République démocratique populaire algérienne
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia Fares de Médéa



Faculté de Technologie
Département du Génie Mécanique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière :Technologie
Spécialité :Energie Renouvelable

Thème: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque sous Matlab / Simulink

Présenté par:

Adjroud Abdennour Hachelfi Mohamed

Devant le jury:

Dr. DIDI Faouzi	MCB	Encadreur/rapporteur	Unv **Médéa**
Dr. TRIKI Zakaria	MCA	Examinateur	Unv **Médéa**
Dr. CHIBA Younes	MCA	Examinateur	Unv **Médéa**

Année universitaire:

2021-2022

Remerciement

Tout d'abord, nous voudrions remercier Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la force et le courage de faire cet humble travail.

Cette affaire ne pourrait être aussi riche et ne verrait pas le jour sans l'aide et l'encadrement

de Mr. DIDI FOUAZI, nous le remercions infiniment pour tous ses commentaires, ses encouragements et son soutien sans faille et de nous avoir accordé de son temps pour la réussite de notre travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont pris le temps et le soin d'évaluer ce travail.

Nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation

de cet mémoire.

Dédicace

Avant tous,

Je remercie mon Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et lapatience pour réaliser Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce travail à mes très chères parents, comme simple témoignagede ma reconnaissance pour l'immense effort qu'ils sont fournis le long demes études.

A mon frère et sœur,

Pour leurs soutiens moral et leur conseil précieux tout au long de mesétudes.

À tous mes professeurs du Département de génie mécanique. Merci pourvotre soutien et vos conseils.

A tous mes amis proches, mes collègues d'études en énergie Renouvelables.

Pour leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.

A mon chère binôme, pour sa entente et sa sympathie.

A tous les membres de ma famille et toute personne qui porte Le nom ADJROUD, je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussi.

ABDENNOUR

Dédicace

Merci Allah qui donne la capacité d'écrire et de réfléchir.

Avec toute modestie, je dédie ce travail : A mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur soutien et leur prière tout ou longue de mes études.

A ma famille pour son encouragement permanent et leur soutien moral.

A toute personne qui porte le nom HACHELFI

A je le dédie particulièrement à mon binôme Abdennour.

A tous mes amis.

A tous mes enseignants et mes collègues de la spécialité énergie renouvelables en Mécanique.

A tous ceux qui sont proches de mon cœur et dont je n'ai pas cité Le nom.

Mohamed

Liste des symboles

E : Eclairement (W/m^2).

D : Diamètre de soleil($1.39.10^9$m).

D_t **:** Diamètre de soleil($1.27.10^7$m).

D_{LTS} **:** Distance moyenne soleil terre($1.5.10^1$m).

$\mathbf{R_p}$ **:** Résistance parallèle shunt(Ω).

$\mathbf{R_s}$ **:** Résistance série(Ω).

Iph : Le photo-courant (A).

Isat : Courant de saturation (A).

Tc : Température de jonction (°K).

G : L'éclairement de référence (1000 W/m2).

a : Le coefficient de courant en fonction de température (A/°C).

Tref: La température de référence (298 °K).

n : Facture de non idéalité de la jonction.

Icc : Le courant de court-circuit (A).

Vco : La tension de circuit ouvert (V).

Ns : Nombre de modules dans le panneau en série.

Np : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

Pmax : La puissance maximale produite PV (W).

Vmax : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

Imax : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

Vopt : Tension optimale (V).

Iopt : Courant optimum (A).

Vco : Tension à circuit ouvert (V).

Icc : Courant de court-circuit (A)

K : coefficient de Boltzman (1.38.10-23 J / K)

Tc : Température de la cellule (C°)

Abréviation utilisées

PV: Panneau Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current).

Listes des figures

Chapitre I :

Figure (I.1) : Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque 04

Figure (I.2) : La premiére voiture alimetée par l'energie photovoltaïque 06

Figure (I.3) : Schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 08

Figure (I.4): Schéma de jonction 09

Figure (I.5) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque 10

Figure (I.6): Différents types de modules PV 14

Figure (I.7) : Sillicium 14

Figure (I.8) : Cellule au silicium multicristallin (photowatt international) 16

Figure (I.9) **:** Cellule monocristalline 16

Figure (I.10) **:** Cellule multicristalline 17

Figure (I.11) **:** Cellule au silicium amorphe 18

Figure (I.12) **:** Un modéle des panneaux solaires installé dans le sud 20

Chapitre II :

Figure (II.1) : Les différents types des convertisseurs statiques 24

Figure (II.2) : Symbole d'un convertisseur DC-DC 25

Figure (II.3) : Schéma électrique d'un hacheur buck 26

Figure (II.4) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck 27

Figure (II.5) : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé 27

Figure (II.6) : Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert 28

Figure (II.7) : Schéma électrique d'un hacheur boost 28

Figure (II.8) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost 29

Figure (II.9) : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé 29

Figure (II.10) : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert 30

Figure (II.11) : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont 31

Figure (II.12) :Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT 32

Figure (II.13) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température 33

Figure (II.14) : Principe classique d'une MPPT pouvant être implantée en numérique 34
Figure (II.15) : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT 36
Figure (II.16) : Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge 37
Figure (II.17) : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence 37
Figure(II.18) : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de I sc 38
Figure(II.19) : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) 39
Figure(II.20) : Algorithme incrémental conductance 40

Chapitre III :

Figure (III.1) : Système photovoltaique 43
Figure (III.2) : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque 43
Figure (III.3) : Schéma Bloc du module solaire dans SIMULINK 46
Figure (III.4) : Résultats de simulation des caractéristiques (courant-tension) du GPV 46
Figure (III.5): Résultats de simulation des caractéristiques (puissance-tension) du GPV 47
Figure (III.6) : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différent éclairement et une température T = 25°C 47
Figure (III.7) : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension pour différent éclairement et une température T = 25°C 48
Figure (III.8) : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différent température et un éclairement E = 1000 W/m^2 48
Figure (III.9) : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension pour différent température et un éclairement E = 1000 W/m^2 49
Figure (III.10) : Schéma block d'un convertisseur buck 50
Figure (III.11) : Résultats de simulation de la tension aux bornes de la charge 50
Figure (III.12) : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge 50
Figure (III.13) : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge 51
Figure (III.14) : Schéma block d'un convertisseur boost 51
Figure (III.15) : Signal commande DC/DC (gâchette- d'hacheur) 52
Figure (III.16) : Résultats de simulation de la tension d'entée du hacheur boost 52

Figure (III.17) : Résultats de simulation de la tension de sortie du hacheur boost 53
Figure (III.18) : Block des 08 modules en SIMULINK 54
Figure (III.19) : Résultats de simulation de courbe P(V) des 08 modules 54
Figure (III.20) : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O) 56
Figure (III.21) : Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P & O) 56
Figure (III.22) : Bloc de MPPT en SIMULINK 57
Figure (III.23) : Résultats de simulation du rendement de l'hacheur pour éclairement variable 57
Figure (III.24) : Résultats de simulation des courbes de puissance pour éclairement constante 58
Figure (III.25) : Résultats de simulation des courbes de puissance pour éclairement variable 58
Figure (III.26) : Résultats de simulation du rendement de l'hacheur pour éclairement variable 59
Figure (III.27) : Résultats de simulation des courbes de puissance pour éclairement constante 59
Figure (III.28) : Résultats de simulation des courbes de puissance pour éclairement variable 60

Tableau :

Tableau (I.1) : comparatif des différents matériaux PV 19
Tableau (I.2) : Programme d'électrification rurale solaire dans les 04 wilayas du sud 21
Tableau (I.3) : Principales réalisations du CDER dans le domaine Photovoltaïque 21
Tableau (III.1) : Caractéristiques électriques du module PV Shell SP75 en condition de test standard 45

Sommaire

Introduction générale 01

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction 04

I.2. L'énergie solaire phtovoltaïque 05

I.2.1 Le soleil 05

I.2.2 Avantages et inconvénient de l'énergie solaire phtovoltaïque 05

I.3. Historique 06

I.4. L'effet phtovoltaïque 08

I.5. Principe de fonctionnement d'un cellule phtovoltaïque 08

I.5.1 Semi- conducteur 09

I.5.2 Dopage du silicium 09

I.5.3 Formatoin de la jonctoin (PN) 10

I.5.4 Rendement 10

I.5.5 Modélisation de la cellule solaires 11

I.5.6 Paramètre des cellules photovoltaïque 12

I.5.7 Assemblage en série / paralléle des modules photovoltaïque 14

I.6. Le panneau solaire 15

I.7. Les différentes technologies photovoltïque 15

I.7.1 Cellules au silicium cristallin 16

I.7.2 Cellules au silicium amorphe 19

I.7.2 Autres technologies 19

I.7.3 Comparatif des différentes technologies 20

I.7.4 photovoltaïque en l'Algérie 21

I.8. Conclusion 22

Chapitre II : Les convertisseurs statique et la commande MPPT

II.1. Introduction 24

II.2. Les Hacheurs 24

II.2.1. Type des hacheurs 25

II.2.2. Hacheur Buck 25

II.2.3. Hacheur boost 28

II.3. Les onduleurs 30

II.3.1. Principe de fonctionnement d'un onduleur 30
II.3.2. Onduleur Monophasé 31
II.3.3. Onduleur triphasé 31
II.4. La commande MPPT 31
II.4.1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque 32
II.4.2. Principe du MPPT 32
II.4.3. Classification des techniques MPPT 34
II.4.4. Les premiers types de technique MPPT 34
II.4.5. Evolution du point d'opération du générateur PV 35
II.5. Les méthodes de poursuite de MPP 37
II.5.1. Méthodes à contre réaction de tension 37
II.5.2. Méthodes à contre réaction de courant 38
II.5.3. Méthodes à contre réaction de puissance 38
II.5.3.1. Algorithme perturbation et observation 38
II.5.3.2. Algorithme incrémentation de la conductance 39
II.6. Conclusion 40

Chapitre III : Modélisation et Simulation d'un système photovoltaïque

III.1. Introduction 42
III.2. L'outil Matlab/Simulink 42
III.3. Le générateur photovoltaïque 42
III.3.1. Modélisation du système photovoltaïque 43
III.3.2. Caractérisation du module PV 45
III.3.3. Simulation du module PV 45
III.4. Simulation du hacheur 49
III.4.1. Simulation de hacheur buck 49
III.4.2. Simulation de hacheur boost 51
III.5. Mise en œuvre de la commande de poursuite MPPT 53
III.5.1. Principe du MPPT 53
III.5.2. Structure et simulation de la commande MPPT numérique « P&O » 55
III.5.2.1. Structure de la commande « perturbation et observation » 55

III.5.2.2. Simulation de la méthode MPPT 56
III.5.2.3. Bloc du système avec MPPT 57
III.5.2.4. Résultats de simulation 57
III.6. Conclusion 61
Conclusion générale 63
Bibliographique
Résumé

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir effet, les besoins énergétique des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement, un grande partie de la production mondiale d'énergie est assuré à partir de source fossile.

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 électrique est produite à partir de 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 dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque, Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles du point de vue coût et performance de production. Cependant, leur système de conversion de l'énergie en électricité souffre souvent d'un manque d'optimisation qui en fait encore des systèmes trop chers, et présentant des déficiences importantes en rendement et en fiabilité. Pour cela, bien qu'il existe de plus en plus de travaux de recherches prouvant la viabilité de sources comme, par exemple, l'énergie photovoltaïque (PV) ou l'énergie éolienne, beaucoup de réticentes existent encore pour installer ces systèmes à grande échelle, autant en production de masse que chez des particuliers.

Bien que l'énergie photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, il est solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages :

- la production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre, il faut cependant réduire l'impact environnemental de la fabrication du système.

- la lumière du soleil étant disponible partout et quasi-inépuisable, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne, dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville, et aussi bien au sud que dans le nord.
- l'électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population mondiale.

Le but de ce travail est d'établir un modèle permettant de simuler la diminution de l'efficacité de puissance électrique produits par un panneau cause par l'altération des matériaux dans le temps.

La rédaction de notre mémoire se compose de trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous avons présenté généralité sur les systèmes photovoltaïques et construction des cellules photovoltaïques et l'effet photovoltaïque et principe de fonctionnement .
- Dans le deuxième chapitre, on étudie quelques types convertisseurs statiques (DC-DC) et (DC-AC) et utilisés les méthodes de la commande MPPT.
- Dans le troisième chapitre, on étudie une Modélisation et simulation par MATLAB SIMULINK de chaque élément du système PV réalisé, convertisseur buck, boost et commande MPPT « perturbation et observation ».

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I
Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque désigné l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.[1]



Figure (I. 1): schéma de principe d'un générateur photovoltaïque

On début cette chapitre par les connaissances de base de tout ce qui concerne photovoltaïque. Nous présenterons ensuite le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Enfin nous présenterons le développement d'utilisation l'énergie solaire en Algérie.

Le chapitre deux est une présentation de les trois type de convertisseurs statique photovoltaïque. Nous montrons ensuite au chapitre trois la dimension de l'installation photovoltaïque, nous fait ensuite au chapitre quatre une étude économique de dispositif. Au chapitre cinq nous représentera l'étude technico économique d'une installation photovoltaïque. À la fin de se recherche fait une conclusion général.

I.2 L'énergie solaire photovoltaïque :

I.2.1 Le soleil :

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre 1391000 km. Il estsitué à une distance moyenne de 149598000km de terre. Sa lumière, a une vitesse de 300000km/s, met environ 8 minutes pour parvenir la terre. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelé la constante solaire égale à 1367W/m².[2]

I.2.2 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque :

Les avantages de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont: [3]

I.2.2.1 Avantage :

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- Génère l'énergie requise.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- Entretien minimal.
- Aucun bruit.

