

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار - عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



Année 2010

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département d'électrotechnique

MEMOIRE

*Présenté pour l'obtention du diplôme de **Magister***

THEME

MODELISATION D'UN DIPOSITIF MPPT POUR L'ETUDE DE L'AUGMENTATION DE LA PUISSANCE PRODUITE PAR LES GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUES

Option : réseaux électrique

Présenté par : MERAHI REDA

Devant le jury :

Président :	H. Razem	M.C.	Univ. Badji Mokhtar Annaba
Rapporteur :	M. Houabes	M.C.	Univ. Badji Mokhtar Annaba
Examineurs :	R. Chenni	M.C.	Univ. Mentouri Constantine
	E-B. Azzag	M.C.	Univ. Badji Mokhtar Annaba
	H. Labar	M.C.	Univ. Badji Mokhtar Annaba
	A. Abderrazak	M.C.	Univ. Badji Mokhtar Annaba

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, mes frères et mes sœurs, mes amies et mes collègues de travail et à toute la famille.

Remerciement

Remerciement

Le plus grande merci revient à EL-LAH qui m'a guidé dans le bon sens durant ma vie et qui nous aidé à réaliser ce modeste travail ;

En premier lieu, je tiens à remercier Mr : HOUABES Mourad, mon directeur de mémoire pour ses valeureux conseils, son soutien au cours de la période de réalisation de ce travail.

J'exprime toute ma gratitude Mr : CHENNI Rachid, Docteur à l'université Mentouri de Constantine, de par sa patience, sa générosité sans lui, je ne serai surement pas arrivé là.

Je remercie également Mr : Prof. Ir Ernest Matagne, Professeur de l'université Catholique de Louvain-Belgique, pour son hospitalité, son intérêt apporté à mon travail.

J'exprime mon profond respect à Mr : Giovanni Petrone, Ingénieur de l'université degli Studi di Salerno-Italie, pour son aide précieuse en matière de modélisation et simulation.

Je tiens à remercier Mr : H. Razem pour avoir présidé mon jury.

Nous remercions également E-B. Azzag, H. Labar et A. Abderrazak d'avoir accepté de participer à mon jury comme examinateurs.

Nombreux sont ceux et celles qui n'ont apporté aide et encouragements au cours de la préparation de ce mémoire. Qu'ils en soient tous chaleureusement remerciés.

Résumé

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie, mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet, la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. À cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont, connus sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) associée au hacheur, lequel assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre. En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Aussi, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées.

Le problème est abordé dans sa globalité dans cette thèse par une approche systémique du point de vue architecture de conversion et mode de commande associée visant des rendements, fiabilités et flexibilités élevés.

Abstract

Abstract

A photovoltaic generator can function in a broad range of tension and of current output but it can deliver a maximum power only for particular values of the current and tension. Indeed characteristic I (V) of the generator depend on solar illumination and the temperature. These climatic variations involve the fluctuation of the point of maximum power. Because of this fluctuation, one often intercalates between the generator and the receiver one or more static inverters ordered allowing continuing the point of maximum power. These command are, known under the name of MPPT (Maximum Power Point Tracking) associated to the inverter DC-DC, which ensures the coupling between photovoltaic generator and the receiver by forcing the first to deliver his maximum power.

Techniques MPPT (maximum power Point Tracking) are used in the photovoltaic systems to maximize the power delivered by the panel photovoltaic by continuing the point of maximum power continuously, which is not obvious to reach; Indeed, this problem of continuation made until our days the object of several research. Also, several methods have to be elaborate and used.

In this thesis, the problem is studied systematically from a power interface point of view in order to obtain high levels of efficiency, reliability and flexibility.

المخلص

يستطيع مولد الطاقة الشمسية العمل في مجال واسع من التوتر و التيار و لكن لا يستطيع توزيع الطاقة القصوى إلا في توتر و تيار مميزتين.

عموما تتأثر خصائص المولد بمعدل التنبوير الشمسي و الحرارة، هذه التغيرات لمناخية تتسبب في تدبب نقطة الطاقة القصوى، لهذا السبب نعمل على إدراج واحد أو عدة محولات ساكنة، مزودة ببرنامج بين مولد الطاقة الشمسية و المستقبل، هذه البرامج تعرف باسم mppt (متتبع نقطة الطاقة القصوى) مشترك مع محول ساكن من نوع مستمر- مستمر. هذا الأخير يضمن الربط بين مولد الطاقة الشمسية و المستقبل بإرغام الأول بتوزيع الطاقة القصوى .

أساليب mppt تستعمل في أنظمة الطاقة الشمسية لرفع الطاقة المزودة من طرف المولد بمتتبع دائم للطاقة القصوى، لهذا الصدد يبقى مشكل تتبع الطاقة القصوى لحد يومنا هدف عدة أبحاث، أيضا عدة طرق حضرت لهذا الغرض.

المشكل المعالج في هذه المذكرة هو بحث تتابعي لهذا النوع من التحولات و طريقة التحكم فيه لهدف تحسين المرودود و الفعالية.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE

I.1. Introduction	1
I.2. Les cellules photovoltaïques	3
I.2.1: Description de la cellule	3
I.2.2: Principe de fonctionnement	4
I.2.3: La jonction PN utilisée comme capteur PV	6
I.3 : Module PV	7
I.3.1: Panneaux PV	7
I.3.2: Générateur PV	8
I.3.3: Les caractéristiques d'un module PV	8
I.3.3.1 La tension en circuit ouvert	8
I.3.3.2 Le courant de court-circuit	8
I.3.3.3 La puissance maximale	8
I.3.3.4 Le rendement	8
I.3.3.5 Le facteur de forme	9
I.4. Les différentes technologies	9
I.4.1: Cellules cristallines	10
I.4.1.1 La cellule monocristalline	10
I.4.1.2 Les cellules poly-cristallines	10
I.4.2: Cellules à couches minces	10
I.4.3 : Rendement des différentes technologies	11
I.5. Les critères influant sur le rendement de module PV	12

Sommaire

I.5.1 Critères atmosphériques	12
I.5.1.1 L'éclairement	12
I.5.1.2 La température de fonctionnement	12
I.5.2: Critères non atmosphérique	12
I.5.2.1. Le matériau de fabrication	12
I.5.2.2. L'inclination et l'orientation du module	13
I.5.2.3 L'utilisation des régulateurs de charge	13
I.6 Les différents types du système PV	13
I.6.1 Systèmes autonomes	13
I.6.2 Systèmes hybrides	14
I.6.3 Système PV accordée au réseau	14
I.7 Les avantages spécifiques du photovoltaïque	15
I.8 Conclusion	16
Chapitre II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN MODULE PV	
II.1 Introduction	17
II.2 Choix d'un modèle	18
II.2.1 Modèle parfait	19
II.2.2 Modèle réel	20
II.2.2.1 La résistance série	20
II.2.2.2 La résistance parallèle	20
II.2.2.3 Recombinaison	21
II.3 Modélisation d'un modèle à 4 paramètres	22
II.3.1 Détermination des paramètres électriques	22

Sommaire

II.3.1.1	Calcul de I_L	22
II.3.1.2	Calcul de I_D	23
II.3.1.3	Calcul de I_0	23
II.3.1.4	Evaluation de résistance série R_s	24
1)	Méthode 1	24
2)	Méthode 2	24
3)	Méthode 3	24
4)	Méthode 4	24
5)	Méthode 5	25
II.3.1.5	Evaluation de facteur de qualité	25
II.3.2	Résolution de l'équation I(V)	26
II.4	Simulation de modèle à 4 paramètres par MATLAB	27
II.4.1	Influence de l'éclairement	29
II.4.2	Influence de la température	30
II.4.3	Influence de la résistance série	31
II.4.4	Influence du facteur de qualité de la diode	31
II.4.5	Influence des groupements des cellules en série	31
II .5	Conclusion	33
Chapitre III : ETAGE D'ADAPTATION POUR GENERATEUR PV (MPPT)		
III.1	Introduction	34
III.2	Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale	35
III.2.1	Principe	35
III.2.2	Point de puissance maximale	35

Sommaire

III.2.3 Régulateurs MPPT	37
III.3 Connexion directe entre la source et la charge	38
III.4 Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge	42
III.4.1 Structure des convertisseurs d'énergie élévatrice et abaisseur	43
III.4.1.1 Structure de convertisseur survolteur	44
III.4.1.2 Structure de convertisseur abaisseur	45
III.5 Critères d'évaluation entre connexion direct et à l'intermédiaire d'un étage d'adaptation	46
III.5.1 Etude comparative entre connexion direct et indirect	46
III.5.2 Recherche du point optimal de fonctionnement	48
III.6 Conclusion	50
Chapitre IV : Modélisation et Simulation de MPPT par la Commande P&O	
IV.1 Introduction	51
IV.2 Commande pour la recherche du point de puissance maximale (MPPT)	52
IV.2.1 : Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature	52
IV.2.2: Les Différents commandes de MPPT	53
IV.2.2.1: Méthode « Perturbation et Observation »	53
IV.2.2.2: Principe des commandes « Hill Climbing »	53
IV.2.2.3: Méthode de la « Conductance Incrémentielle »	54
IV.3: Conception du système de poursuite du point optimum de fonctionnement (commande P&O)	55
IV.3.1: Principe de la régulation	55
IV.3.2: L'organigramme fonctionnel	57
IV.4 : Simulation et synthèse du système global	58

Sommaire

IV.4.1 : Simulation de panneau PV	58
IV.4.2: Simulation de l'ensemble panneau-hacheur-batterie	59
IV.4.2.1: Détermination des composants de la carte puissance	59
1)- La bobine	60
2)- Condensateur	61
a) Condensateur d'entrée	61
b) Condensateur de sortie	61
3) Diode Schottky	62
4) Transistor MOSFET	62
IV.4.2.2:Analyse du fonctionnement de convertisseur dans l'environnement PSIM	63
IV.4.3: Simulation de la commande MPPT	64
IV.4.3.1: Synthèse du régulateur	64
IV.4.3.2: Description des composants du régulateur MPPT	65
IV.4.3.3: Simulation avec logiciel PSIM	66
IV.5: Résultats de simulation	67
IV.6 Conclusion	69
Conclusion générale	70
Bibliographie	71
Annexes	75

Liste des tableaux

Tableau (1.1)	Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques	11
Tableau (2.2)	Caractéristiques électriques du module PW500 de PHOTOWATT	27
Tableau (3.3)	Puissance maximale de module photovoltaïque	48
Tableau (4.4)	Caractéristiques des panneaux solaires SP75	58

Liste des figures

Liste des figures

Figure.1.1	Description d'une cellule	4
Figure.1.2	Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction	5
Figure.1.3	Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	6
Figure.1.4	Module photovoltaïque	7
Figure.1.5	Facteur de forme pour une cellule PV	9
Figure.1.6	Différents technologie des cellules	10
Figure.2.1	Modèle à 3 paramètres	19
Figure.2.2	Présentation générale d'une cellule PV	21
Figure.2.3	Circuit équivalent de la modèle	22
Figure.2.4	Organigramme de calcul de courant et de sortie du module	28
Figure.2.5	Caractéristique I(V) d'un module pour différentes éclairément solaires	29
Figure.2.6	Caractéristique P(V) d'un module pour différentes éclairément solaires	29
Figure.2.7	Caractéristique I(V) d'un module pour différentes température	30
Figure.2.8	Caractéristique P(V) d'un module pour différentes température	30
Figure.2.9	Influence de la résistance série	31
Figure.2.10	Influence de facteur de qualité sur la caractéristique I(V)	32
Figure.2.11	Regroupement des cellules en série	32
Figure.3.1	Installation photovoltaïque	35
Figure.3.2	Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du système Dans les trois cas: $R_s < R_{opt}$, $R_s = R_{opt}$ et $R_s > R_{opt}$	36
Figure.3.3	Caractéristique aux bornes d'un panneau solaire- situation du Point de Puissance Maximale	37
Figure.3.4	Schéma bloc du MPPT	38
Figure.3.5	Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge	39

Liste des figures

Figure.3.6	Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe en fonction de la charge.	40
Figure.3.7	Chaîne de conversion photovoltaïque	43
Figure.3.8	Schémas d'hacheur de type élévateur	44
Figure.3.9	Schémas d'hacheur de type abaisseur	45
Figure.3.10	Comparaison de η_{MPPT} pour une connexion directe (Diode) et à l'aide d'un étage d'adaptation de type Boost avec MPPT (MPVE)	47
Figure.3.11	Caractéristiques courant-tension et puissances optimales	48
Figure.4.1	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec sa commande	52
Figure.4.2	Principe de la commande P&O	54
Figure.4.3	Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique	54
Figure.4.5	Evolution de la puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau	55
Figure.4.6	Principe de la régulation	57
Figure.4.7	Diagramme fonctionnel algorithme (P&O)	57
Figure.4.8	Modèle d'un panneau solaire sous PSIM	58
Figure.4.9	Caractéristiques du modèle du panneau	59
Figure.4.10	Modèle de l'ensemble panneau-hacheur-batterie sous PSIM	62
Figure.4.11	Représente la tension à l'entrée et à la sortie en fonction du temps dans le cas d'un convertisseur Boost simulé dans l'environnement PSIM	63
Figure.4.12	Schéma du régulateur	64
Figure.4.13	Schémas global de la commande	66
Figure.4.14	Courant et tension à la sortie du panneau	68
Figure.4.15	Courant et tension à la sortie du convertisseur	68

Introduction générale

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production d'électricité est assurée par des ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et tant dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

D'autre part, ce type de consommation d'énergie n'est pas neutre sur l'impact environnemental. Pour les hydrocarbures et le charbon par exemple, d'importantes émissions de gaz à effet de serre sont générées quotidiennement jouant un rôle prépondérant au niveau du dérèglement climatique et de l'augmentation de la pollution. Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes palliant le déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement. Ainsi, le développement des sources non-polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics.

De plus, les énergies renouvelables utilisent des sources inépuisables d'énergies d'origine naturelle : rayonnement solaire, vents, cycles de l'eau et du carbone dans la biosphère, flux de chaleur interne de la Terre, effet de solaire sur les océans. Elles s'opposent ainsi aux énergies fossiles,

Parmi les énergies renouvelables qui connaissent jours après jours des développements considérables est l'énergie solaire qui est considérée depuis longtemps comme l'origine des majorités d'énergies.

L'énergie solaire permet d'assurer des conditions de température favorables à la vie et anime les cycles de l'eau, des vents et du carbone dans la biosphère. Mais elle peut aussi être utilisée directement pour produire de la chaleur à différents niveaux de température pour divers usages : chauffage et climatisation de locaux, séchage de produits agricoles,

Introduction générale

production d'eau chaude et de vapeur, production d'électricité par le biais de cycles thermodynamiques. La production d'électricité peut être aussi obtenue directement par la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire au moyen de photopiles. Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts au mégawatt, reste à un stade anecdotique et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des capteurs mis en œuvre.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays peut couvrir certains de ces besoins en énergie solaire, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées surtout dans les applications photovoltaïque.

Ces différents constats ont motivé différents travaux de recherches pour rendre viables des sources photovoltaïques.

Dans ces domaines, de nombreux progrès effectués sur les matériaux et les cellules au cours de ces dernières années sont à noter, notamment en termes de réduction de coût.

Par contre, des difficultés engendrées par l'utilisation d'une chaîne de conversion photovoltaïque est focalisée sur le problème du couplage non parfait entre le générateur photovoltaïque et la charge de type continue ou alternative. Comme les applications sont nombreuses, ce problème reste en grande partie ouvert. Un des verrous technologiques qui existe dans ce type de couplage est que lorsqu'il est mal dimensionné, il détériore d'autant plus la production et le transfert de la puissance du générateur photovoltaïque (GPV), le faisant fonctionner loin de ses ressources maximales. Dans ce travail nous allons diviser notre travail en quatre chapitres.

Dans le chapitre 1, nous présentons en détail l'énergie photovoltaïque, par l'étude de l'élément de base qui est la cellule puis le module et leur dérivé, caractéristiques, les différentes technologies de construction et les avantages.

Introduction générale

Dans le chapitre 2, nous avons fait une modélisation de la module pour avoir les différents effets sur lui, comme l'éclairement, la température, la résistance série, le facteur de forme et le regroupement des cellules en série.

Dans le chapitre 3, nous allons étudier le problème de couplage puis analyser deux modes différents : couplage direct et couplage à travers un étage adaptateur.

Dans le chapitre 4, nous allons faire un dimensionnement par la détermination des différents paramètres de convertisseur statique et le réglage de différentes valeurs dans le circuit de commande.

Nous terminerons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude et la proposition des perspectives relatives à ce travail.

CHAPITRE I
ENERGIE
PHOTOVOLTAIQUE

I. Introduction :

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par **Antoine Becquerel** en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les **années 50** pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçues par votre téléviseur ne vous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque.

Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La croissance de l'industrie fut spectaculaire.

Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques expédiés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentait. Bien que le prix se soit quelque peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année continue d'augmenter.

Le rayonnement solaire, aussi bien direct que diffus, peut être converti directement en électricité, sous forme de courant continu au moyen des photopiles, sans avoir ainsi besoin de recourir à un cycle thermodynamique. Les systèmes photovoltaïques, sont donc particulièrement simples, puisque, à l'inverse des centrales électriques thermiques conventionnelles ou solaires, ils ne comportent ni fluides à haute température ou sous pression, ni pièces tournantes, ni la nécessité de la présence d'une « source froide » consommant de l'eau [38].

Dans le cas de photovoltaïque, l'énergie primaire est le rayonnement solaire. Elle se trouve dans le milieu ambiant, il se fait d'exposer les modules ou les panneaux devant la lumière pour obtenir une puissance électrique, cette énergie est gratuite et disponible pendant toutes la journée.

Les systèmes photovoltaïques sont particulièrement bien adaptés à la production décentralisée d'électricité et les sites isolés : électrification rurale (pour les besoins domestiques et les besoins communautaires : centres de santé, écoles, etc.), pompage de l'eau, réfrigération, télécommunications, etc. Ils constituent donc une solution de choix pour les populations rurales qui ne pourront pas être reliées aux réseaux électriques conventionnels, même pour les villes on peut économiser la consommation d'énergie par l'utilisation des panneaux sur le toit ou sur les façades des bâtiments.

Dans ce chapitre, nous présentons les principales caractéristiques des éléments constitutifs de ces MPVE avec leurs problématiques propres. Ainsi nous décrivons tout d'abord le GPV typique constitué de plusieurs cellules PV et la connexion classique associée.

I.2. Les cellules photovoltaïques

I.2.1: Description de la cellule

C'est l'élément de base qui grâce à lui la conservation est faite par l'assemblage de plusieurs cellules, on peut atteindre la puissance que l'on veut.

Les photopiles ou **cellules photovoltaïques** sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants [1].

Le matériau de base est dans la plupart des cas le **silicium**. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, polycristalline, ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellurure de Cadmium (CdTe) [15] [1].

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des "impuretés") sont substitués à des atomes de silicium dans un réseau cristallin : c'est ce que l'on appelle le dopage :

- Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type "N" (ex : dopage au phosphore).
- Si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le Silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type "P" (ex : dopage au bore).

Une cellule solaire sera obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposées (jonction PN). Au voisinage de la jonction, un champ électrique apparaît provoqué par le déséquilibre de charges. Il va contribuer à drainer les électrons qui auront été détachés par l'énergie des photons (grains de lumière) incidents [1]. Pratiquement, la cellule PV est composée de plusieurs couches minces figure (1.1) à savoir :

- Une couche "antireflet" sur la face avant dont le but est de faciliter au maximum la pénétration d'un maximum de photons à travers la surface et de réduire les pertes par réflexion;
- Une grille conductrice avant "collectrice des électrons" qui doit également être liée au silicium et ne pas être sensible à la corrosion.

- Une couche dopée N avec porteurs de charge libres négatifs (électrons);
- Une couche dopée P avec porteurs de charge positifs (trous);
- Une surface de contact conductrice en métal (collectrice des électrons), ayant une bonne conductivité ainsi qu'un bon accrochage sur le silicium;

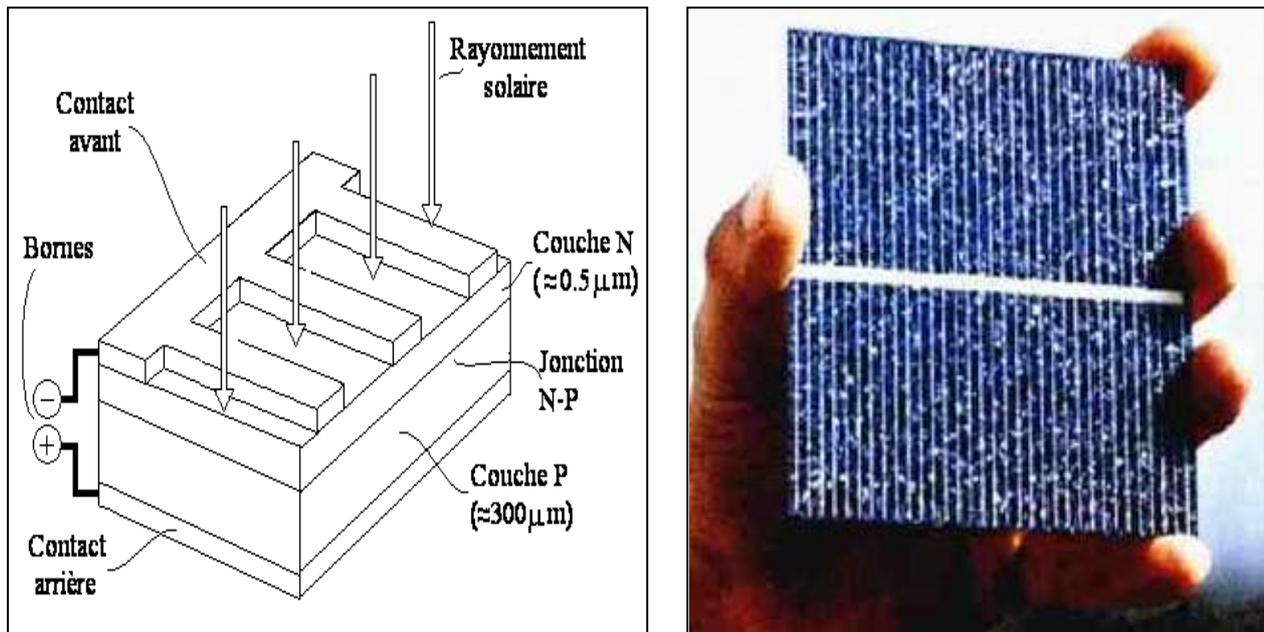


Fig.1.1 : Description d'une cellule

I.2.2: Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des cellules PV repose sur un effet physique appelé : **l'effet photovoltaïque**, qui se traduit par la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu cc). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$), si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ($E_g = E_C - E_V$), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron- trou dans différents points de la jonction figure (I.2).

Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires.

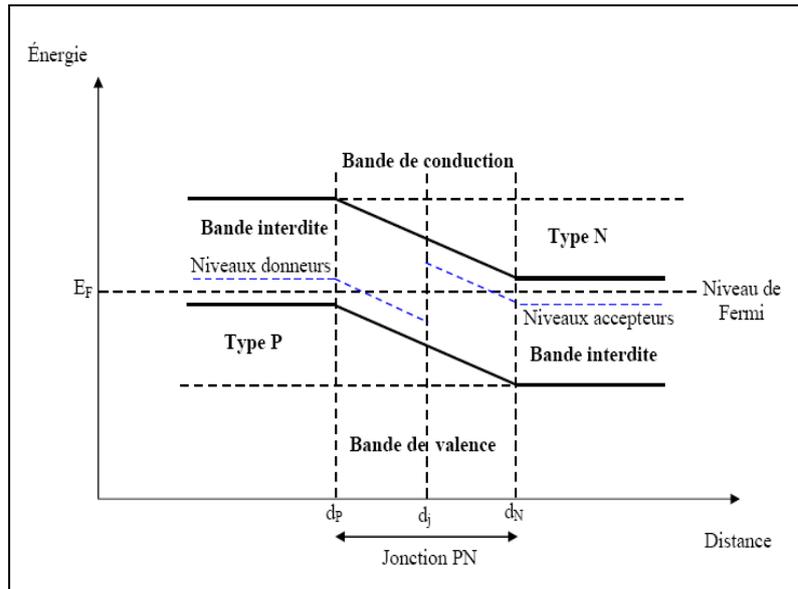


Fig 1.2 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction

Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.

Si les photons ont une énergie inférieure E_g ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650nm-670nm.

L'expression qui exprime l'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (I.1)$$

Ou

h : La constante de Planck

λ : Longueur d'onde

c : La vitesse de la lumière

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

De même, toute l'énergie des photons n'arrivant pas à se transformer en électricité est absorbée par le matériau sous forme thermique.

I.2.3: La jonction PN utilisée comme capteur PV

Un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa constitution, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre. Le comportement d'une cellule PV peut donc se modéliser comme celui d'une mauvaise jonction PN autant en statique qu'en dynamique lorsque cette dernière n'est pas éclairée.

En polarisant électriquement une jonction PN classique, on obtient les caractéristiques statique semblables à celles de la diode figure (I.3).

Sans éclairage, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer.

Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction [9].

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, un courant électrique proportionnel à l'éclairement apparaît, c'est cette particularité qui est employée dans les générateurs photovoltaïques.

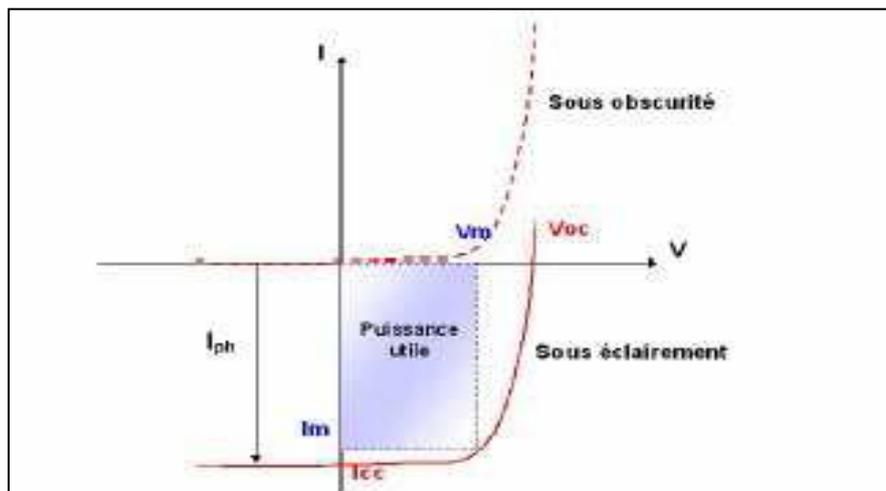


Fig 1.3 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [5]

I.3. Module PV

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module figure (1.4-a). La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant [10].

Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) figure (1.4-b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [31].

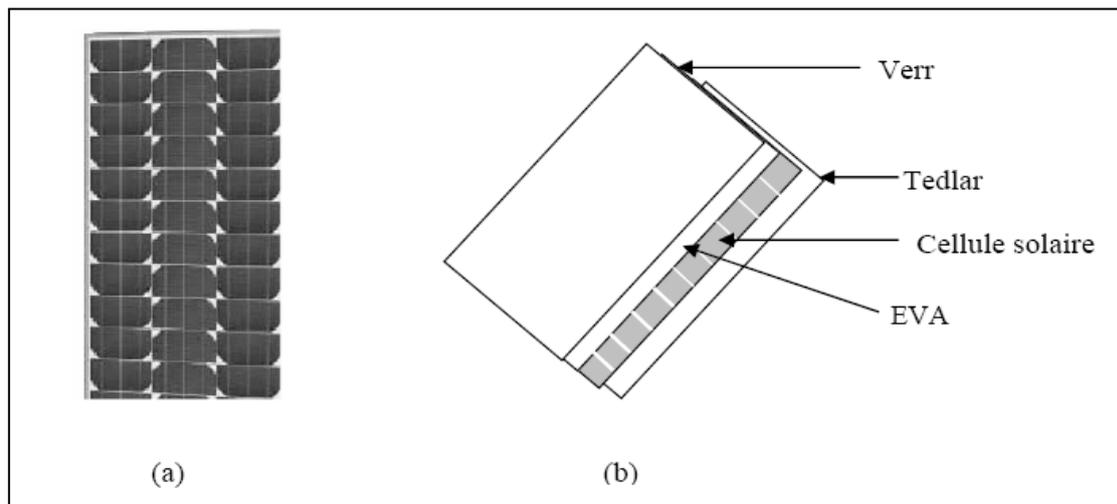


Fig 1.4 : Module photovoltaïque

I.3.1: Panneaux PV

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en série (augmenté la tension) et en parallèle (augmenté le courant) pour former un panneau.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants du panneau PV dépend :

- Des besoins en électricité
- De la taille du panneau
- De l'ensoleillement du lieu d'utilisation
- De la saison d'utilisation

I.3.2: Générateur PV

Le câblage série/parallèle des panneaux est utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées, ce dernier que l'on appelle un central photovoltaïque.

I.3.3: Les caractéristiques d'un module PV

I.3.3.1 La tension en circuit ouvert

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à son borne, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert U_{CO} ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement) [12].

I.3.3.2 Le courant de court-circuit

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une photopile en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit I_{CC} . De plus, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, le photo-courant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau mis en œuvre, Ainsi, plus ces deux paramètres seront élevés, plus l'intensité produite sera grande [12].

I.3.3.3 La puissance maximale

L'objectif principal de l'utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible, c'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale U_m et à une intensité maximale I_m . Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC standard (25°C et un éclairement de 1000 W/m²), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (Wc) [12].

I.3.3.4 Le rendement

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit S la surface du module et E l'éclairement en W/m², ce rendement a pour formule [12] :

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (I.2)$$

I.3.3.5 Le facteur de forme

Le facteur de forme est un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour évaluer la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV. Il est illustré sur la figure (1.5). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{\max} et la puissance formée par le rectangle $I_{CC} \cdot V_{CO}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de révolution technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [16].

$$FF = \frac{P_m}{V_{CO} \times I_{CC}} \quad (I.3)$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7, Il diminue avec l'augmentation de la température.

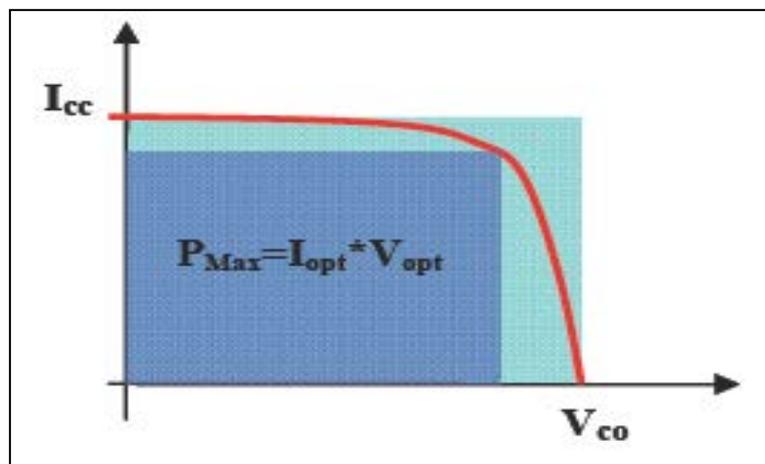


Fig 1.5 : facteur de forme pour une cellule PV

I.4. Les différentes technologies

Le rendement des cellules PV dépend principalement des matériaux constitutants, la plupart des recherches se dirigent dans ce domaine, car c'est l'élément qui freine jusqu'à maintenant la production photovoltaïque et sa répartition à grande échelle.

Les technologies des cellules solaires se sont développées de manière très diverses. On distingue en général les cellules cristallines et les cellules à couches minces.

I.4.1: Cellules cristallines

Les cellules en silicium mono et poly-cristallin représentent environ 94% du marché. On reconnaît deux types des cellules sont :

I.4.1.1 La cellule monocristalline : qui s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches (fig. 1.6-a). Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 % [34].

I.4.1.2 Les cellules poly-cristallines : sont composées d'un agglomérat de cristaux (fig. 1.6-b). Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes [34].

I.4.2: Cellules à couches minces

La technologie des couches minces a l'avantage de produire les cellules par un procédé de revêtement à grande surface peu onéreux. Elles sont plus minces et peuvent même être déposées sur des supports flexibles ((fig. 1.6-c).

Par contre leur rendement est plus bas que celui des cellules cristallines. Divers matériaux semi-conducteurs entrent en ligne de compte pour cette technologie: le silicium amorphe et micro-morphe, le Cd-Te (tellurure de cadmium), le CIS (sélénure de cuivre et d'indium), parfois aussi le CIGS (sélénure de cuivre, indium et gallium). Les nanotechnologies (cellules à colorants) ne jouent pas encore un grand rôle [3].

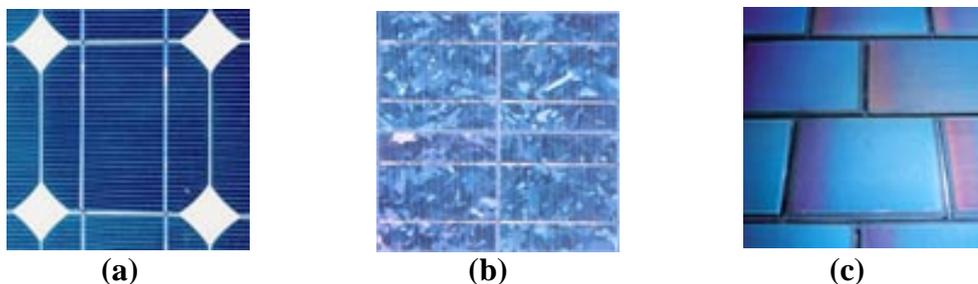


Fig 1.6: Différents technologie des cellules

I.4.3: Rendements des différentes technologies

En conclusion, il est intéressant de comparer les rendements des différentes technologies qui existent actuellement [38].

Type de cellule	Rendement des cellules PV			Domaines d'applications
	théorique	en laboratoire	disponibles	
Si mono (silicium monocristallin)	27,0 %	24,7 %	14,0-16,0 %	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Si poly (silicium polycristallin)	27,0 %	19,8 %	12,0-14,0 %	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Si a (silicium amorphe)	25,0 %	13,0 %	6,0-8,0 %	Appareils de faible puissance production d'énergie embarquée (calculatrice, montres...) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
GaAs	29,0 %	27,5 %	18,0-20,0 %	Systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIGS (séléniure de cuivre, indium et gallium)	27,5 %	18,2 %	10,0-12,0 %	Appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
CdTe (tellurure de cadmium)	28,5 %	16,0 %	8,0 %	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

Tableau (1.1): Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques

I.5. Les critères influant sur le rendement de module PV

Pour que le module photovoltaïque garde toujours un rendement élevé, plusieurs paramètres entrent en jeu et perturbent son fiabilité ou l'inverse, on peut classer ces critères en deux :

I.5.1 Critères atmosphériques

Ces critères sont imposés généralement par les conditions climatiques et dépendent principalement de l'atmosphère et des lieux des installations, on peut citer plusieurs paramètres tels que l'éclairement, la température, la vitesse du vent, la présence de poussières ...etc.

I.5.1.1 L'éclairement

D'après la formule (I.2), on constate que le rendement dépend de l'éclairement, ce facteur est variable le long de la journée et ne peut agir pour l'augmenter, la meilleure solution est de choisir un endroit de forte ensoleillement pour exposer les modules.

I.5.1.2 La température de fonctionnement

L'augmentation de la température influe directement sur le comportement de la photopile, elle engendre la diminution de la tension de l'ordre de 2 mV par degré, cette augmentation se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, donc, sur le rendement de la cellule.

I.5.2: Critères non atmosphérique

Ce sont les critères qui ne dépendent pas de l'atmosphère et en fonction de ceux-ci on peut augmenter le rendement du module, Les principaux sont les suivants :

I.5.2.1. Le matériau de fabrication

Ce facteur est très important, et influe directement sur la conversion photovoltaïque, en général le silicium reste le matériau le plus fiable dans la fabrication du module et son rendement est le plus élevé.

I.5.2.2. L'inclination et l'orientation du module

En général, les modules sont statiques. Comme le soleil est en mouvement permanent, il faut donc leur donner une orientation et une inclinaison qui optimise l'énergie fournie annuelle.

L'orientation plein Sud des modules permet de capter un maximum de lumière au cours de la journée et résulte en un pic de production autour de midi [45].

L'inclination joue un rôle très important pour attirer le maximum de flux solaire, les expériences ont montré qu'il suffit incliner le module d'un angle de 30 degrés pour obtenir un meilleur rendement [45].

I.5.2.3 L'utilisation des régulateurs de charge

Afin d'améliorer les performances des modules photovoltaïques et d'assurer une meilleure durée de vie, il est primordial d'installer les régulateurs de charge, tel que de type série, shunt, PWM, MPPT [12].

I.6 Les différents types de système PV

Les systèmes PV sont composés selon les exigences en trois types : autonome, raccordée au réseau et hybride :

I.6.1 Systèmes autonomes

Une installation photovoltaïque (PV) est dite autonome – ou isolée – quand elle n'est pas reliée à un réseau de distribution. Le système PV autonome permet de fournir du courant électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau. Donc l'énergie produite est utilisée immédiatement (pompage, l'éclairage, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée.

Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques [36].

Les performances des systèmes autonomes reviennent surtout sur l'état des batteries, c'est l'élément de base dans ces types de systèmes.

I.6.2 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés [34].

I.6.3 Système PV accordée au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings [37].

Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs.

Dans les systèmes raccordés au réseau, c'est l'onduleur qui remplace les batteries, dans ce cas c'est l'élément de base dans ces types des systèmes.

I.7 Les avantages spécifiques du photovoltaïque

Par rapport aux autres sources renouvelables, le photovoltaïque offre des avantages particuliers :

- Elle est exploitable pratiquement partout, la lumière du soleil étant disponible dans le monde entier.
- L'équipement de production peut presque toujours être installé à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne.
- Il est totalement modulable et la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.
- Aucun mouvement, pas de pollution directe ou indirecte (facteurs atmosphériques ou liquides, produits de nettoyage, risque d'accident physique,...) aucun déchet, aucune perturbation pour l'environnement de proximité, c'est une énergie purement propre et écologique.
- La maintenance et les réparations sont réduites à presque rien pour la partie photovoltaïque et à peu de chose pour l'électronique associée.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait des descriptions générales sur l'énergie photovoltaïque, tous les éléments ont été introduits (cellule, module, panneau, champ PV) afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV.

Ce chapitre nous a permis d'explorer le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir. Des aspects aussi bien technologiques qu'électriques ont été abordés afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion photovoltaïque.

CHAPITRE II
MODELISATION ET
SIMULATION D'UN
MODULE PV

II. 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons définir un modèle simple et applicable aux cellules photovoltaïques. L'objectif est de trouver un modèle simple et adaptable avec différents modules des constructeurs.

Ce modèle doit être modélisé de telle façon que tous les paramètres sont facilement calculés et en évitant le plus possible les équations complexes.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques dans la littérature ont été développés, dont le but est l'obtention d'une caractéristique $I(V)$ la plus performante possible, parmi ces modèles on peut citer les suivants [6] :

- Modèle à sept paramètres (7P)
- Modèle à six paramètres (6P)
- Modèle à cinq paramètres (5P)
- Modèle à quatre paramètres (4P)
- Modèle à trois paramètres (3P)

Les principaux paramètres sont les suivants :

- I_L = le courant photonique
- I_0 = courant de saturation inverse
- n = facteur de qualité
- R_S = la résistance séries
- R_{SH} = la résistance shunt

Ces modèles sont différents entre eux par la procédure et le nombre de paramètres mis en jeu.

II.2 Choix d'un modèle

En général le choix d'un modèle dépend toujours de l'usage que l'on veut en faire, mais aussi des informations dont on dispose pour déterminer les paramètres [40].

Après une comparaison entre les résultats de simulation obtenu par ces modèles et les résultats expérimentaux, Townsend [6] à tiré les conclusions suivantes [40]:

- La résistance shunt dans les modèles (7P), (6P) n'influe sur la caractéristique I-V uniquement au niveau des éclairements très bas.
- Les modèles électriques qui incluent le paramètre de la résistance série (4P et 6P) sont de meilleurs modèles représentant des caractéristiques I-V, pour des niveaux d'éclairément assez loin du niveau de référence, que les modèles qui négligent cette résistance (3P et 5P).
- Le modèle (7P) ne traduit pas les caractéristiques I-V aussi bien que les autres modèles pour des températures de cellules qui sont assez loin de la température de référence.
- Les courbes I-V globales, obtenues par les modèles 4P et 6P sont plus précises.

D'après ces résultats, on peut conclure que les deux modèles à 4 et 6 paramètres sont le plus avantageux par rapport les autres modèles.

Si on ne dispose que des données fournies par le fabricant, on ne peut en général déterminer que quatre paramètres. Dans ce cas, le plus simple est de prendre un modèle à 4 paramètres (sans résistance parallèle) et d'utiliser les informations disponibles pour déterminer [40]:

- Le courant photonique
- Le courant de fuite de la jonction
- Le coefficient d'imperfection de la diode
- La résistance série de la cellule

Avant de passer à l'étude du modèle à 4 paramètres, il vaut mieux faire une représentation générale du modèle idéal du PV (puisqu'il constitue la base de tous les modèles qui ont été développés) puis le modèle réel.

II.2.1 Modèle parfait

Le modèle le plus simple d'une cellule PV est montré comme un circuit équivalent figure (1), constitue d'une source de courant idéale en parallèle avec une diode idéale. La source de courant représente le courant produit par les photons (souvent désignés par I_{PH} ou I_L), et sa production est stable sous température et irradiation incidente constante [7].

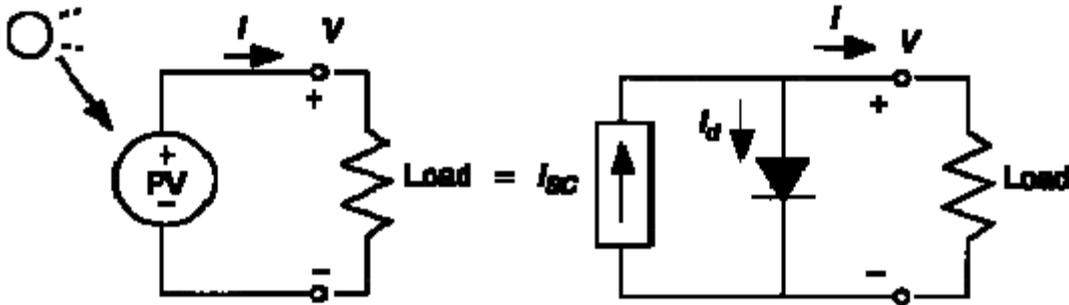


Fig 2.1 : Modèle à 3 paramètres

Il y a deux paramètres principaux fréquemment employés pour caractériser une cellule de PV sont, le courant de court circuit et la tension de circuit ouvert, Les fabricants des modules fournissent habituellement les valeurs de ces paramètres dans leurs fiches techniques [7].

