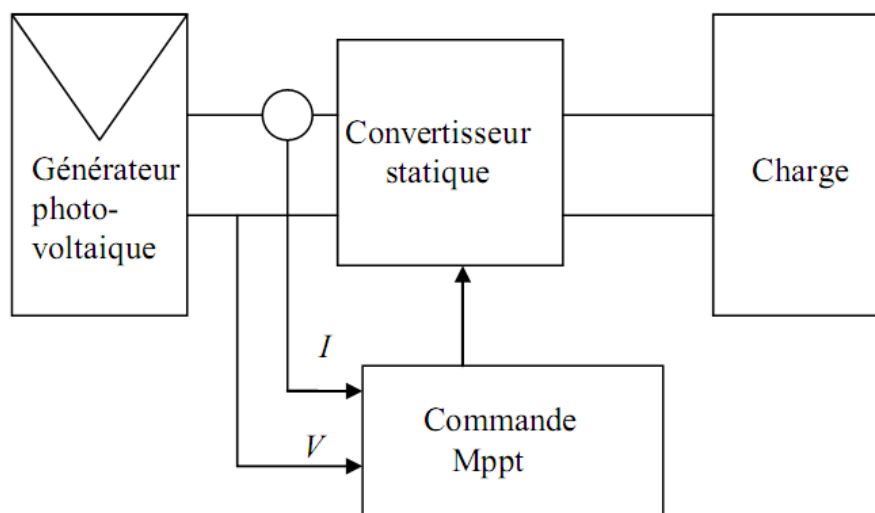


Fig II.19 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge quelconque

Le principe d'un contrôleur MPPT est souvent basé sur le « coude » de la caractéristique P-V [13]. C'est plus ou moins une méthode par tâtonnement, comme le montre la figure (II.23). On se place à un endroit de la courbe (X1), et l'on regarde si la valeur du point suivant est

supérieure ou non. Si oui, on se déplace au point suivant (X_2), jusqu'au moment où le terme suivant (X_n) sera inférieur au précédent (X_{n-1}). A ce moment, on prend un intervalle de valeur entre chaque point plus faible, et l'on recommence à partir de (X_{n-1}), jusqu'à obtenir le MPPT (X). Cependant, ce principe, facile à réaliser semble t-il dans ces conditions, devient moins accessible lorsque l'éclairement intervient. En effet, lorsque l'intensité de l'éclairement varie, on passe ici à une valeur $E_2 < E_1$, la caractéristique P-V change. Le point X , qui était jusqu'à présent le MPPT, se retrouve être un mauvais point de fonctionnement dans les nouvelles conditions, comme le montre la figure (II.23). On voit apparaître un nouveau point de fonctionnement ici appelé X' .