I.2.2.2 Inconvénients :

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute technologiedemandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

I.3 Historique :

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.



Figure (I.2): la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque

I.4 L'effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau.

Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745 1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse.

I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Nous allons ici exposer les principes de fonctionnement principaux de cette technique. L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Les électrons ne circulent que de la zone p à n et inversement pour les trous. Ceci est dû à l'utilisation de semi-conducteur. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule.[4]

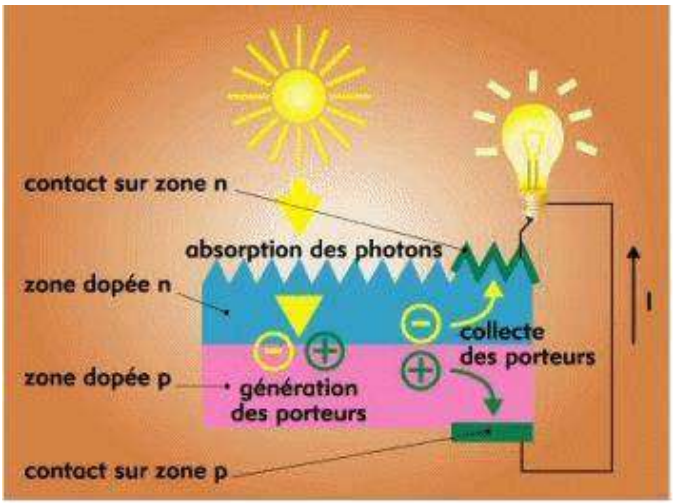


Figure (I.3) : *schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque*

I.5.1 Semi-conducteur :

La situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il ya donc courant électrique sous l'exposition à la lumière.

I.5.2 Dopage du silicium :

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage. [5]

I.5.2.1 Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

I.5.2.2 Dopage de type P :

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très

supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.

I.5.3 Formation de la jonction (PN) :

La jonction p-n est le dispositif utilisé dans les cellules photovoltaïques. En effet, quand des photons sont absorbés dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou formées sont séparées par le champ électrique de la jonction qui fait migrer les électrons vers la région n et les trous vers la région p.

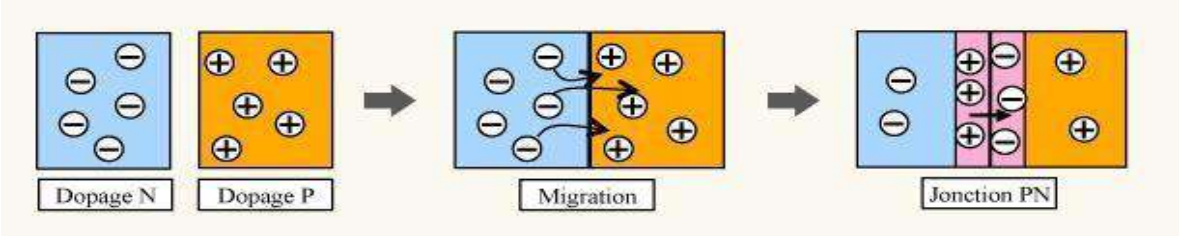


Figure (I.4) : schéma de jonction

I.5.4 Rendement :

Le rendement ρ d'une cellule photovoltaïque est égal au rapport de la puissance électrique fournie à la puissance lumineuse incidente. Le rendement est limité par un certain nombre de facteurs :

- les pertes par réflexion : une partie de la lumière incidente est réfléchie à la surface du silicium. Pour un milieu d'indice de réfraction ν le coefficient de réflexion est égal à $[(\nu-1)(\nu-1)]^2$ pour le silicium dont l'indice de réfaction est élevé de réfraction est élevé ($\nu \approx 3{,}5$), environ 30 % de la lumière est réfléchie. Le dépôt d'une couche anti-réflectrice à la surface permet de diminuer cette perte. On définit le rendement partiel correspondant ρ_R comme le rapport du nombre de photons incidents au nombre de photons pénétrant dans l'échantillon.
  - le spectre de la lumière solaire est très large. Seuls les photons d'énergie supérieure à la largeur de la bande interdite peuvent être absorbés, soit environ 50 %. Demême que ci-dessus le rendement partiel correspondant ρ_A sera le rapport du nombre de photons absorbés au nombre de photons pénétrant dans l'échantillon.
  - les pertes électriques qui interviennent à plusieurs stades. jcc est limité par l'efficacité de collection des charges. Il faut que les photons soient absorbés dans la zone de

charge d'espace pour avoir une bonne séparation des paires électron-trou. De plus il faut minimiser les pertes par recombinaison ou piégeage des charges au cours de leur migration vers les contacts extérieurs. Enfin le facteur FF vient lui aussi limiter le rendement. Il est très sensible à la résistance interne Rs de la cellule.

- enfin, il faut tenir compte d'une contrainte thermodynamique : l'ensemble qui nous fournit de l'énergie constitue un système qui comprend une source chaude (soleil T=6000K) et une source froide (cellule T=300K). Le principe de Carnot nous indique que le rendement maximum est $\rho_C = 1 - (300 / 600) = 0.95$.

I.5.1 Modélisation de la cellule solaire :

Cellule solaire est décrite comme un générateur de courant égal à Iph, shunté par des diodes possédant les caractéristiques de la cellule à l'obscurité. [7]

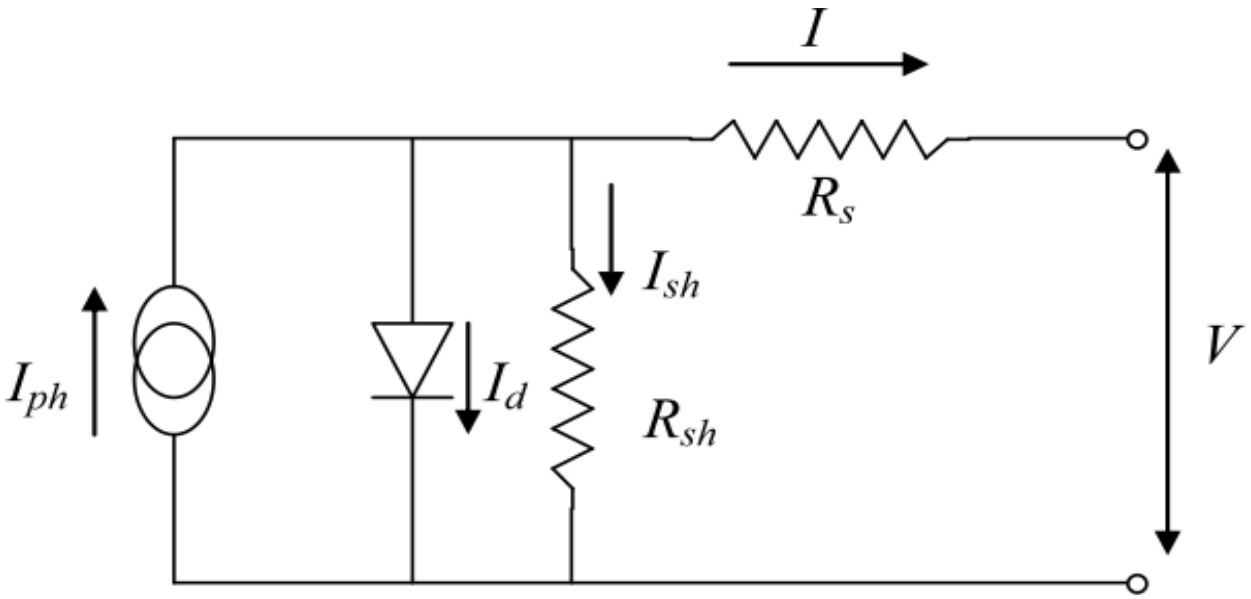


Figure (I. 5) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes.

Ce modèle est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont :

Le photo-courant (I_{ph}), le courant de saturation (I_0), le facteur d'idéalité de la jonction (A), la résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh}).

Si on néglige l'effet de la résistance shunt R_{sh}, en le considérant infini, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui est très utilisé. Et si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à 3 paramètres. Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude. Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision.

Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants [19][34] :

L'étude physique d'une photopile nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \qquad \text{(I-1)}$$

Avec :

I_{cell}**:** Courant délivré par la photopile.

I_{ph} **:** Photo courant.

I_d **:** Courant de la diode.

I_{Rsh} **:** Courant shunt.

On a la résistance (Rsh) plus élevée donc on peut négliger le courant I_{Rsh} donc l'équation s'écrit :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d \qquad \text{(II-2)}$$

I.5.1.1 Courant de court-circuit (ICC) :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant V= 0 dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

I.5.1.2 Tension à circuit ouvert (V) :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

I.5.1.3 Facteur de forme (FF) :

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifiela qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fil factor(FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée Pmax et la puissance formée par le rectangle Icc*Voc. Plus la valeur de ce facteur ne sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = P_{\max} / V_{oc} \times I_{cc}$$

I.5.1.4 Résistance série (R_s) :

Rs est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe courant-tension au point V_{oc} représente l'inverse de la résistance série (1/Rs).

I.5.1.5 Résistance shunt (R_{sh}) :

Rsh est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe courant-tension au point Icc représente l'inverse de la résistance shunt (1/Rsh).En général, la valeur de Rsh est plus grande que Rs d'au moins un ordre de grandeur. Pour minimiser les pertes, il faut diminuer Rs et augmenter Rsh. Le cas idéal est représenté par Rsh égale à l'infini et Rs égale à zéro.

I.5.2 Assemblage en série / parallèle des modules photovoltaïques :

Sur le papier, l'assemblage sérié et parallèle répond aux regels connues de l'électricité : cité

quand les modules sont montés en série, les tensions s'ajoutent et le courant reste constant, et quand ils sont montés en parallèle, c'est l'inverse les courants s'ajoutent et la tension reste constante. Encore faut-il que les courants des différents panneaux soient identiques dans une liaison série et que les tensions dans une liaison parallèle. On retiendra donc la première règle

suivante on ne monte en série que des panneaux ayant le même courant de fonctionnement (mais ils peuvent ne pas avoir la même tension), et on ne monte en parallèle que des panneaux qui ont la même tension). De fonctionnement (mais ils peuvent ne pas avoir le même courant). Dans la réalité il n'y a pas deux panneaux strictement identiques, donc on peut être amenés à l'appairer en tension ou en courant selon le cas. Cela consiste à mettre ensemble des panneaux dont les valeurs sont le plus proche possible. [9]

Même appariés, les panneaux peuvent, sur le terrain, ne pas débiter la même puissance, tout simplement parce qu'ils ne reçoivent pas le même rayonnement solaire une ombre portée sur une partie du champ photovoltaïque peut faire baissent momentanément, de manière significative, la production de la partie moi exposée. De même que les cellules ombrées dans le phénomène de « hot-spot », un panneau moins bien exposé peut devenir récepteur de autres panneaux, et recevoir de la puissance en inverse. Le plus simple pour évite tout problème de

ce type est de placer une diode antiretour de puissance adéquat en sortie de chaque série de panneaux Ces diodes sont souvent mises dans des boîtes de raccordement qui servent aussi à réunir les câbles venant des panneaux, et à débiter la puissance totale au travers d'un plus gros

câble vers le régulateur.

Si le champ photovoltaïque se réduit à un seul panneau ou une série de panneaux le plus simple est de placer cette diode à l'entrée du régulateur. Sa chute de tension devra être la plus faible possible car elle pénalise directement la tension de travers du panneau (une diode Schottky n'a que 0,5 V de chute de tension contre 1V environ avec une diode au silicium.

I.6 Le panneau solaire :

Un panneau solaire est aussi désigné sous le nom capteur solaire. Un panneau solaire est un dispositif technologique qui sert à récupérer une partie du rayonnement solaire, en vue de convertir ce rayonnement en énergie solaire qui sera ensuite utilisable par les humains. En général, on distingue deux types de panneaux solaires, le panneau solaire thermique, qui convertit la lumière en chaleur, et le panneau solaire photovoltaïque qui convertit la lumière en électricité.



Figure (I.6) : différents types de modules PV

I.7 Les différentes technologies photovoltaïques :

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzeux (dioxyde de silicium).



Figure (I. 7) : silicium

Il Ya quelques matériaux constituant des cellules solaires comme le silicium cristallin et le silicium amorphe.

On peut distinguer deux grandes familles de matériaux photovoltaïques :

- les matériaux solides cristallisés
- les couches minces

Ces couches minces sont également solides, mais d'épaisseur nettement plus faible (de l'ordre du micron et en deca) et déposées sur un support. Alors que les photos piles cristallines sont massives et épaisses de 0,15-0,4 mm.

I.7.1 Cellules au silicium cristallin :

Les cellules au silicium cristallin sont les plus répandues. Elles se présentent sous forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo carrées. Si l'on parle de matériau « cristallin », c'est

parce que le silicium qui les constitue est ordonné, avec un arrangement parfait des atomes, selon une structure atomique ordonnée de type tétraédrique.

Si la photopile est constituée d'un seul cristal, on parle de silicium monocristallin et elle à un aspect uniforme et gris bleuté, parfois noir. Si par contre la photopile est faite de silicium multicristallin (on dit plus couramment polycristallin), elle est composée de plusieurs cristaux assemblés, et présente l'aspect d'une mosaïque compacte de fragments cristallins bleutés de quelques millimètres à quelque centimètres, appelés « grains ».

