



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



Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

***Etude de fonctionnement d'un système
photovoltaïque***

Réalisé par:

- Abid Mohammed
- Gadi khaled
- Djebali Lakhadar
- Chekembou Mohammed Soufiane

Encadré par:

- Mr.Z.Lammouchi

Soutenu en Juin 2015

REMERCIEMENT

En premier lieu, nous tenons à remercier Dieu, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier Mr.Zakaria.Lammouchi notre promoteur pour son grand soutien et ses conseils considérables.

Nous remercions également tous les professeurs du département Génie Électrique.

Que toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail accepte nos grands et sincères remerciements.

DEDICACE

Nous avons faire où offrir quelque chose à nous parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti comme efforts, rien que pour me voir réussir, et voilà, l'occasion est venue.

A ceux qui nous 'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de nos inspiration et de mon courage, à qui nous devons de l'amour et de la reconnaissance.

A nous parents :

- Mon per (Abd Elazize)*
- Maman Zohra (Lalli).*

A nous frères, et mes sœurs.

A toute la famille ABID.

A tous nous amis sans exception.

Abid Mohammed

Liste des symboles

- S** : Surface du module photovoltaïque (m^2)
- E** : Eclairement (W/m^2).
- I_{ph}** : Le photo-courant (A).
- I_{sat}** : Courant de saturation (A).
- I₀** : Le courant de saturation inverse d'une diode.
- R_p** : Résistances parallèle shunt. (Ω) : Courant de saturation (A).
- R_s** : Résistance série (Ω).
- T_c** : Température de jonction ($^{\circ}K$).
- G** : L'éclairement de référence ($1000 W/m^2$).
- h** : Constante de Planck ($6.62.10^{-34} j.s$).
- E_g** : Energie de la bande interdite (eV).
- T_{ref}** : La température de référence ($298 ^{\circ}K$).
- α** : Le coefficient de courant en fonction de température ($A/^{\circ}C$).
- I_{cc}** : Le courant de court-circuit (A).
- V_{co}** : La tension de circuit ouvert (V).
- V_T** : La tension thermique.
- N_s** : Nombre de modules dans le panneau en série.
- N_p** : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.
- P_{max}** : La puissance maximale produite PV (W).
- V_{max}** : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
- I_{max}** : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
- V_{co}** : Tension à circuit ouvert (V).
- I_{cc}** : Courant de court-circuit (A)
- K** : coefficient de Boltzman ($1.38.10^{-23} J / K$)
- T_c** : Température de la cellule (C°)
-

Abréviation utilisées

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

PPM : Point de fonctionnement optimal 'Maximum Power Point'.

DC= CC : Courant Continu.

AC=CA : Courant alternatif.

PWM : commande MLI.

INC : Algorithme.

Introduction générale.....	I
----------------------------	---

Chapitre I :

Etude du Système photovoltaïque

I.1 Introduction	01
I.2 Le générateur photovoltaïque GPV	01
I.2.1 Principe de fonctionnement	01
I.2.2 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)	03
I.3 Constitution d'un générateur photovoltaïque	03
I.3.1 Les cellules solaires	03
I.3.2 Les modules (ou panneaux)	04
I.3.3 Le générateur photovoltaïque	04
I.4 Regroupement des cellules.....	04
I.4.1 Regroupement en série	04
I.4.2 Regroupement en parallèle	05
I.4.3 Regroupement (série et parallèle).....	06
I.5 Connexion directe source-charge	06
I.6 Conclusion	08

Chapitre II :

Modélisation et simulation d'un Système photovoltaïque

II.1 Introduction	09
II.2 Modèle de cellule	09
II.3 Modélisation du Module (panneau) photovoltaïque	10
II.4 Le Simulation photovoltaïque « G PV ».....	12
II.4-1 Simulation de la cellule PV	12
II.4-2 Simulation du module PV	14
II.5 Influence de la température sur le rendement des cellules	17
II.6 Influence du rayonnement sur les cellules	19
II.7 Conclusion	20

Chapitre III :
Techniques de Poursuite du Point de Puissance
Maximale MPPT

III.1. Introduction.....	21
III.2. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque	21
III.3. Principe du MPPT	21
III.3.1. Adaptation manuelle de la charge au générateur photovoltaïque:.....	22
III.3.2. Méthodes à contre réaction de tension :	23
III.3.3. Méthodes à contre réaction de courant	23
III.3.4. Méthodes à contre réaction de puissance.....	24
III.3.4.1. Technique de l'incrémentation de la conductibilité	24
III.3.4.2. Algorithme 'perturbation et observation	27
III.4. Conclusion.....	30
Conclusion générale.....	31
Références Bibliographies.....	34

Liste de figure

Chapitre I : Etude du Système photovoltaïque

Figure(I.1) : Coupe transversale d'une cellule PV.....	01
Figure(I.2) : Caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque.....	02
Figure(I.3) : Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.....	05
Figure(I.4) : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle.....	05
Figure(I.5) : Connexion directe d'un GPV-charge.....	06
Figure(I.6) : Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge.....	07

Chapitre II : Modélisation et simulation du Système photovoltaïque

Figure(II.1) : Schéma équivalent de cellule PV.....	09
Figure(II.2) : Bloc de la cellule solaire dans SIMULINK.....	13
Figure(II.3) : Caractéristique $P=f(V)$ de la cellule.....	14
Figure(II.4) : Caractéristique $I=f(V)$ de la cellule.....	14
Figure(II.5) : Module Shell SP75.....	15
Figure(II.6) : Block du module Shell SP 75 dans SIMULINK.....	16
Figure(II.7) : Courbe $I(V)$ du module.....	16
Figure(II.8) : Courbe $P(V)$ du module.....	17
Figure(II.9) : Effet de la température sur la caractéristique $I-V$	18
Figure(II.10) : Effet de la température sur la caractéristique $P-V$	18
Figure(II.11) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique $I-V$	19

Chapitre III : Techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT

Figure(III.1) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	22
Figure(III.2) : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence..	23
Figure(III.3) : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de I_{sc}	24
Figure(III.4) : Organigramme de l'algorithme INC.....	26
Figure(III.5) : Caractéristiques de fonctionnement de la méthode par incrément de conductibilité.....	27
Figure(III.6) : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.....	29
Figure(III.7) : Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O.....	29
Figure(III.8) : Effet d'une augmentation soudaine de l'ensoleillement sur la poursuite du PPM.....	30

Liste des tableaux

Tableau(II.1): Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 150.....	11
Tableau(II.2): Caractéristiques électriques du module.....	15
Tableau (III.1) : Table de vérité de l'algorithme 'perturbation et observation.....	28

Introduction générale

La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. ces ressources_ deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation [1].

Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important.

A ce sujet, Les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, ... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. Si l'on prend l'exemple du soleil, une surface de 145000km² (4% de la surface des déserts arides) de panneaux photovoltaïques (PV) suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux [2].

Dans ce dernier cas, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes Photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Pour une installation photovoltaïque, la variation de l'éclairement ou de la charge induit une dégradation de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque, en plus ce dernier ne fonctionne plus dans les conditions optimums.

Dans ce contexte, de nombreux chercheurs se sont attachés à inventer des systèmes permettant de récupérer toujours le maximum d'énergie : c'est le principe nommé maximum power point tracker (MPPT) qui est l'objet principal de ce mémoire.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude et fonctionnement d'un système photovoltaïque, Ce mémoire est partagé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons une généralité sur la technologie photovoltaïque. En commençant par des notions sur le rayonnement, nous finissons ce chapitre par le principe de l'effet photovoltaïque, ensuite on va montrer l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement. Dans deuxième temps nous montrons la modélisation du notre

panneau. Les modèles de simulation développés sous l'environnement MATLAB/Simulink font l'objet de ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous présentons quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des panneaux solaires.

Chapitre I :

Etude du Système photovoltaïque

I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprises dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (cellules Photovoltaïque **PV**). L'association de plusieurs cellules PV en série et /ou parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV). Ce GPV a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Le point de fonctionnement du générateur PV peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit I_{sc} et la tension en circuit ouvert V_{oc} . La détermination du point de fonctionnement du GPV (**G**énérateur **P**hotovoltaïque) dépend directement de la charge à laquelle il est connecté. Ce point de fonctionnement est plus ou moins éloigné du PPM qui est caractérisé par le courant et la tension optimaux. Dans ce chapitre, nous commencerons par un rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque et nous détaillerons les principales caractéristiques de la source PV

I.2. Le générateur photovoltaïque GPV

I.2.1.Principe de fonctionnement

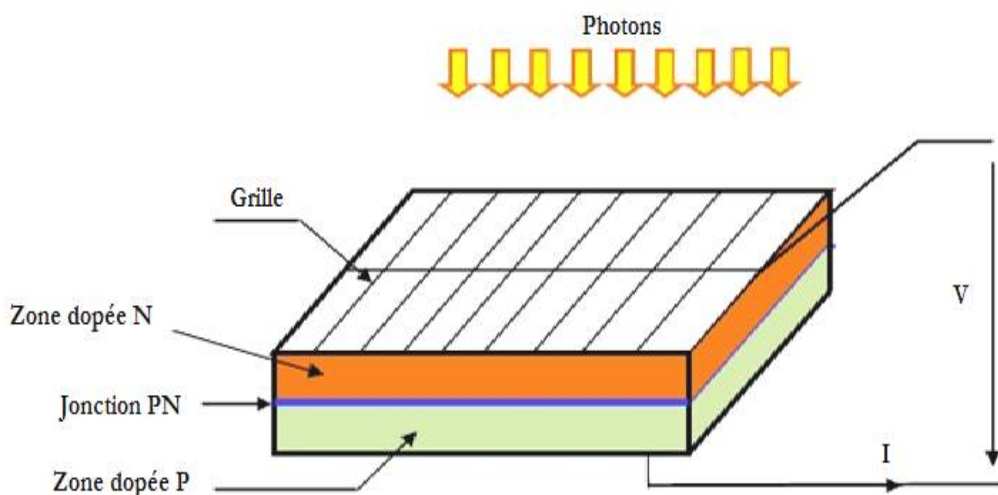
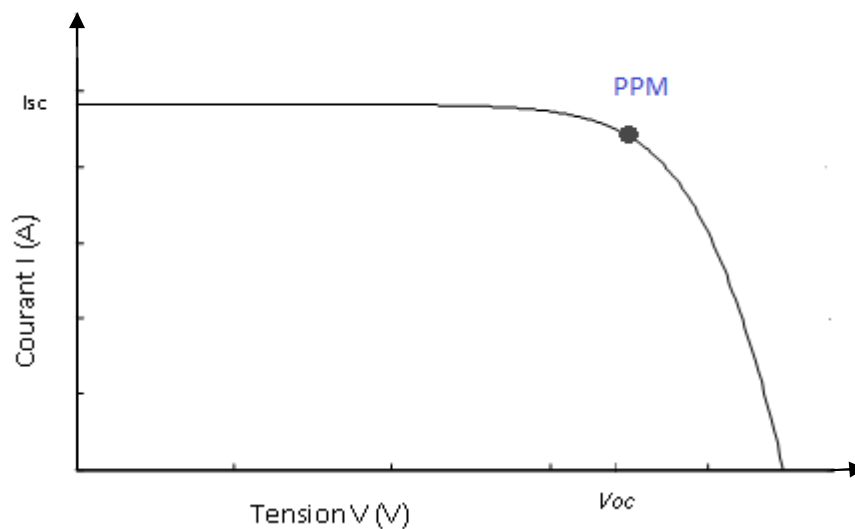


Figure (I.1) : Coupe transversale d'une cellule PV.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé « effet photovoltaïque » qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule

est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température de la cellule ainsi que le vieillissement de la cellule [7].