Le courant de sortie I de la cellule PV est calculé en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit équivalent représenté sur la figure précédente.

$$I = I_L - I_D \quad (I.1)$$

Ou

I_L : le courant photonique qui est estimé par I_{CC}

I_D : le courant parallèle par le diode

le courant de la diode est donné par l'équation de shockley suivant :

$$I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (II.2)$$

Ou

V : la tension de sortie [volts]

I_0 : le courant inverse de saturation [ampères]

n : le facteur de qualité

q : la constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-19}$ C

K : la constante de Boltzmann, $10381 \cdot 10^{-23}$ J/K

Si on remplace (II.2) dans (II.1) on obtient la relation courant-tension de la cellule PV.

$$I = I_L - I_o \left(\exp \left(\frac{qV}{nKT} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

II.2.2 Modèle réel

Dans le modèle parfait ou idéal, il y a quelques paramètres qui n'ont pas été pris en considération, et cela affectera la performance de la cellule PV dans la pratique.

Pour rapprocher le plus possible à un modèle réel, il faut prendre en considération les pertes et les différents phénomènes évoqués dans le modèle idéal, qui sont caractérisées généralement par les résistances et les diodes, on peut citer, la résistance série, qui représente les pertes de contacts, la résistance shunt qui représente les pertes de fuites et les diodes parallèles qui représentent le phénomène de recombinaison [7].

Dans les paragraphes suivants, on va expliquer chaque paramètre en détail.

II.2.2.1 La résistance série

Dans une cellule PV réelle, il y a une résistance série dans le chemin du courant à travers le matériau semi conducteur, la grille du métal et les différents contacts [7]. Ces pertes sont réunies comme une résistance série R_s , son effet devient très remarquable dans un module PV qui se compose de plusieurs cellules connectées en série, et la valeur de la résistance est multipliée par le nombre des cellules [7].

II.2.2.2 La résistance parallèle

Celle-ci s'appelle également la résistance shunt. L'existence de fissures et de défauts de structure complexe devient le siège de phénomène physique assimilable à une résistance R_p , qui apparait en parallèle sur le schéma électrique [4].

Cette résistance parallèle est liée directement aux processus de fabrication, son effet est beaucoup moins remarquable dans un module PV comparé à la résistance série, il deviendra

seulement apparent quand un certain nombre de modules PV sont reliés en parallèle pour un grand système [4].

II.2.2.3 Recombinaison

La recombinaison dans la région d'épuisement des cellules de PV fournit les chemins courants non-ohmiques parallèlement à la cellule intrinsèque de PV. Ceci peut être représenté par la deuxième diode (D_2) dans le circuit équivalent.

D'après les données que nous avons jusqu'à maintenant en peuvent faire une représentation simple d'une cellule PV figure (II.2).

Ce modèle comporte quatre variables, les deux variables d'entrées sont

- ✓ G_S : Ensoleillement dans le plan de module
- ✓ T_J : Température de jonction des cellules

Et les deux variables de sortie sont :

- ✓ I_G : Le courant fournit par le module
- ✓ V_G : La tension à la borne du module

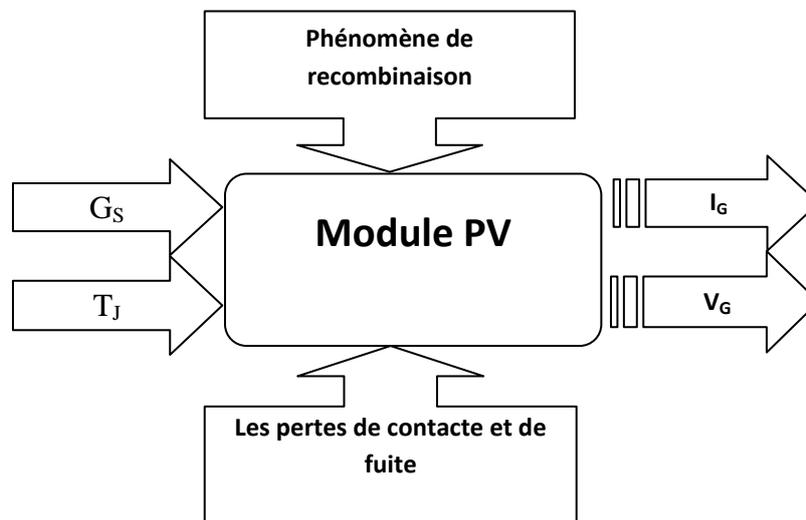


Fig. 2.2 : Présentation générale d'une cellule PV

II.3 Modélisation d'un modèle à 4 paramètres

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé; il a été étudié par Townsend [4][6][8]. Ce modèle traite la cellule PV comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_S [6], l'effet de la résistance parallèle (R_p) est très petit dans un module simple, ainsi le modèle ne l'inclut pas figure (2.3).

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique $I(V)$ sont : le courant photonique I_L , la résistance série R_S , et deux caractéristiques de la diode I_0 et n , ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants [4][6].

Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants).

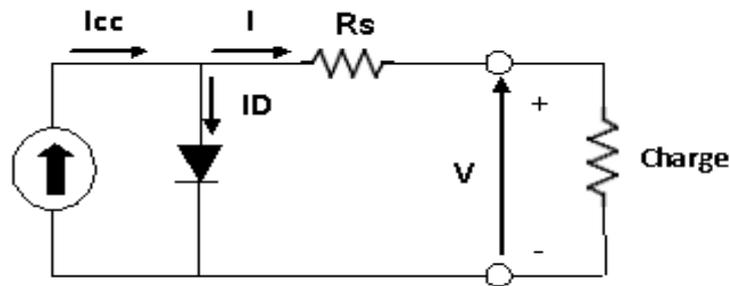


Fig 2.3 : Circuit équivalent de la cellule

II.3.1 Détermination des paramètres électriques

D'après la figure (2.3), le courant de sortie déduit de schémas équivalent est le suivant:

$$I = I_L - I_D \quad (\text{II.4})$$

II.3.1.1 Calcul de I_L

Le courant photonique est lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence par :

$$I_L = \left(\frac{G}{G_{REF}} \right) \left(I_{L,REF} + \mu_{ISC} (T_C - T_{C,REF}) \right) \quad (\text{II.5})$$

Ou

$I_{L,REF}$: le courant photonique sous condition de référence [ampères]

G, G_{REF} : l'éclairement réels et à la condition de référence [W/m^2]

$T, T_{C,REF}$: température de cellules, réelles et à la condition de référence [degré Kelvin]

μ_{ISC} : coefficient de la température du courant de court circuit [ampères/degré]

Pour simplifier le calcul de I_L , on fait souvent l'approximation que le courant $I_{L,REF}$ est égal au courant de court circuit μ_{ISC} du module.

II.3.1.2 Calcul de I_D

Le courant de la diode est donné par l'équation de Shockley :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V+IR_S)}{nkT_C} \right) \right] \quad (II.6)$$

Ou

R_S : la résistance série [ohm]

II.3.1.3 Calcul de I_0

Le courant inverse de saturation de la diode s'exprime en fonction des caractéristiques du matériau et de la température comme suit :

$$I_0 = I_{0-T_1} * \left(\frac{T_f}{T_1} \right)^{\frac{3}{n}} \exp \left(\frac{-qV_g}{n*k*\left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_1} \right)} \right) \quad (II.7)$$

Ou :

I_{0-T_1} : le courant de saturation

V_g : l'énergie de bandage (1.12 eV pour S_i , 1.35 eV pour G_e)

Donc la caractéristique $I(V)$ est décrite ainsi par :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V+IR_S)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (II.8)$$

II.3.1.4 Evaluation de résistance série R_S

Le terme de la résistance série prouve être un paramètre important, spécialement pour des températures de cellules et éclairagements loin des conditions de référence. Avec de mêmes conditions de référence, chaque modèle PV trace des courbes I-V très similaires, mais uniquement près des conditions de référence [4][7].

En dehors de ces conditions, les modèles PV lesquels incluent le terme de la résistance série, décrivent les courbes I-V étant différentes des courbes des modèles négligeant la résistance série. Sur une plage complète des conditions d'exploitation, telle que dans la simulation annuelle, le rendement du système quand la résistance séries est négligée, baisse entre 5-8% par rapport au cas ou la résistance série est utilisée [4].

Plusieurs différentes méthodes ont été développées pour déterminer la résistance série, on représente ici les cinq méthodes les plus utilisé qui sont [6][7]:

- 1) **Méthode 1:** est basé sur l'utilisation directe de la valeur de résistance série indiquée sur les données du constructeur. L'inconvénient est que les fabricants n'éditent pas souvent ce paramètre.
- 2) **Méthode 2:** est basé sur l'utilisation du coefficient de la température en relation directe avec la tension de circuit ouvert $\mu_{V_{co}}$, qui est souvent donné par le fabricant.
- 3) **Méthode 3:** est basé sur la création d'une quatrième équation indépendante et la résoudre pour trouver la valeur de R_S et d'autres paramètres. La quatrième équation résulte de différencier la puissance ($I(V)*V$). En ce qui concerne la tension au point de puissance maximum, cette quantité doit égalé zéro.
- 4) **Méthode 4 :** Si R_S est connu pour un système, pour un autre système, R_S peut être estimée en échelant R_S du système connu vers le plus ou le moins en se basant sur les magnitudes relatives à la puissance max, courants et tensions des deux systèmes. La résistance en série est proportionnelle a la tension et inversement proportionnelle au courant. Ce type d'approximation ne prend pas en considération les différences en

matériaux et fabrication et ne peut être ajusté aussi bien pour les systèmes qui diffèrent en dimension.

- 5) **Méthode 5:** est basé sur l'estimation de la résistance série par la mesure de la pente d'une courbe I(V) au point de tension de circuit ouvert, puis prendre le négatif de la tangente.

La méthode que nous avons choisi pour évaluer la valeur de R_s est la dernière, elle est expliquée en détail dans la section suivante.

Les résistances série (R_s) du module PV a un grand impact sur la pente de la courbe I-V, par conséquent la valeur de R_s est calculée en évaluant la pente dI/dV de la courbe I-V au point V_{oc} [7].

D'après l'équation (II.8), la valeur de R_s est évaluée de la façon suivante :

$$dI = 0 - I_0 * q \left(\frac{dV + R_s * dI}{nKT} \right) * \exp \left(q \left(\frac{V + IR_s}{nKT} \right) \right) \quad (II.9)$$

$$R_s = - \frac{dI}{dV} - \frac{nKT/q}{I_0 * \exp \left(q \left(\frac{V + IR_s}{nKT} \right) \right)} \quad (II.10)$$

Alors, d'après l'équation (II.10), la valeur de R_s est estimé en fonction de $V_{C0} = V$.

$$R_s = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{CO}} - \frac{nKT/q}{I_0 * \exp \left(\frac{qV_{CO}}{nKT} \right)} \quad (II.11)$$

II.3.1.5 Evaluation de facteur de qualité

Le facteur de qualité de diode (n) est inconnu et doit être estimé, généralement il prend une valeur entre 1 et 2, la valeur de $n=1$ (pour la diode idéale) est cependant employée jusqu'à ce que la valeur plus précise soit estimée plus tard par l'ajustement de courbe [7].

II.3.2 Résolution de l'équation I(V)

Finalemment après la détermination des différents paramètres du circuit équivalent, il est possible de résoudre l'équation de la caractéristique I(V), donc on peut résoudre numériquement pour un éclairement donné et une température de module, l'ensemble des paramètres inconnus qui sont (I_L , I_0 , n , R_S), puis les autres variables inconnues dans l'équation I(V) originale sont I et V du module [6].

Bien qu'il puisse être possible de trouver la réponse par des itérations simples, la méthode du Newton est choisie pour la convergence rapide de la réponse [7].

La méthode de Newton est décrite par la formule suivante :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{II.12})$$

Où : $f'(x_n)$ est le dérivé de la fonction, $f(x)$

x_n : La valeur de l'itération n

x_{n+1} : La valeur de l'itération n+1

Par conséquent, l'équation (II.8) devient:

$$f(I) = I_{CC} - I - I_0 \left[\exp \left(q \left(\frac{V + IR_S}{nKT} \right) \right) \right] \quad (\text{II.13})$$

La substitution de cette équation dans la formule (II.2) donne l'équation (II.14), et le courant de sortie I est calculé itérativement :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{CC} - I_n - I_0 \left[\exp \left(q \left(\frac{V + I_n R_S}{nKT} \right) \right) - 1 \right]}{-1 - I_0 \left(\frac{q R_S}{nKT} \right) \exp \left(q \left(\frac{V + I_n R_S}{nKT} \right) \right)} \quad (\text{II.14})$$

II.4 Simulation de modèle à 4 paramètres par MATLAB

La stratégie de modéliser un module PV n'est aucun différent de modéliser une cellule PV. Les paramètres sont les mêmes, mais seulement la tension qui va changer (la tension du circuit ouvert) est différente et doit être divisé par le nombre de cellules.

Le programme MATLAB que nous avons utilisé exécute les calculs itératifs cinq fois afin d'assurer la convergence des résultats.

La méthode employée ici est appliquée dans des programmes script pour la simulation des différents effets sur la caractéristique $I(V)$ telle que, l'influence de l'éclairement, température, la résistance série, le facteur de qualité et regroupement des cellules en série.

Le module PV que nous avons choisi pour la simulation est le PW500 de PHOTOWATT, ce module fournit une puissance maximum 55W avec une taille optimale [41].

Les caractéristiques principales du module sont montrées dans le tableau (2.1).

Température	T	25	°C
Tension de circuit ouvert	V_{CO}	21.7	V
Courant de court circuit	I_{SC}	3.45	A
Tension de puissance maximale	V_m	17.3	V
Courant de puissance maximale	I_m	3.2	A
Puissance maximale	P_m	55	W

Tableau (2.2): Caractéristiques électriques du module PW500 de PHOTOWATT

CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UNMODULE PV

Toutes les fonctions décrites dans la section sont représentées dans l'organigramme suivant :

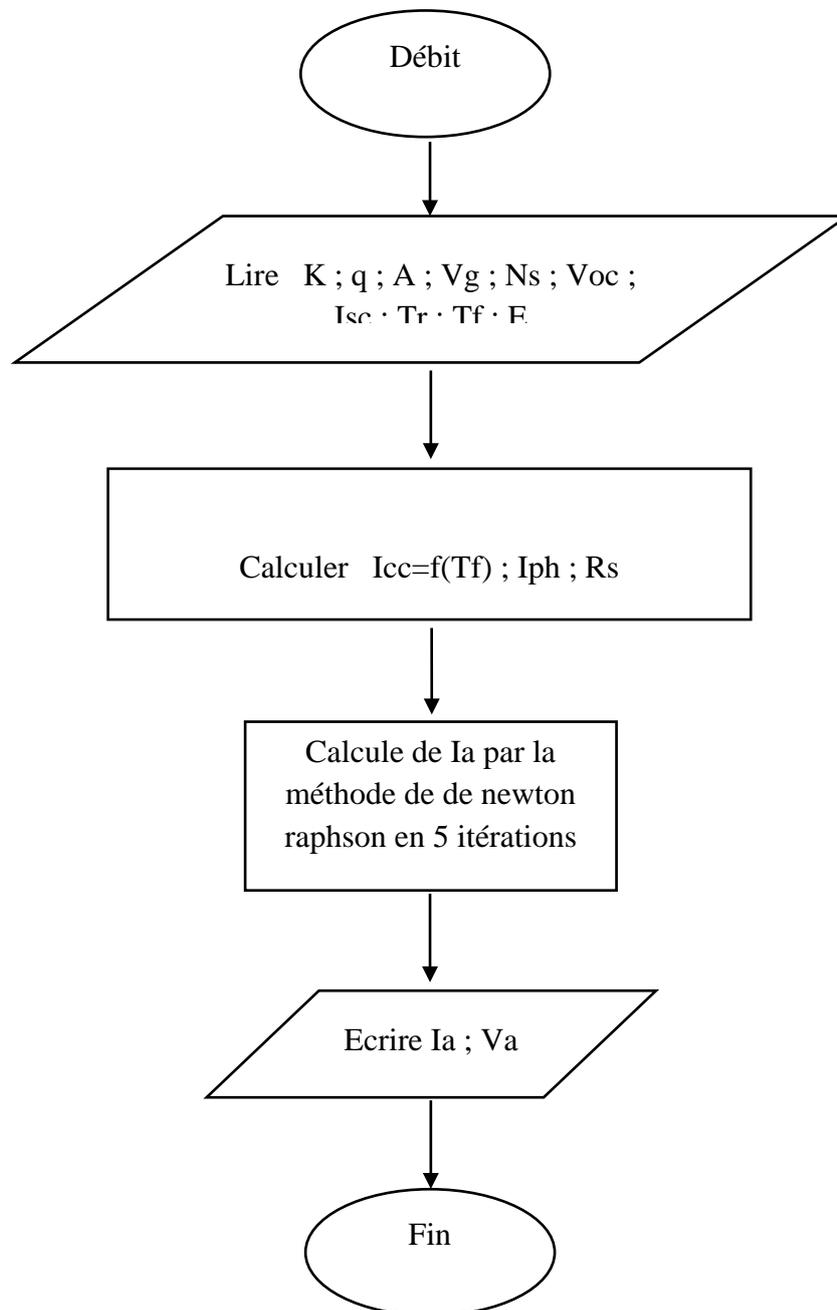


Fig 2.4 : Organigramme de calcul de courant et tension de sortie du module

II.4.1 Influence de l'éclairement

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croît, les courbes I-V se décalent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus importante, figure (2.5).

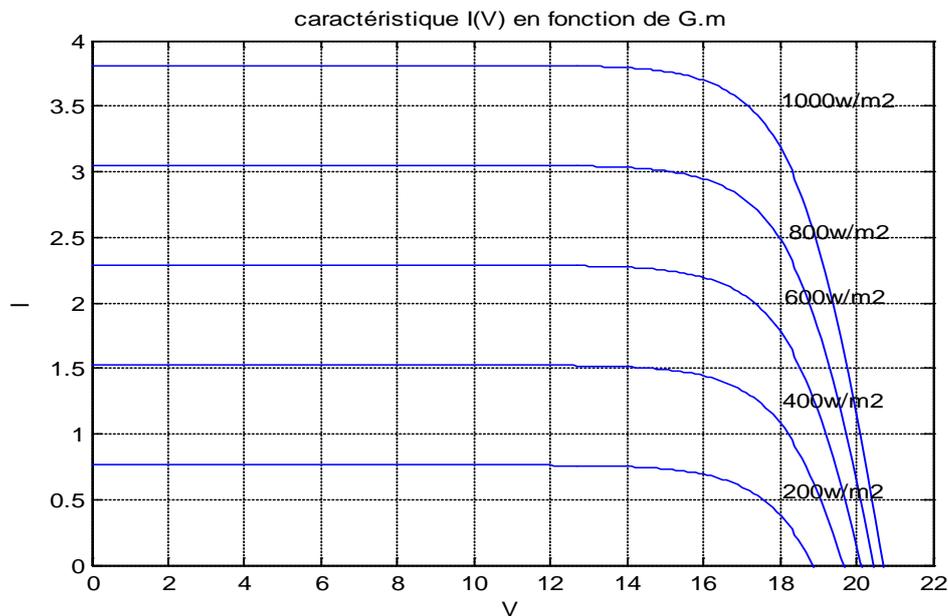


Fig 2.5: Caractéristique I(V) d'un module pour différents éclairement solaires

Et la même chose pour la caractéristique P(V) dans la figure (2.6).

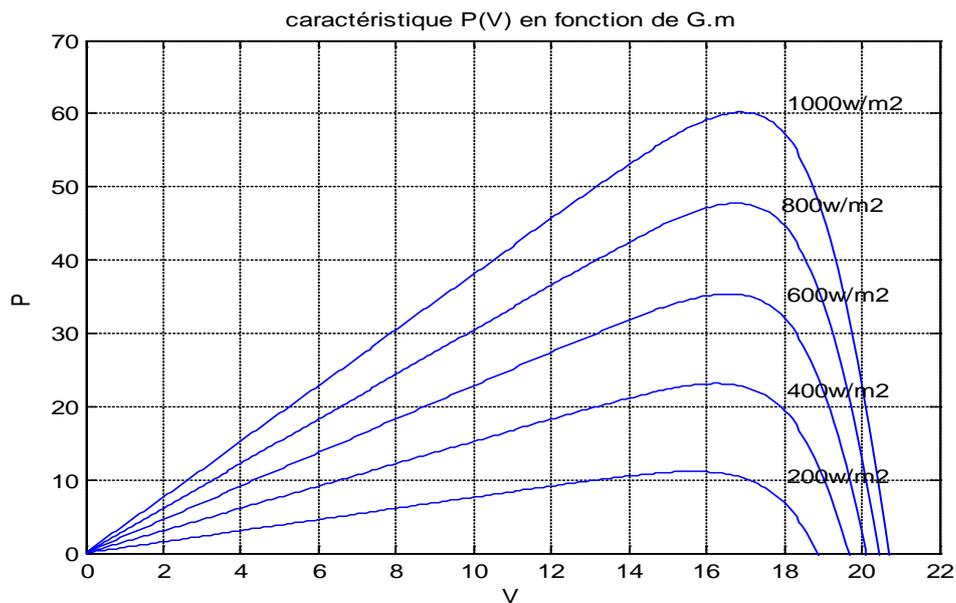


Fig 2.6 : Caractéristique P(V) d'un module pour différents éclairement solaires

II.4.2 Influence de la température

L'évolution de la caractéristique $I(V)$ montre que le courant est faiblement dépendant de la température alors que la tension est très sensiblement à la variation de la température. L'augmentation de la puissance va dans le sens inverse de T figure (2.7).