I.7.1.1 Silicium métallurgique :

Le silicium n'existe dans la nature que sous forme oxydée puisqu'il est le constituant de base du sable, sous forme de silice. Pour fabriquer du silicium pur, on va donc employer du sable sous forme de quartz cristallisé. Le procédé de raffinage est une réduction dans un four à arc électrique par du carbone. La réaction suit l'équation :

$$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO \quad (1.7)$$

On fabrique selon ce procédé plus d'un million de tonnes de ce silicium par an, dit« métallurgique» Sa pureté est de l'ordre de 98 à 99%, les impuretés les plus importantes étant l'aluminium et le fer Sa principale utilisation est comme composant de l'aluminium et de l'acier. Une petite proportion de cette production, quelques dizaines de tonnes, sera purifiée pour l'industrie électronique.

Pour obtenir un matériau suffisamment pur pour fabriquer des composants électroniques, on utilise le procédé Siemens qui transforme le silicium en trichlorosilane à l'aide d'acide chlorhydrique :

$$Si + 3HCI \longleftrightarrow SiHCI_3 + H_2 \quad (1.8)$$



Figure (I.8) : cellule au silicium multicristallin (photowatt international)

I.7.1.2 Cellules monocristallines :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal.

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau.

Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un mono- cristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche anti-reflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.

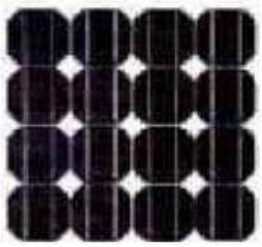


Figure (I.9) : Cellule monocristalline

I.7.1.3 Cellules multicristallines :

Les cellules multicristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules mono-cristallines.

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans.

Un cristal est un solide avec des façades polygonales, plus ou moins brillant, à structure régulière et périodique, formée d'un empilement ordonné d'un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions.

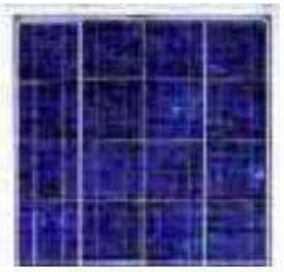


Figure (I.10):Cellule multicristalline

I.7.2 Cellules au silicium amorphe :

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies polycristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.

Nota : En chimie, un composé amorphe est un composé dans lequel les atomes ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance, ce qui le distingue des composés cristallisés. Les

verres sont des composés amorphes.



Figure (I.11) : Cellules au silicium amorphe

I.7.3 Autres technologies :

Plusieurs technologies de cellules photovoltaïques autre que la technologie « silicium » existent mais ne sont pas représentatives de la production actuelle mais plutôt du domaine de la recherche. Voici quelques-unes d'entre-elles.

I.7.3.1 Cellules au CdTe :

Ce matériau est intéressant du fait de son gap optique 1,45 eV et de sa forte absorption qui permet en moins de 2 μ m d'épaisseur d'absorber la quasi-totalité du spectre visible. Il est ordinairement déposé sur du CdS (sulfure de cadmium) de type n, qui sert de couche avant, pour former une hétérojonction (jonction à matériaux). Les résultats de laboratoire sont très intéressants avec notamment un rendement de 15,8 obtenus par une équipe de Floride.

I.7.3.2 Cellules CIS : (cuivre-indium-sélénium)

Le thin film met en œuvre 1% seulement du silicium utilisé pour la fabrication de modules cristallins équivalents. Les cellules thin film sont plutôt utilisées pour des applications "courant faible". Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir car le rendement ne chute pas avec la température. Cependant, le rendement est de l'ordre de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée. Il y a un risque de toxicité vis-à-vis de l'environnement pour les modules CIS qui présentent un meilleur rendement que l'amorphe pur.

I.7.4 Comparatif des différentes technologies :

Tableau I.1: comparatif des différents matériaux PV

Matériau	Rendement	Longévité	caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono Cristallin	12 à 18% *(24,7% en laboratoire)*	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,…
Silicium poly Cristallin	11 à 15% *(19,8% en laboratoire)*	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs…
Amorphe	5 à 8% *(13% en laboratoire)*		* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices…), intégration dans le bâtiment
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% *(27.5% en laboratoire)*		* Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CulnGaSe2, etc.)	8% *(16% en laboratoire)*		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices…), intégration dans le bâtiment

I.7.5 Photovoltaïque en l'Algérie :

Plusieurs projets photovoltaïques d'une capacité totalisant 800 MWc sont envisagés d'ici 2020. D'autres projets à petite échelle ont été réalisés, particulièrement par SONELGAZ. Ainsi, entre 1992 et 2005, 18 villages du sud algérien, soit environ 1.000 ménages, ont bénéficié d'installations photovoltaïques pour la satisfaction des besoins essentiels (éclairage, réfrigération, télévision, ventilation) en électricité. [10]

D'autres programmes sont en cours comme le programme complémentaire de soutien à la croissance en vue de l'électrification de 20 villages du sud de l'Algérie et celui du développement des hauts plateaux qui concerne une soixantaine de localités des zones steppiques.

Sonelgaz a introduit la filière solaire pour une 20 de villages du programme de l'électrification rurale dans le but d'impulser l'utilisation des énergies renouvelables et notamment le photovoltaïque.

Ces villages situés dans le Sud et à nombre de foyers réduits, étaient caractérisés par leur isolement et leur éloignement de tout réseau de communication.



Figure (I.12) :un modèle des panneaux solaires installé dans le sud

Cette électrification rurale solaire a concerné 20 villages répartis dans les 04 wilayas du Sud : Tamanrasset – Tindouf – Illizi – Adrar dont les consistances physiques sont les suivantes :

Tableau I.2: Programme d'électrification rurale solaire dans les 04 wilayas du Sud

Wilayas	Puissance crêt (Wc)	Nombre de systèmes	Type de systèmes			Nombre de foyers
			1.5 kwc	03 kwc	06 kwc	
Tamanrasset	277.5	60	3	23	34	555
Illizi	75	20	6	6	8	150
Tindouf	78	20	0	14	6	156
Adrar	22.5	08	1	7	0	45

Aussi installé plusieurs systèmes de plusieurs kW dans différentes régions du pays, comme le montre le tableau suivant :

Tableau I.3: Principales réalisations du CDER dans le domaine photovoltaïque

Région	Usage	Puissance installée et systèmes
Batna (Est Algérie)	Electrification de logements pour enseignants	10KWc
	Etude et installation de mini centrales pour différents usages	1 central de 5KWc et 3 centrale de 2.5 Kw
	Santé rurale	5 conservateurs médicaux (60litres de capacité unitaire)
Oum El bouaghi	Pompage	5 systèmes dans différents site de la région
Tiret	Eclairage, pompage, santé	Plusieurs systèmes
Centrale	Téléphonie rurale	8 relais de 160 w
Déférentes régions	Balisage aérien et signalisation	15 radio-baises dans plusieurs aéroports
Sud	Alimentation de relais hertziens	10 systèmes de 2 kWc

I.8 Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la présentation des principales caractéristiques et des technologiques des éléments constitutifs d'un système photovoltaïque, On a étudié le principe de fonctionnement de la cellule PV et présenté leurs caractéristiques, à la fin de ce chapitre on a parlé sur quelques projets photovoltaïque réalisé en Algérie. Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les convertisseurs statiques DC-AC (onduleurs) et DC-DC (hacheurs).

Chapitre II

Les convertisseurs statiques et la commande MPPT

II.1. Introduction :

Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en courant alternatif et inversement. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les énergies renouvelables: les redresseurs, les onduleurs, les hacheurs.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible…) [12].

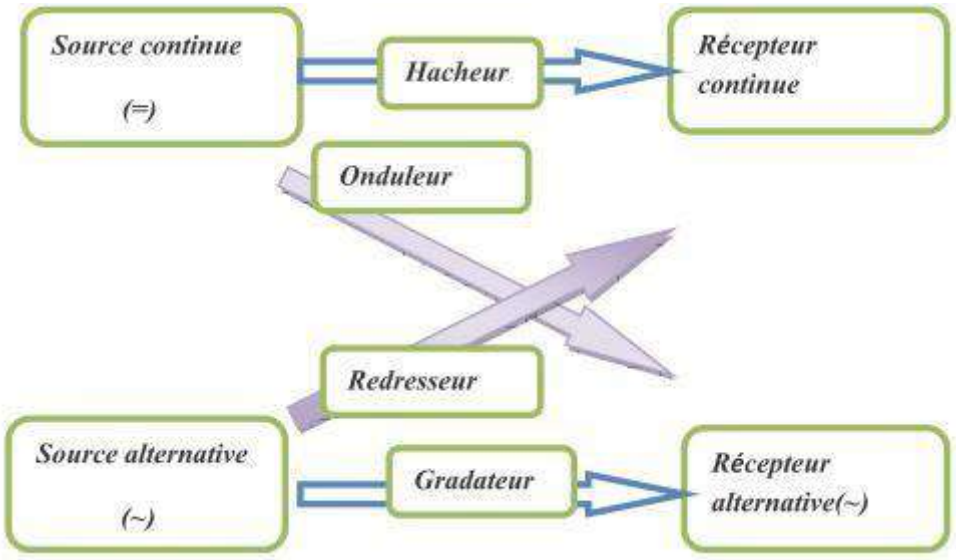


Figure (II.1) : les différents types de convertisseurs statiques.

Dans ce chapitre nous présentons les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque. Premièrement on commence par les convertisseurs (DC-DC) et sont différents types, et on termine par les convertisseurs (DC-AC). On présente dans ce chapitre, quelques méthodes MPPT basées sur réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémentation de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

II.2. Les Hacheurs :

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [13].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [14].

Les hacheurs sont des convertisseurs continu qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [1].

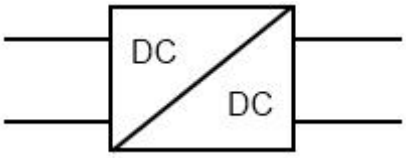


Figure (II.2) : Symbole d'un convertisseur DC-DC.

II.2.1. Type des hacheurs :

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer:

- des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

Cela conduit à L'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue deux familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- hacheur abaisseur (ou buck).
- hacheur élévateur (ou boost) [3].

II.2.2. Hacheur Buck :

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant.

L'interrupteur K figure (II.3) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [3].

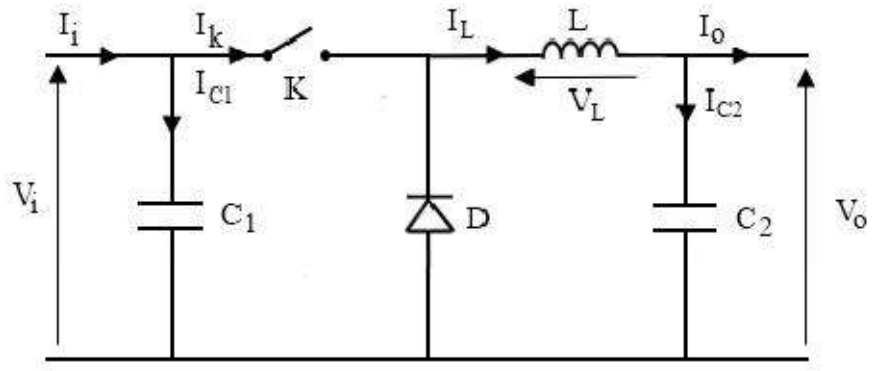


Figure (II.3) : Schéma électrique d'un hacheur buck.

a)-Fonctionnement

On note *a* : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : étant la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e, la tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $fe = \frac{1}{Te}$. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [3].

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure (II.4) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [3].

$$V_0 = \alpha . V\text{i} \qquad \text{(II. 1)}$$

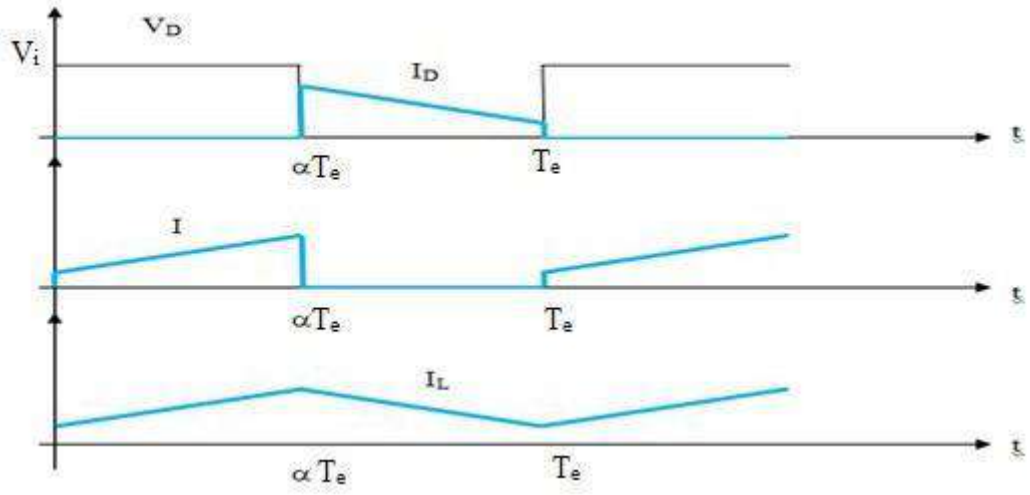


Figure (II.4) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

b) Modèle mathématique équivalent :

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (II.5) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure (II.6) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1-\alpha)e$[3].