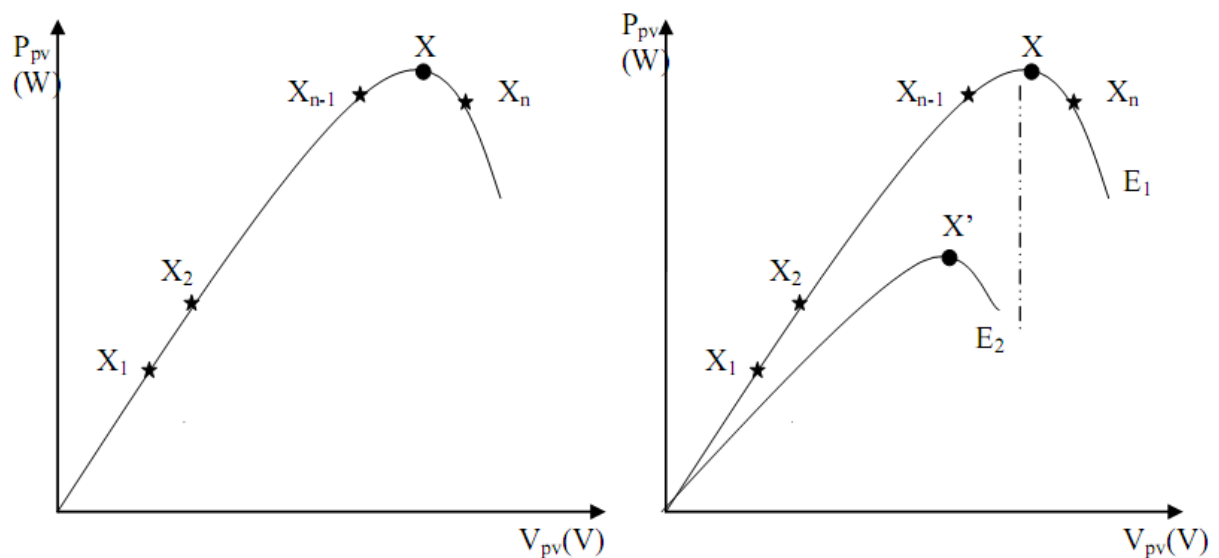


Fig II.20 Le principe d'un contrôleur MPPT

Comme pour les régulateurs linéaires, le contrôle est basé sur un système de régulation qui a X_s et X_e respectivement comme variables de sortie et d'entrée. Dans la plupart des systèmes de régulation seulement une mesure est nécessaire pour connaître le rapport entre X_s et X_e , mais ce n'est pas une condition suffisante dans un système où le rapport est une fonction du temps.

Le déplacement de X_e peut être assimilé à une perturbation dans la régulation du maximum. En effet quand le signe de la dérivée de X_s est connu, et si cela signifie que X_s s'éloigne du maximum, alors le contrôleur change le signe de la direction de X_e pour retrouver le maximum. Cette constante évolution de X_e introduit un état d'oscillation autour de la valeur maximale.

Cependant, plusieurs limites existent :

- La caractéristique P-V du générateur peut avoir plus de un maximum. Cela se produit quand beaucoup de cellules PV, avec leurs diodes de protection, sont associées en série ou en parallèle.
- Des variations brutales peuvent apparaître au niveau de l'éclairement ou de la charge. Si le MPPT n'a pas une bonne dynamique, le MPPT peut être perdu. Pendant le temps qu'il faudra pour retrouver le MPPT, de nouvelles pertes de puissance vont apparaître.
- Des oscillations autour du MPPT existent lors de la recherche de ce point. Cela introduit des pertes.

II.6 Les différents types d'MPPT solaires photovoltaïques :

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes Mppt selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte [13,15]. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes MPPT plus ou moins complexes, nous nous centrerons sur quelques-unes représentant le mieux un type d'algorithme.

II.6.1 Les MPPT Classifiés selon les paramètres d'entrés :

- **MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS :** il y a un certain nombre d'MPPT qui effectuent une recherche du point de puissance maximale selon l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Dans la littérature, nous pouvons retrouver différents types d'algorithmes basés sur des commandes extrémales (dans la littérature anglo-saxonne nommé Perturbe & Observe) présentant plus ou moins de précisions [23,24], ou les algorithmes d'incrément de conductance [23], qui utilisent aussi la valeur de la puissance fournie par le générateur PV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du point de puissance maximale. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité puissance maximale. D'autres types de commandes MPPT sont basés sur la régulation du courant du générateur PV, supposant que ce dernier soit une image proportionnelle à P_{max} . Ceci permet de s'approcher le plus proche possible du courant optimal I_{opt} . Pour cela, une des variantes de ce type de commande calcule un courant de référence dérivé directement du I_{cc} du générateur PV. Cela nécessite que le système effectue un court-circuit du générateur PV périodiquement pour effectuer la mesure. Ensuite, à partir

d'une relation de proportionnalité plus ou moins complexe, on peut obtenir la référence du courant du générateur PV qui doit être proche du courant optimal souhaité [25]. Ce type de commande ayant besoin uniquement d'un capteur, s'avère plus facile à mettre en œuvre et un peu moins coûteux que les commandes extrémales. Par contre, la précision de ces commandes est faible notamment à cause du procédé d'estimation de I_{cc} qui ne peut pas se faire trop souvent. L'échelle temporelle de réaction est en effet de la minute. De plus, à chaque fois que la mesure de courant est faite, cela entraîne un arrêt obligatoire de transfert de puissance et donc des pertes énergétiques qui ne sont pas négligeables au cours d'une journée. Ces commandes sont destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où la météo garantit très peu de changements climatiques. D'autres auteurs [26,23] déduisent la puissance optimale de la tension optimale V_{opt} et cela à partir de la tension de circuit ouvert du générateur PV en effectuant des estimations plus ou moins précises. Pour ce faire, une fraction constante de la tension en circuit ouvert est utilisée comme référence pour la tension du générateur PV. D'autres se servent de méthodes assistées par ordinateur pour calculer la puissance fournie par le générateur PV à partir de la tension de celui-ci [23]. Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones ; dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives.