La figure (I.1) illustre une cellule PV typique. Elle montre clairement sa constitution détaillée. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre couche dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.



Figure(I.2) : Caractéristique courant – tension d’une cellule photovoltaïque.

Comme nous le voyons sur la figure(I.2), la cellule solaire PV est caractérisée par la courbe $I(V)$ non linéaire qui dépend particulièrement des conditions d’ensoleillement et de température.

Il y a trois points importants sur cette courbe :

- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).
- Le point du courant maximal (I_{sc}). Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court circuit (I_{sc}) et dépend fortement du niveau d’éclairement.
- Le point de la tension maximale de la cellule (V_{sc}) (environ 0.6 V) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc})

I.2.2. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques)

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [4]

A. Les cellules monocristallines

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % en laboratoire). Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe.

B. Les cellules poly cristallines

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire).

C. Les cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

I.3. Constitution d'un générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est composé particulièrement par :

I.3.1. Les cellules solaires

Une cellule solaire photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur), capable de convertir directement la lumière en électricité. Cet effet est appelé l'effet photovoltaïque. Le courant obtenu est un courant continu et la valeur de la tension obtenue est de l'ordre de 0,5 V.

I.3.2.Les modules (ou panneaux)

La cellule individuelle, unité de base d'un system photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité.

I.3.3.Le générateur photovoltaïque

L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle, pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

I.4.Regroupement des cellules

I.4.1.Regroupement en série

Une association de (N_s) cellule en série figure (I.3) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (N_s) cellules [5].

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad (I.1)$$

$$I_{cc} = I_c \quad (I.2)$$

V_{coNs} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccNs} : courant de court circuit de N_s cellules en série.

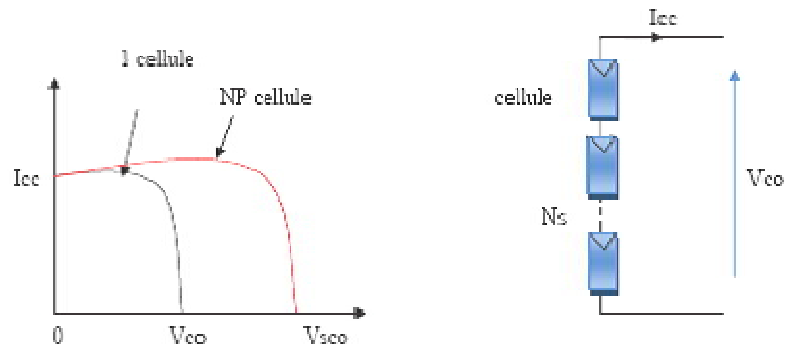


Figure (I.3): Caractéristique courant tension de Ns cellule en série

I.4.2.Regroupement en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellule figure (I.4) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [5]

Avec

$$I_{ccNP} = NP \times I_{sc} \quad (I.3)$$

$$V_{co} = V_{coNP} \quad (I.4)$$

I_{ccNP} : la somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle

V_{co} : tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

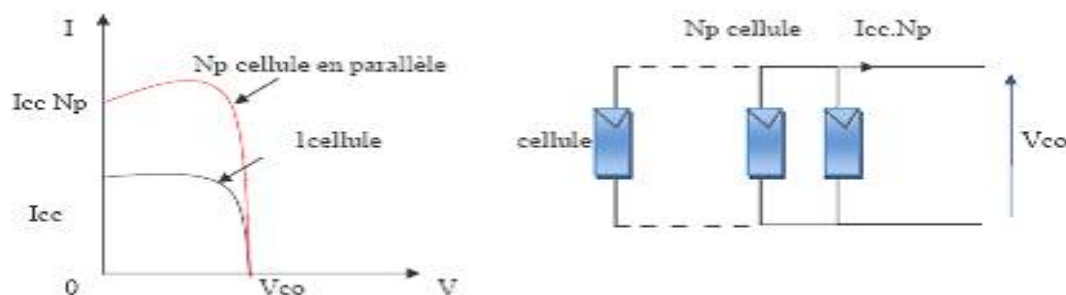


Figure (I.4) : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle

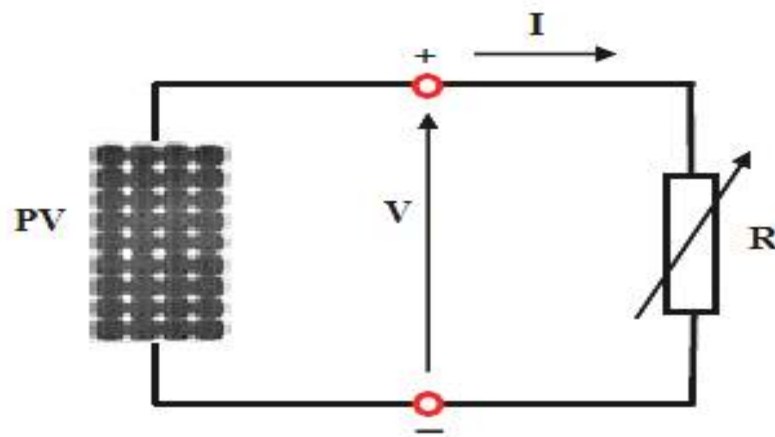
I.4.3.Regroupement (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [5].

I.5.Connexion directe source-charge

Actuellement, nous trouvons encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et le très haut degré de fiabilité. Ceci est dû principalement à l'absence d'électronique, sans oublier le faible coût de la solution. La figure(I.5) montre ce cas de montage.



Figure(I.5): Connexion directe d'un GPV-charge

L'inconvénient de cette configuration est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de P_{max} disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti.

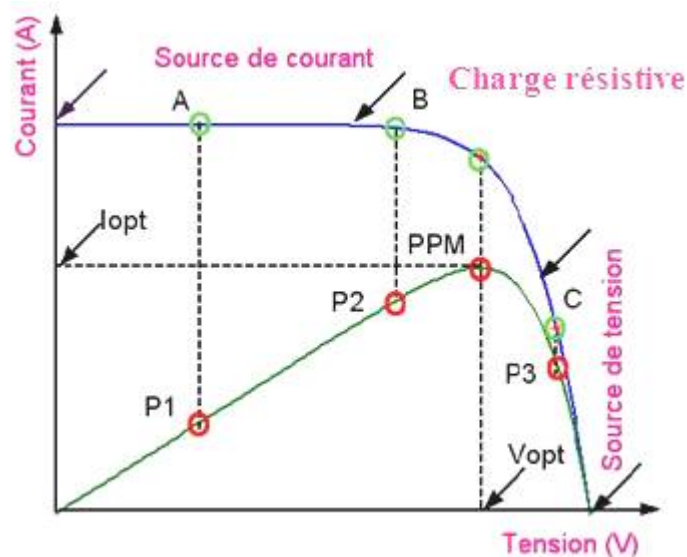
Trois types de charges DC typiques existent : une charge purement résistive, une charge de type source de tension et une charge de type source de courant. Sur la figure(I.6), nous avons

représenté les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un générateur PV ainsi que les caractéristiques $I(V)$ des trois types de charges.

Tout d'abord, nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale pour un courant optimal et une tension optimale. Ce point est nommé PPM. Ensuite, nous remarquerons le point d'intersection entre les caractéristiques $I(V)$ du générateur et celles des trois types de charges [3] :

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

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement $P1$, $P2$ et $P3$, que, comme l'illustre la Figure (I.6), correspondent à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible. Donc une perte d'une partie de la puissance dérivable aux bornes du générateur PV implique à la longue des pertes de production énergétiques importantes.



Figure(I.6): Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge

I.8.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologies des éléments constitutifs d'un générateur PV. Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque. Aussi que les principes de fonctionnement de chaque élément, ce qui permet d'introduire à la modélisation et l'analyse de ce système, chose qu'on va présenter dans le chapitre II.[2]

Chapitre II :
Modélisation et simulation d'un Système
photovoltaïque

II.1.Introduction

La simulation digitale sert afin de comprendre le comportement opérationnel de ces composants et les interactions entre eux. Depuis la simulation de la performance d'un système, on peut tracer toutes les étapes de la conversion d'énergie et identifier en détail les pertes à travers le système.

Comme la simulation sur ordinateur permet la variation d'une gamme de paramètres d'un système l'investigation comme fonction de ces paramètres, de caractéristiques opérationnelles, du procédé du projet de tel système. Toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel MATLAB/Simulink.[8][4]

II.2.Modèle de cellule

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p [2]. Ainsi, la figure (II.1) illustre le schéma électrique équivalent d'une cellule PV réelle.

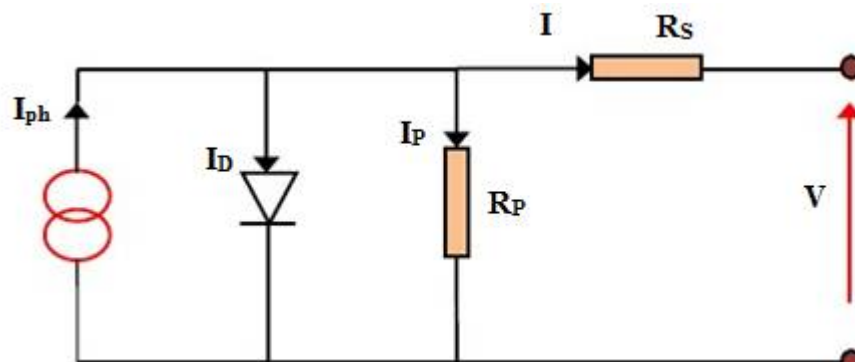


Figure (II.1) : Schéma équivalent de cellule PV

Dans cette figure, on prend en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique. En statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante:

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

Avec

I : Le courant fourni par la cellule

$I_{sc} : I_{scr} \left(\frac{G}{1000} \right)$: Où I_{scr} le courant de court-circuit de référence.