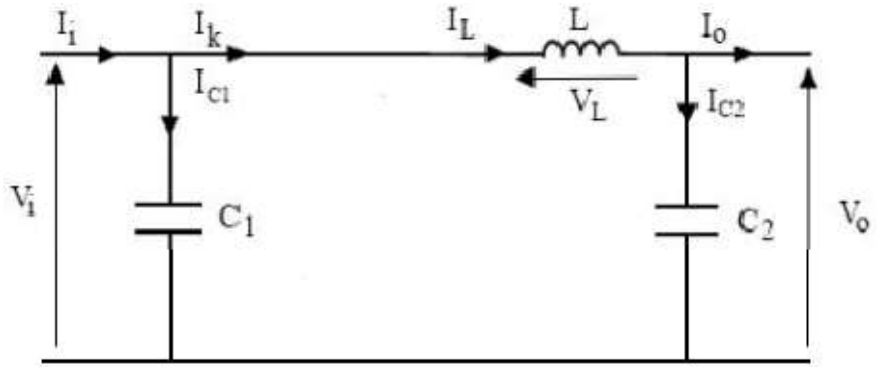


Figure (II.5) : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes:

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \text{(II.2)}$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV0(t)}{dt} = I_i(t) - I_0(t) \quad \text{(II.3)}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad \text{(II.4)}$$

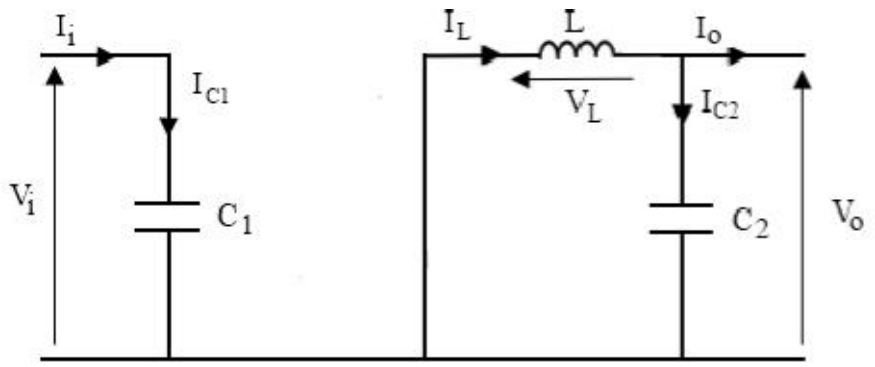


Figure (II.6) : Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \quad \text{(II.5)}$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad \text{(II.6)}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt} = -V_0(t) \quad \text{(II.7)}$$

II.2.3. Hacheur boost :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [3]. Connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.7). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [14].

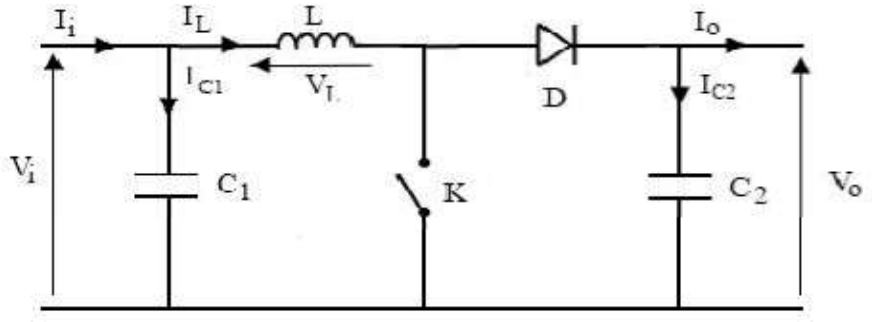


Figure (II.7) : Schéma électrique d'un hacheur boost

a) Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et

l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [3]

$$V_0 (1 - \alpha) = V_i \quad \text{(II.8)}$$

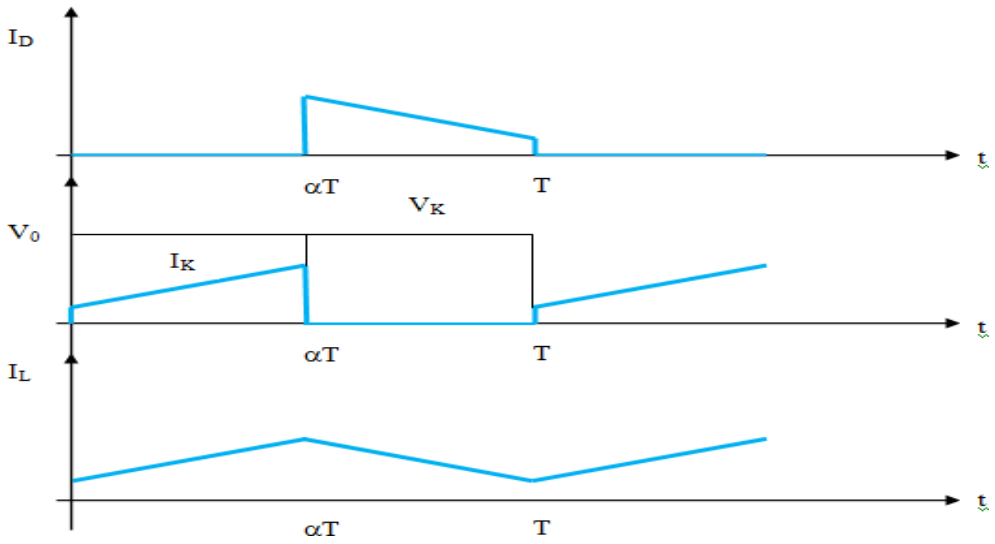


Figure (II.8) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

b) Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (II.9) présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d d'entre $[0,\alpha T_e]$[3].

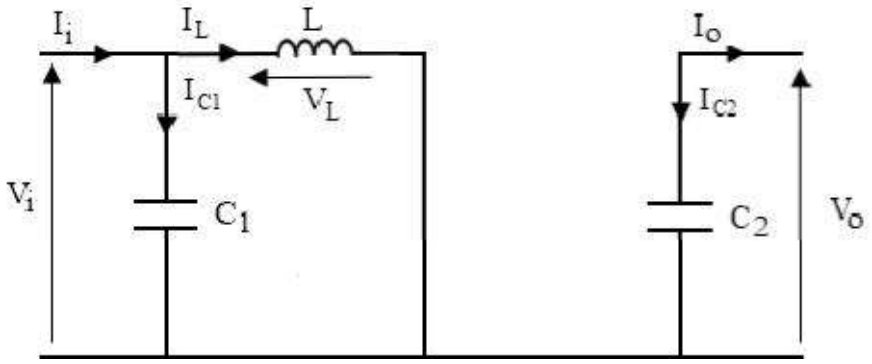


Figure (II.9) : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.

Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les calcules suivantes :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \text{(II.9)}$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV0(t)}{dt} = -I_0(t) \quad \text{(II.10)}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt} = V_i(t) \quad \text{(II.11)}$$

L'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:

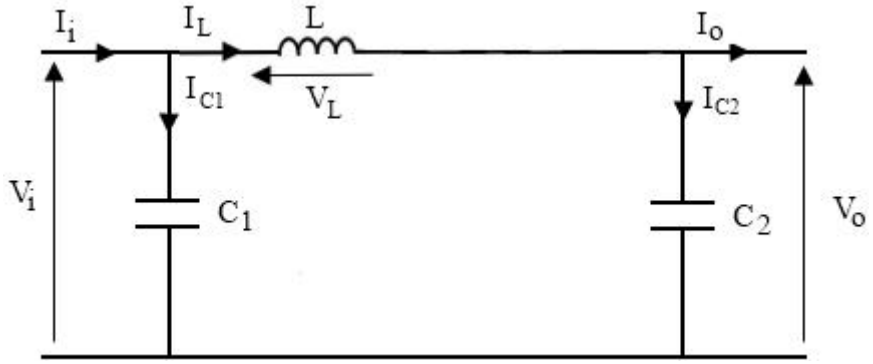


Figure (II.10) : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \text{(II.12)}$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad \text{(II.13)}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad \text{(II.14)}$$

II.3. Les onduleurs :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [15].

II.3.1. Principe de fonctionnement d'un onduleur :

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui même sa fréquence et sa forme d'onde .Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [11].

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

II.3.2. Onduleur Monophasé :

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie :

- Onduleur monophasé en demi-point.
- Onduleur monophasé en pont (Pont H) [11].

II.3.3. Onduleur triphasé :

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre.

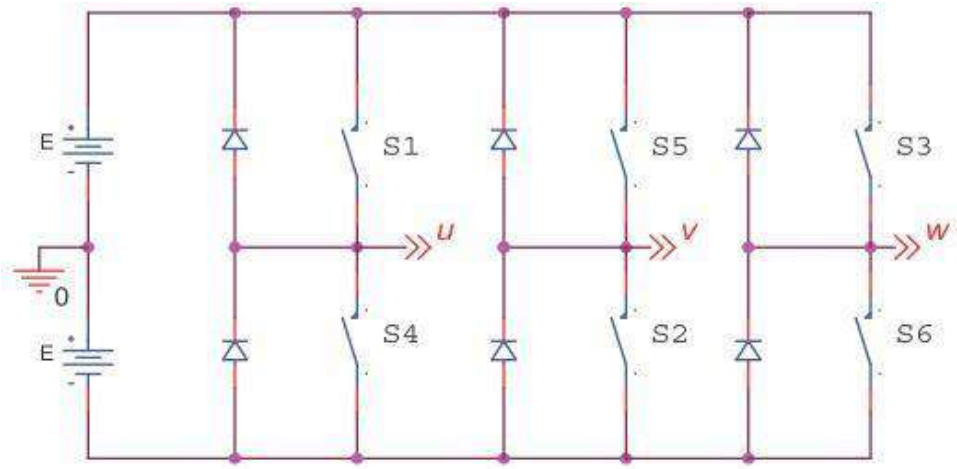


Figure (II.11) : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont.

La figure (II.11) illustre la topologie d'un onduleur triphasé à six interrupteurs de puissance. Le décalage entre les signaux de commande est de 60° [11].

II.4. La commande MPPT :

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [16].

II.4.1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différent entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [16] .

II.4.2. 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 (Vmpp , Impp) [16].

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (II.12).

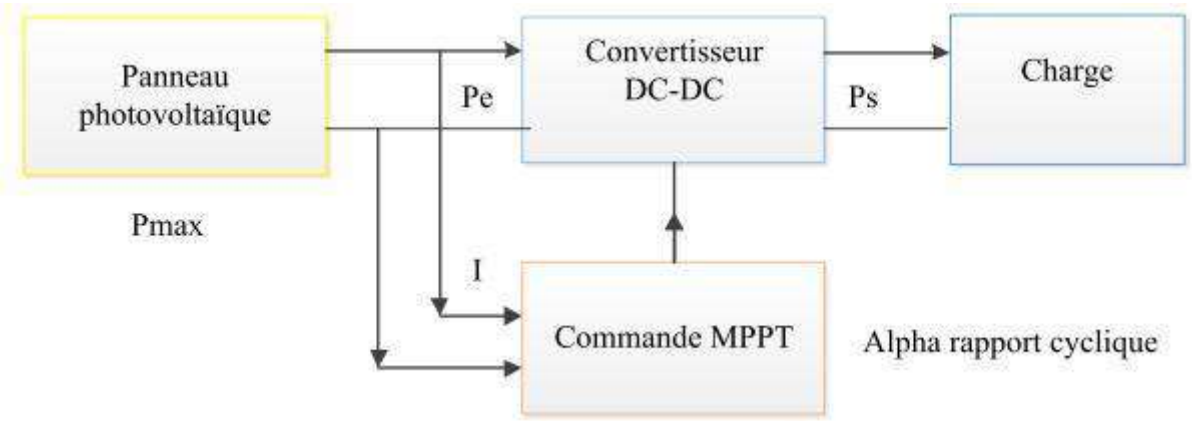


Figure (II.12) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La figure (II.13) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point defonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

- Pour une variation d'ensoleillement (cas a), Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.

- Variations de température de fonctionnement du GPV(cas c).Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.
- Pour une variation de charge (cas b).

On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l"action d"une commande.

En résumé, le suivi du PPM.

réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [12].

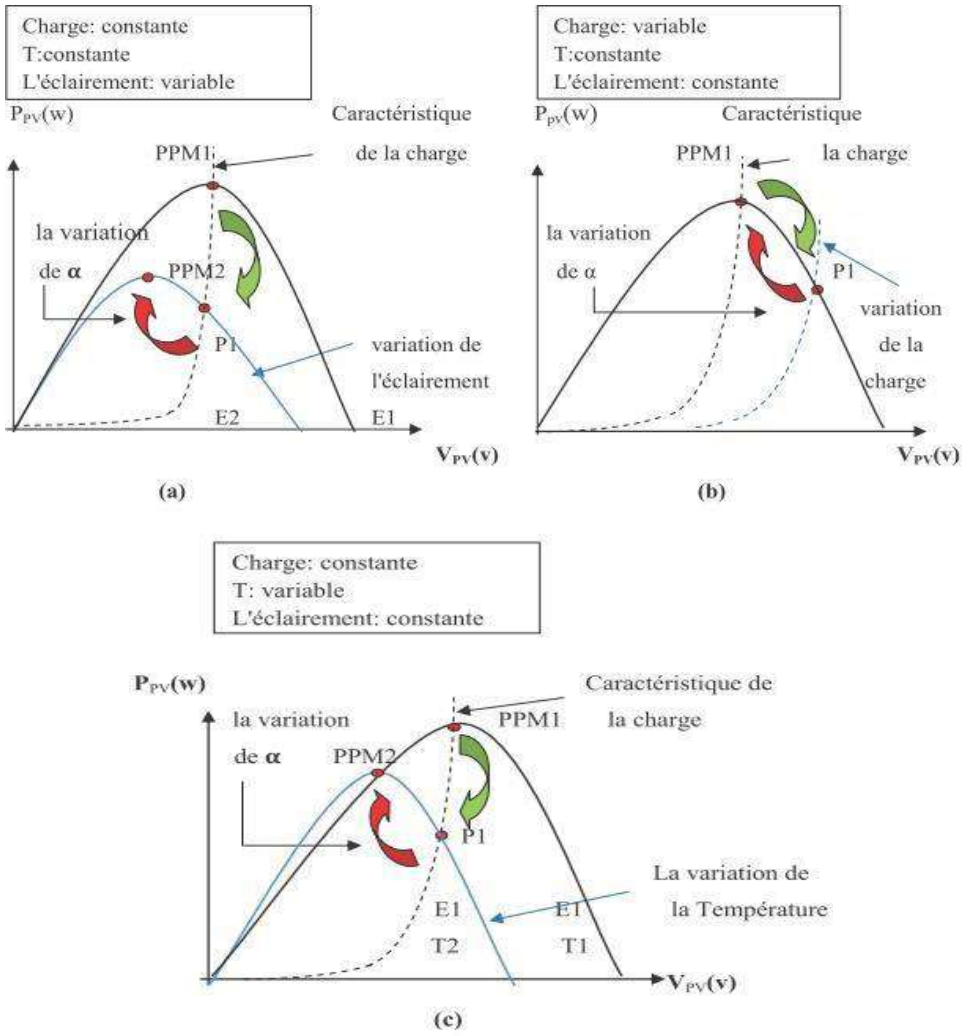


Figure (II.13) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

II.4.3. Classification des techniques MPPT :

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d"énergie renouvelable de type photovoltaïque. Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative [12].