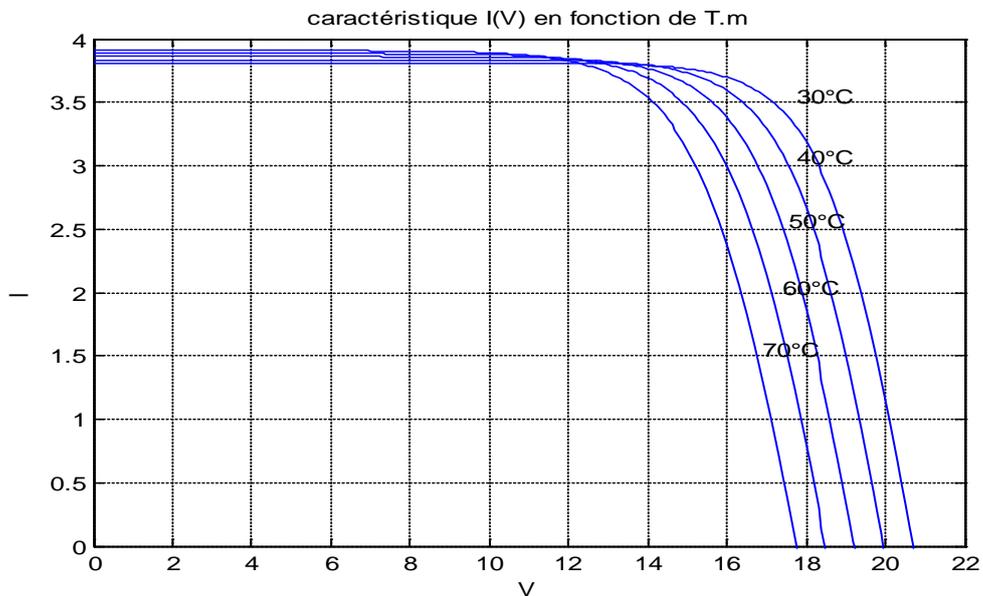


Fig 2.7 : Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes température

Et la même chose pour la caractéristique $P(V)$ dans la figure (2.8).

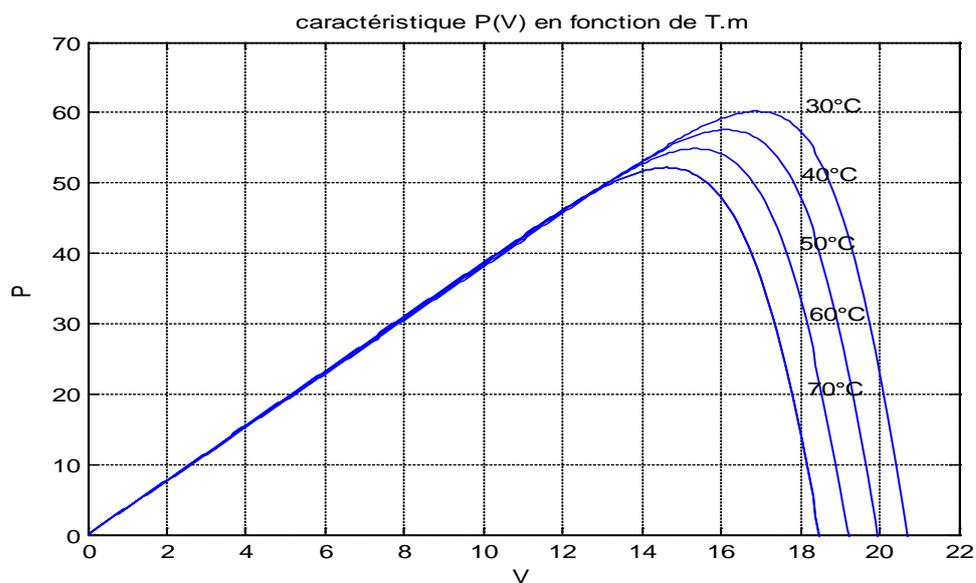


Fig 2.8: Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes température

II.4.3 Influence de la résistance série

Les performances d'une cellule sont d'autant plus dégradées que R_s est grande, la figure (2.9) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V. cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe $I=f(V)$ dans la zone où le module fonctionne comme une source de tension, à droite du point de puissance maximum, la chute de tension est liée au courant généré par le module.

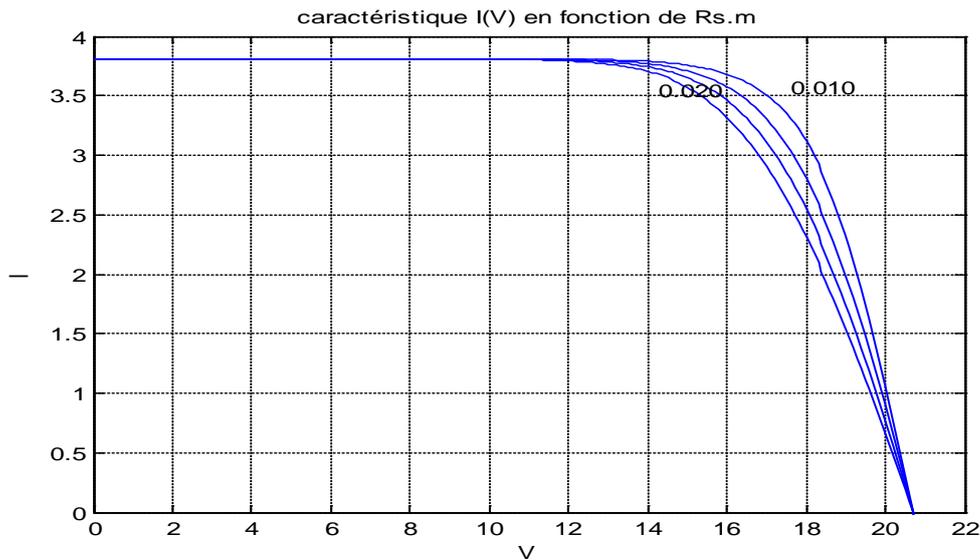


Fig 2.9 : Influence de la résistance série

II.4.4 Influence du facteur de qualité de la diode

D'après la figure (2.10), on peut constater que les valeurs les plus élevées du facteur de qualité ramollissent le genou de la courbe.

II.4.5: Influence des groupements des cellules en série

La plupart des modules disponibles ont un nombre entre 36 ou 72 cellules connectées en série. Par exemple un module de 36 cellules fournit une tension appropriée pour charger une batterie de 12V, et pareillement un module de 72 cellules est approprié pour une batterie de 24V. d'après la figure (2.10) on constate que chaque fois que l'on augmente le nombre des cellules on obtient des courants constants et des tensions qui sont multipliées par le nombre de cellules, ce que nous donne un rendement élevé.

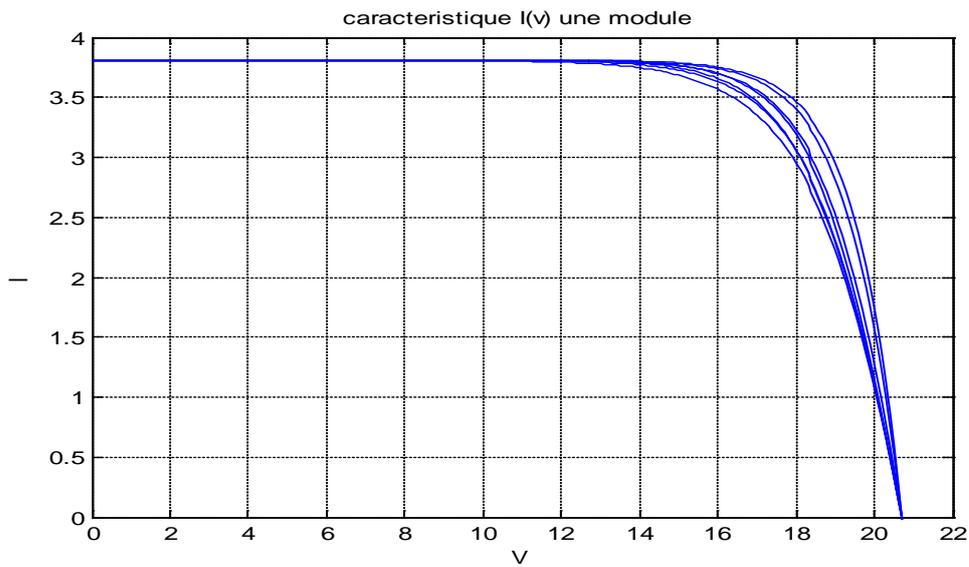


Fig 2.10 : Influence de facteur de qualité sur la caractéristique I(V)

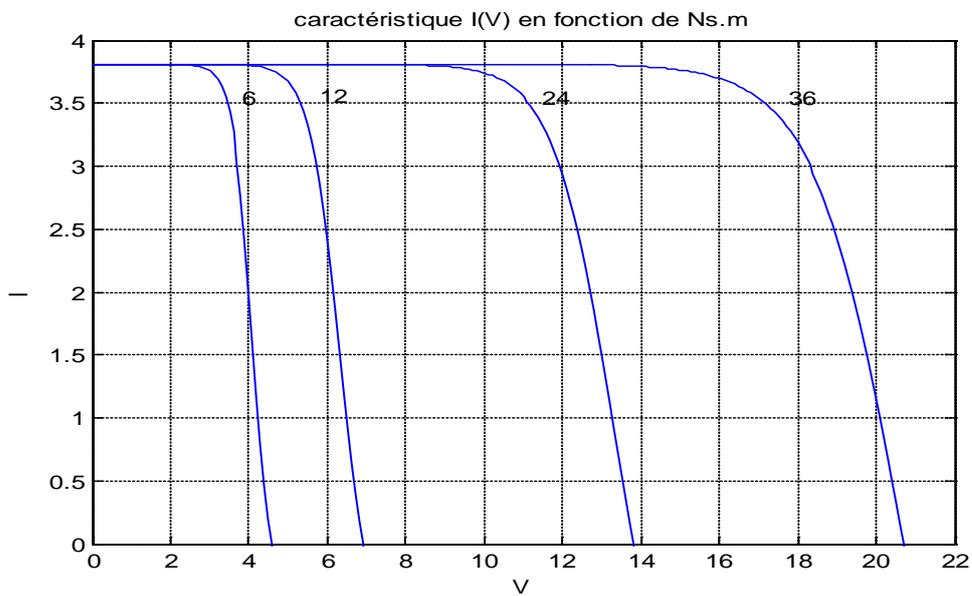


Fig 2.11 : Regroupement des cellules en série

II .5 Conclusion

Les performances d'un module PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement solaire et la température.

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le modèle à 4 paramètres pour simuler le fonctionnement du module PV (PW500 de PHOTOWATT) pour différentes conditions d'ensoleillement et de température.

D'après les résultats que nous avons obtenus, nous constatons que l'augmentation de la résistance série et le facteur de qualité se traduit par la dégradation de la courbe I (V) au niveau du coude.

Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données du constructeur.

CHAPITRE III
ETAGE D'ADAPTATION
POUR GENERATEUR
PV (MPPT)

III.1 Introduction

La production d'un GPV est variable, elle dépend d'une part du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi du vieillissement de l'ensemble, d'autre part de la charge qu'il alimente. Afin de maintenir la production stable et maximale, il faut assurer deux conditions nécessaires qui sont :

- Des conditions optimales (un éclairement élevé, une température basse et installation récente) pour que la production soit maximale.
- des charges optimales pour un transfert optimal.

La fluctuation de l'éclairement et la température au cours de la journée sont imposées par les conditions climatiques, par contre, l'atteinte de la charge optimale est l'objectif de ce travail.

Le problème du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge (surtout de type continue) n'est pas encore réellement résolu. Un des verrous technologiques qui existe dans ce type de couplage est le transfert de la puissance maximale du GPV à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale PPM [17][18].

Nous avons partagé notre travail en plusieurs parties.

D'abord, on va décrire la partie puissance du régulateur MPPT, la partie commande fera l'objet du chapitre suivant.

Puis, on va étudier les différents modes des couplages direct et indirect.

Ensuite, nous allons aborder les solutions qui vont améliorer le transfert de l'énergie par l'intermédiaire de l'étage d'adaptation.

Enfin, nous allons conclure par une analyse comparative entre couplage directe et indirect, et leur influence sur le rendement du système.

III.2 Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale

III.2.1 Principe

La conception de systèmes photovoltaïques optimisés doit prendre en compte la nature de la charge et les différents phénomènes qui peuvent influencer sur la source. Il faut donc arriver à concilier ces comportements avec ceux propres à une charge, qu'elle soit de nature continue (DC) comme des batteries ou bien alternative (AC) comme le réseau électrique 240V/50Hz.

Le principe donc est de faire fonctionner le système à sa puissance maximale, quel que soit les perturbations qui peuvent apparaître (variation de l'éclairement ou la température).

III.2.2 Point de puissance maximale

L'installation la plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un champ photovoltaïque et d'une charge (charge ou batterie) qui utilise directement l'énergie produite figure (3.1).

Cette installation ne fournit un effet utile que pendant les périodes ensoleillées et pour des températures bien définies. Le courant fournis à la charge dépend fortement de l'intensité de l'éclairement pour une température donnée et de la nature de la charge [26].

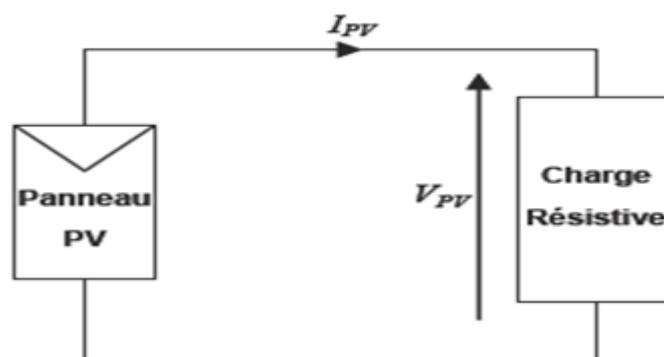


Fig.3.1 : Installation photovoltaïque

Sur le schéma de la figure au-dessus sont représentées, pour un éclairement et température donnés, les caractéristiques courant-tension du générateur PV connecté à la charge résistive R_S . Il apparaît que :

CHAPITRE III: ETAGE D'ADAPTATION POUR GENERATEUR PV (MPPT)

- Le générateur PV fonctionne à sa puissance maximale (P_{max}) lorsque :

$$V_{pv} = V_{opt}, I_{pv} = I_{opt}, R_s = R_{opt} = \frac{V_{pv}}{I_{opt}} \quad \text{III.1}$$

$$P_{pv} = V_{pv} * I_{pv} = P_{max} = V_{opt} * I_{opt} \quad \text{III.2}$$

Pour un éclairage donné, la condition optimale de fonctionnement des générateurs PV est alors caractérisée par une tension V_{opt} et un courant I_{opt} . Le produit V_{opt} par I_{opt} constitue ainsi le maximum de puissance qu'on peut extraire du module PV. Ce point (V_{opt} et I_{opt}) est appelé point de puissance maximale (PPM) du générateur PV pour une température et un éclairage donnés. Il est caractérisé par une résistance interne optimale R_{opt} du générateur.

- Les points P_1 , P_2 et PPM sont les points de fonctionnement du système de la figure (3.2) dans les conditions suivantes : $R_s < R_{opt}$, $R_s = R_{opt}$ et $R_s > R_{opt}$
- Lorsque la valeur de la charge est supérieure ou inférieure à celle correspondant aux conditions optimales R_{opt} la puissance fournie par le générateur est inférieure à celle optimale P_{max} .

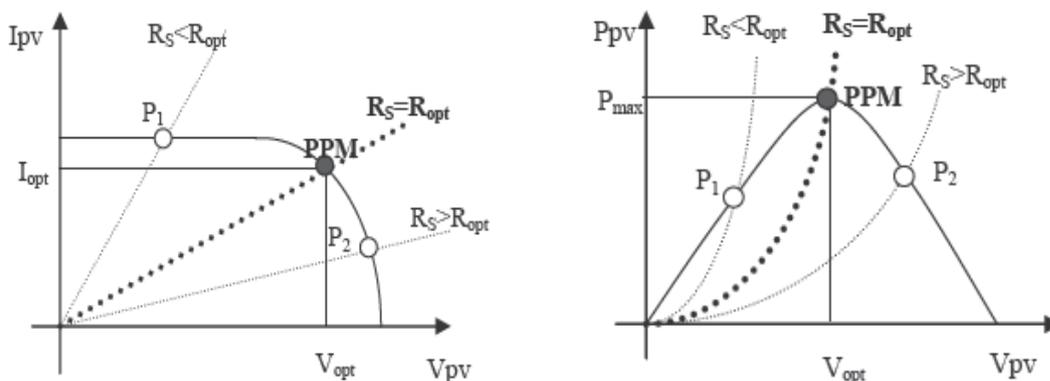


Fig 3.2 : Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du système dans les trois cas :

$$R_s < R_{opt}, R_s = R_{opt} \text{ et } R_s > R_{opt}$$

Remarque : Pour que le générateur PV travaille dans les conditions optimales il nous faut une régulation spéciale qui est assuré par un régulateur spécial dit : MPPT (Max Power Point Tracker).

III.2.3 Régulateurs MPPT

Dans ce régulateur, un circuit mesure en permanence de la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale. Ceci permet de garantir que le maximum d'énergie sera récupéré, quels que soient la température et l'ensoleillement. En général, ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale de l'ensemble des panneaux et un deuxième circuit transforme le courant et la tension pour l'adapter avec la charge [12].

Le but d'un tel régulateur de charge est de détecter et de placer le circuit au point de puissance maximal que nous pouvons observer sur le graphique suivant.

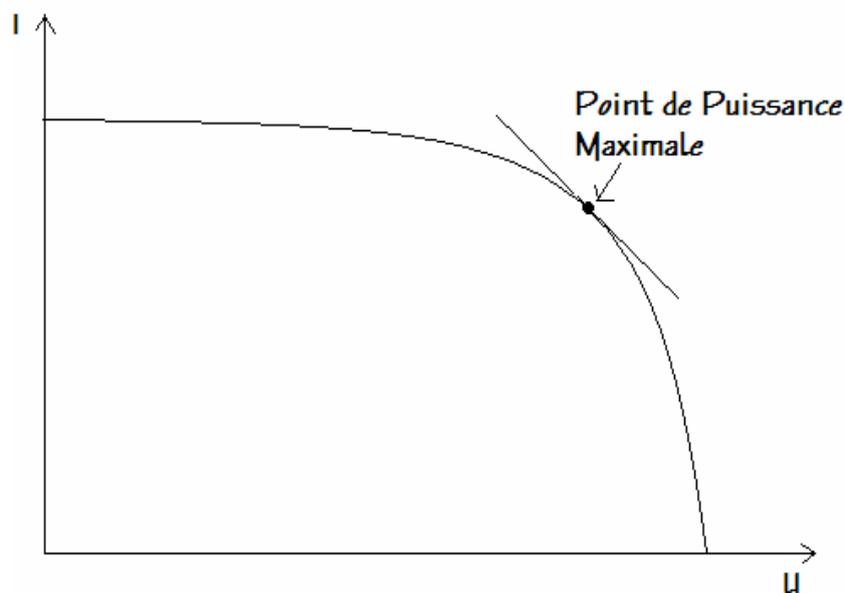


Fig 3.3 : Caractéristique aux bornes d'un panneau solaire- situation du Point de Puissance Maximale

Le régulateur MPPT est constitué de deux parties distinctes [12]:

- **La partie commande** : dont le but est de déterminer le point de fonctionnement, de la partie puissance, où les panneaux pourront transmettre la puissance la plus importante aux batteries

CHAPITRE III: ETAGE D'ADAPTATION POUR GENERATEUR PV (MPPT)

- **La partie puissance** : qui assure le transfert d'énergie entre les panneaux solaires et les batteries

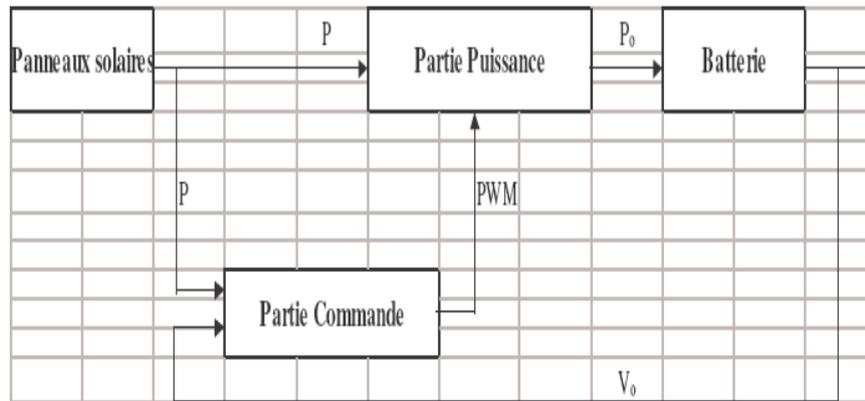


Fig 3.4: Schéma bloc du MPPT

En résumé, le régulateur MPPT est l'ensemble d'une partie de puissance (convertisseur statique) et la partie de commande (les différents algorithmes).

III.3 Connexion directe entre la source et la charge

L'utilisation directe de l'énergie sortant d'un générateur PV est possible. Par exemple, un panneau PV peut être directement connecté à une charge. Il faut cependant que la charge accepte la tension et le courant continus délivrés par le générateur.

Ce type de connexion est aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté [10].

De plus, chaque charge que ce soit en continu ou alternatif (batterie, résistance, impédance) a son comportement propre.