- **MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur** : dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des convertisseurs statiques [27]. Il est exposé un algorithme MPPT qui maximise le courant de charge d'une batterie. D'un autre côté, dans [28], sont présentées différentes stratégies de commandes MPPT basées sur les paramètres de sortie du convertisseur. Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

II.6.2 Les MPPT classifiés selon le type de recherche ou contrôle :

Indépendamment des paramètres d'entrée de l'algorithme MPPT, nous pouvons trouver dans la littérature différents types d'MPPT. Certaines d'entre elles sont basées sur la commande qui essaye de faire « monter » le point de fonctionnement du générateur PV le long de la caractéristique $P(V)$ jusqu'à atteindre le point de puissance maximale. Dans ce type de méthodes, nous pouvons distinguer les méthodes basées sur l'incrément de conductance et les méthodes P&O (Perturbe & Observe) [13].

La commande Perturbe & Observe [23,13] impose toujours une oscillation autour du point de puissance maximale. En effet, cette oscillation est nécessaire pour connaître les variations de la puissance de sortie du générateur PV et ainsi réajuster le rapport cyclique du convertisseur statique en faisant en sorte que le point de fonctionnement du générateur PV oscille le plus près possible du point de puissance maximale, même si les conditions de fonctionnement sont inchangées. Cela entraîne des pertes en régime établi mais qui sont largement rattrapées en fonctionnement dynamique (lors de transitoires). En effet, ces commandes réagissent très vite à tout changement sans en savoir l'origine. D'autre part, le type de commande MPPT nommé algorithme d'incrément de conductance [23,13], se base sur la dérivée de la conductance du générateur PV pour connaître la position relative du point de puissance recherchée et enfin pour appliquer une action de contrôle adéquate au suivi de ce point. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du générateur PV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du générateur PV le plus près possible du point de puissance maximale [23]. Parfois, les algorithmes établissent des approximations afin que le point d'opération du générateur PV soit le plus proche possible du point de puissance maximale, nous parlons alors des méthodes complexes assistées par ordinateur. Par exemple celle basées sur la technique de commande nommée logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy control) [23,13].

II.7 Conclusion :

Ce chapitre a permis le survol de tout ce qui a trait aux systèmes solaires photovoltaïques sans batterie ainsi caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque et modélisation d'une cellule et d'un générateur photovoltaïque sont donnés. un point important entamé en fin de ce chapitre est l'MPPT permettant d'extraire le maximum de puissance d'un système photovoltaïque.

Conclusion Générale

La ressource globale en énergie photovoltaïque (soleil) est très importante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité au niveau mondiale.

Les travaux présentés dans cette mémoire concernent la production d'électricité à partir d'une chaîne photovoltaïque sans système de stockage.

L'objectif était en premier lieu de faire une recherche bibliographique sur les systèmes solaires photovoltaïques et en deuxième lieu de décrire les différentes modélisations de la chaîne de production photovoltaïque sans batterie et de définir le principe de fonctionnement de l'MPPT d'un système solaire photovoltaïque.

La production d'électricité par une chaîne photovoltaïque répond bien à la problématique posée par le contexte énergétique actuel.

En Algérie, la nature du terrain et la durée de l'ensoleillement peuvent lui avoir permis d'être un des pays modèles dans la production d'énergie renouvelables.

D'une façon générale et pour contribuer à la solution aux problèmes d'énergie, il est intéressant de développer des sources décentralisées de cette énergie. Dans la recherche de telles solutions, le système solaire développé pourra constituer un moyen très économique pour l'énergie d'électrification rurale. Et comme perspective on propose d'étudier les systèmes hybrides-solaire/éolien- de production d'énergie électrique.

Références Bibliographiques

- [1] T. Shimizu, M. Hirakata, and T. Kamezawa. "Generation control circuit for photovoltaic modules". IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 16(3) :293 300, May 2001.
- [2] Mukund R. Patel, Ph.D., P.E, " Wind and Solar Power Systems ", U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, 1999.
- [3] Bent. Sorensen, " Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects", Roskilde University Energy & Environment Group Institute 2 , 1, P. O. Box 260 DK-4000 Roskilde, Denmark
- [4] Laure BOCQUET, " L'ENERGIE SOLAIRE EN ISRAËL", Ambassade de France en Israël Mission Scientifique, Web: <http://www.ambafrance-il.org/sciences>,2004.
- [5] Jimmy.Royer, "LE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE", Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français,56 rue Saint-Pierre 3e étage,Québec (Québec) G1K 4A1 CANADA, Téléphone : (418) 692-5727,Télécopie : (418) 692-5644,Courriel : iepf@iepf.org, Site Internet : <http://www.iepf.org>.
- [6] S. J. Chiang, "Residential Photovoltaic Energy Storage System" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 45, NO. 3, JUNE 1998.
- [7] A.Djerdir, "Maquette pédagogique associant un générateur photovoltaïque et des super condensateurs dans une application transport",Khadija.elkhadri@utbm.fr.
- [8] L.ProtinandS.Astier."Convertisseurs photovoltaïques". Techniques De l'ingénieur D3360,1996
- [9] Sylvie Faÿ, " L'oxyde de zinc par dépôt chimique en phase vapeur comme contact électrique transparent et diffuseur de lumière pour les cellules solaires", ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES 2003.