II.4.4. Les premiers types de technique MPPT :

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres appliquées initialement.

Au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM)[12].

Ce dernier est décrit en figure (II.14) et peut être implanté entièrement en numérique .

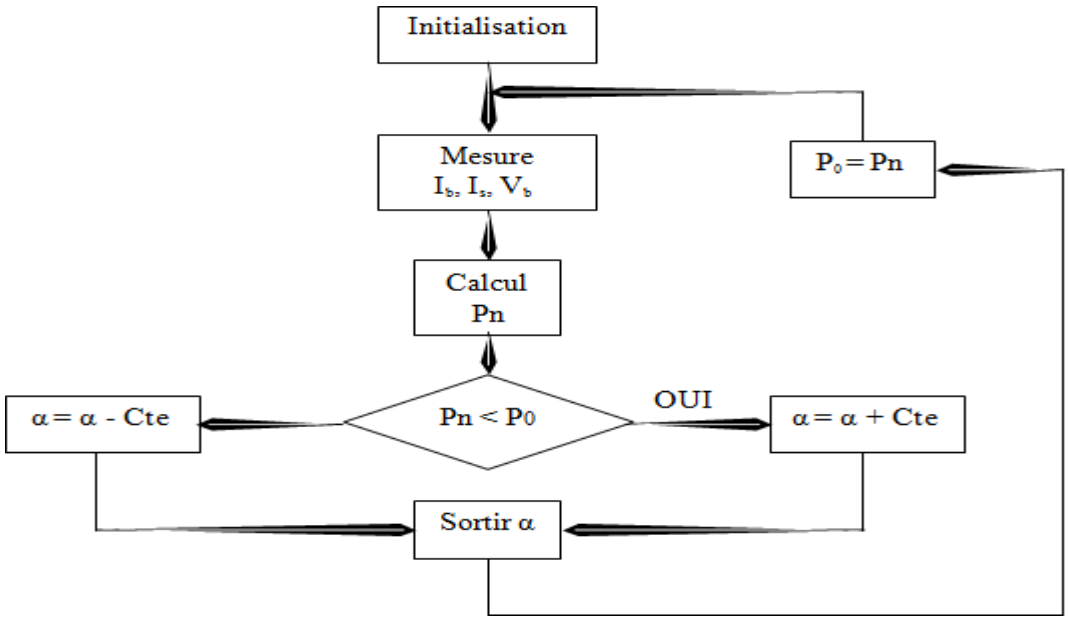


Figure (II.14) : Principe classique d'une MPPT pouvant étre implantée en numérique .

Le système démarre d'un rapport cyclique initial α_0 et d'une puissance initiale P_0 après avoir effectué la mesure du courant I_b et de la tension V_b aux bornes de la batterie et du courant de charge I_S, le produit $[(I_b+I_S)x.V_b]$ est calculé. Ce dernier est l'image de la puissance instantanée Pn délivrée par le générateur PV à l'instant où la mesure a été effectué.

Cette image est alors comparée à la puissance P_0, si Pn est inférieure à P_0, alors α est incrémenté, sinon a est réduit. Une fois a modifié, P_0 prend la valeur Pn et on effectue une nouvelle mesure de I_b , V_b et I_S pour calculer la nouvelle puissance Pn.

Ainsi, par un algorithme numérique de recherche, on peut régler la précision de cette commande de façon à obtenir un rendement MPPT proche de 100% en fonction de l'algorithme implanté. De plus, le temps de calcul de la MPPT est directement fonction de l'algorithme implanté ainsi que des performances du microprocesseur [1].

II.4.5. Evolution du point d'opération du générateur PV :

Nous devons chercher le point de puissance maximale, pour cela, nous comparons un point de puissance (P2) mesuré à l'instant (t) avec un point de puissance (P1) mesuré à l'instant (t-I) (figure II.15).

Si P1<P2, la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximal.

Si la dérivée de puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximal.

Les commandes MPPT présentant finalement un bon compromis de rendements en statique et dynamique mais aussi de robustesse sont basées sur une continuelle évaluation de la puissance et une comparaison avec l'état à l'instant précédent [1].

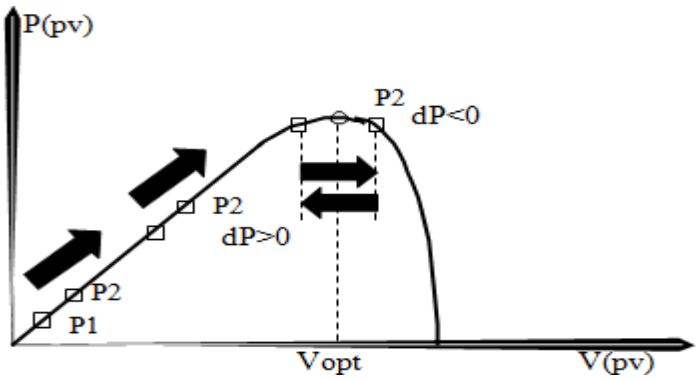


Figure (II.15) : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.

Cependant, pour la plupart des commandes MPPT, pour arriver à converger dans de bonnes conditions, quel que soit l'algorithme, il faut que les courbes de puissance délivrées par le générateur soient constantes ou lentement variables. Si cette hypothèse n'est pas respectée (changements brutaux des conditions de fonctionnement) le système peut diverger.

Nous avons répertorié les différents problèmes qui peuvent survenir [1] :

La puissance délivrée par le générateur peut présenter plusieurs maximumes. Cela peut se produire, en particulier, lorsque les diodes de protections (diodes by-pass) des cellules PV associées en série et ou en parallèle se ferment.

Des changements brutaux d'éclairement et de charge peuvent survenir à tout moment sans que la fréquence de ces changements soit prévisible. Ainsi, le générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée et donc son PPM comme l'illustre la figure (II.16).Le point de fonctionnement (P1) se trouve sur la partie montante de la courbe de puissance 1'avant le changement d'éclairement. Suite à la variation d'éclairement, le point de fonctionnement passe de P1 à P2 qui se trouve sur la courbe de puissance 2. En comparant la puissance P2 et P1, on en déduit une dérivée négative, donc on inverse le sens de poursuite pensant avoir dépassé le point de puissance maximum, ici la commande MPPT perd momentanément le PPM. De plus, le changement du sens de la poursuite fait éloigner encore plus le point d'opération du PPM.

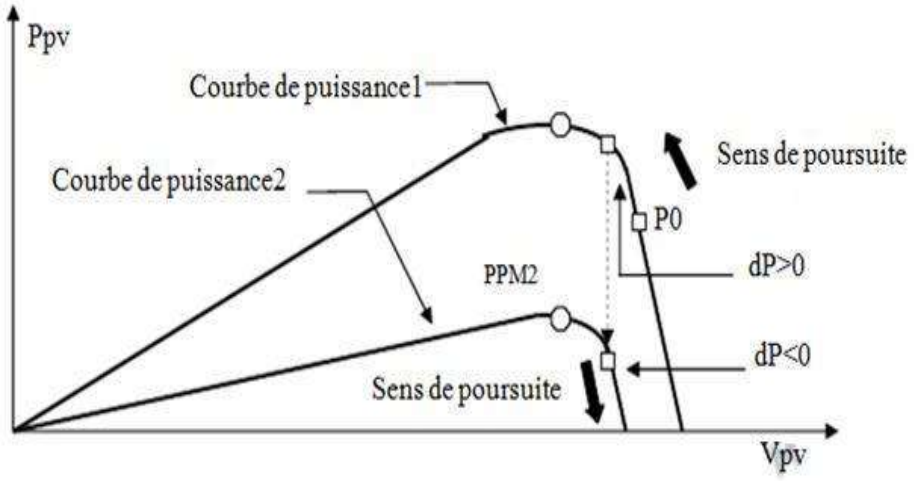


Figure (II.16) : Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge.

II.5. Les méthodes de poursuite de MPP :

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables [3].

II.5.1. 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 [16].

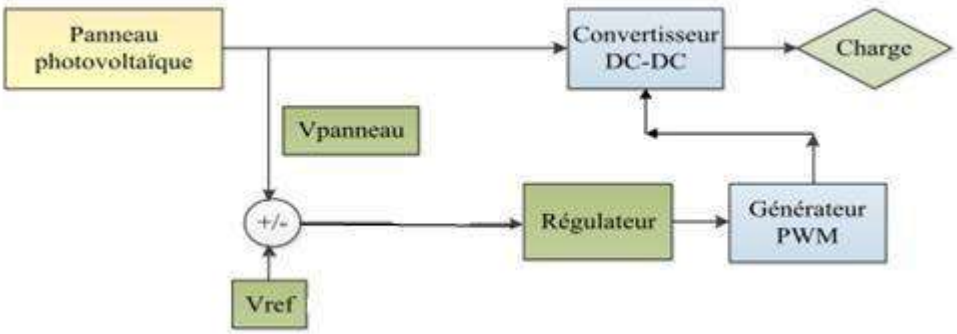


Figure (II.17) : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.

On a trois types de cette méthode selon la nature de la tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe).

➢

- Référence fixe.
- Référence en fonction de Voc.
- Tension de référence externe (Cellule pilote).

II.5.2. Méthodes à contre réaction de courant :

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension on a le schéma décrit par la figure (II.18) [16].

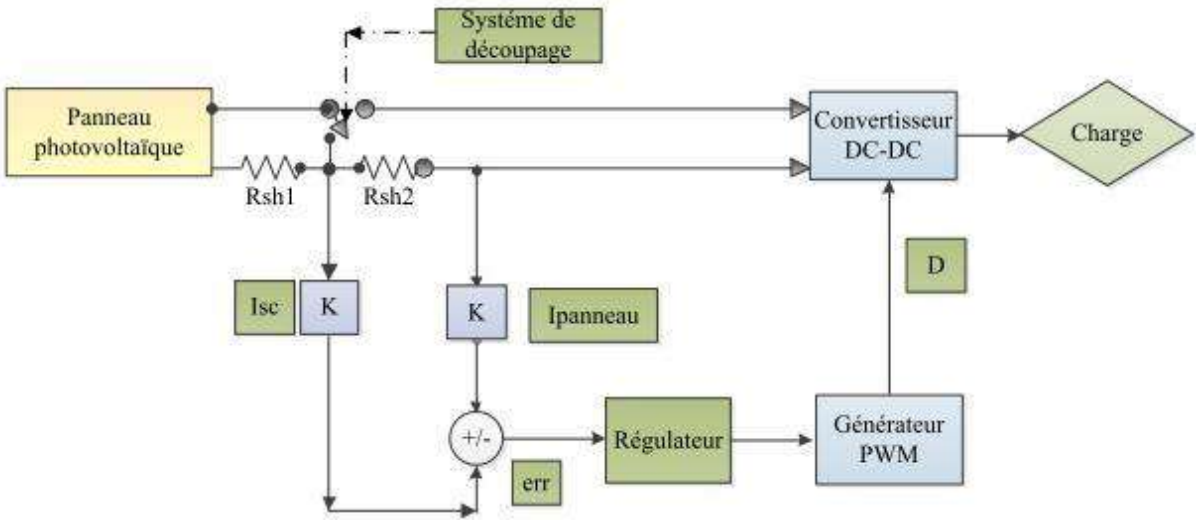


Figure (II.18) : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de I sc .

❖ **Ainsi nous avons présenté les méthodes suivantes :**

- Référence en fonction du courant de court-circuit I_{CC} .
- Référence externe (Cellule pilote).

II.5.3. Méthodes à contre réaction de puissance :

Les méthodes à contre réaction de puissance se bases 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 $P = V \times I$ [16].

II.5.3.1. Algorithme perturbation et observation :

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du

convertisseur (DC-DC,), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (D).

Si la valeur de la puissance actuelle du générateur est supérieure à la valeur précédente alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la Figure (II.19) [3].

D : rapport cyclique.