CHAPITRE III: ETAGE D'ADAPTATION POUR GENERATEUR PV (MPPT)

Ainsi, pour qu'une connexion source-charge soit possible, un point de fonctionnement correspond à l'intersection des caractéristiques électriques doivent exister. Pour simplifier en prend l'exemple d'une connexion directe entre un GPV et une charge figure (3.5), la présence de la diode anti-retour est indispensable pour empêcher la circulation d'un courant négatif vers le module PV.

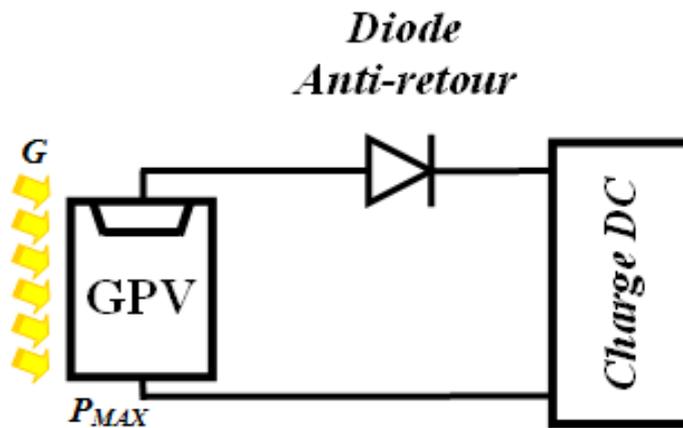


Fig. 3.5 : Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.

Cependant, cette configuration n'offre aucun type de limitation et/ou de réglage de la tension de la charge. Ce qui la restreint à des applications nécessitant une tension fixe ou faiblement variable [10].

Un GPV peut être connecté directement à trois types de charges

- Une charge de type source de tension continue.
- Une charge de type source de courant continu.
- Une charge purement résistive.

Sur la figure (3.6), nous avons représenté les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un GPV ainsi que les caractéristiques $I(V)$ des trois types de charges.

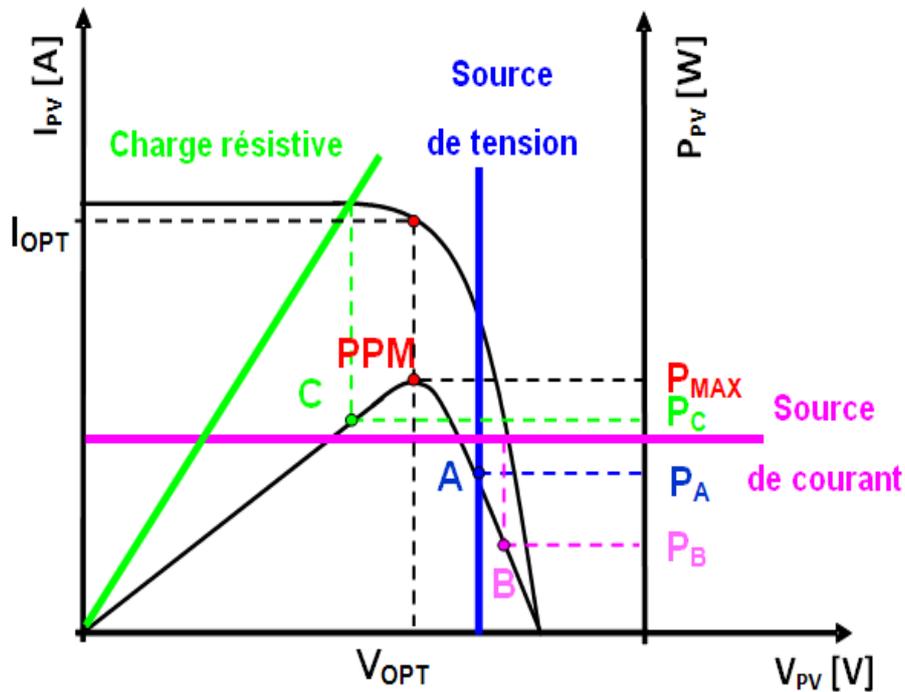


Fig 3.6: Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.

D'après la figure (3.6), nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale (P_{max}) pour un courant optimal (I_{opt}) et une tension optimale (V_{opt}), point nommé PPM. Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques $I(V)$ du générateur et celles des trois types de charges [17] :

- 1) Point A pour une charge résistive.
- 2) Point B pour une charge de type source de tension.
- 3) Point C pour une charge en source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement P_A , P_B et P_C , ces cas de figures montrent que le GPV est mal exploité et ne fournit pas la puissance maximale potentielle, la différence étant perdue sous forme de chaleur dissipée dans le générateur [10][17].

CHAPITRE III: ETAGE D'ADAPTATION POUR GENERATEUR PV (MPPT)

L'exemple que nous avons donné de la connexion directe entre GPV et les différents types des charges (charge résistive, de type source de tension et charge de source de courant) est bien expliqué dans la représentation par PowerPoint de Christian GLAIZE [30].

Dans le cas général la charge du générateur PV est une batterie, le rendement du système dépend de l'écart entre la tension optimale du générateur PV et la tension de batterie qui varié en fonction de son état de charge.

À travers ces exemples, on peut montrer rapidement les limites de la connexion directe autant sur les pertes de production qu'elle entraîne que sur les limites des applications compatibles (DC). Des recherches sur des solutions novatrices optimisant mieux la production d'énergie PV sont d'actualité et même nécessaires pour amener l'énergie PV à un degré de fiabilité comparable à une source d'énergie traditionnelle [10].

A travers ces exemples, on peut conclure que cette configuration :

- N'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la charge,
- Les formes des tensions et des courants délivrés par le générateur ne sont pas compatibles avec la charge (cas d'une charge devant être alimentée en sinusoïdal),
- Le transfert de P_{\max} disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti.

En résumé, la connexion directe est surtout utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre, son coût minimal et sa fiabilité. En termes de rendement, même si la puissance du GPV est choisie judicieusement par rapport à la charge, ce type de connexion souffre souvent d'une mauvaise adaptation électrique et présente des pertes importantes de production d'énergie.

III.4 Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des PMM, ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférer à la charge en mode connexion direct [17].

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (3.7). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{\max} disponible [18].

Aujourd'hui, on peut trouver deux types d'étages d'adaptation électroniques distincts commercialisés.

Le premier type permet de connecter le GPV à une charge continue telle qu'une batterie. Il fait appel à des convertisseurs DC-DC. Ce type d'architecture est la plupart du temps utilisé pour un fonctionnement en site isolé (hors réseau, off-grid en anglais).

Dans certains cas, il n'y a pas le choix car les caractéristiques de la charge ne sont pas compatibles avec la forme d'électricité produite par un GPV. C'est le cas de toutes les charges ayant besoin des tensions alternatives. Dans ce cas, on fait appel à un second type d'architecture permettant d'effectuer une conversion continu-alternatif (DC-AC).

L'étage d'adaptation (partie de puissance) se compose généralement d'un convertisseur statique, qui situé entre les panneaux solaires et la charge.

Par définition un convertisseur statique est un montage permettant par une commande pertinente de un ou plusieurs interrupteurs à semi-conducteur de régler un transfert d'énergie entre une source et un récepteur, Usuellement, au sein d'un MPPT, deux types de convertisseurs statiques sont utilisés:

CHAPITRE III: ETAGE D'ADAPTATION POUR GENERATEUR PV (MPPT)

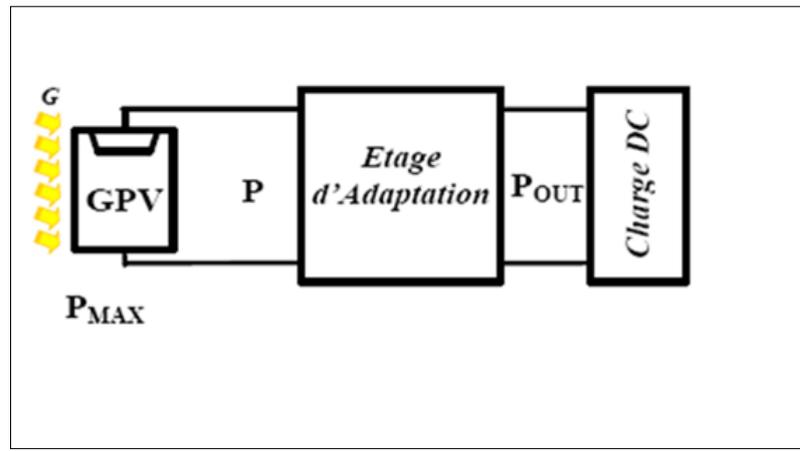


Fig 3.7 : Chaîne de conversion photovoltaïque.

- des convertisseurs de type « Boost » : la tension en sortie (aux bornes de la batterie) est plus importante que celle en entrée (aux bornes du panneau solaire)
- des convertisseurs de type « Buck » : la tension en sortie est alors plus faible que celle en entrée.

L'étage d'adaptateur est le plus souvent un hacheur DC-DC, grâce à son commande, en peut à chaque instant ouvrir ou fermée l'interrupteur pour changer le point de fonctionnement, l'adaptation se fait par la variation du rapport cyclique de la commande de l'interrupteur du convertisseur.

Il existe d'autres types d'adaptation comme l'utilisation des transformateur et des girateur DC, mais sont moins utilisé par rapport les hacheurs [17].

En résumé, la connexion entre une source et une charge peut être optimisée en ajustant le rapport cyclique α pour que d'un côté, le générateur puisse fonctionner à R_{opt} et d'un autre coté que la charge puisse varier à sa guise dans la mesure où le point d'intersection source-charge continue à exister.

III.4.1 Structure des convertisseurs d'énergie élévatrice et abaisseur

Le choix de la structure de conversion est effectué en fonction de la charge à alimenter. Nous avons besoin de structures de conversion survoltrice ou désolatrice en fonction de la caractéristique de cette charge. Deux types de convertisseurs statiques sont utilisés :

III.4.1.1 Structure de convertisseur survolteur

Le schéma de réalisation de l'étage d'adaptation d'un GPV à partir d'un convertisseur de type boost est présenté en figure (3.8). Cette structure élévatrice est plutôt destinée aux applications où la tension de la batterie est supérieure à la tension de circuit ouvert U_{OC} du générateur [26],

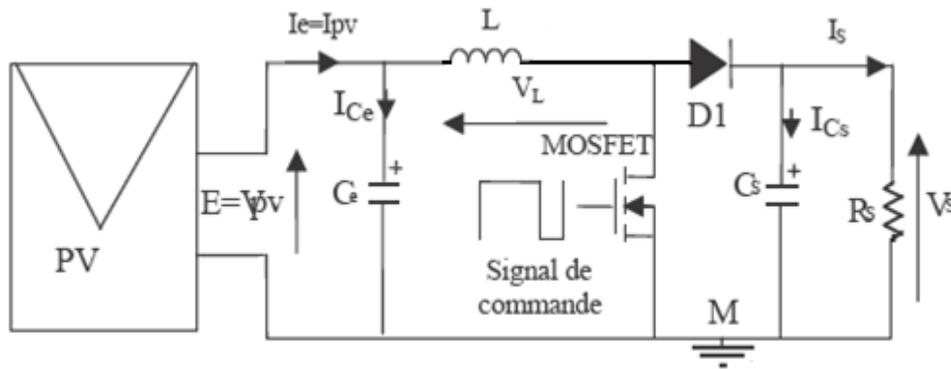


Fig 3.8 : Schémas d'hacheur de type élévateur

Les équations de la tension et de courant en régime établi sont :

$$V_S = \frac{V_{PV}}{1-\alpha} \quad \text{III.1}$$

Cette équation montre que la tension V_S est en fonction du rapport cyclique α et supérieur à celle d'entrée V_{PV} .

$$I_S = (1 - \alpha)I_{PV} \quad \text{III.2}$$

Cette dernière équation montre que le courant de sortie I_S est en fonction du rapport cyclique et il inférieur à celui d'entrée.

L'adaptation optimale est alors réalisée lorsque I_{PV} et V_{PV} valent respectivement I_{OP} et V_{OP} . Ceci correspond alors à une résistance optimale R_{OPT} du générateur répondant à l'équation suivante :

$$R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} = (1 - \alpha)^2 \frac{V_S}{I_S} = (1 - \alpha)^2 R_S \quad \text{III.3}$$

III.4.1.2 Structure de convertisseur abaisseur

Le schéma de réalisation de l'étage d'adaptation d'un GPV à partir d'un convertisseur de type Buck est présenté en figure (3.9). Cette structure élévatrice est plutôt destinée aux applications où la tension de la batterie est supérieure à la tension de circuit ouvert U_{OC} du générateur [2,6].

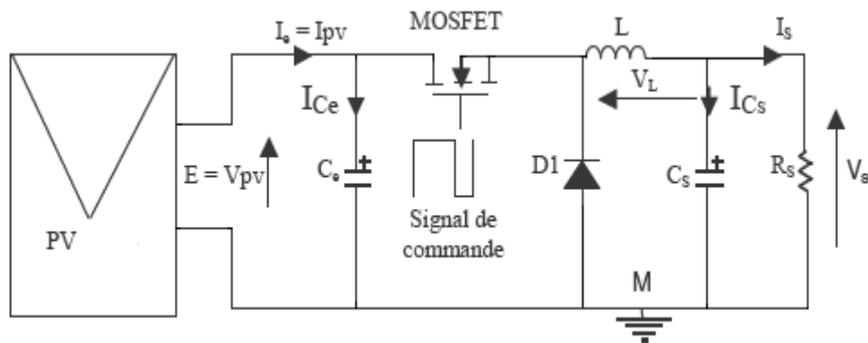


Fig 3.9 : Schémas d'hacheur de type abaisseur

Les équations de la tension et de courant en régime établi sont :

$$I_S = \alpha V_{PV} \quad \text{III.4}$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre le générateur et la charge se conserve alors nous pouvons écrire :

$$I_S = \frac{I_{PV}}{\alpha} \quad \text{III.5}$$

Les relations précédentes montrent que la tension V_S est inférieure à celle d'entrée et le courant I_S est supérieur à celui d'entrée I_{PV} .

Dans les conditions optimales et pour une charge R_s donnée, la résistance à la sortie du panneau $R_{pv}=R_{opt}$ et le rapport cyclique $\alpha= \alpha_{opt}$ obéissent à l'équation :

$$R_{opt} = \frac{1}{(\alpha_{opt})^2} R_S \quad \text{III.6}$$

III.5 Critères d'évaluation entre connexion direct et à l'intermédiaire d'un étage d'adaptation

III.5.1 Etude comparative entre connexion direct et indirect

Dans le cas d'une connexion directe entre une batterie et un générateur photovoltaïque, le rendement du système dépend de l'écart entre la tension optimale du générateur photovoltaïque et la tension de batterie qui varie en fonction de son état de charge.

Ainsi pour une batterie au plomb de tension nominal de 12V et un générateur PV constitué par exemple d'un module de tension optimale $V_{opt} = 16.7$ V et de courant optimal $I_{opt} = 4.7$ A, la tension de la batterie en début de charge étant égale à 12V et le courant de charge I_b de 5A et compte tenue que le point de fonctionnement est égal au courant de court-circuit du générateur PV, $I_{cc} = 5$ A, le rendement de l'ensemble sera :

$$\eta = \frac{V_b \times I_b}{V_{opt} \times I_{opt}} = \frac{12 \times 5}{16.5 \times 4.7} = 76.4\% \quad \text{III.7}$$

Si l'état de charge de la batterie est tel que sa tension vaut 14 V, le rendement atteint alors :

$$\eta = \frac{14 \times 4.9}{16.5 \times 4.7} = 87\% \quad \text{III.8}$$

D'après l'exemple précédent, nous avons montré l'importance d'introduire un étage d'adaptation entre un GPV et une charge, par ce que toujours nous assure une charge maximale de la batterie c'est-à-dire un rendement élevé.

On peut confirmer ca, par les travaux réalisés par Angel Cid-Pastor, dans le cadre de sa thèse sur la conception et la réalisation de modules photovoltaïques électroniques à l'échelle de 100Wc [16,27], ont montré le bénéfice à utiliser un étage d'adaptation électronique par rapport à une utilisation d'une simple connexion directe par diode anti-retour.

Un exemple de résultats de ses travaux est consigné en figure (3.10) et représente la superposition des rendements MPPT des deux types de connexion. Cela permet de constater que le η_{MPPT} de l'étage d'adaptation avec fonction MPPT est toujours supérieur à celui de la diode. De plus, le η_{MPPT} de l'étage est indépendant du niveau tension de la batterie contrairement au cas d'une connexion directe.

CHAPITRE III: ETAGE D'ADAPTATION POUR GENERATEUR PV (MPPT)

Généralement, dans le cas de couplage direct le point fonctionnement est rarement au point MPP du module PV, de ce fait il ne produit pas la puissance maximum. Une étude prouve qu'un couplage direct utilise seulement 31% de la capacité de PV [47].

Pour atténuer ce problème, un régulateur (MPPT) peut être employé pour maintenir le point de fonctionnement du module PV au point MPP. L'MPPT peut extraire plus de 97% de la puissance de PV si correctement optimisé [46].

De plus, pour augmenter la production d'un GPV, on trouve de plus en plus d'étages d'adaptation entre le panneau et la charge, dans le but d'optimiser le transfert de puissance. Bien sûr, ces étages présentent un surcoût par rapport à la connexion directe qui ne nécessite qu'une simple diode. De nombreuses études montrent qu'une réduction du prix du kWh produit par un GPV, outre son augmentation du rendement η_{PV} , pourrait s'effectuer par une augmentation de l'énergie transmise du GPV à la charge par l'intermédiaire de gestionnaires appropriés [16].

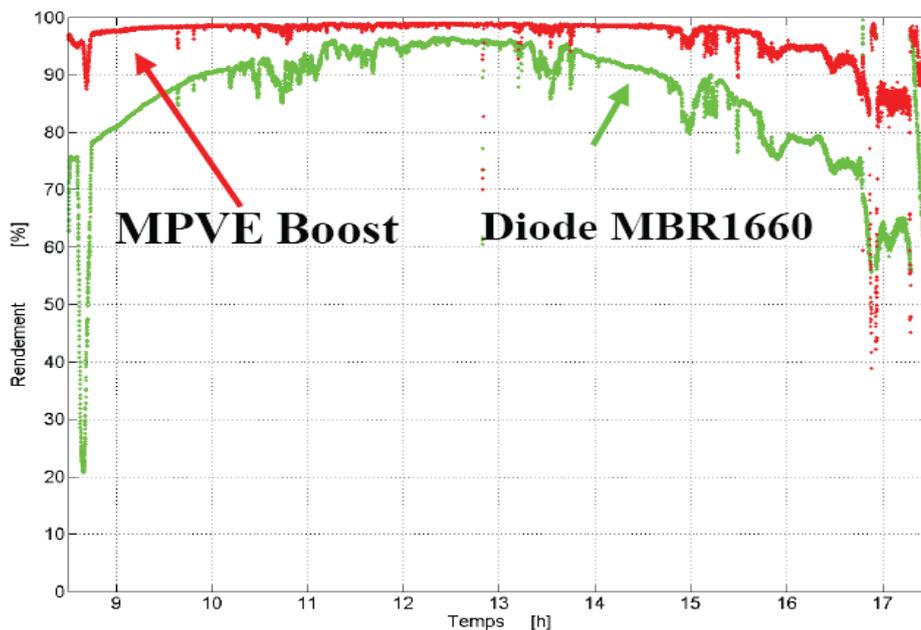


Fig 3.10 : Comparaison de η_{MPPT} pour une connexion directe (Diode) et à l'aide d'un étage d'adaptation de type Boost avec MPPT (MPVE).

CHAPITRE III: ETAGE D'ADAPTATION POUR GENERATEUR PV (MPPT)

III.5.2 Recherche du point optimal de fonctionnement

Dans cette partie, on va introduire un étage d'adaptation dans un programme MATLAB, afin de fonctionner le module dans sa puissance maximal, et en variant chaque fois les éclairagements et la température.

La fonction Test_Caracteristiq_I_Imax_G.m, permet de calculer la puissance maximale du module photovoltaïque et d'obtenir le point optimal de fonctionnement du modèle.

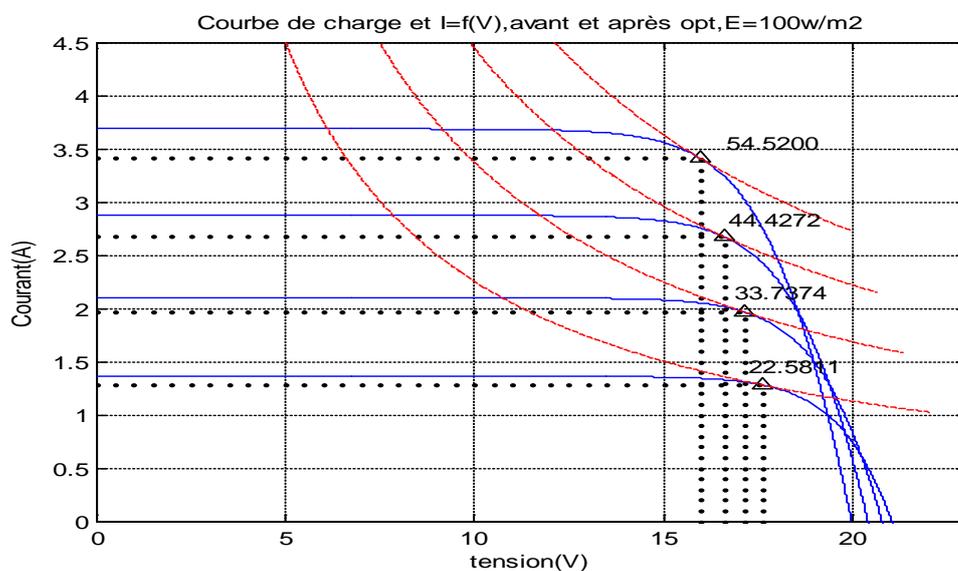


Fig 3.11: Caractéristiques courant-tension et puissances optimales.