$I_p = \frac{V+I.R_s}{R_p}$: Le courant dérivé par la résistance parallèle.

$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V+I.R_s}{nV_T} \right) - 1 \right]$: Le courant traversant la diode.

I_0 : Le courant de saturation inverse d'une diode.

$V_T = \frac{KT}{e}$: La tension thermique.

Où :

e : charge d'électron ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$),

K : constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} \text{J/K}$)

n : Facture de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

T : La température effective de la cellule en kelvin.

En utilisant les équations ci-dessus, on peut en déduire l'expression du courant délivré par la cellule photovoltaïque :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V+I.R_s}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (\text{II.2})$$

II.3.Modèle du Module (panneau) photovoltaïque

Pour réaliser cette modélisation, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation [9]. fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, ou de charges courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 72 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 150 W.

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

Puissance maximale ($P_{\max}$)	150 W
Tension à $P_{\max}$ (V_{mp})	34.5 V
Courant à $P_{\max}$ (I_{mp})	4.35 A
Courant de court-circuit (I_{sc})	4.75 A
Tension à circuit ouvert (V_{oc})	43.5 V
Coefficient de température de I_{sc}	$0.065 \pm 0.015\%/^{\circ}\text{C}$
Coefficient de température de V_{oc}	$-160 \pm 20 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$
Coefficient de température de la puissance	$-0.5 \pm 0.05\%/^{\circ}\text{C}$
NOCT	$47 \pm 2^{\circ}\text{C}$

Tableau(II.1) : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 150

Dans notre cas, nous avons choisi un modèle simple nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, la caractéristique I-V de ce modèle est illustrée ci-dessous [10] :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V+I.R_S}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V+I.R_S}{R_P} \quad (\text{II.3})$$

Où I_D , le courant de diode, est donné par l'équation :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{V+I.R_S}{nV_T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.4})$$

Le courant de saturation inverse d'une diode est donné par :

$$I_0 = I_{sc} / \left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.5})$$

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_P = \infty$) l'équation (II.3) devienne :

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V+I.R_S}{nV_T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.6})$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule.

V : La tension à la borne de cellule.

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V+I.R_S}{nV_T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.7})$$

Calcul de la résistance série dans le point V_{oc}

$$dI = 0 - I_0 \cdot \left(\frac{dV+R_S.dI}{nV_T} \right) \cdot \left[\exp \left(\frac{V+I.R_S}{nV_T} \right) \right] \quad (\text{II.8})$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristique I-V au voisinage de V_{oc} . Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$R_s = -\frac{dV}{dI} - \frac{nV_T}{I_0 \exp\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right)} \quad (\text{II.9})$$

Enfin, pour résoudre l'équation de caractéristique non linéaire, on utilise la méthode de Newton décrite par :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{II.10})$$

Où :

$f'(x_n)$: Le dérivé de la fonction $f(x_n)$

x_n : La présente itération.

x_{n+1} : L'itération suivante

Ainsi, on récrit l'équation (2.6) sous la forme suivante :

$$f(I) = I_{sc} - I - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] = 0 \quad (\text{II.11})$$

En remplaçant dans l'équation (II.11), on calcule le courant (I) par les itérations [11] :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right) - 1 \right]}{-1 - I_0 \left(\frac{R_s}{nV_T} \right) \cdot \left[\exp\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right) \right]} \quad (\text{II.12})$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différentes éclairagements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.[9]

$$I_{sc}(T) = I_{scr}(T_{ref}) \cdot [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (\text{II.13})$$

$$I_{sc} = I_{scr} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (\text{II.14})$$

- Où I_{scr} courant de court-circuit de référence.

Donc :

$$I_0(T) = I_0(T_{ref}) \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot \left[\exp\left(\frac{-q \cdot E_g}{nK}\right) \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \right] \quad (\text{II.15})$$

Où :

α : Le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

T_{ref} : La température de référence, 298k (25°C).

G : L'irradiation solaire.

II.4. Le Simulation photovoltaïque « G PV »

II.4.1. Simulation de la cellule PV

Sur la base du modèle mathématique de la cellule solaire développé dans le sous paragraphe 2.2 du chapitre II, on obtient le bloc schématique de SIMULINK est montré sur la Figure (II.2).[6]

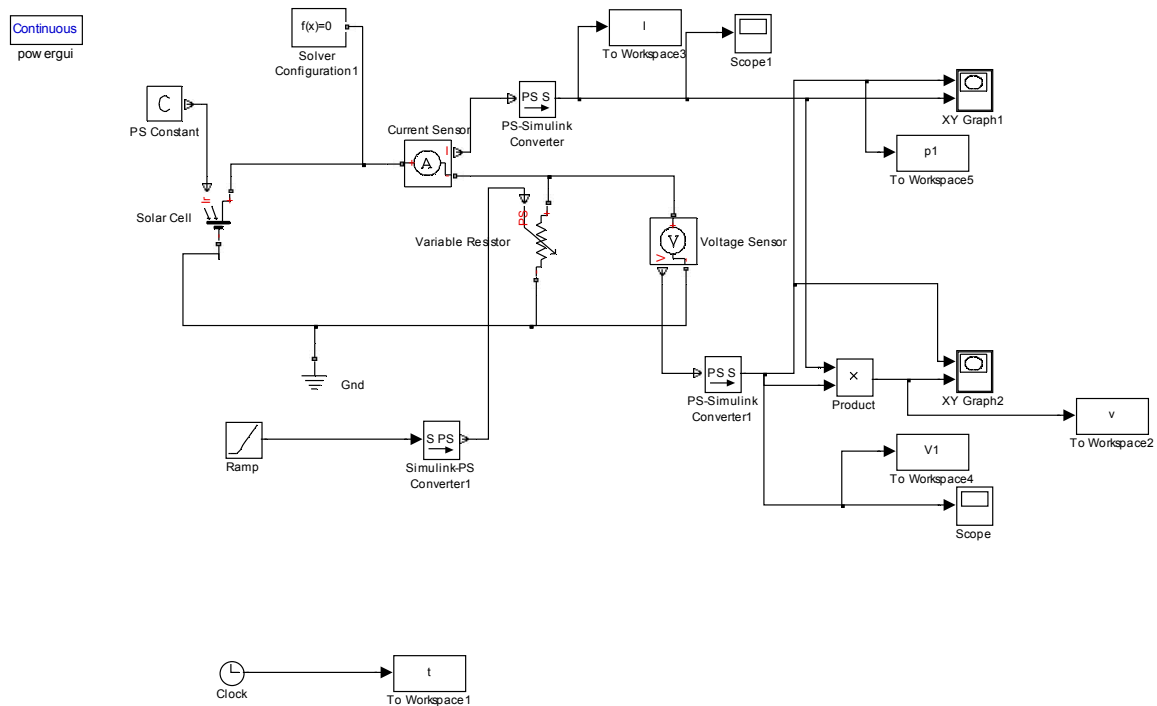


Figure (II.2) : Bloc de la cellule solaire dans SIMULINK.

Les résultats de simulation du bloc SIMULINK sont montrés sur la Figure(II.3) et Figure (II.4), pour l'éclairement $E=1000\text{W/m}^2$ et de température 25°C.

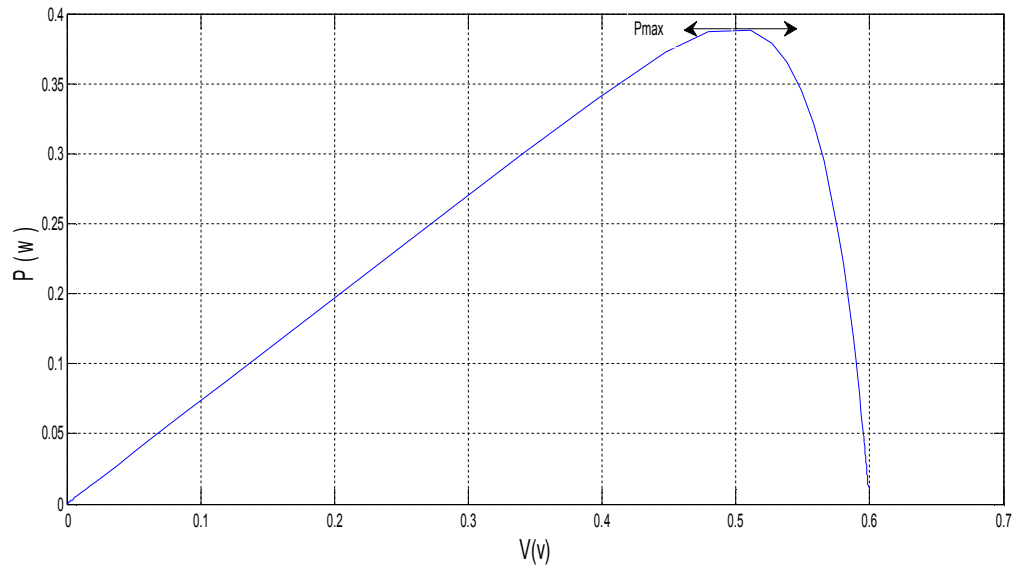


Figure (II.3) : Caractéristique $P=f(V)$ de la cellule.