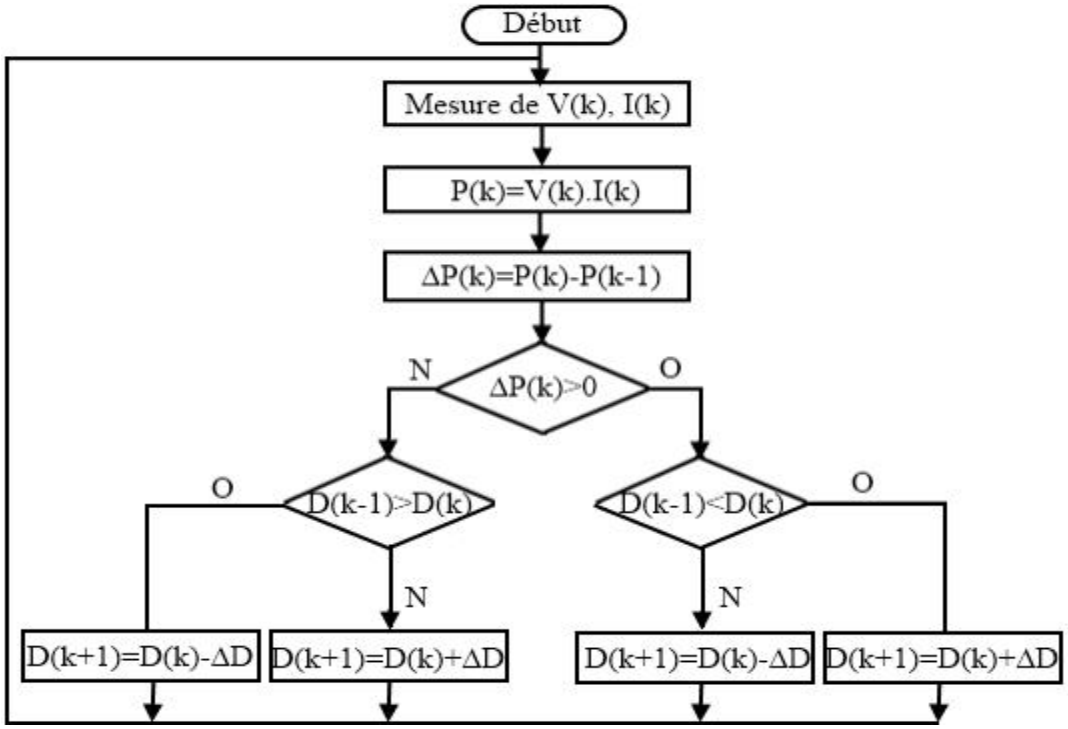


Figure (II.19) : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).

II.5.3.2. Algorithme incrémentation de la conductance :

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes [3]:

$$\frac{dP}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} \quad \text{(II.22)}$$

$$\frac{1}{V}\frac{dP}{dV} = \frac{1}{V} \quad \text{(II.23)}$$

On définit la conductance de la source et incrémentation de la conductance puisque la tension V du panneau est toujours positive, la relation (II.8) explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source égale incrémentation de la conductance de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure il l'incrémentale conductance et vice-versa [3], comme suit:

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad si \quad \frac{1}{V} > -\frac{dI}{dV} \tag{II.24}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad si \quad \frac{1}{V} = -\frac{dI}{dV} \tag{II.25}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad si \quad \frac{1}{V} < -\frac{dI}{dV} \tag{II.26}$$

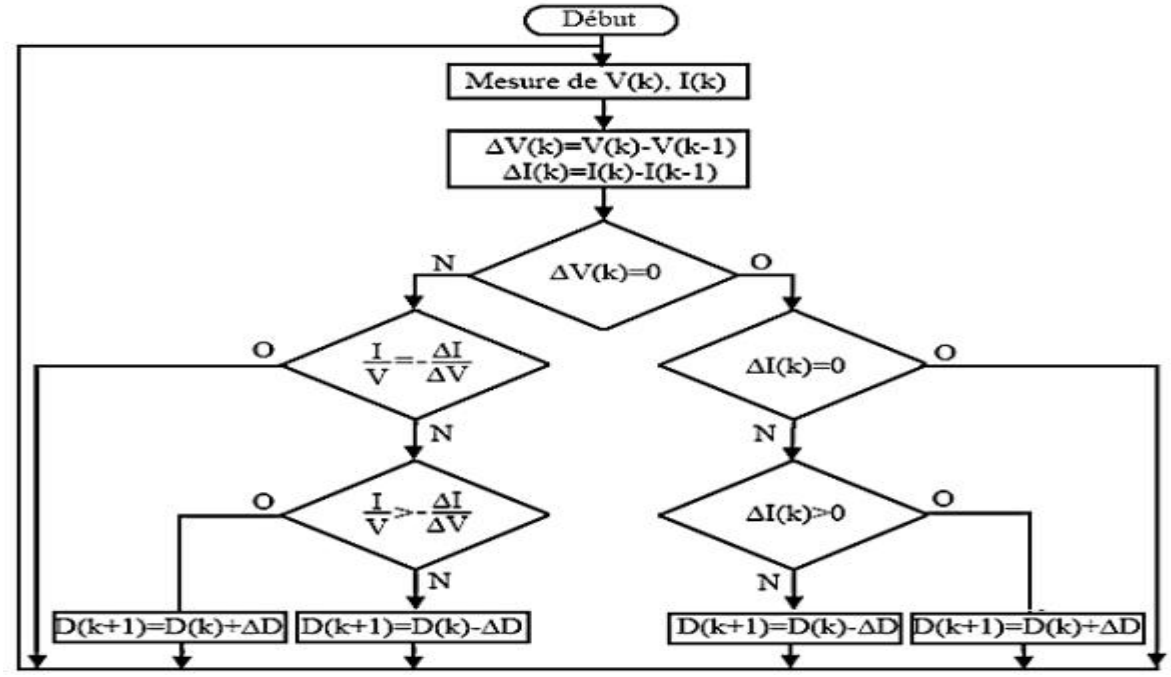


Figure (II.20) : Algorithme incrémental conductance .

II.6.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs statiques (convertisseur DC-DC/DC-AC). Nous sommes sur l'étude des convertisseurs du courant continu (boost-buck). On a étudié quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémentation de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

Chapitre III

Modélisation et Simulation d'un système photovoltaïque

III.1. Introduction :

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constituants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP.

Cette 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.

Ce chapitre, à pour but l'étude modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque adapté a un hacheur survolteur « boost» avec une commande MPPT numérique « perturbation et observation ».

Toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel MATLAB 7.10.0.

III.2. L'outil Matlab / Simulink :

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulions spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la Simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [2].

III.3. Le générateur photovoltaïque « GPV » :

Le système photovoltaïque est contrôlé par la commande MPPT, il est présenté à la Figure (III.1).

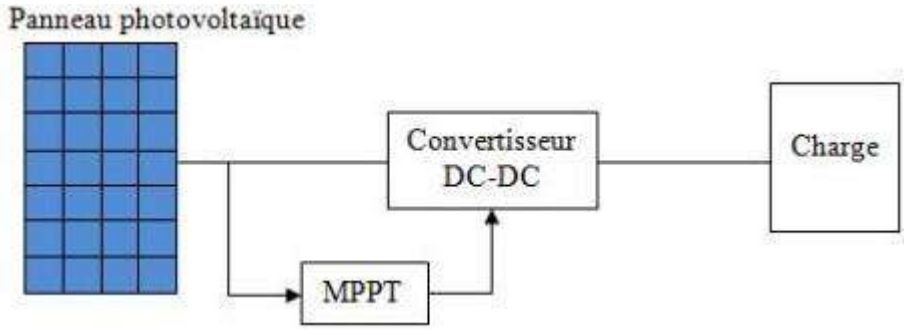


Figure (III.1) : Système photovoltaïque.

III.3.1. Modélisation du système photovoltaïque :

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série Rs représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle RP caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

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

On présente le schéma du circuit électrique par la figure (III.2) :

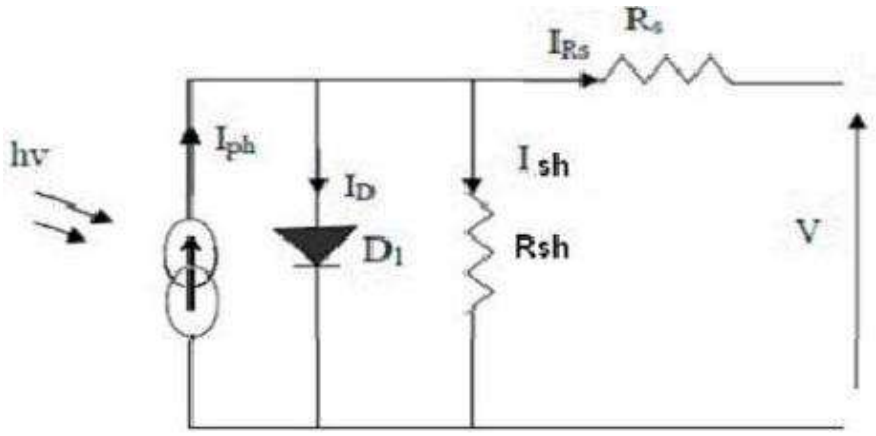


Figure (III.2) : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Dans ce cas, on a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabriquant, la caractéristique I-V de ce modèle est donnée par (chapitre I-équation (I.1)):

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat}\left[\, exp\left(\frac{q\ (Vpv+(Ipv*Rs))}{nKT}\right) - 1\,\right] - \frac{Vpv+(Ipv*Rs)}{Rp} \qquad \text{(III.1)}$$

Où *Vpv*, *Ipv* sont la tension (V) et le courant (A) de sortie du panneau, I_{ph} est la photo courant en ampère, I_{sat} Courant dans la diode en ampère, Rs est la résistance série en ohm, R_h est la résistance shunt en ohm, q est la charge de l'électron q=1.602.10^{-19}coulomb, k est la constante de Boltzmann k=1.381.10^{-23} J/K, n est le facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

Si l'on suppose que la résistance parallèle (shunte) est infinie (R = ∞), l'équation (III.1) devienne :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat}(\exp(\frac{pv+Rs.Ipv}{nVT}) - 1) \quad \text{(III.2)}$$

Où I_{pv} le courant fourni par la cellule PV et V_{pv} est la tension au bornes de la cellule PV.

On peut calculer la résistance série dans le point V_{co} :

$$dI_{pv} = 0 - I_{sat}\left(exp\left(\frac{pv+Rs.Ipv}{nKT}\right)\right)\left(\frac{dVpv+Rs.dIpv}{nKT}\right) \quad \text{(III.3)}$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristique (I-V) au voisinage de V_{co}.

Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$R_S = -\frac{dVpv}{dIpv} - \frac{nVT}{Isat\ (exp(\frac{7pv+Rs.Ipv}{n7T}))} \quad \text{(III.4)}$$

L'équation de la caractéristique I=f(V) (III.1) non linéaire est résolue par des méthodes d'itération simple. Généralement la méthode de Newton-Raphson est choisie pour la convergence rapide de la réponse. La méthode de Newton-Raphson est décrite comme suit:

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(Kn)}{f'(Kn)} \quad \text{(III.5)}$$

Où $f'(Xn)$ est la dérivée de la fonction$f\ (Xn), Xn$ est la présente itération et X_{n+1} est l'itération suivante.

La réécriture de l'équation (III.5) donne la fonction suivante :

$$f\ (I_{pv}) = I_{cc} - I_{pv} - I_{sat}\ (exp\ (\frac{Vpv+Rser.Ipv}{nVT}) - 1) = 0 \quad \text{(III.6)}$$

En remplaçant dans l'équation (III.5), on calcule le courant (I) par les itérations :

$$I_{n+1} = In - \frac{Icc - Isat\ (\ xp(\frac{7pv+Rser.In}{n7T}) = 1)\ - In}{-1 - Isat\ (\frac{}{ser}\ exp(\frac{7pv+Rser.In}{n7T}))} - \quad \text{(III.7)}$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différentes éclairements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements [8].

$$I_{cc}(T) = I_{CC}(T_{ref}) \cdot [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad \text{(III.8)}$$

$$I_{ph} = I_{cc}\left(\frac{\quad}{1000}\right) \quad \text{(III.9)}$$

$$I_{sat}(T) = I_{sat}(Tref).\left(\frac{Tref}{T}\right)^{3}\left[exp\left(\frac{q.Eg}{nk}\right).\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{Tref}\right)\right] \quad \text{(III.10)}$$

Où a est le coefficient de variation du courant en fonction de la température, T_{ref} est la température de référence, 298k (25°C) et G est l'irradiation solaire.

III.3.2. Caractérisation du module PV :

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

Le module PV **Shell SP75** peut produire une puissance maximale de 75 watts à 17 volts. Ce ci 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/m^2.

Les caractéristiques électriques du module Photovoltaïque **Shell SP 75** en conditions de test standards sont représentées sur le tableau (III.1).

Tab (III.1) : Caractéristiques électriques du module PV Shell SP75 en condition de test standard[17].

Grandeurs	Valeur
- Eclairement standard, E.	1000 W/m^2
- Température standard, T.	25^0 C
- Puissance crête maximale, Pm.	75 W
- Tension optimale, Vopt.	17 V
- Courant optimale, Iopt.	4.4 A
- Tension de circuit ouvert, Vco.	21.7 V
- Courant de court-circuit, Icc	4.8 A

III.3.3. Simulation du module PV :

Sur la base du modèle mathématique de la cellule solaire développé dans le sous paragraphe (I.4) du chapitre I, on obtient le bloc schématique de SIMULINK est montré sur la Figure (III.3).