Le tableau suivant donne la valeur de la tension, le courant et ainsi la puissance nominale, calculée en fonction du rayonnement :

Rayonnement W/m ²	Température [°C]	Tension maximale [V]	Courant maximal [A]	Puissance nominale [W]
1000	50	15.97	3.44	54.52
800	40	16.60	2.71	44.42
600	30	17.17	2.00	33.73
400	20	17.64	1.31	22.58

Tableau (3.3) : Puissance maximale de module photovoltaïque

CHAPITRE III: ETAGE D'ADAPTATION POUR GENERATEUR PV (MPPT)

Nous constatons d'après les valeurs de tableau (3.3) que l'adaptateur assure toujours la puissance maximale quel que soit la variation de l'éclairement et la température, une propriété que ne le trouve pas en cas du couplage direct.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le concept, la constitution et le rôle de régulateur MPPT, par la suite nous avons faire une comparaison entre le couplage direct et indirect, on peut aboutir à deux résultats :

- les limites de la connexion direct et comment nous pourrions optimiser la puissance fournie par le GPV.
- L'importance d'introduire un étage d'adaptation, afin d'augmenter le rendement du module ou panneau.

CHAPITRE IV

Modélisation et Simulation

de MPPT par la

Commande P&O

IV.1 Introduction

Pour que l'adaptation se fasse automatiquement à tout instant, un certain nombre de lois de commande ont été élaborées, toutes ont pour objectif d'effectuer une recherche automatisée du PPM du système, en se basant sur la nature convexe des courbes de puissance du générateur PV ou, plus généralement, d'une source non-linéaire. Ce type de commande est connu sous le nom de (**commande extrémale ou régulateur extrémal**) [9].

Le type de commande MPPT la plus décrite dans la littérature est basé sur la mesure du courant et de la tension de la source. Deux types d'implantation existent (analogique ou numérique) en fonction de la complexité des algorithmes implantés [9].

Dans ce travail, nous avons opté pour l'approche d'adaptation pour la commande MPPT analogique par raison de simplicité de réalisation et sa dynamique satisfaisantes vis-à-vis des autres implantations.

Dans la section suivante, nous présentons un bilan des différents types d'algorithmes MPPT présents dans la littérature ainsi que l'algorithme de commande que nous avons choisis pour notre étude.

IV.2 Commande pour la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas des sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature (Recherche du Point de Puissance Maximum, MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance [10]. La figure (4.1) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT.

Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge [10].

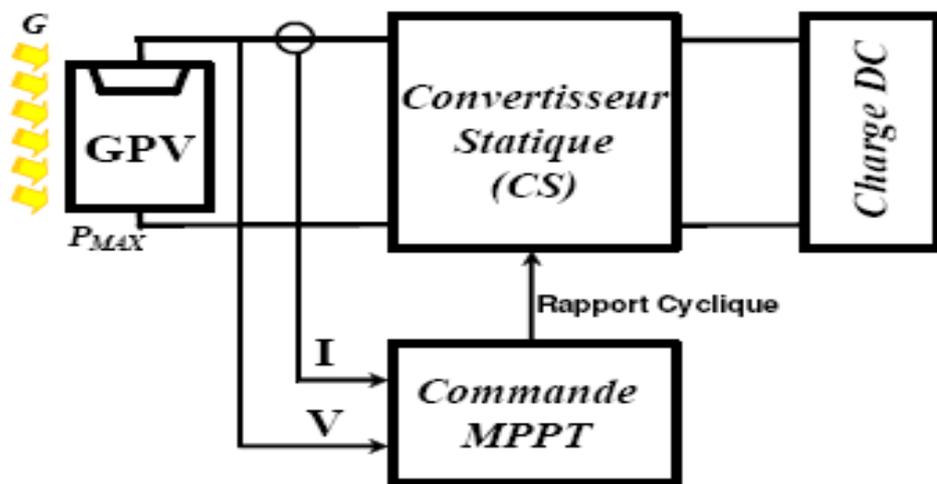


Fig.4.1: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec sa commande.

IV.2.1 : Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature

Divers publications sur des commandes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de la publication de première lois de commande sur ce type, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type PV [44].

Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous ne présentons que le principe de base des principaux types de commande, ensuite décrire la commande que nous avons choisis pour l'étudier.

IV.2.2: Les Différents commandes de MPPT

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM [25, 22]. Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ (P&O) et l'incrément de conductance (IncCond) [10].

IV.2.2.1: Méthode « Perturbation et Observation »

Le principe des commandes MPPT de type **P&O** consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (4.2), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM [10].

IV.2.2.2: Principe des commandes « Hill Climbing »

La technique de contrôle nommée Hill Climbing consiste à faire monter le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum.

Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au CS.

Mathématiquement, le PPM est atteinte lorsque $dP_{pv}/d\alpha$ est forcé à zéro par la commande, comme le montre la figure (4.3).

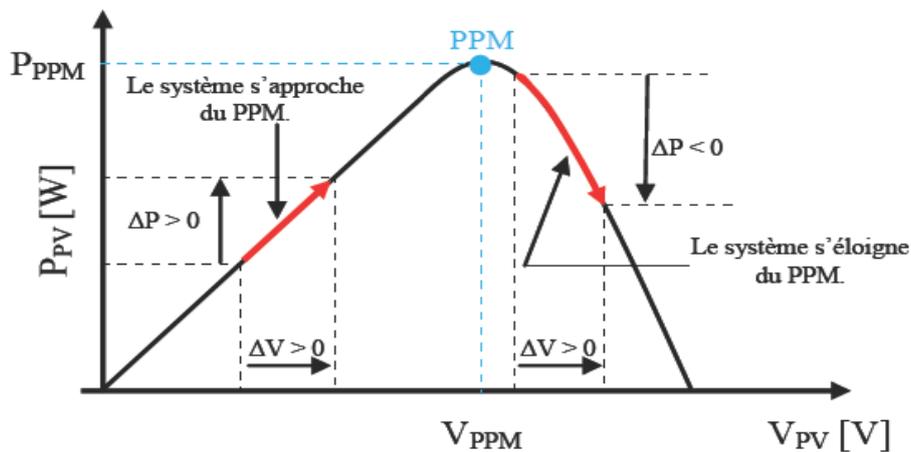


Fig.4.2 : Principe de la commande P&O

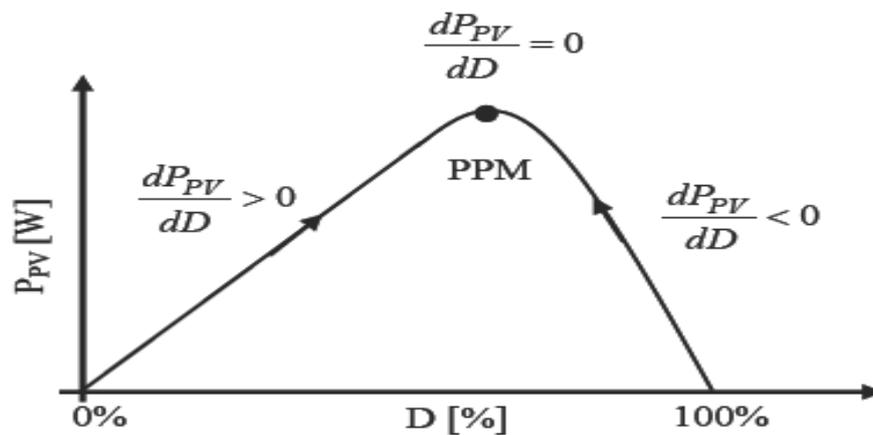


Fig.4.3 : Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique.

IV.2.2.3: Méthode de la « Conductance Incrémentielle »

Nous allons dans cette méthode nous intéresser directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. La conductance est une grandeur physique relativement connue : il s'agit du quotient de l'intensité par la tension ($G=I/V$). La conductance incrémentielle est beaucoup plus rarement définie, il s'agit du quotient de la variation, entre deux instants, de l'intensité par celle de la tension ($\Delta G = dI / dV$) [10][13].

En comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG , nous allons chercher le maximum de la courbe (figure 4.5) en cherchant le point d'annulation de la dérivée de la puissance [13]. Nous déduisons facilement les actions à faire dans les différents cas sur le schéma $P=f(V)$.

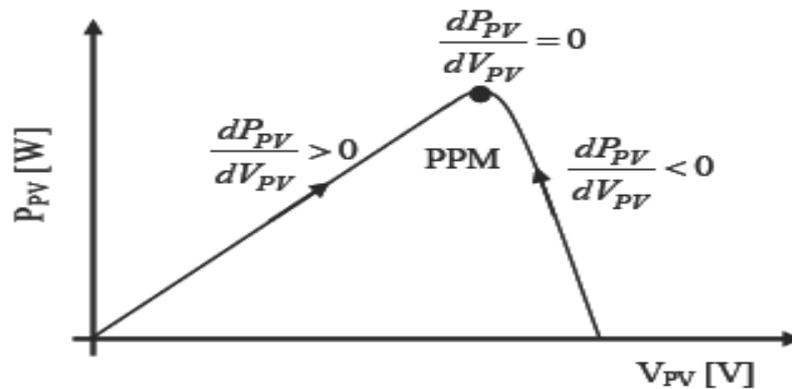


Fig.4.5: Evolution de la puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau

Il existe encore d'autres algorithmes qui peuvent être utilisés dans la recherche du Point de Puissance Maximale. Nous pouvons par exemple citer les méthodes basées sur des relations de proportionnalité (Mesure de V_{OC} , Mesure de I_{CC}), les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue et les commandes MPPT de réseaux de neurones artificiels [10].

La méthode que nous avons choisie est l'algorithme de perturbation et observation (P&O) est le plus utilisé parmi les autres commandes.

IV.3: Conception du système de poursuite du point optimum de fonctionnement (commande P&O)

IV.3.1: Principe de la régulation

Soit une grandeur P , la puissance fournie par les modules photovoltaïques présentant un et un seul maximum, en fonction d'une autre grandeur V , la tension appliquée aux bornes du générateur.

Soit (V_0, P_0) , (V_g, P_g) et (V_d, P_d) , différents points de fonctionnement, (V_0, P_0) étant le point optimum, voir figure (4.6). On peut étudier l'effet d'une perturbation périodique de faible amplitude autour de V_0 , V_g et V_d sur la variable de sortie autour des valeurs correspondantes P_0 , P_g et P_d [5][19].

- Si V se trouve à gauche du point optimum, les oscillations autour de P_g seront en phase avec celles appliquées à V_g .

CHAPITRE IV : Modélisation et Simulation de MPPT par la Commande P&O

- Si V se trouve à droite du point optimum, les oscillations autour de P_d seront en opposition de phase par rapport à celles appliquées à V_d .
- Au point optimum l'amplitude des oscillations est très faible et leur fréquence est doublée.

Dans les deux premiers cas, plus on s'écarte du point optimum, plus l'amplitude des oscillations est grande. De ces constatations, on peut déduire une méthode pour la recherche du point optimum. On applique en permanence des oscillations de commande (la tension appliquée aux modules) autour du point de fonctionnement considéré [5].

Trois cas se présentent :

- Soit les oscillations sont en opposition de phase et une diminution de la tension sera nécessaire.
- Soit les oscillations sont en phase et une augmentation de la tension sera nécessaire.
- Soit les oscillations sont très faibles et de fréquence double, on est alors au point optimum.

L'augmentation ou la diminution de la tension se fait à travers la commande MLI du hacheur, donc par le rapport cyclique α .

La relation qui donne l'écart $\Delta\alpha$ dans un système perturbé est [5]:

$$\Delta\alpha = K \int \frac{dp}{dt} * \frac{dV}{dt} dt \quad (IV.1)$$

Dans notre cas l'optimisation de la puissance se fait par le courant qui alimente la charge, donc optimiser la puissance revient à optimiser ce courant.

La relation (IV.1) devient

$$\Delta\alpha = K \int \frac{dI_b}{dt} * \frac{dV}{dt} dt \quad (IV.2)$$

K est un réel qui dépend du gain de la commande MPPT et sa position (positive ou négative), donc de l'emplacement du point de fonctionnement.

- $K < 0$: on est à gauche du point optimum.
- $K > 0$: on est à droite du point optimum.

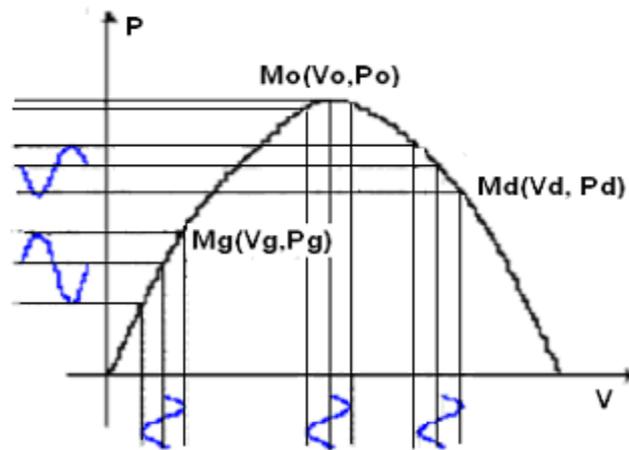


Fig.4.6 : Principe de la régulation

Pour savoir si un signal périodique est en phase ou en opposition de phase avec un autre signal de même fréquence, une démodulation est nécessaire. Si les deux signaux ont une valeur moyenne nulle, leur produit aura une valeur non nulle qui dépend de leur déphasage relatif, si elle est positive, les signaux sont en phase, si par contre elle est négative, ils seront en opposition de phase [5].

IV.3.2: L'organigramme fonctionnel : l'organigramme fonctionnel de cet algorithme est le suivant :

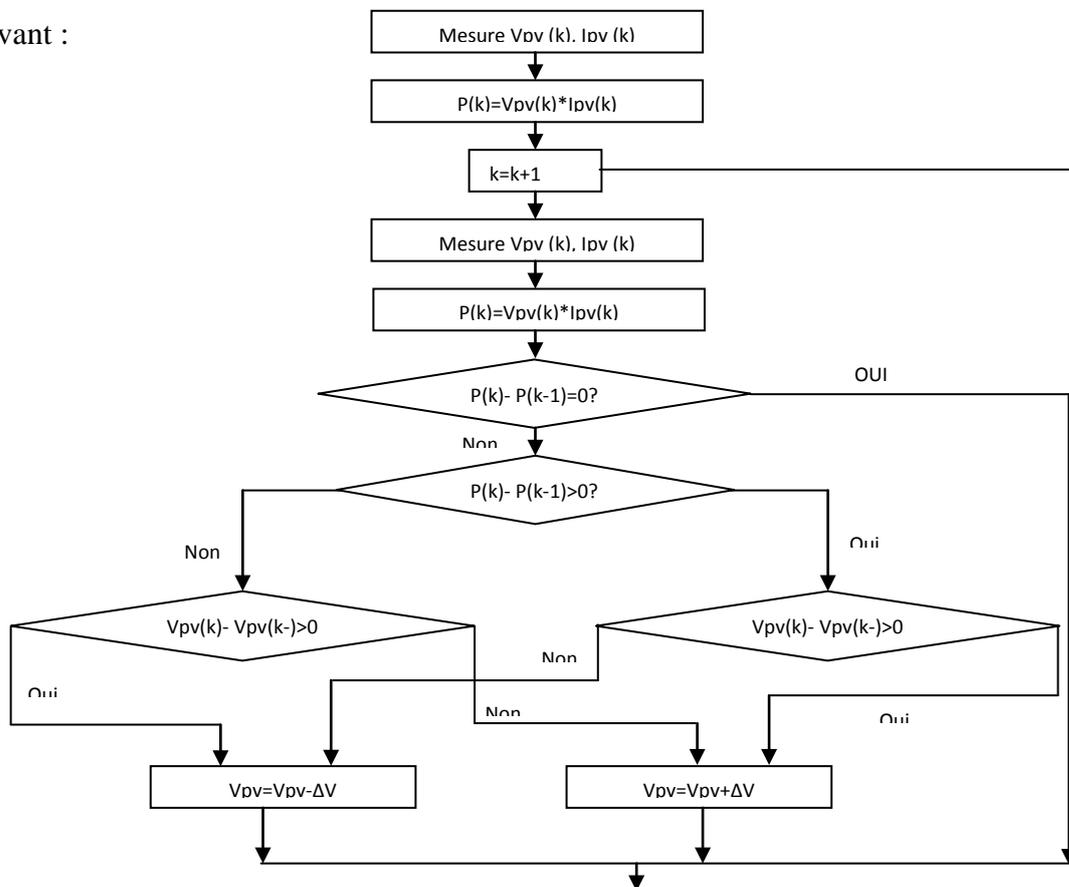


Fig.4.7: Diagramme fonctionnel algorithme (P&O)

IV.4 : Simulation et synthèse du système global

Le système est composé de trois éléments distincts, le panneau PV, le convertisseur de type hacheur survolteur (partie de puissance) avec sa commande (partie de commande) qui représentent les deux le régulateur MPPT et la charge (batterie). Pour chacune des parties, un modèle simple à été choisis en vue de la simulation. Ceci nous permet de mieux comprendre l'influence des paramètres du système et d'en dégager les conclusions intéressantes.

IV.4.1 : Simulation de panneau PV

Nous présentons ici un modèle à une diode plus simple qu'un modèle équivalent à une deux diodes. La figure (4.8) présente les constituants de ce modèle [19].

La détermination des paramètres du modèle peut se faire comme suit. Prenons par exemple un panneau solaire SP75 de caractéristiques suivants :

Puissance maximale P_{max}	75MW
Tension maximale optimale V_{opt}	17.5V
Courant maximal optimal I_{opt}	4.41A
Tension de circuit ouvert V_{co}	21.7V
Courant de court-circuit I_{cc}	4.8V
Resistance série R_s	12m Ω

Tableau (4.4) : Caractéristiques des panneaux solaire SP75

Le générateur V1 est fixé à une valeur supérieure ou inférieure à la valeur du V_{opt} .

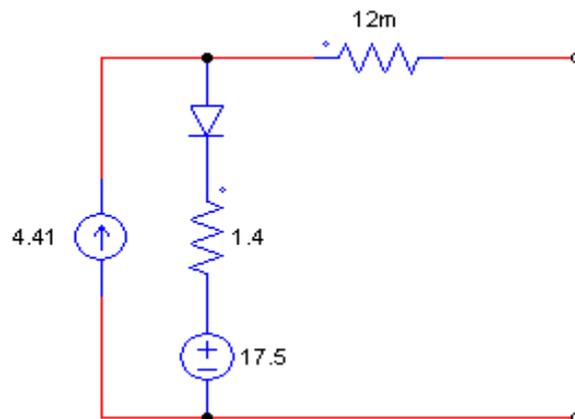


Fig.4.8 : Modèle d'un panneau solaire sous PSIM

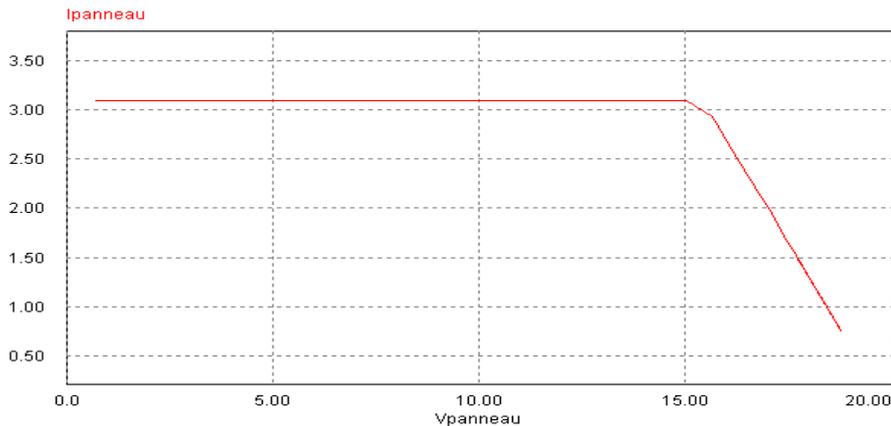


Fig.4.9 : Caractéristiques du modèle du panneau

IV.4.2: Simulation de l'ensemble panneau-hacheur-batterie

Après avoir défini le type de circuit que nous allons réaliser (un circuit de type Boost en ce qui nous concerne), avant de faire réaliser le circuit de puissance, il fallait déterminer les composants que nous allons utiliser, afin de prévoir les tensions, courants, etc..mis en jeu. De plus, suivant les types ou même marques des composants, les branchements pouvaient différer. Dans cette partie, nous développerons les calculs et le choix précis des valeurs des composants [13].

IV.4.2.1: Détermination des composants de la carte puissance

Déterminer les caractéristiques de la carte de puissance est une étape critique dans la construction du MPPT. Certes, tout composant inadapté peut logiquement empêcher un fonctionnement optimal de cette carte de puissance [13].

Dans notre type de panneau SP75, le convertisseur doit remplir les conditions suivantes [26]:

- Le convertisseur fournit une tension réglable à la valeur souhaitée (dans notre cas égale 24V) à partir du panneau SP75, avec une ondulation résiduelle en tension de sortie ne dépassant pas 10 mV et en entrée ne dépassant pas 100 mV.
- Le convertisseur fonctionne en conduction continue pour un courant de charge I_s qui varie de 0.3A à 4.8A (soit de 6% à 100% de sa valeur maximale). En dessous de 0.3A,

CHAPITRE IV : Modélisation et Simulation de MPPT par la Commande P&O

l'utilisation du convertisseur n'est pas intéressante puisque son rendement est trop faible. Donc, la charge maximale ($R_{s_{max}}$) admissible est :

$$R_{s_{max}} = \frac{100}{0.3} = 300\Omega \quad (IV.3)$$

- La charge R_s doit être supérieur à la résistance interne optimale R_{opt} ($R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}}$) à un éclairement donné pour que le convertisseur effectue correctement son rôle.