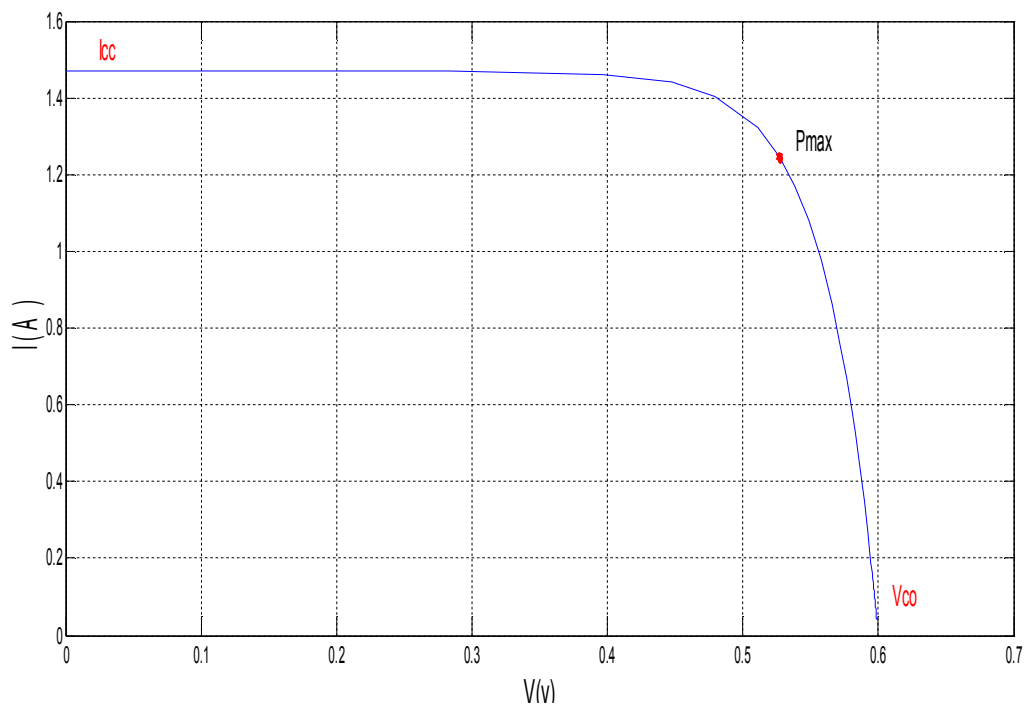


Figure (II.4) : Caractéristique $I=f(V)$ de la cellule.

D'après ces résultats de simulation, on peut constater que cette cellule à :

- Courant de court-circuit $I_{cc} = 1$ A.
- Tension de circuit ouvert $V_{co} = 0.54$ v.
- Puissance maximale $P_m = 0.44$ w.

II.4.2.Simulation du module PV

Dans ce travail nous avons simulé le module Shell SP75 qui comporte 36 cellules solaires de silicium monocristallin de 125.125mm connectées en série.

Le Shell SP75 peut produire une puissance maximale de 75 watts à 17 volts.

Ceci nous a permis de déterminer la puissance en fonction de la tension et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairement de 1000 W/m². Les caractéristiques électriques du module Photovoltaïque Shell SP 75 en conditions de test standards sont représentées sur le Tableau (II.2).

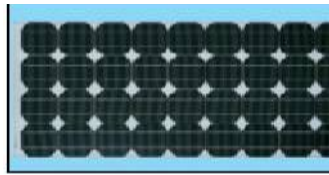


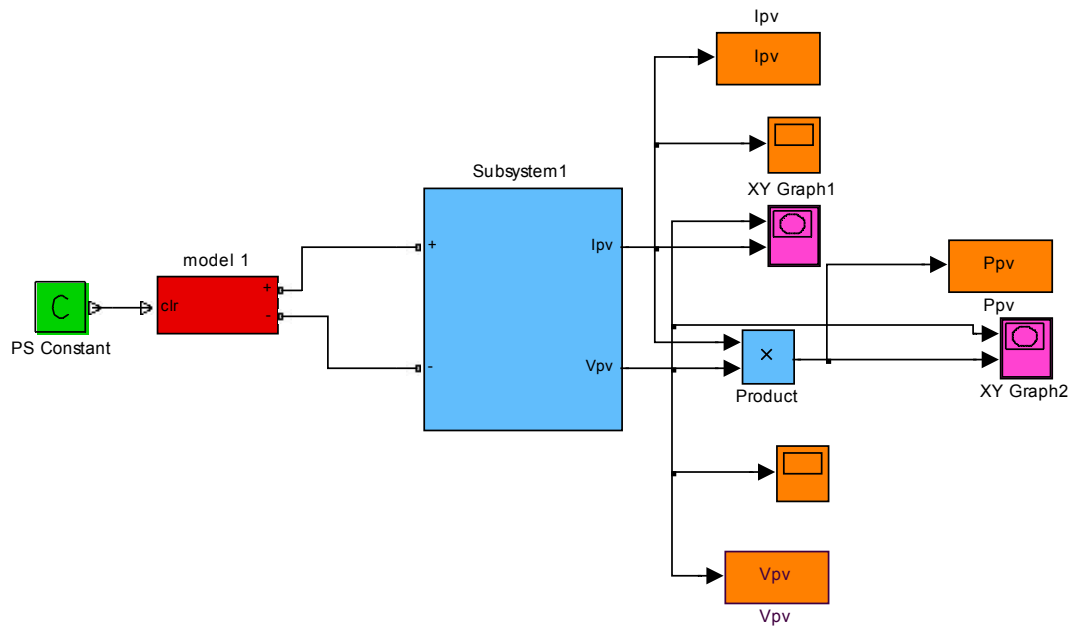
Figure (II.5) : Module Shell SP75

Grandeurs	Valeur
- Eclairement standard, E.	1000 W/m ²
- Température standard, T.	250 C
- Puissance crête maximale, P _m .	75 W
- Tension maximale, V _m .	17 V
- Courant maximal, I _m .	4.4 A
- Tension de circuit ouvert, V _{co} .	21.7 V
- Courant de court-circuit, I _{cc} .	4.8 A

Tableau(II.2): Caractéristiques électriques du module

Photovoltaïque Shell SP 75 en condition de test standard. [3]

La figure ci-dessous présente le block du module photovoltaïque dans l'environnement SIMULINK

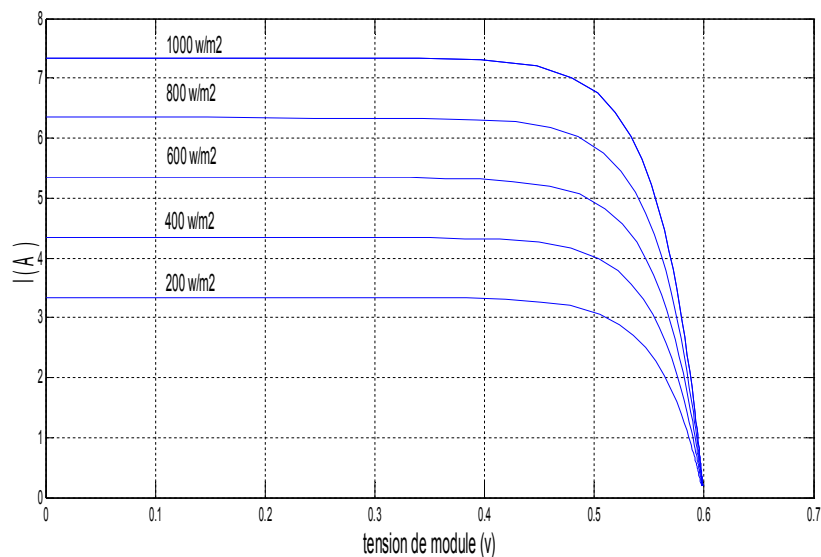


Figure(II.6): Block du module Shell SP 75 dans SIMULINK.

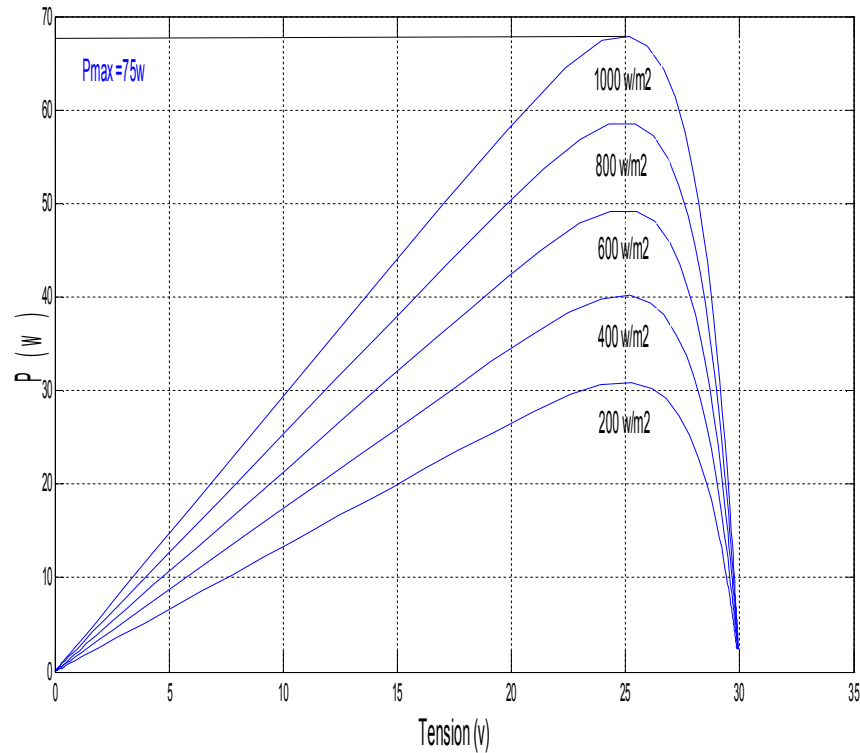
Les Figure(II.6).a et Figure(II.7).b nous montrent les caractéristiques électriques du module Shell SP75 après son simulation avec MATALB/SIMULINK pour différentes valeurs d'éclairement et pour une température de 25°C.

Nous pouvons constater les caractéristiques suivantes pour ce module photovoltaïque :

$$I_{cc}=4.8 \text{ A}, \quad V_{co}=21.7\text{V}, \quad V_m=17\text{V}, \quad P_{max}=75\text{W}.$$



Figure(II.7) : Courbe I(V) du module.



Figure(II.8): Courbe P(V) du module.