- [10] Vanessa Terrazzoni-Doudrix, " Cellules solaires en couches minces de silicium amorphe: effets de substrat réflecteur texturé et de la couche intrinsèque sur le courant photo-généré", Thèse de doctorat, université de Neuchâtel 2004.
- [11] Doming0 H. Pontoriero, "Network Compensation with Active Power Filters Integrated to PV Generation", Paper accepted for presentation at PPT 2001 200 1 IEEE Porto Power Tech Conferenceloth -131h September, Porto, Portugal.
- [12] K.AGROUI, "CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PERFORMANCES DES MODULES PHOTOVOLTAIQUES EN COUCHES MINCES", 8ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Centre Universitaire de Béchar-Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.
- [13] M. Angel Cid Pastor, " CONCEPTION ET REALISATION DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES ELECTRONIQUES ", thèse présentée en vue de l'obtention de grade de Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse 2006.
- [14] Bouna . Ould Zeidane , "Contribution to the study of the grid connected photovoltaic system", memoir de magistère, université de Batna,2006.
- [15] Yann Pankow, "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque ",thèse de doctorat, Ecole doctorale de L'ENSAMED 432,Lille 2004.
- [16] N. Patcharaprakiti, "Maximum Power Point Tracking Using Adaptive Fuzzy Logic Control for Grid-Connected Photovoltaic System", 0-7803-7322-7/02/\$17.00 © 2002 IEEE.
- [17] Benoit. BROUSSE, "RÉALISATION ET CARACTÉRISATION DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ORGANIQUES OBTENUES PAR DÉPÔT PHYSIQUE", Thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES 2004.
- [18] Tom. Markvart, "Photovoltaic's fundamentals and applications", Copyright 2003 Elsevier Ltd Tel : +44(0)1865 843000 ,Fax: +44(0) 1865 843971.

- [19] Richard A. Cullen, "What is Maximum Power Point Tracking (MPPT) and How Does it Work?", 2598 Fortune Way, Suite K · Vista, CA 92081 · Phone 760-597-1642 · Fax 760-597-1731 · www.blueskyenergyinc.com.
- [20] Jimmy. Royer, "LE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE", Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français, 56 rue Saint-Pierre 3e étage, Québec (Québec) G1K 4A1 CANADA, Téléphone : (418) 692-5727, Télécopie : (418) 692-5644, Courriel : iepf@iepf.org, Site Internet : <http://www.iepf.org>.
- [21] L. Zarour, "Optimisation de la performance d'un système de pompage photovoltaïque à l'aide d'un moteur à induction", Université M'entoura de Constantine. Algérie , Zarour.laid1@yahoo.fr.
- [22] Valérie. Pommier, "Les énergies renouvelables : étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque", Das/ENSICA-Toulouse, Tel : 0561618620.
- [23] V. Salas, "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems", Solar Energy Materials & Solar Cells 90 (2006) 1555–1578 www.sciencedirect.com 2006.
- [24] Pallab Midday, "Dynamic Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Applications" 0-7803-3500-7/96/\$5.00 © 1996 IEEE, University of Illinois Department of Electrical and Computer Engineering Urbana, Illinois 61 801 1996.
- [25] TSAI-FU WU, "1Ø3W Grid-Connection PV Power Inverter with Partial Active Power Filter" IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS VOL. 39, NO. 2 APRIL 2003.
- [26] TSAI-FU WU, "Single-Phase Inverter System for PV Power Injection and Active Power Filtering With Nonlinear Inductor Consideration " IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS VOL. 41- NO. 4, JULY/AUGUST 2005.
- [27] Romin.Garcin, "Photodiodes et photodiodes avalanche", Université de la Méditerranée Maitrise de physique et applications.
- [28] Chee.Wei Tan, "An Improved Maximum Power Point Tracking Algorithm with Current-Mode Control for Photovoltaic Applications", IEEE PEDS 2005.