Dans tous les calculs qui vont suivre, le cas extrême sera envisagé. Nous supposons que la conduction est continue (le courant dans l'inductance ne s'annule jamais) et que le convertisseur est toujours efficace à 100% :

$$P_{entré} = P_{sortie} \quad (IV.4)$$

Donc :

$$V_e * I_e = V_s * I_s \quad (IV.5)$$

1- La bobine

Cet élément est le plus délicat à déterminer. En effet, une inductance trop faible ne permet pas le fonctionnement du circuit de puissance, et une inductance trop forte quant à elle provoquerait d'importantes pertes de puissance par effet joule.

$$L = \frac{\alpha_0 V_{pv}}{I_{s_{min}} f} \quad (IV.6)$$

Avec :

α_0 : le rapport cyclique

$I_{s_{min}}$: 0.3A

f : fréquence de commutation

Le rapport cyclique que l'on peut prévoir dans les conditions nominales ($V_e = 17.5V$ et $V_s = 24 V$) se déduit de :

$$\frac{V_e}{V_s} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (IV.7)$$

$$\text{AN: } \alpha = 0.27$$

Nous supposons que notre convertisseur statique fonctionne à la fréquence de 10 kHz (il s'agit de la fréquence de commutation de l'interrupteur), cela implique que :

$$L \approx 2mH \quad (\text{IV.8})$$

2- Condensateur

a) Condensateur d'entrée

Le critère de conception pour les condensateurs d'entrée est que la tension d'ondulation à travers eux devrait être plus moins de 1%.

$$C_e = \frac{I_{opt}\alpha}{\Delta V_e f} \quad (\text{IV.9})$$

Avec :

$$\Delta V_e = 10mV$$

La valeur de C_e est :

$$C_e = 11.90\mu F \quad (\text{IV.10})$$

b) Condensateur de sortie

Le but du condensateur de sortie est en effet de filtrer les variations de tension en sortie du convertisseur Boost.

La valeur du (C_s) est calculée on utilisant l'équation d'ondulation de tension de sortie.

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1-\alpha}{8LC_s f^2} \quad (\text{IV.11})$$

Avec :

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = 1\% \quad (\text{IV.12})$$

La solution de l'équation (IV.13) pour le C_s donne :

$$C_S = \frac{1-\alpha}{8L \frac{\Delta V_0}{V_0} f^2} = \frac{1-0.27}{(8)(2 \times 10^{-3})(0.01)(10 \times 10^3)^2} = 58.12 \mu F \quad (\text{IV.13})$$

3- Diode Schottky

Le choix d'une diode est toujours un compromis entre la tension de claquage, la vitesse de commutation, et la tension de seuil. Au niveau des pertes de puissance, plus la tension de seuil est importante, plus ces pertes augmentent. De plus, la diode se doit d'être suffisamment rapide pour suivre les variations de l'interrupteur, sous peine de limiter l'efficacité du convertisseur [13][26].

Le modèle de diode que nous avons choisi doit supporter:

- Un courant moyen en direct de 5A
- Une tension inverse de 100V

4- Transistor MOSFET

Ces transistors sont les plus utilisés dans le domaine de faibles et moyennes puissance (quelques KW). Dans notre cas, nous utilisons le transistor IRF 540 caractérisé par [26]:

N-Channel, $I_{DS}=28A$, $V_{DS}=100V$, $R_{DSon}=100V$, $R_{DSon}=77m\Omega$, temps de fermeture $t_r=10ns$, temps d'ouverture $t_f=10ns$.

Le schéma final dont nous avons cherchés les composants est le suivant :

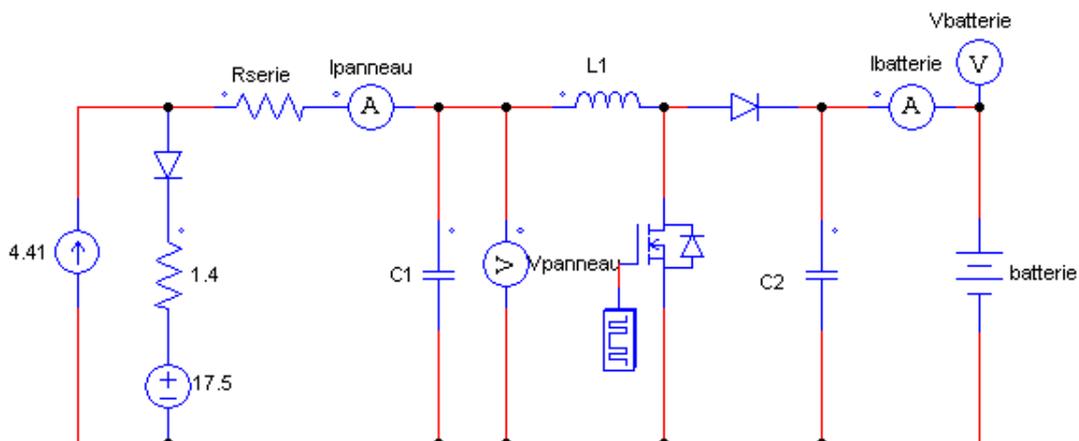


Fig.4.10 : Modèle de l'ensemble panneau-hacheur-batterie sous PSIM

CHAPITRE IV : Modélisation et Simulation de MPPT par la Commande P&O

Ce convertisseur est à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Son fonctionnement est le suivant. Pendant le temps αT (α étant le rapport cyclique de transformation et T la période de hachage), le transistor est conducteur et la diode bloquée, l'inductance se magnétise et le courant qui la traverse croît. Pendant le temps $(1-\alpha T)$, le transistor est bloqué et la diode conductrice. L'inductance décharge son énergie dans la batterie et son courant décroît.

IV.4.2.2:Analyse du fonctionnement de convertisseur dans l'environnement PSIM

Sur la figure (4.11), les résultats typiques de la tension à l'entrée et la sortie du convertisseur.

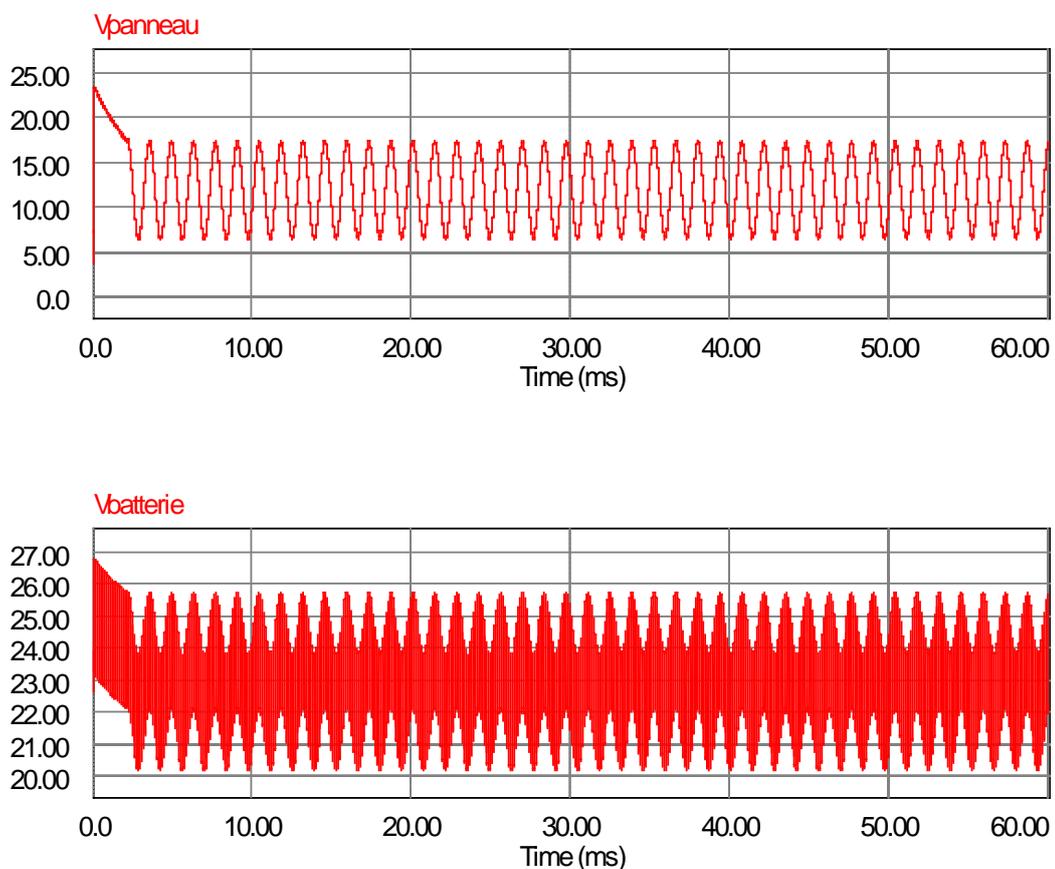


Fig.4.11: représente la tension à l'entrée et à la sortie en fonction du temps dans le cas d'un convertisseur Boost simulé dans l'environnement PSIM

D'après la figure ci-dessus, on peut conclure que la tension se stabilise à la valeur de 15V (24V) à l'entrée (sortie) du convertisseur survolteur, nous remarquons bien le comportement élévateur du convertisseur. Par la présence de la capacité de filtrage C_s , la tension se stabilise autour de la valeur moyenne qui est donné par l'expression (IV.11).

IV.4.3: Simulation de la commande MPPT

Cette partie a pour objectif de simuler les différentes boucles de régulation du hacheur. L'objectif final est de charger la batterie avec un courant maximal en utilisant le panneau solaire au maximum de sa puissance.

IV.4.3.1: Synthèse du régulateur

Le fonctionnement en boucle ouverte à rapport cyclique donné n'est pas satisfaisant, en effet même pour un éclairage constant, la tension évolue au cours de son changement et fait donc varier le point de fonctionnement. Asservir la tension du générateur à une référence donnée, permet de palier à ce problème. Une boucle d'asservissement de tension est donc nécessaire. Cette seconde boucle de régulation permet de générer cette référence de tension et peut être obtenue d'une façon analogique à l'aide d'une détection synchrone. Une composante alternative ajoutée à la référence de tension induit une composante alternative dans le courant de charge de la batterie. Le produit de ces deux composantes permet d'obtenir la pente de la courbe puissance/tension du panneau solaire. L'intégration de cette pente permet alors de générer la composante continue de la référence de tension [19].

Donc le régulateur sera constitué de plusieurs éléments à travers lesquels le signal de mesure sera traité en vue de corriger le rapport cyclique si celui-ci n'est pas optimum.

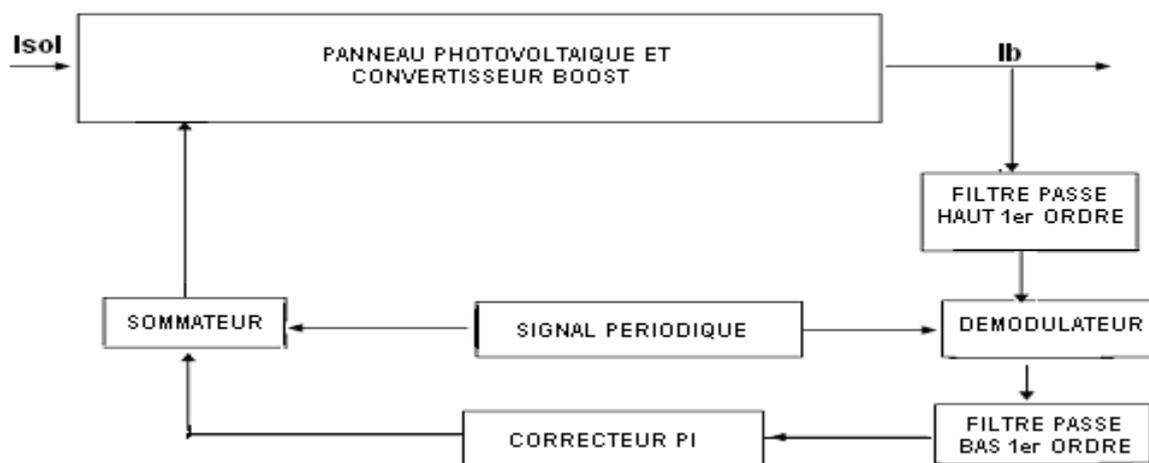


Fig.4.12 : Schéma du régulateur.

IV.4.3.2: Description des composants du régulateur MPPT [5]

- 1- Un capteur assure la mesure du courant entrant dans la batterie.
- 2- Un filtre passe haut: Celui-ci permet de ne conserver que la composante alternative du courant mesuré.
- 3- Un Générateur basse fréquence : Celui-ci fournit un signal sinusoïdal (bien que dans la pratique, ce signal sera carré pour faciliter la mise en œuvre) de faible amplitude.
- 4- Un démodulateur: Celui-ci multiplie le signal de départ par le signal mesuré.
- 5- Un filtre passe bas: Il permet de ne conserver que la composante continue du signal sortant du démodulateur. Celle-ci contient deux informations :
 - la valeur absolue est l'image de l'amplitude du signal mesuré,
 - le signe nous renseigne si le signal mesuré est en phase (+) ou en opposition de phase (-) avec celui du générateur ;
- 6- Un correcteur PI: il fournit, si l'amplitude du signal n'est pas nulle, un nouveau rapport cyclique sur base du signe du signal précédent, s'il est en phase, α augmente, s'il est en opposition de phase, α diminue.

Quand on regarde plus en détail les éléments du régulateur, on s'aperçoit que plusieurs paramètres restent encore à fixer: tout d'abord, la fréquence du signal produit par le générateur basse fréquence de laquelle dépendent les pulsations de coupure des deux filtres, le gain du terme proportionnel K_p et le gain du terme intégral K_i .

La fréquence du générateur basse fréquence est choisie pour assurer un bon fonctionnement du démodulateur, on prend dans notre cas une fréquence de 30hz.

K_i et K_p seront choisis de manière telle que le temps de réponse ne soit pas trop long et l'amplitude des oscillations pas trop grande, et ce, pour un échelon d'ensoleillement (variation la plus contraignante).

IV.4.3.3: Simulation avec logiciel PSIM

Le schéma du système de régulation est le suivant :

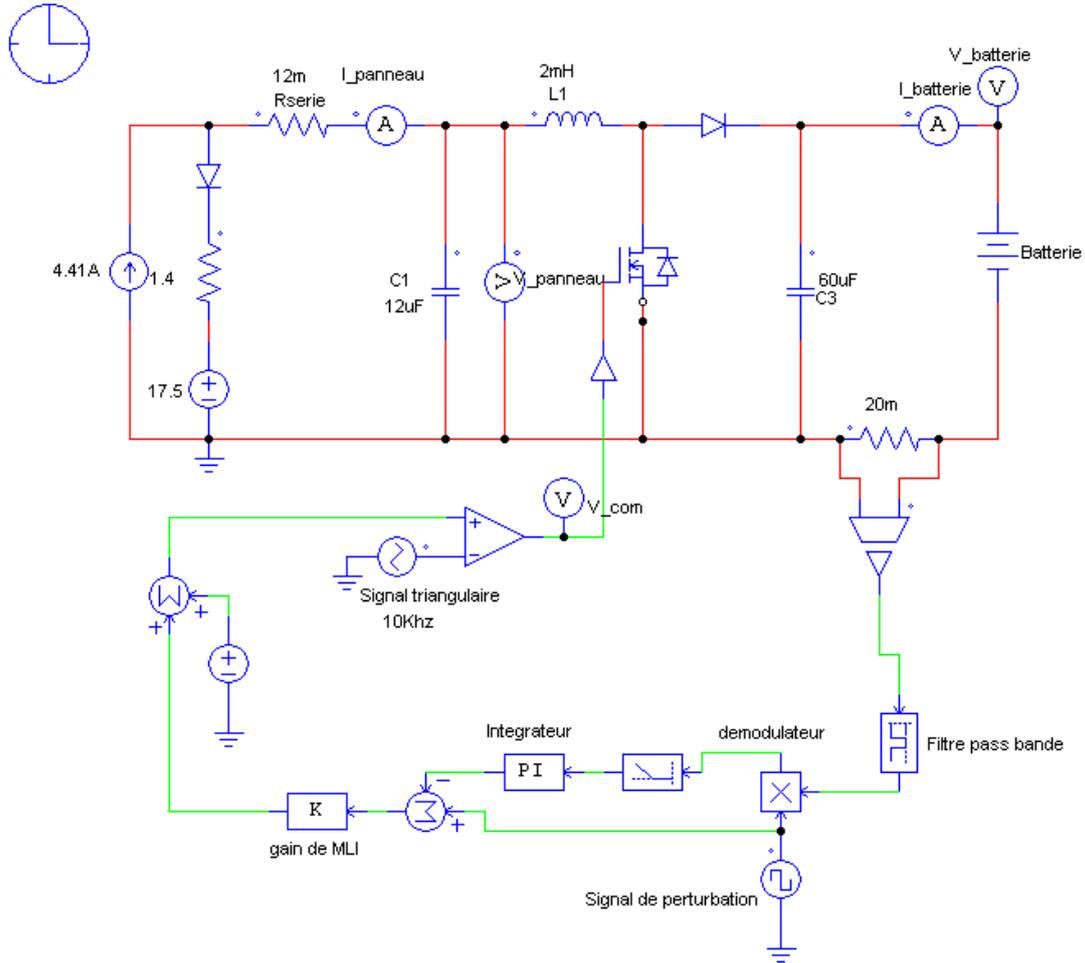


Fig.4.13: schémas global de la commande

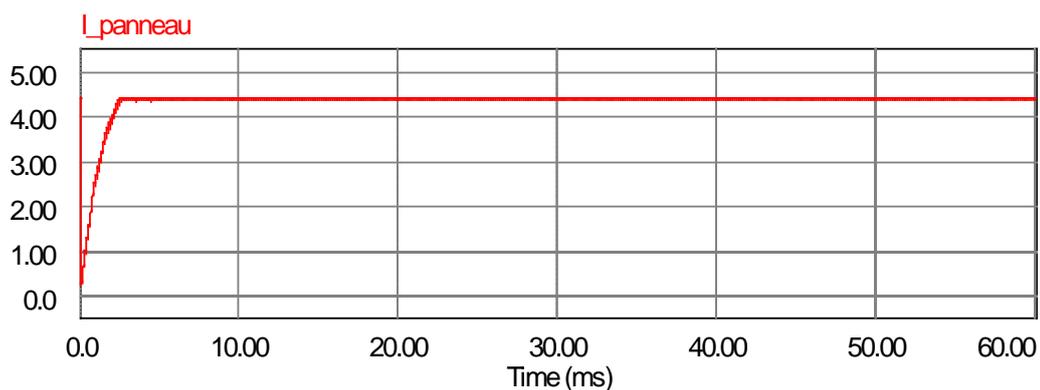
On perturbe le signal de commande (α). Cette perturbation permet de déduire la pente d'un point de fonctionnement sur la caractéristique du panneau. On obtient cette perturbation dans la sortie (le courant I_b), on la mesure à travers une résistance shunt, elle sera filtrée et multipliée par le signal de perturbation pour obtenir la pente ou le signe de déplacement du point optimum. Un correcteur PI corrige le rapport cyclique qui donne le courant $I_{optimal}$.

IV.5: Résultats de simulation

Sur les figures (4.14) et (4.15) , sont représentés, pour un éclairement constant de 1000 W/m² et une température de 25 °C, les résultats typiques de simulation, dans l'environnement PSIM, des caractéristiques électriques à la sortie du panneau et à la sortie du hacheur de type élévateur contrôlé par la commande MPPT analogique de la figure (4.13). Il apparaît que:

- Après un régime transitoire, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM.
- Les différentes grandeurs électriques (tensions et courants) se stabilisent autour des valeurs fixées par nos données:
 - ✓ A la sortie du panneau, la tension et le courant se stabilisent respectivement autour de 17 V et 4.4 A;
 - ✓ Au niveau de la charge, la tension et le courant se stabilisent respectivement autour de 24 V et 4.5 A

L'ensemble des résultats obtenus montre que le convertisseur CC-CC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le générateur PV à la batterie: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.