II.5.Influence de la température sur le rendement des cellules

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la base des cellules photovoltaïques est une jonction PN. Ceci nous laisse envisager que son rendement variera selon la température de la jonction. En effet, l'équation de Boltzmann donne :

$$I_{sc} = I_0 \cdot \exp - \left(\frac{eV_{oc}}{KT} \right) \quad (\text{II.16})$$

La figure 2.4 ci-dessous montre que la tension à vide d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule. L'ordre de grandeur des pertes est de 2.3 mV / par degré Celsius / par cellule. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule (environ 0.05 % par degré Celsius). La figure ci-dessous montre clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule.[1]

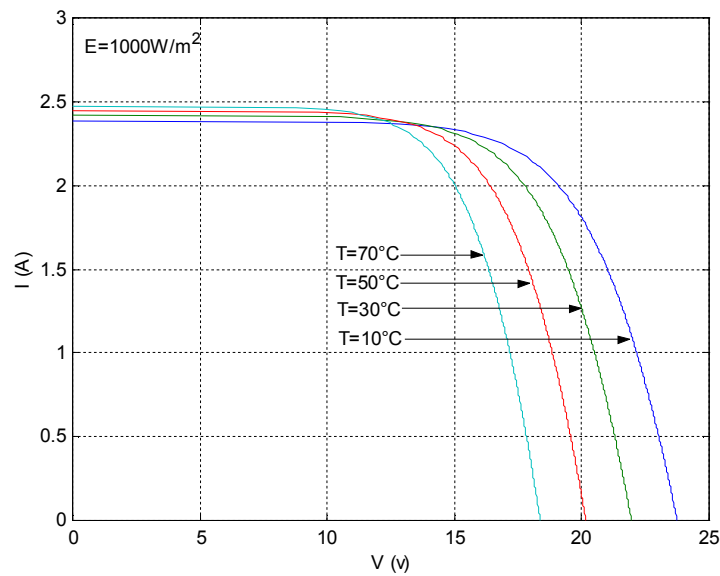


Figure (II.9) : Effet de la température sur la caractéristique I-V

On peut remarquer sur la figure 2.5 que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible (de l'ordre de $(5 \times 10^{-5} \text{ W/K})$ par cm^2 de la cellule) [11].

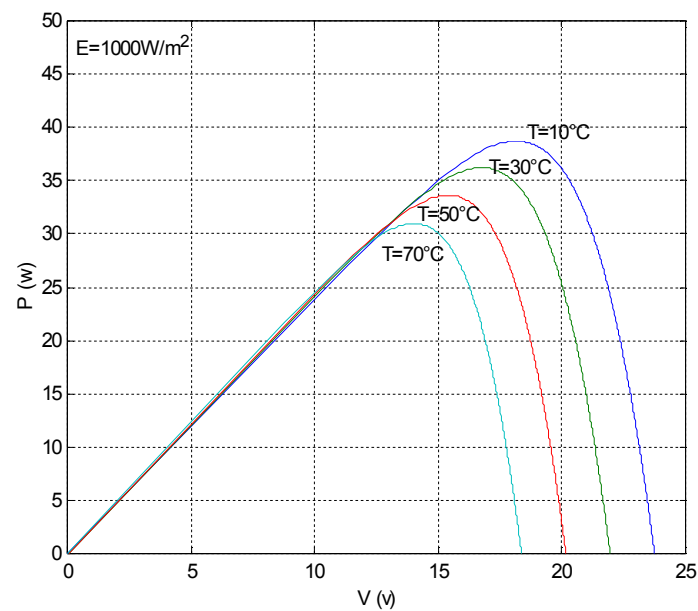


Figure (II.10) : Effet de la température sur la caractéristique P-V

II.6. Influence du rayonnement sur les cellules

De la même manière que la température, la jonction PN réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit. Plus elle reçoit d'énergie plus elle en restitue, mais toujours avec un coefficient de rendement très faible de l'ordre de 15%. La variation des caractéristiques est représentée sur les courbes de la (figure II.10). Pour différents niveaux d'irradiation, le changement du courant optimal est très important. Ceci confirme l'approximation faite classiquement sur le courant optimal délivré par un générateur PV qui est globalement proportionnel au niveau d'irradiation. Nous pouvons le voir. Selon les conditions météorologiques, nous obtenons différentes courbes avec différentes puissances maximales au cours d'une même journée. Nous remarquons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert à une chute du flux lumineux. En examinant les caractéristiques réelles obtenues, nous pouvons conclure que des fortes variations du niveau d'irradiation provoquent des variations relativement importantes du courant optimal. Alors que, les variations relatives de la tension optimale restent faibles.[8][12]

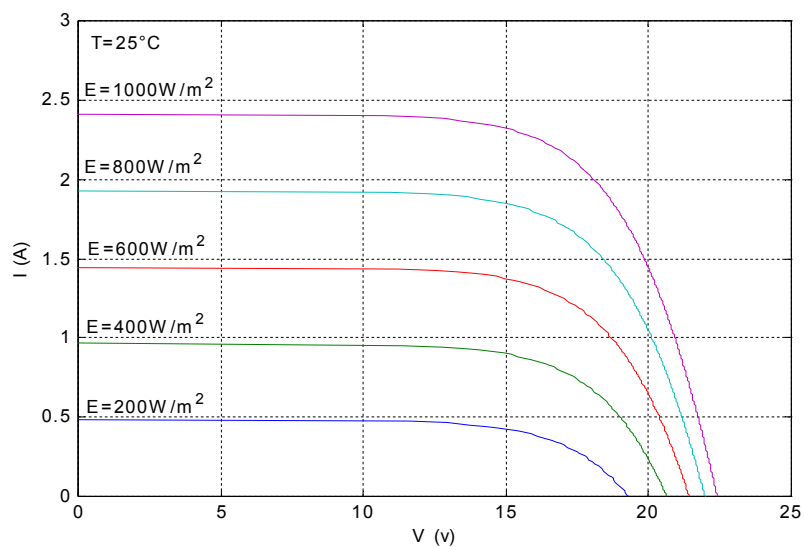


Figure (II.11) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V

II.7.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation et la simulation d'une cellule photovoltaïque et d'un Module photovoltaïque, les caractéristiques du générateur PV avec ses performances. Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques.

Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge ou un autre système que nous allons l'étudier dans le chapitre suivant.

Chapitre III :
Techniques de Poursuite du Point de
Puissance Maximale MPPT

III.1. Introduction

Le branchement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple qui soit. Le point de fonctionnement dans ce cas se situe à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique I-V du générateur. Ce point ne peut pas coïncider avec le point de puissance maximale, il s'ensuit une perte de puissance maximale du système. Ce problème peut être résolu soit par le changement de configuration du générateur photovoltaïque, soit par l'adjonction d'un dispositif de recherche de point de puissance maximale placé entre le générateur et la charge pour assurer l'adaptation d'impédance. L'exploitation optimale de l'énergie électrique disponible aux bornes du générateur photovoltaïque peut contribuer à la réduction du coût global du système. Il existe plusieurs techniques pour satisfaire ce but.

Dans ce chapitre nous allons citer et expliquer différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

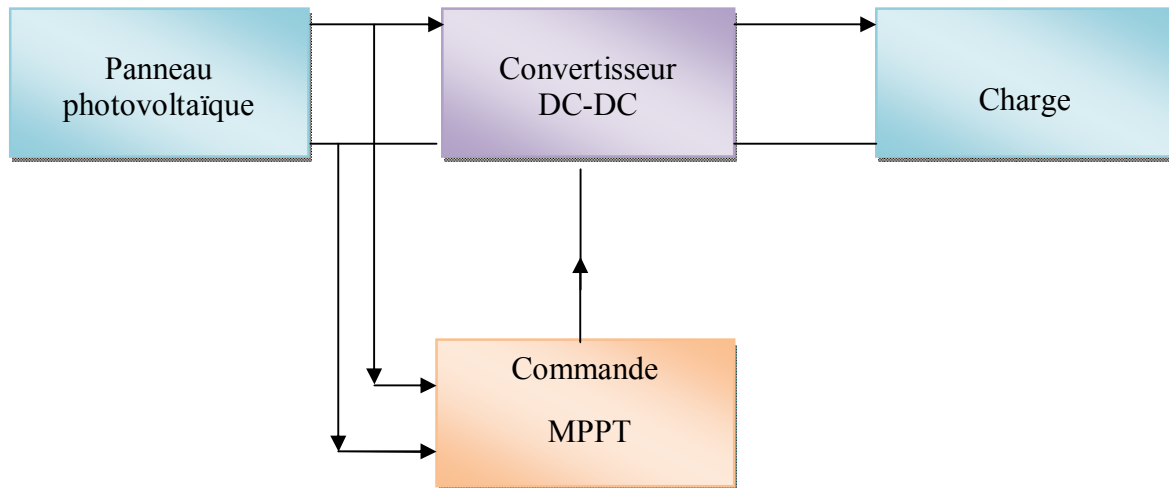
III.2. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïque. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 dates de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application. [1]

III.3. Principe du MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}). [1]

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (III.1).



Figure(III.1):Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

III.3.1.Adaptation manuelle de la charge au générateur photovoltaïque

Dans cette méthode, le MPP du panneau solaire est déterminé par une série de mesures ou théoriquement, dans les conditions normales de fonctionnement. Ensuite les mesures, des valeurs du courant et de la tension correspondants à cette puissance, sont relevées. Par la suite la valeur de la charge correspondante à ces valeurs est fixée. [1]

L'avantage de cette méthode est qu'elle est très simple. Car aucun circuit additionnel n'est employé, et la perte de puissance entre le panneau et les batteries est réduite aux pertes dans les conducteurs. L'inconvénient de ce système est qu'il ne prend en compte aucun changement d'insolation ou de température qui provoquent bien sûr le changement du point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale (V_{mpp} et I_{mpp}), sans tenir compte des angles d'incidence sur les panneaux qui sont négligés. Les effets comme le vieillissement des cellules photovoltaïques ou d'une surface poussiéreuse du panneau peuvent également causer une variation du point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Par conséquent, une méthode plus sophistiquée pour l'adaptation panneau-charge doit être trouvée si on veut avoir un rendement de puissance plus élevé.