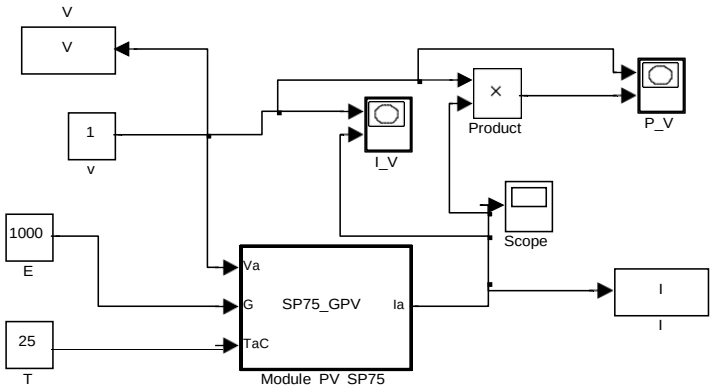


Figure (III.3) : schéma Bloc du module solaire dans SIMULINK.

Caractéristique (Ipv = f(Vpv)) : À température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards (STC) (E = 1000 w/m^2. T = 25°C).

La caractéristique (Ipv = f(Vpv)) est donnée par la figure (II.4).

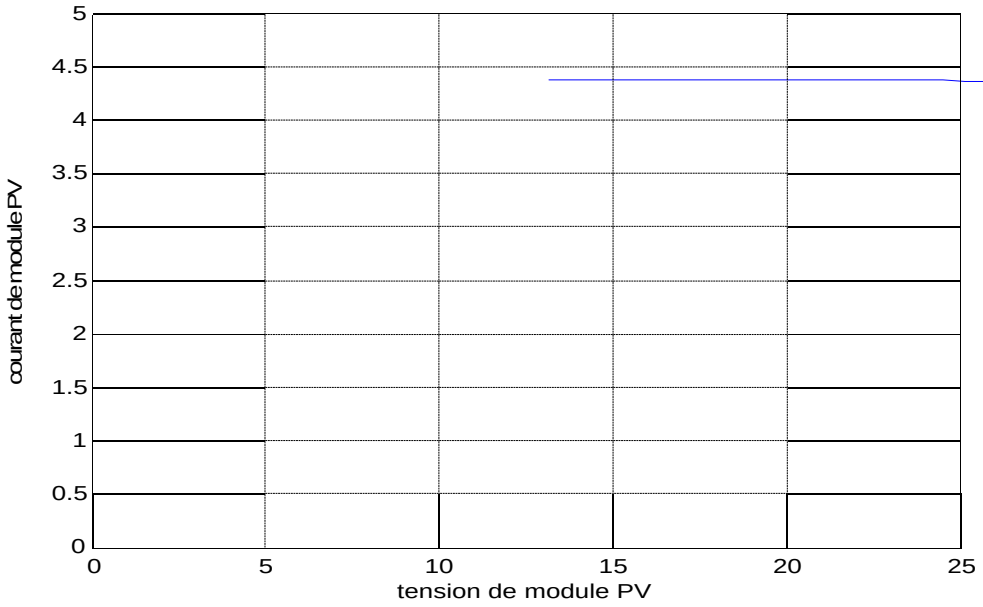


Figure (III.4) : Résultats de simulation des caractéristiques (Courant –Tension) du module PV Shell SP75.

Caractéristique (Ppv = f(Vpv)) : À température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards (STC) (E = 1000 w/m^2. T = 25°C).

La caractéristique (Ppv = f(Vpv)) est donnée par la figure (II.5).

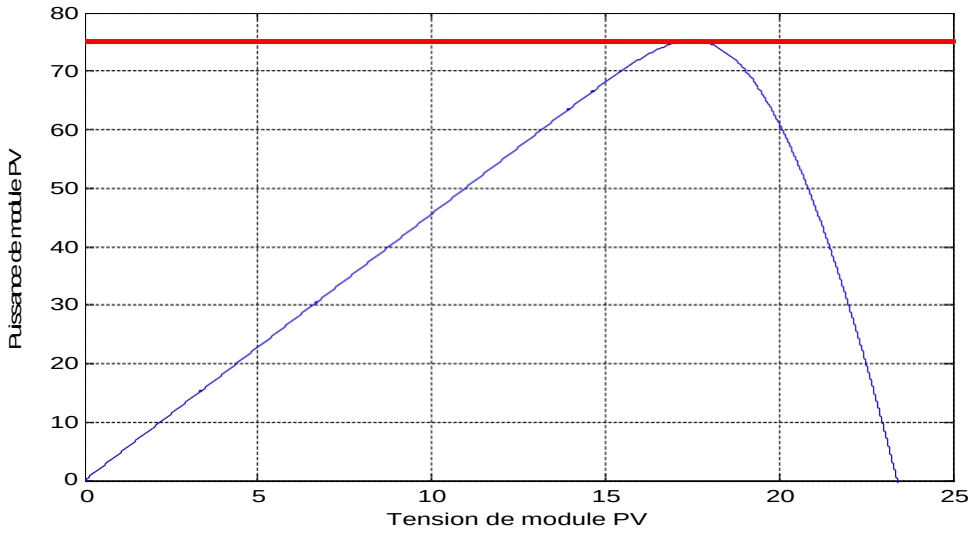


Figure (III.5) : Résultats de simulation des caractéristiques (puissance –tension) du GPV.

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante (T = 25°C) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.

D'après la figure (III.6), on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement (E) et une faible diminution de la tension du circuit ouvert. C'est qui prouve que le courant de court circuit de la cellule dépend au éclairement, par contre la tension de circuit ouvert subit une légère augmentation quand l'éclairement varie de 200 W/m² a 1000 W/m².

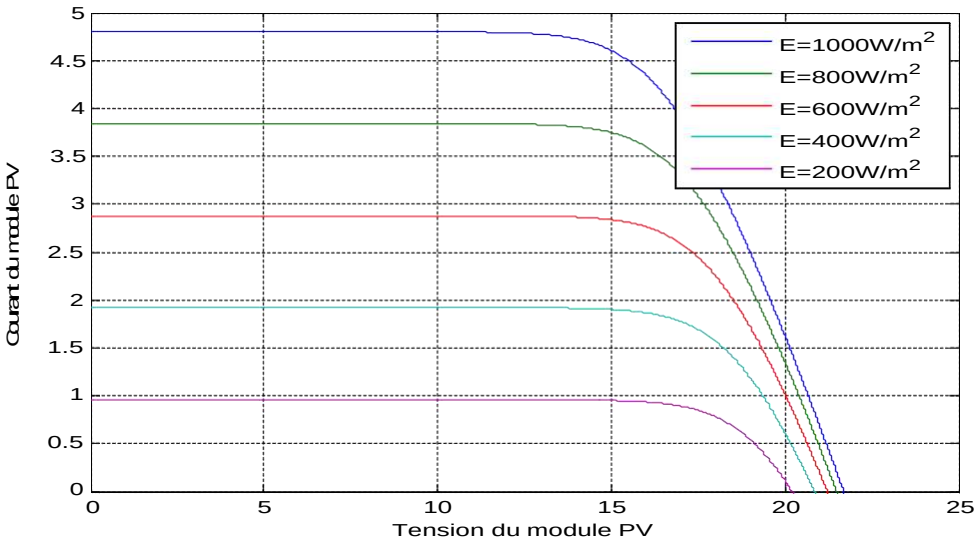


Figure (III.6) : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension

Pour différents éclairement et une température T=25°C.

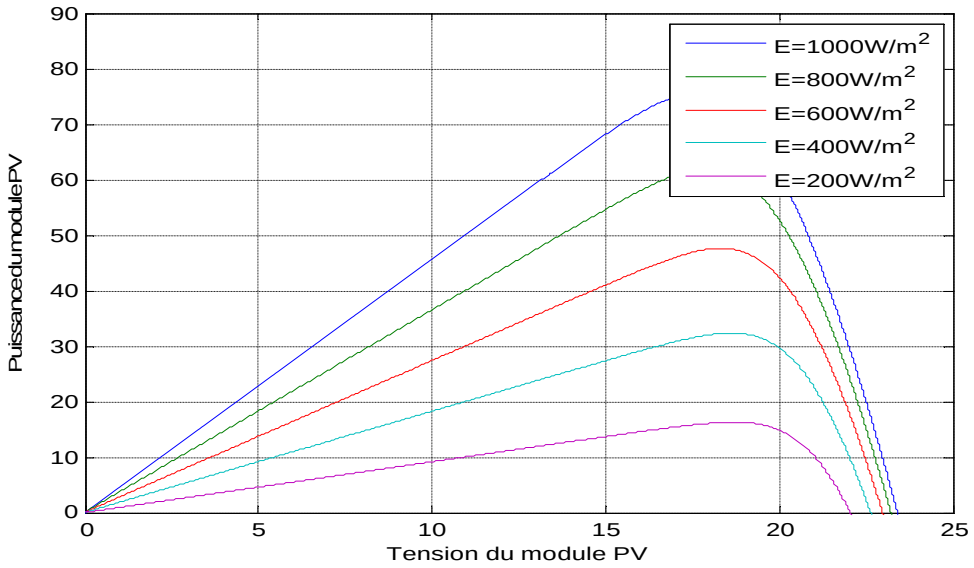


Figure (III.7) : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension

Pour différents Eclairements et une température T=25°C.

On remarque aussi sur la figure (III.7) que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV.

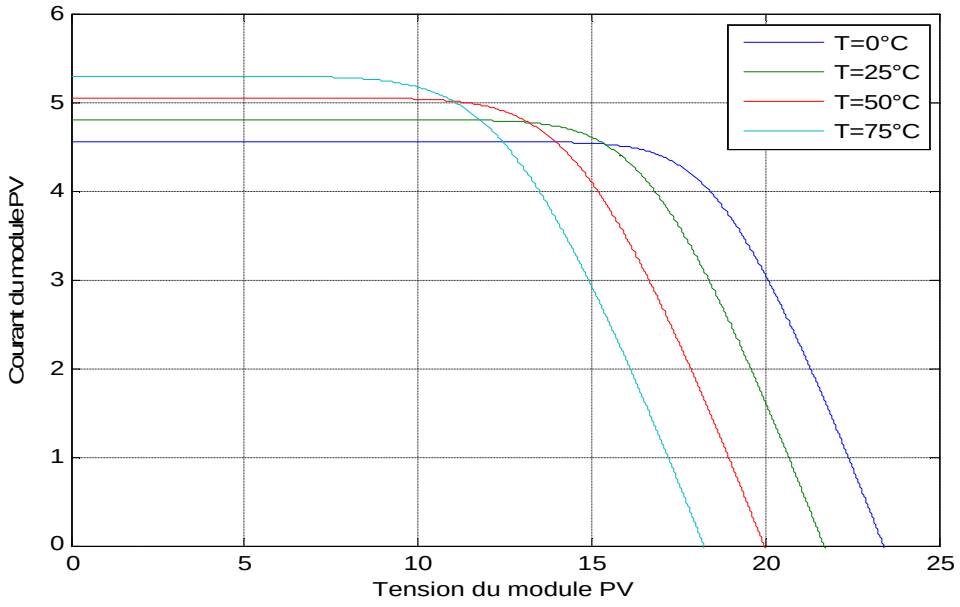


Figure (III.8) : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension

Pour différents température et un éclairement E=1000 W/m^2.

On constate d'après la figure (III.8) que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert du GPV, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

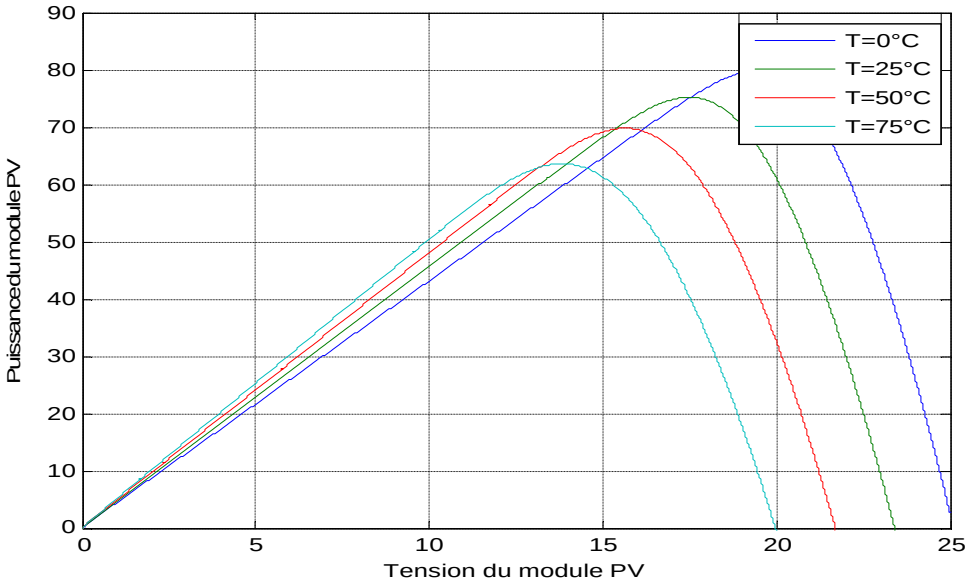


Figure (III.9) : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension

Pour différents température et un éclairement E=1000 W/m^2.

D'après la figure (III.9) l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique Ppv = f(Vpv) fait diminuer la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV.

La modèle choisi a donné des résultats concordant avec ceux obtenus la littérature et reflète bien le comportement physique d'une cellule (PV) vis-à-vis des variations de la température et de l'éclairement, ce qui valide le modèle utilisé.

III.4. Simulation des hacheurs :

III.4.1. Simulation de hacheur buck :

Pour montrer le rôle des convertisseurs buck nous avons utilisé logiciel Matlab pour la simulation et nous prenons (E=24V, L=1H, R=30Ω,α=0.5).

La figure (III.10) représente le schéma block d'un convertisseur Buck.