CHAPITRE IV : Modélisation et Simulation de MPPT par la Commande P&O

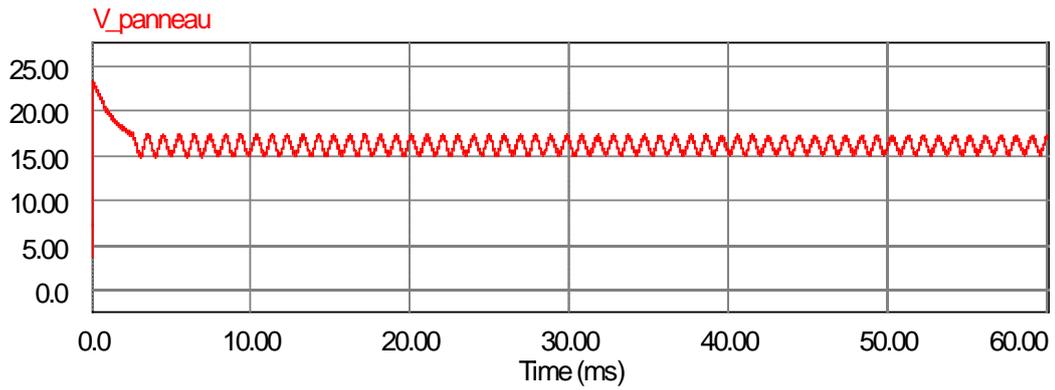


Fig.4.14: Courant et tension à la sortie du panneau

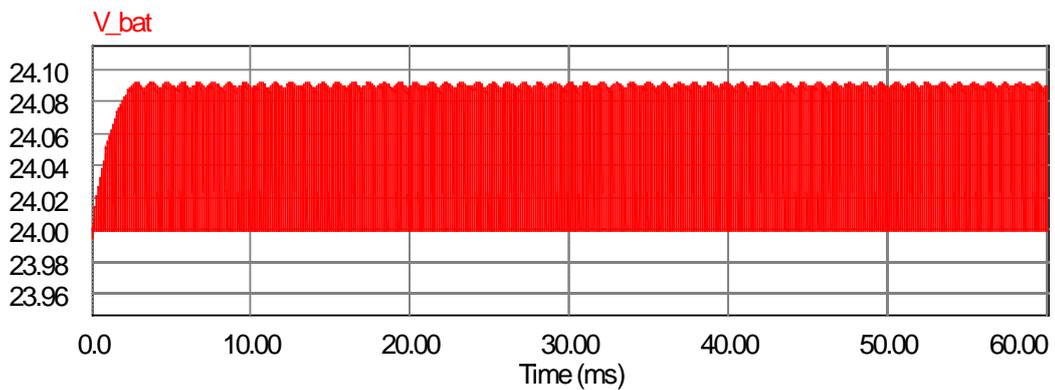
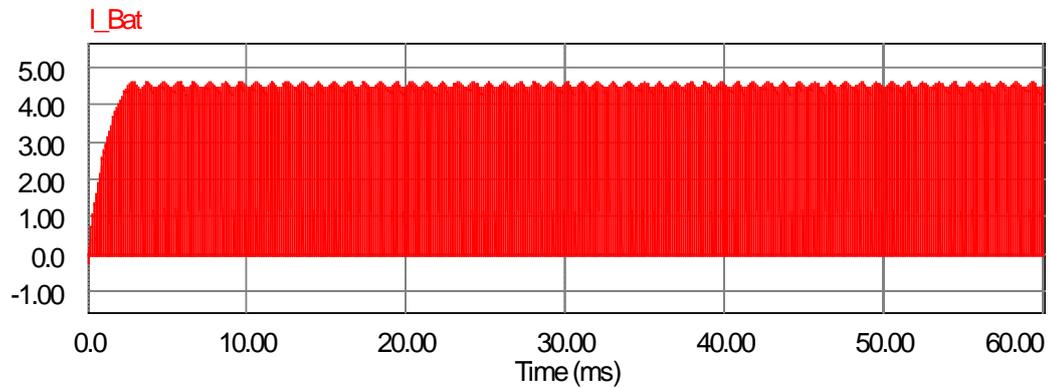


Fig.4.15: Courant et tension à la sortie du convertisseur

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé dans l'environnement PSIM le fonctionnement électrique d'un système PV, adapté par des convertisseurs d'énergie CC-CC (hacheur), régulé par une commande MPPT analogique. Les résultats obtenus montrent que pendant une durée inférieure à 50 ms et en variant d'une manière automatique le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur d'énergie le système converge vers les conditions optimales indépendamment des conditions météorologiques et de la variation de la charge. Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques. La validation de l'ensemble de ces résultats est présentée dans des travaux en cours.

Conclusion Générale

Les travaux présentés dans cette thèse se sont focalisés sur l'optimisation de la production d'énergie électrique photovoltaïque ainsi que son transfert vers une charge avec le moins de pertes possibles.

A la fin de ce travail on peut résumer notre travail par les points suivants :

- l'énergie photovoltaïque devient progressivement une source d'énergie à part entière, de plus en plus sollicitée pour produire de l'énergie électrique allant du domestique à de grandes centrales connectées au réseau. Cependant, il reste encore pas mal de freins à son développement en termes de manques de production, de taux de pannes ou bien même de coûts prohibitifs rendant cette source d'énergie chère et peu fiable.
- La modélisation et la conception d'un module ou générateur PV est une manière d'étude très importante pour analyser le fonctionnement de système PV et voir l'influence de différents facteurs sur le module surtout la variation de l'éclairement et la température.
- Nous avons montré tout d'abord l'importance d'installer un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge, ce type de connexion est indispensable pour augmenter le rendement et minimiser les pertes de transfert d'énergie.
- Nous avons montré aussi que dans un système photovoltaïque, la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que grâce à des lois de commande spéciale qui réagit directement sur le rapport cyclique.

Finalement, Ce travail propose le régulateur MPPT comme solution pour optimiser le système photovoltaïque quel que soit le taux de variation de l'éclairement et la température.

Notation des Symboles

E	Niveau d'éclairement (ou d'irradiation) [W/m ²]
A _{eff}	Surface Effective du module PV [m ²]
E _g	Large de la bande interdite du matériau [eV]
U _m	Tension maximale
I _m	Courant maximal
P _m	Puissance maximale
S	La surface du module
FF	Facteur de forme
MPPT	Maximum Power Point Tracker
G	Conductance [Ω^{-1}]
GPV	Générateur Photovoltaïque
I _{CC}	Courant de Court-Circuit [A]
V _{OC}	Tension de Circuit Ouvert [W]
I _{OPT}	Courant Optimal d'un générateur ou d'une cellule PV [A]
V _{OPT}	Tension Optimale d'un générateur ou d'une cellule PV [V]
K	Constante de Boltzmann [1.38 10 ⁻²³ JK ⁻¹]
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPVE	Module Photovoltaïque Electronique
n	Facteur de non idéalité de la jonction PN
P&O	Perturb&Observ
IncCond	Incrémental Conductance
P _{MAX}	Puissance Maximale du générateur PV [W]
P _{nom}	Puissance nominale de l'étage d'adaptation [W]
PPM	Point de Puissance Maximale
PV	Photovoltaïque
R _P	Résistance Shunt du générateur PV [Ω]
R _S	Résistance Série du générateur PV [Ω]
T	Température effective des cellules [K]
R _{opt}	Résistance optimale
V _B	Tension de batterie

Notation des Symboles

I_B	Courant de batterie
CS	Convertisseur statique
f	Fréquence de commutation
V_{PV}	Tension aux bornes du générateur PV [V]
η_{MPPT}	Rendement de la Commande MPPT [%]
η_{PV}	Rendement du GPV [%]

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]: L'électricité photovoltaïque, Yves JAUTARD et Thierry BOUDOL (Solarte) - 25/05/2000.

[2]: Energie solaire photovoltaïque.doc /B. Flèche - D. Delagnes / juin 07

[3]: Photovoltaïque Electricité solaire, document délivré par l'association suisse des professionnels de l'énergie solaire.

[4]: R. Chenni, M. Makhlof, T. Kerbache, A. Bouzid, "A detailed modeling method for photovoltaic cells", Science Direct, Energy 32, 2007

[5]: R. Chenni, " Etude Techno-économique d'un Système de Pompage Photovoltaïque dans un Village Solaire, Thèse de Doctorat, Avril 2006.

[6]: Townsend, T. U. "A method for estimating the long-term performance of direct-coupled photovoltaic systems". MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.

[7]: Akihiro Oi, "Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System", A Thesis Presented to the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2005.

[8]: G. Walker, "Evaluating MPPT Converter Topologies Using A MATLAB PV Model, A Thesis Presented to the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2005

[9]: Corinne ALONSO, "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie", thèse soutenue le 12 Décembre 2003.

[10]: Cédric CABAL, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat soutenue le 15 décembre 2008.

[11]: N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method", IEEE Transactions On Power Electronics, Vol.20, No. 4, pp. 16-19, Mar. 2004.

[12]: Laura Baxerres, Aurélie Michallet, Céline Ramet, Rapport_PIP_Microtransat_Energie_I, "Partie électronique et énergétique", 2005-2006.

[13]: Laura Baxerres, Aurélie Michallet, Céline Ramet, Rapport_PIP_Microtransat_Energie_II, "Partie électronique et énergétique", 2005-2006.

[14]: L. Protin, S. Astier, "Convertisseurs photovoltaïques", Techniques de l'ingénieur, D3360.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [15]: Alain RICAUD, "Modules photovoltaïques, Filières technologiques", Techniques de l'ingénieur, D3940.
- [16]: M. PETIBON Stéphane, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Thèse de doctorat soutenue le 20 janvier 2009.
- [17]: Angel Cid Pastor, "Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques, thèse de doctorat, soutenue le 29 septembre 2006.
- [18]: Alain Bilbao Learreta, "Réalisation de Commande MPPT Numériques", septembre 2006.
- [19]: V. BOITIER, P. MAUSSION, "Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques".
- [20(19)]: http://www.iufmrese.cict.fr/contrib/2008/PM/PSim_MPPT.shtml
- [21]: K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivie, "Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique", Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007)
- [22]: T. Mrabti, M. El Ouariachi, K. Kassmi, F. Olivie et F. Bagui, "Amélioration du fonctionnement des systèmes photovoltaïques suite aux brusques variations des conditions météorologiques et de la charge", Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008).
- [23]: V. Pommier, M. Budinger, G. Pérusot, Les énergies renouvelables, "étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque", LEEI/ENSEEIH-Toulouse.
- [24]: F.Z. Zerhouni, M. Zegrar, S. Kaddour Brahim, A. Boudghène Stambouli, "Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique", Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2007).
- [25]: F.Z. Zerhouni, M. Zegrar et A. Boudghène Stambouli, "Amélioration de l'adaptation d'un générateur photovoltaïque à une charge avec implémentation pratique", Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007).
- [26]: A. Aziz, "Propriétés Electriques des Composants Electroniques Minéraux et Organiques, Conception et Modélisation d'une Chaîne Photovoltaïque pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire", Doctorat en Sciences (Electronique), Université Mohamed Premier, N°86/06, 2006, Oujda, Maroc, Université Paul Sabatier, N°06234, Toulouse, France, 2006.
- [27]: CHENNI R1., KERBACHE T, MATAGNE E, "Avantages du Convertisseur Elévateur de Tension par rapport au Convertisseur Abaisseur de Tension pour la Poursuite du Point Optimum de Fonctionnement dans les Applications Photovoltaïques", Conférence EF, ENSEEIHT, Toulouse, 6-7 Septembre 2007.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [28]: REKINGER M, MATAGNE E, EL BACHTIRI R, CHENNI R, "Un Modèle de Cellule Photovoltaïque avec Effet thermique Etabli sur Base des Valeurs Nominales", Conférence EF, ENSEEIHT, Toulouse, 6-7 Septembre 2007.
- [29]: A. O. Mohamed Yahya, A. O. Mahmoud et I. Youm, Etude et Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque, Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3, 2008
- [30]: Christian GLAIZE, "Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque, Recherche du point de puissance maximale et Intérêt d'un convertisseur".
- [31]: Belhadj Mohammed, Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome, mémoire de magister, Centre Universitaire De Bechar, Soutenue le 2007-2008.
- [32]: Anne Labouret, Michel Villos, "Energie Solaire Photovoltaïque, le manuel du professionnel", Ed. Dunod, 2003.
- [33]: Jacques Bernard, " Energie Solaire", Coll. Génie Energétique, Ed. Ellipses, 2004.
- [34]: Maouedj Rachid, "Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah", Mémoire De Magister soutenue en 2005.
- [35]: Malika MADANI, "Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces", thèse de magister en physique soutenue en 2006.
- [36]: Installations photovoltaïques, "Systèmes autonomes", document du constructeur BELPOWER.
- [37]: Installations photovoltaïques, "Systèmes raccordés au réseau", document du constructeur BELPOWER.
- [38]: Guide encyclopédie, CD
- [39]: Y. JAUTARD, T. BOUDOL, L'électricité photovoltaïque, Site Internet "Architecture et énergies renouvelables", 2000
- [40]: <http://www.lei.ucl.ac.be/~matagne/SOLAIRE/INDEX.HTM>
- [41]: www.Photowatt.com
- [42]: M.S. Aït Cheikh, C. Larbes, G.F. Tchoketch Kebir and A. Zerguerras, "Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme", Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°3 (2007)
- [43]: F.Belhachat, C. Larbes, L. Barazane, S. Kharzi, "Commande neuro-floue d'un hacheur MPPT", 4th International conférence on Computer Intergrated Manufacturing CIP, 03-04 Novembre 2007.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[44]: A. F. Boehinger, "Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply", IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, pp. 102-111, 1968.

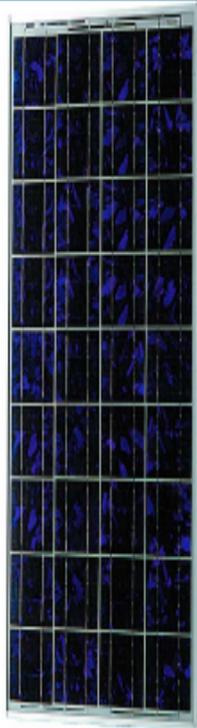
[45]: Persues, Guide des Installations photovoltaïques raccordées au réseau électrique destiné aux particuliers, Edition 2007.

[46]: Hohm, D. P. & M. E. Ropp "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms" Progress in Photovoltaics: Research and Applications November 2002, page 47-62.

[47]: Hussein, K. H., I. Muta, T. Hoshino, & M. Osakada "Maximum Photovoltaic Power Tracking: an Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions" IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution – v. 142 January 1995, page 59-64

Annexes

PHOTOWATT PW500 - 12V PHOTOVOLTAIC MODULE – JBox



APPLICATIONS
- Telecommunications
- Cathodic protection
- Water pumping
- Signaling
- Rural electrification
- Private residences
- Commercial buildings
- Grid connected

- 4x9 polycrystalline 4 inch cells (101,50 x 101,50 mm)
- **Product warranty : 5 years***
- **Efficiency warranty : 25 years***
- **Quality insurance : ESTI (61215), ISO 9001...**

PACKING INFORMATION		
Module weight	Kg	5,5
Module size with cables	mm	1042 x 462 x 45
Packing configuration	modules	6 per carton
Packing size	mm	1100 x 490 x 183
Modules packed weight	Kg	35
Maximum pallet size (96 modules)	mm	1150 x 1050 x 1600
Maximum pallet weight (96 modules)	Kg	570



The PW500 has an optimum configuration that fulfils the most demanding PV applications. Constant improvement in the output of photovoltaic cells has allowed the PW500 to attain higher power level, guaranteeing optimum daily energy for minimum size.

The PW500 module uses Photowatt's multicrystalline technology. The solar cells are individually characterized and electronically matched prior to interconnection. Encapsulation beneath high transmission tempered glass is accomplished using an advanced, UV resistant thermal setting plastic. The encapsulant, ethylene vinyl acetate, cushions the solar cells within the laminate and protect the cells from etching. The rear surface of the module is completely sealed from moisture and mechanical damage by a continuous high strength polymer sheet.

The self-supporting frame made from anodised aluminium was designed to allow to be easily mounted either from the front or from the rear. This module is available in double glass technology with the PW500 which increased its reliability providing the same electrical data.

For building integration, this module can be delivered without aluminium frame. Please contact us for further details.

	PW500	12 V Configuration		
Typical power	W	45	50	55
Minimum power	W	40,1	45,1	50,1
Voltage at typical power	V	17	17,2	17,3
Current at typical power	A	2,65	2,9	3,2
Short circuit current	A	2,9	3,2	3,45
Open circuit voltage	V	21,4	21,6	21,7
Maximum system voltage	V	600V DC		
Temperature coefficient		$\alpha = +1,46 \text{ mA/}^\circ\text{C}$; $\beta = -79 \text{ mV/}^\circ\text{C}$; $\gamma \text{ P/P} = -0,43 \text{ \% /}^\circ\text{C}$		
Power specifications at 1000 W/m ² ; 25°C ; AM 1,5				

* According to general warranty conditions



33 Rue Saint Honoré - Z.I. Champfleuri
38300 Bourgoin-Jallieu - FRANCE
Phone +33 (0)4 74 93 80 20 - Fax +33 (0)4 74 93 80 40
www.photowatt.com - info.fr@photowatt.com

014-PC-01 03 Index 0

The characteristics of this document are representative of the products and have no contractual value. Subject to products improvement, Photowatt reserves the right to modify the characteristics without prior notification.

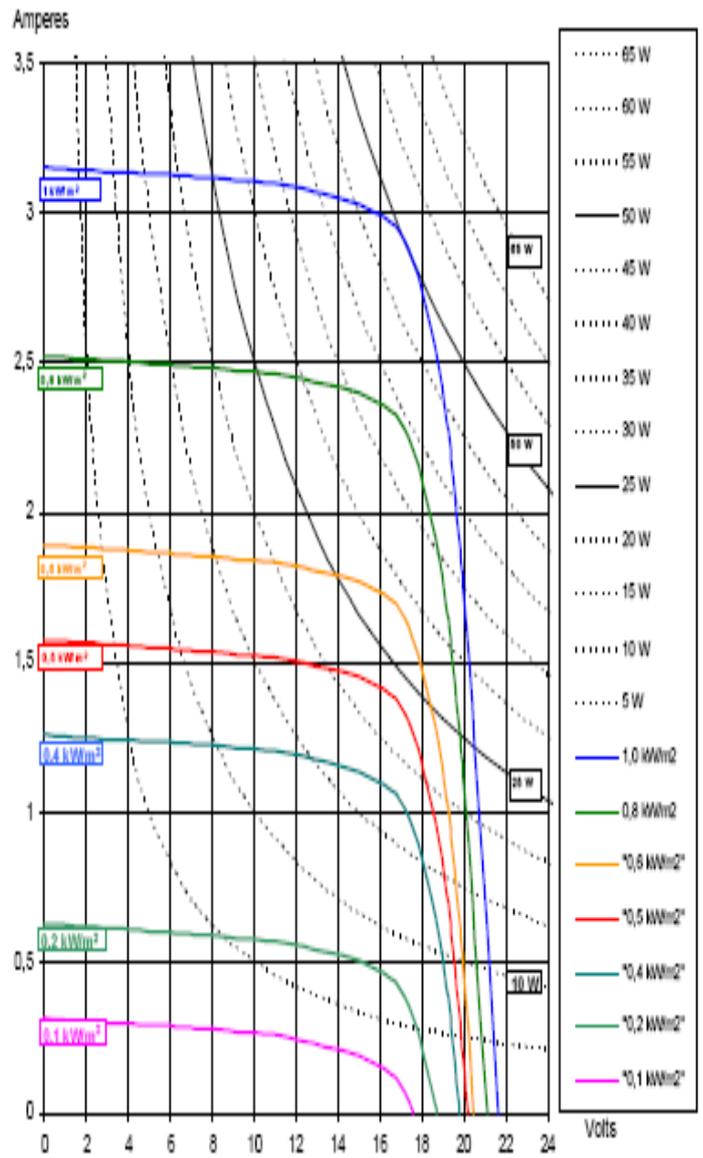
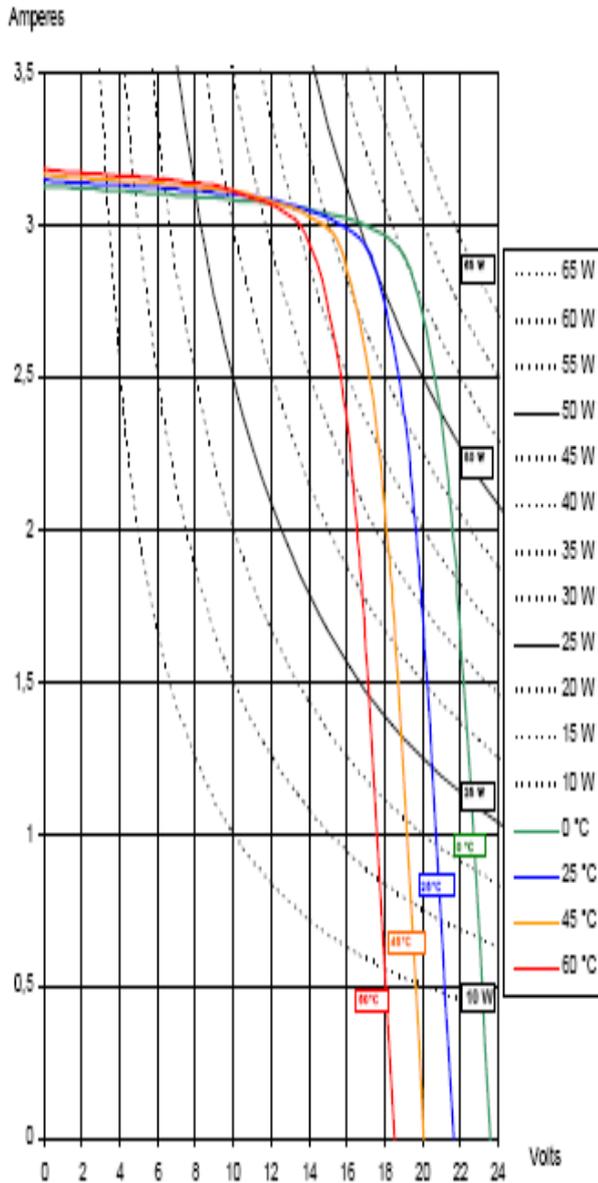
Annexes



PW500 – CHARACTERISTICS Ptyp : 50 Watts (12V)

$I=F(V)$ à $E=1 \text{ kW/m}^2$, $AM=1,5$ en fonction de la température

$I=F(V)$ à $T = 25^\circ\text{C}$ en fonction de l'irradiance E (kW / m^2), $AM 1,5$.



014-PC-01 03 indice 0
The characteristics of this document are representative of the products and have no contractual value.
Subject to products improvements, Photowatt reserves the right to modify the characteristics without prior notification.