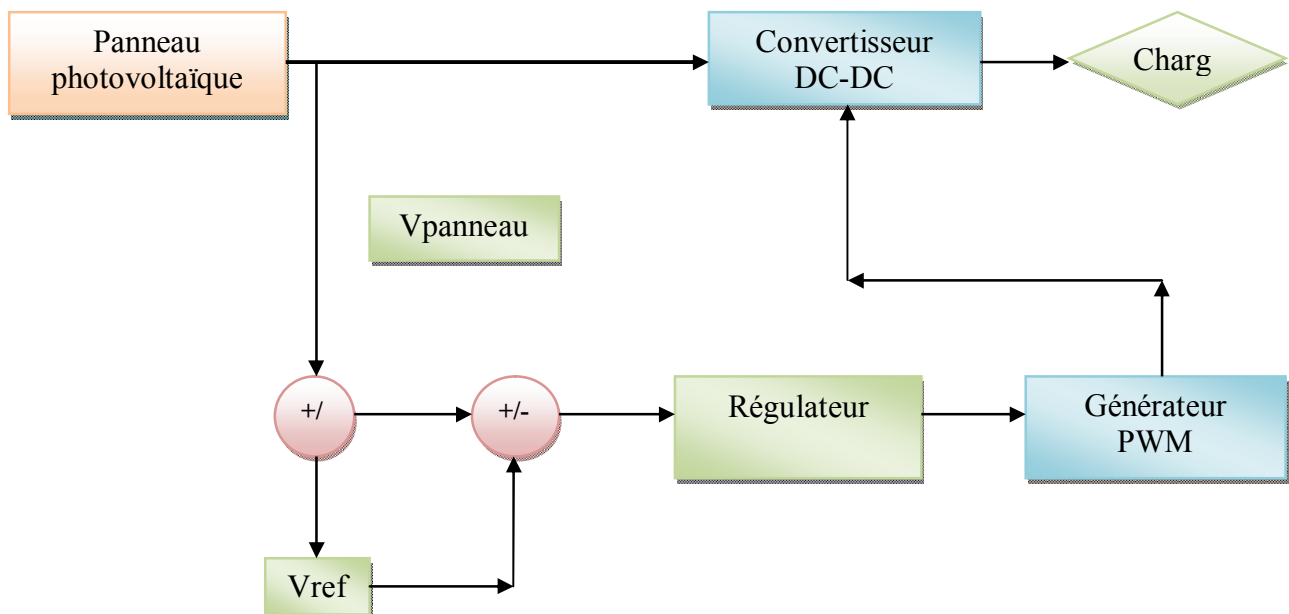
Un certain nombre de batteries contrôlables sont connectées en série. Selon la tension d'opération désirée des modules photovoltaïques, le nombre de cellules de batterie en série peut être modifié. On peut aussi en réarrangeant la disposition en série et parallèles des différents panneaux entres eux, l'assortiment entre la charge et les panneaux photovoltaïques est amélioré. Ceci permet au système de réagir aux changements des conditions environnementales telles que

la température et l'insolation et donc de fonctionner plus près du MPP réel.

Cette approche exige du câblage et des circuits supplémentaires. En plus, l'augmentation ou la diminution par étapes de la tension de fonctionnement ne permet pas la poursuite précise du MPP. Cette approche dans le long terme dégrade la vie des batteries [2]. Ces méthodes pourraient être rentables pour des usages avec cellules photovoltaïques stationnaires à condition de trouver des systèmes ingénieux et économiques de commande.

III.3.2.Méthodes à contre réaction de tension

Dans ce cas on se repose sur la commande de la tension de fonctionnement des panneaux, par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la commande PWM afin d'annuler cette erreur. [2]



Figure(III. 2) : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.

III.3.3.Méthodes à contre réaction de courant

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension on a le schéma décrit par la figure (III.3) [3] .

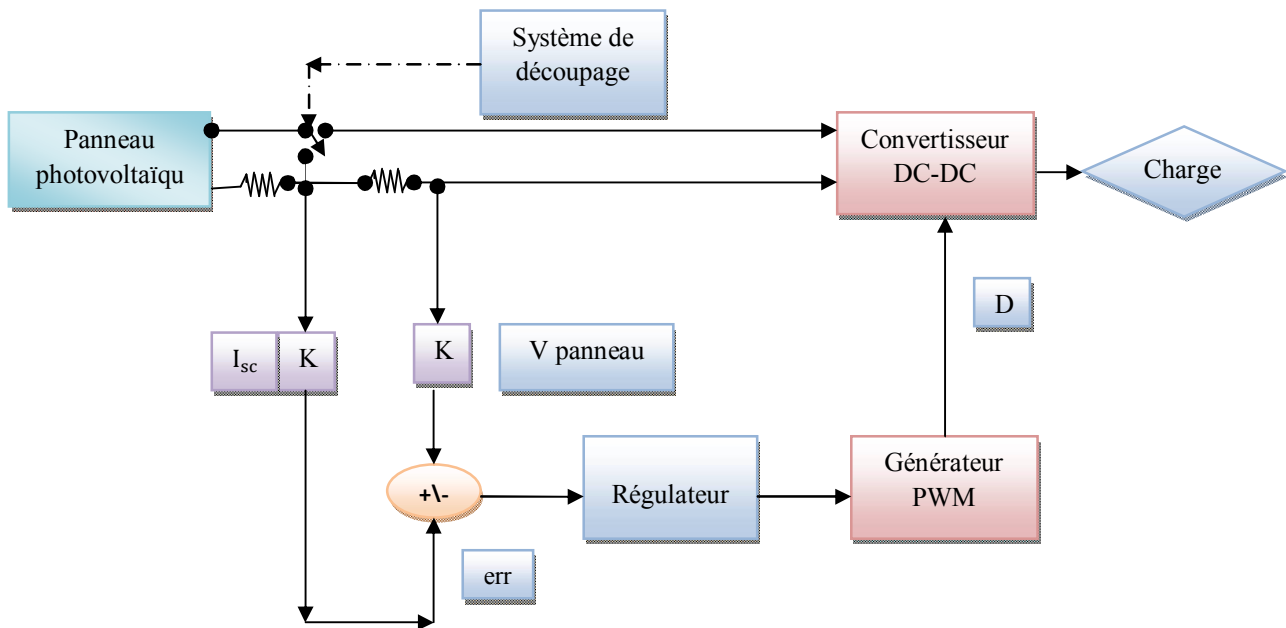


Figure (III.3) : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de I_{sc} .

III.3.4.Méthodes à contre réaction de puissance

Les méthodes à contre réaction de puissance se basent sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système.

La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs $p=v*i$.

III.3.4.1.Technique de l'incrémental de la conductibilité

Cette méthode s'intéresse 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 ($G = dI / dV$). En comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG , nous allons chercher le maximum de la courbe figure (III.4) en cherchant le point d'annulation de la dérivée de la puissance. [4]

Précisément la puissance en sortie de la source peut s'écrire :

$$P=V \times I \quad (III.1)$$

D'ou en écrivant la dérivée :

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

$$\frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I$$

$$\frac{dP}{dV} \cong V \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \quad (III.3)$$

Donc :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 \\ \frac{dP}{dV} > 0 \\ \frac{dP}{dV} < 0 \end{cases} \quad \text{Ou} \quad \begin{cases} a \left\{ \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \right. \\ b \left\{ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \right. \\ c \left\{ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \right. \end{cases} \quad (III.4)$$

Les équations (III.4.b) et (III.4.c) sont employées pour déterminer la direction dans laquelle une perturbation doit se produire pour déplacer le point de fonctionnement vers le MPP. Cette perturbation est répétée jusqu'à ce que l'équation (III.4.a) soit satisfaite. Une fois le MPP est atteint, le MPPT continue à fonctionner avec cette valeur jusqu'à ce qu'un changement de la valeur du courant soit détecté ; ce dernier résulte d'un changement au niveau de l'éclairement. Quand l'éclairement augmente, le MPP se déplace vers la droite de la tension de fonctionnement. Pour compenser ce mouvement du MPP, le MPPT doit augmenter la tension de fonctionnement. La même chose pour le cas contraire, quand l'éclairement diminue, le MPPT doit diminuer cette dernière.

Les valeurs actuelles et précédentes de la tension et du courant sont utilisées pour calculer (ΔV) et (ΔI). Si $\Delta V=0$ et $\Delta I=0$, alors les conditions atmosphériques n'ont pas changé et le MPPT fonctionne toujours au MPP. Si $\Delta V=0$ et $\Delta I>0$, alors l'éclairement a augmenté. Ceci exige à l'algorithme d'augmenter la tension de fonctionnement pour retrouver de nouveau le MPP. Contrairement si $\Delta I<0$, l'éclairement a diminué tout en exigeant au l'algorithme de diminuer la tension de fonctionnement. Si le changement de la tension n'est pas nul, les rapports dans les équations (III.4.b) et (III.4.c) peuvent être employés pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit être changée afin d'atteindre le MPP.

Si $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ (c'est-à-dire le rapport $\frac{dP}{dV} > 0$ donc le point de fonctionnement est à gauche du MPP. Ainsi, la tension de fonctionnement doit être augmentée pour atteindre le MPP. De même,

Si $\frac{dI}{dV} < -\frac{1}{V}$ (c'est-à-dire le rapport $\frac{dP}{dV} > 0$ le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP tout en signifiant que la tension doit être réduite pour atteindre le MPP. [4] Le schéma de la figure (III.5) montre l'organigramme de l'algorithme INC.

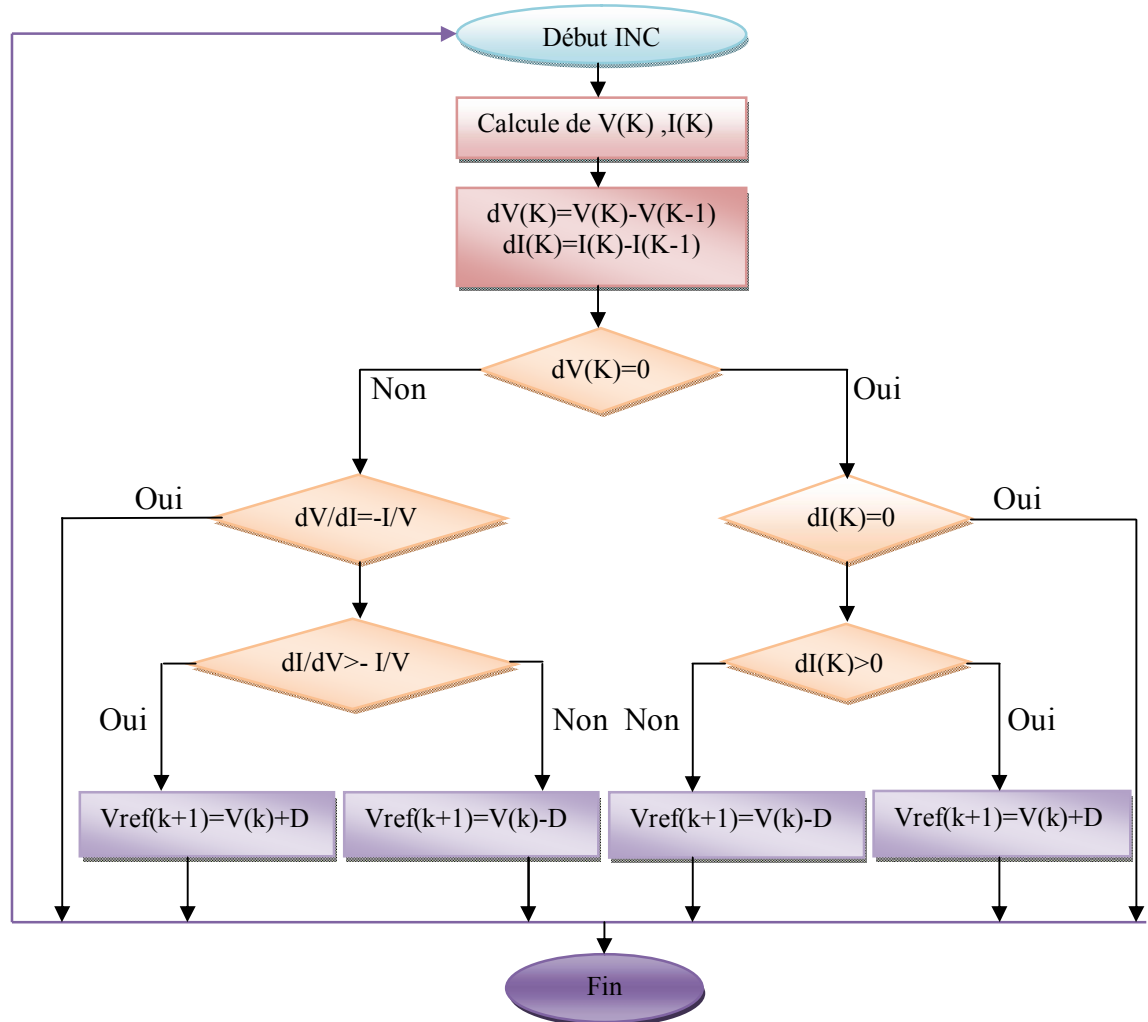
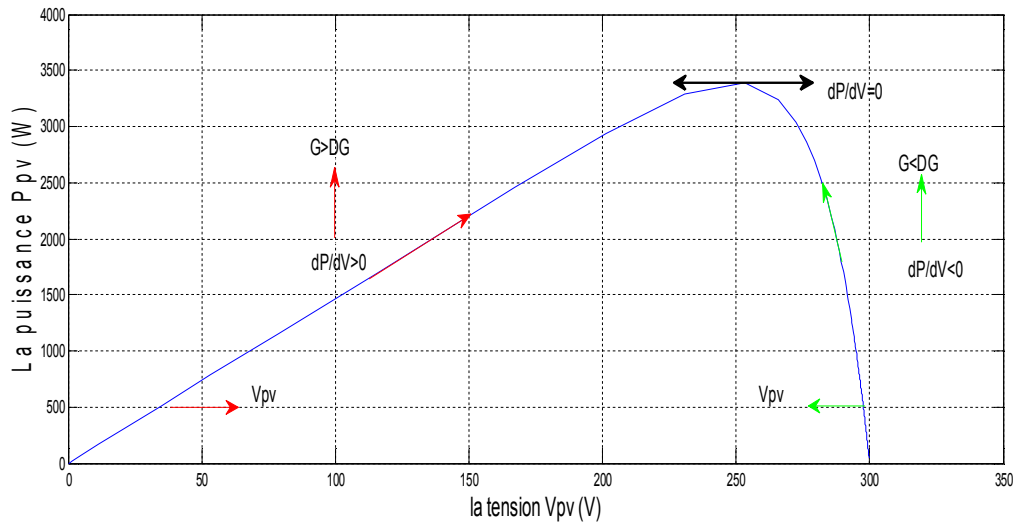


Figure (III .4) : Organigramme de l'algorithme INC.

En réalité, cet algorithme est une correction de l'algorithme "P&O" puisqu'il est capable de calculer la direction dans laquelle la perturbation du point de fonctionnement devrait être pour atteindre le MPP, et il peut aussi déterminer l'atteinte du MPP. De plus, dans les conditions de changement rapide de l'ensoleillement, l'algorithme ne devrait pas prendre la mauvaise direction comme c'est le cas avec l'algorithme "P&O", et d'ailleurs, il n'oscille pas autour du MPP une fois qu'il l'atteint. [4]



Figure(III .5) : Caractéristiques de fonctionnement de la méthode par incrémentation de conductibilité

III.3.4.2. Algorithme ‘perturbation et observation’

C’est l’algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé. [1] Comme son nom l’indique il est basé sur la perturbation du système à travers l’augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis par l’observation des effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure (III.7) montre l’organigramme de l’algorithme de P&O tel qu’il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{mp} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d’une perturbation simple.

Si la largeur du pas est grande, l’algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues relativement aux conditions stables ou lentement changeantes.

Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les conditions de stabilité ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l’insolation. La valeur pour la largeur idéale du pas ΔD dépend du système, elle doit être déterminée expérimentalement.

Un inconvénient de la méthode de P&O est décrit par Hussein et al. [1]. Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continue jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement, moment où il revient vers le vrai point de puissance maximale.

Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance, figure (III.8)

Ces changements atmosphériques sont souvent produits dans les véhicules solaires lors de leurs passages dans une zone d'ombre tels que végétation ou bâtiments ainsi que le changement de l'angle d'incidence pour des véhicules en mouvement.

Perturbation de la tension	Observation de la puissance	Prochaine Perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Negative (-)	Negative (-)
Negative (-)	Positive (+)	Negative (-)
Negative (-)	Negative (-)	Positive (+)

Tableau (III .1) : Table de vérité de l'algorithme 'perturbation et observation.

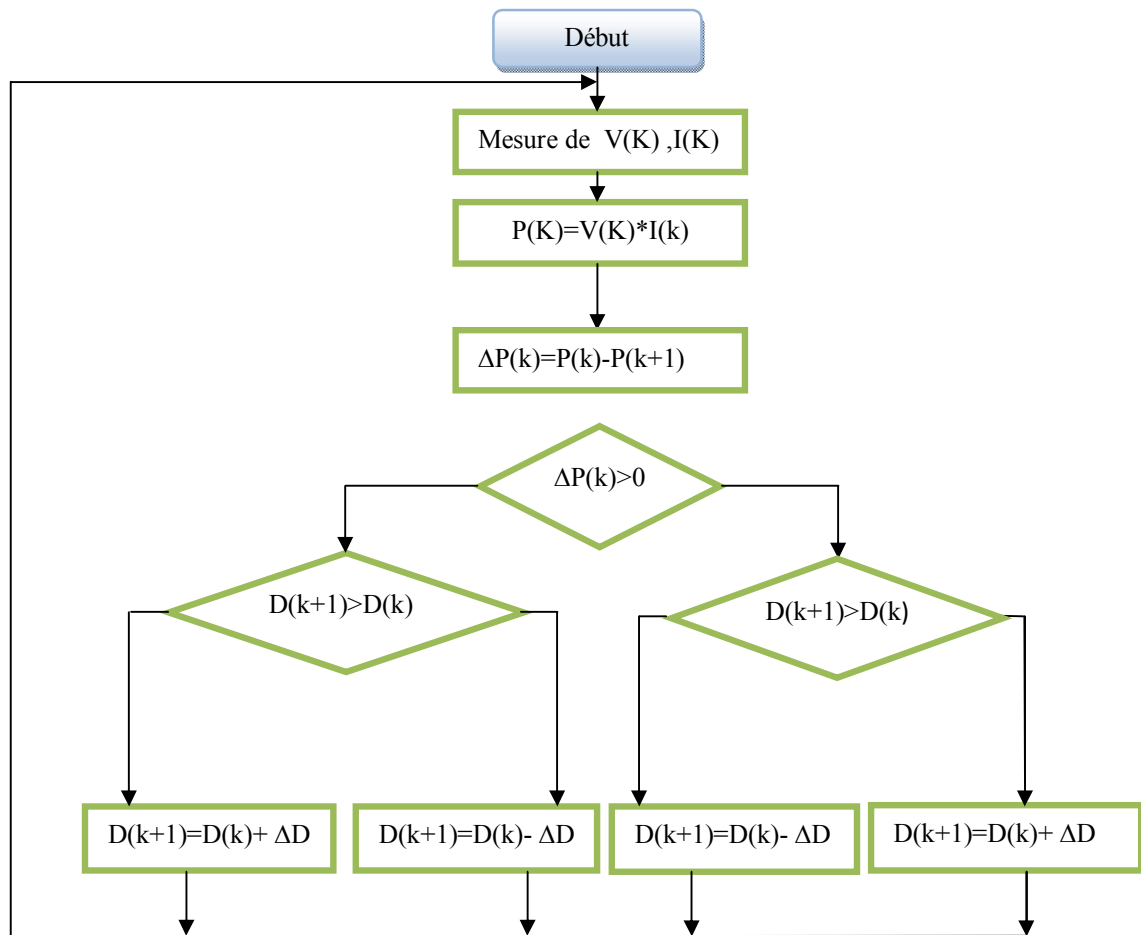
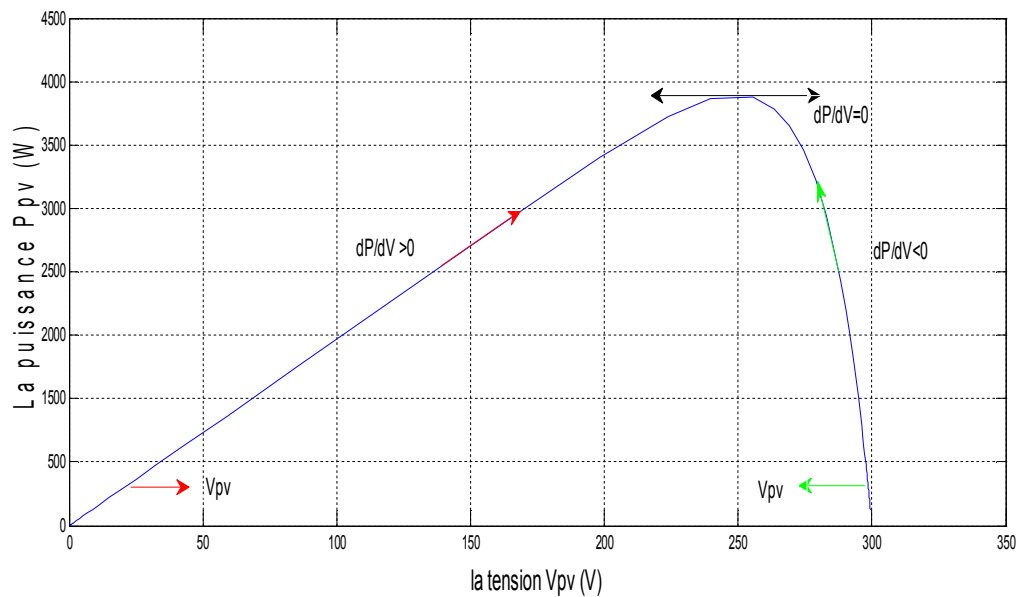


Figure (III.6) : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation



Figure(III .7) : Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O.

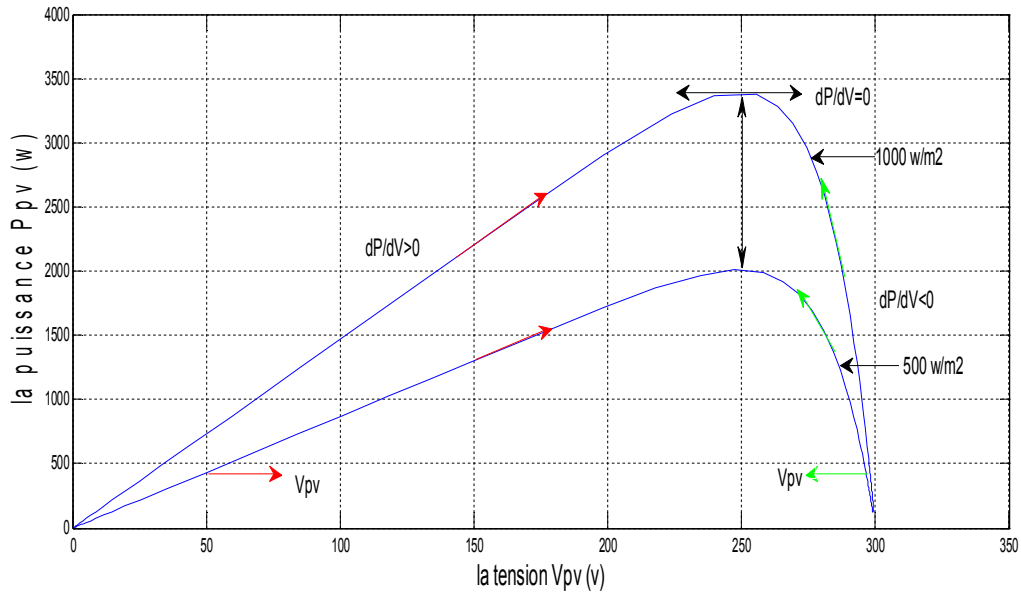


Figure (III .8) : Effet d'une augmentation soudaine de l'ensoleillement sur la poursuite du PPM.

III.4.Conclusion

La modélisation du système PV consiste à la mise en équations des différentes parties les constituant la source primaire (température et ensoleillement), les convertisseurs statiques permettant la commande en tension du panneau photovoltaïque. Il s'agit donc d'optimiser le traitement global de l'énergie électrique au sein du système et en particulier au niveau du générateur, en plaçant celui-ci à chaque instant à son point optimal de fonctionnement grâce à un système de poursuite de type MPPT. Donc le MPPT commande un étage d'adaptation qui permet de relier aisément un générateur photovoltaïque à une charge de type continue (DC) pour avoir un rendement de conversion très élevé.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque. Une meilleure rentabilité de ce système à énergies renouvelables implique forcément un meilleur conditionnement, donc adaptation.

Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'avérer nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque. Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement MATLAB permettant de tracer la caractéristique I-V pour différents éclairagements et températures solaires et de calculer la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque correspondante.

De ce qui précède, on peut conclure que l'énergie produite par le photovoltaïque est difficile à exploiter, cela est dû à la non linéarité de la caractéristique statique, de plus cette caractéristique change, si la température ou l'éclairement varient. Ce dernier changement entraîne une variation du point de fonctionnement, d'où la nécessité de concevoir des régulateurs pour le suivi du point de puissance maximale, quelque soit la valeur de l'éclairement ou de la température.

Pour mieux analyser les contraintes de l'exploitation d'un système photovoltaïque, nous avons étudié des méthodes d'optimisation. Par exemple l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale "Perturbation et Observation" est amélioré pour passer outre ses défauts et minimiser toute éventuelle perte de puissance.

Pour poursuivre ce modeste travail nous proposons les perspectives suivantes :

- ✓ Développer l'étude pour les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux de distribution électrique ou comportant un onduleur.
- ✓ Développer des lois de commande à base des techniques intelligentes et ceux-ci en vue de surmonter les problèmes de non linéarité du modèle imposé par la source PV.
- ✓ Investiguer au niveau de l'implantation des lois de commande envisagées, par l'utilisation de la carte DSP.

Dans le dernier chapitre, nous avons analysé dans le simulateur MATLAB le fonctionnement optimal d'un système PV, de moyennes puissances dont la régulation de la puissance est

effectuée par une commande MPPT, suites aux variations des conditions météorologiques (éclaircissements, ...) et de la charge.

Les résultats obtenus montrent l'oscillation instantanée du point de fonctionnement du module photovoltaïque autour du PPM indépendamment à des variations de l'éclairement et la charge. Le bon fonctionnement du convertisseur DC-DC Booste (rendement de l'ordre de 92%) et les faibles pertes de puissances fournies par ce module (inférieures à 8 %) nous ont permis de conclure le bon fonctionnement et les performances satisfaisantes du système PV réalisé au cours de ce travail. En perspective, ce travail sera poursuivi par une réalisation pratique de commande MPPT à fin de valider les résultats obtenus.

En première partie, nous avons étudié le principe des systèmes photovoltaïques où on a présenté le modèle des différents éléments qui le constituent (module, générateur,) ainsi que les différents types de centrales solaires.

En deuxième partie, nous avons brièvement présenté les techniques d'optimisation de puissance des générateurs PV et nous avons détaillé la technique de maximisation de puissance P & O.

Ce travail a donc porté sur la modélisation et la simulation d'un système : photovoltaïque connecté au réseau électrique moyennant le logiciel MATLAB (Simulink). Nous avons procédé à cette étude en cinq étapes : état de l'art des énergies renouvelables appropriées (photovoltaïque), la modélisation du système photovoltaïque, les convertisseurs statiques, la méthode de poursuite de point de puissance maximale et système photovoltaïque connecté au réseau électrique enfin : la simulation de tout l'ensemble.

L'état de l'art des énergies renouvelables (photovoltaïque) joue un rôle prépondérant dans un tel travail. Nous avons commencé par une étude théorique des caractéristiques d'une source primaire (ensoleillement), ensuite nous avons intéressé aux modes d'intégration d'un système photovoltaïque au réseau électrique.

La modélisation du système PV consiste à la mise en équations des différentes parties les constituant : la source primaire (température et ensoleillement), les convertisseurs statiques : l'hacheur survolteur (Boost) et dévolteur (Buck), permettant la commande en tension du panneau photovoltaïque. Il s'agit donc d'optimiser le traitement global de l'énergie électrique au sein du système et en particulier au niveau du générateur, en plaçant celui-ci à chaque instant à son point optimal de fonctionnement grâce à un système de poursuite de type MPPT.

De plus, en raison de leur fonctionnement en commutation, ces convertisseurs statiques sont des générateurs de perturbations susceptibles de nuire au bon fonctionnement du générateur tant sur le plan électrique qu'énergétique. Sur le plan énergétique, les ondulations de la tension ou du

courant à l'entrée de certains convertisseurs se traduisent par une oscillation du point de fonctionnement sur la caractéristique autour du point de puissance optimale, qui implique une dégradation de la conversion photovoltaïque.

Pour avoir l'échange d'énergie entre le générateur photovoltaïque et le réseau électrique pendant une journée, et de faire une comparaison entre les grandeurs simulées et celles mesurées où les conditions météorologiques (éclairage et température) sont variables.

En première partie, nous avons étudié le principe des systèmes photovoltaïques où on a présenté le modèle des différents éléments qui le constituent (module, générateur,) ainsi que les différents types de centrales solaires.

En deuxième partie, nous avons brièvement présenté les différentes configurations des convertisseurs de puissance DC/DC ainsi que les techniques d'optimisation de puissance des générateurs PV et nous avons détaillé la technique de maximisation de puissance P & O. Les onduleurs multi niveaux se sont l'objectif de la troisième partie où nous avons représenté les différentes topologies de ces onduleurs et le principe de fonctionnement des onduleurs NPC à neuf niveaux par la commande triangle sinusoïdal à 8 porteuses.

Dans la quatrième partie, nous avons exposé la simulation sous MATLAB/Simulink de l'ensemble « générateur PV, convertisseurs DC/DC avec une commande MPPT, l'onduleur NPC à neuf niveaux avec une boucle de régulation de tension de sortie de cet onduleur ». L'étude spectrale a montré que malgré la fréquence de commutation est très basse, notre onduleur peut engendrer des ondes de tension acceptable.

De ce fait, quelques conclusions ont été déduites:

- Les sources PV sont des sources non linéaires et très sensibles aux conditions météorologiques (Eclairage et Température), nous avons présenté un étage d'adaptation de puissance par la technique de commande P&O qui nous donne de bons résultats.
- L'utilisation de plusieurs étages d'adaptation de commande MPPT d'une centrale photovoltaïque permet d'améliorer le fonctionnement global du système photovoltaïque.
- Les systèmes photovoltaïques centralisées permettent d'annuler totalement le déséquilibre entre les phases du réseau électrique engendré dans les systèmes décentralisées par l'utilisation de plusieurs onduleurs monophasés.

Références Bibliographies

- [1] M. SLAMA Fateh. « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique »
- [2] Othmane BENSEDDIK. Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque
- [3] Mr. MEFLAH AISSA .Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque
- [4] A. Moumi, N. Hamani , N. Moumi et A. Z. Mokhtari, « Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de biskra » , SIPE8, 11 et 12 Novembre 2006, Béchar, Algérie.
- [5] M. Capderou, « Atlas solaire de l'Algérie », Office des publications universitaire Tome 1' Tome 2, Algérie 1986.
- [6] A. VIAL, Étude des lignes de déclinaison d'un cadran solaire horizontal 2006, site internet "kaekoda.free.fr/bup/bup1".
- [7] B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », juin 07, STI ELT Approche générale.
- [8] J. A. Duffie, A. Wiley and W.A. Beckman, « Solar Engineering of Thermal Processes », Second Edition. -Interscience Publication, 1991.
- [9] Mohamed Lakhdar LOUAZENE « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla » Mémoire de Magister. UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR – BATNA. 2008
- [10] F.Z Zerhouni, « Adaptation Optimale d'une Charge à un Générateur Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Institut d'Electronique, USTO, 1996.
- [11] L.BAGHLI « Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone », IUFM de Lorraine–UHP, 2005.
- [12] N.Mansouri, N.Ghanmi « Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal » Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008).