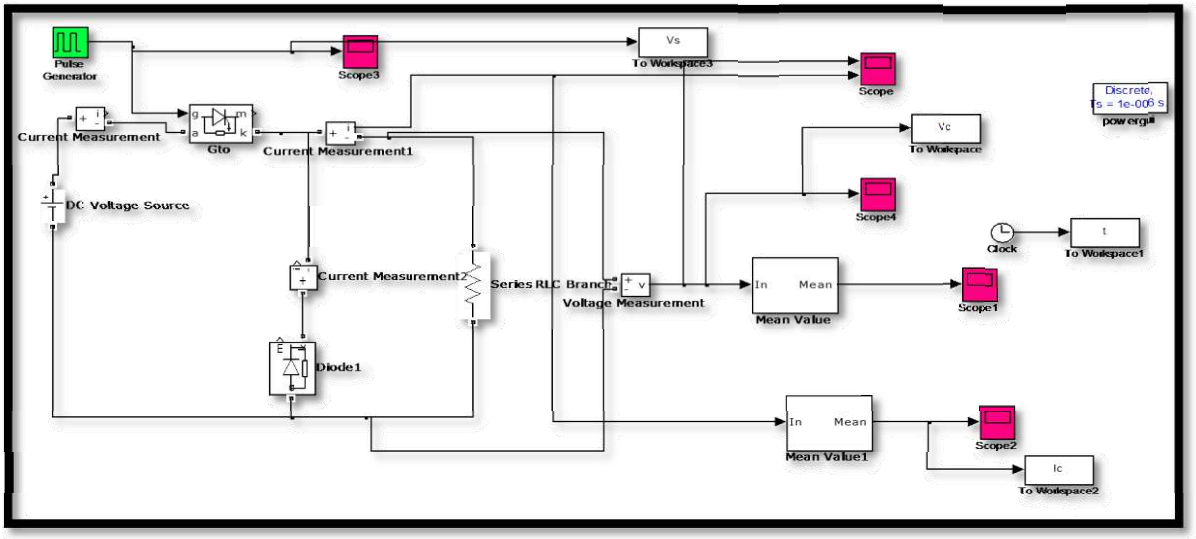


Figure (III.10) : Schéma block d'un convertisseur buck.

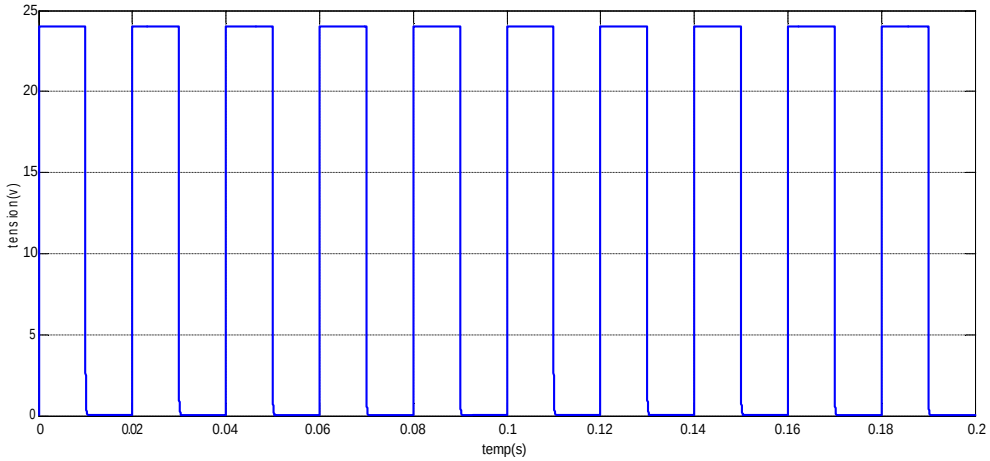


Figure (III.11) : Résultats de simulation de la tension aux bornes de la charge.

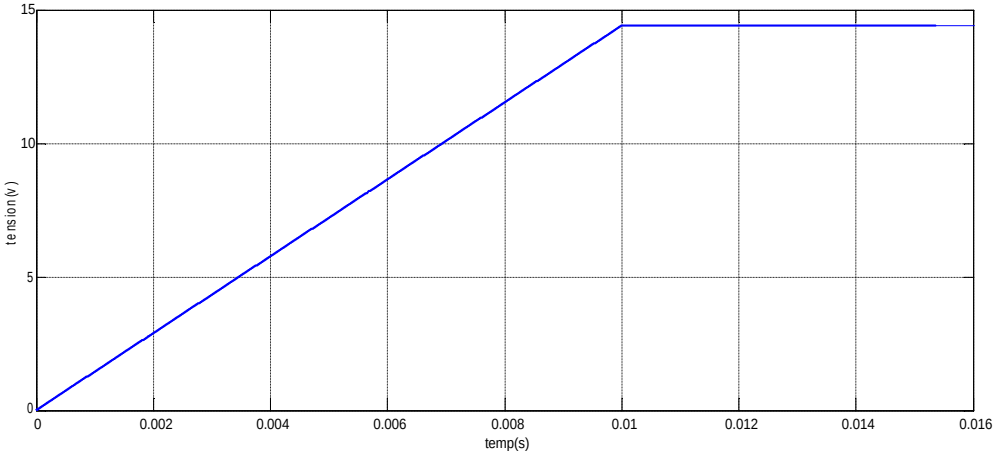


Figure (III.12) : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge.

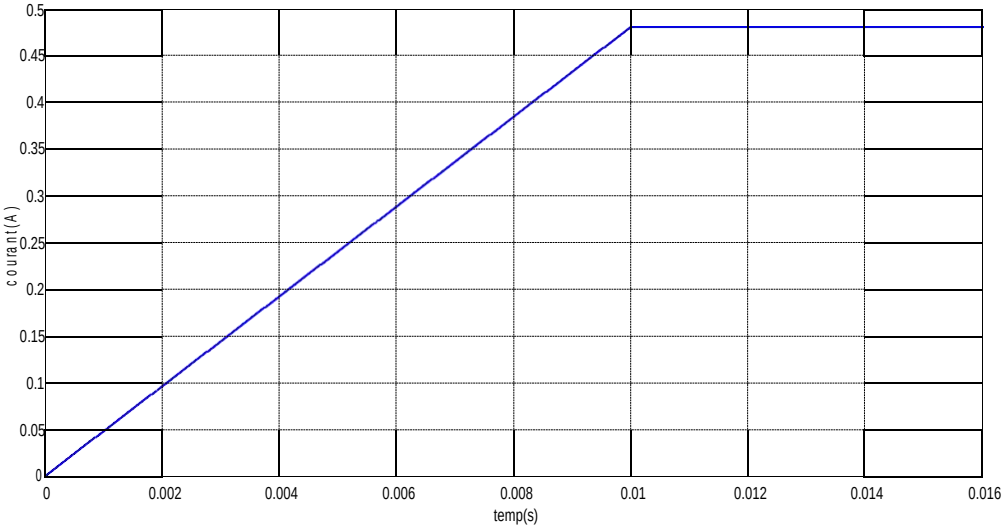


Figure (III.13) : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge.

III.4.2. Simulation de hacheur boost :

Pour montrer le rôle des convertisseurs boost nous avons utilisé logiciel Matlab pour la simulation et nous prenons (E=100V, L= 10e-3 H, R=20Ω,α=0.1).

La figure (III.14) représente le schéma block d'un convertisseur boost :

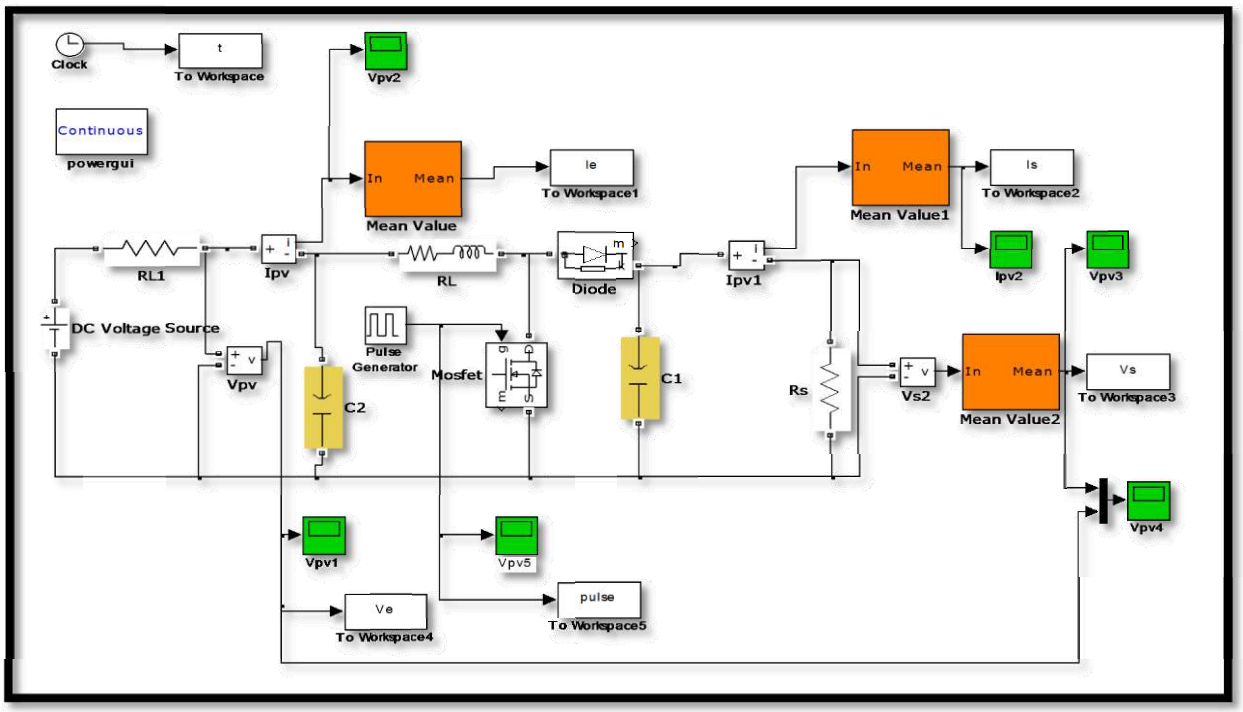


Figure (III.14) : Schéma block d'un convertisseur boost.

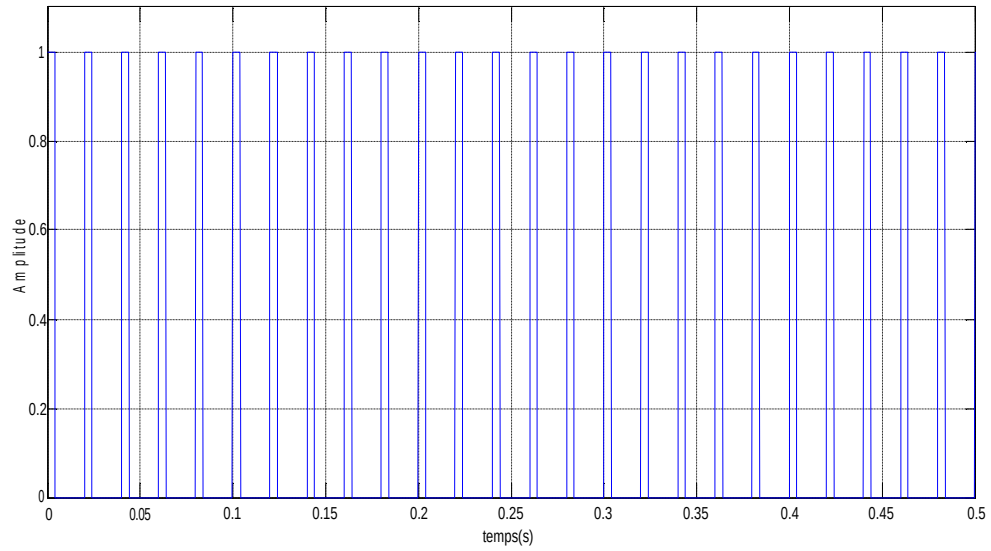


Figure (III.15) : Signal commande DC/DC (grille de Mosfet).

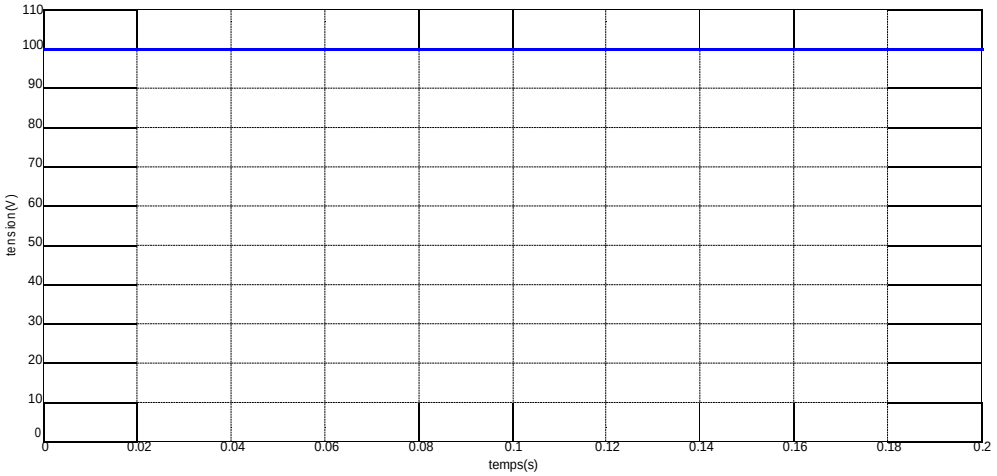


Figure (III.16) : Résultats de simulation de la tension d'entée du hacheur boost.

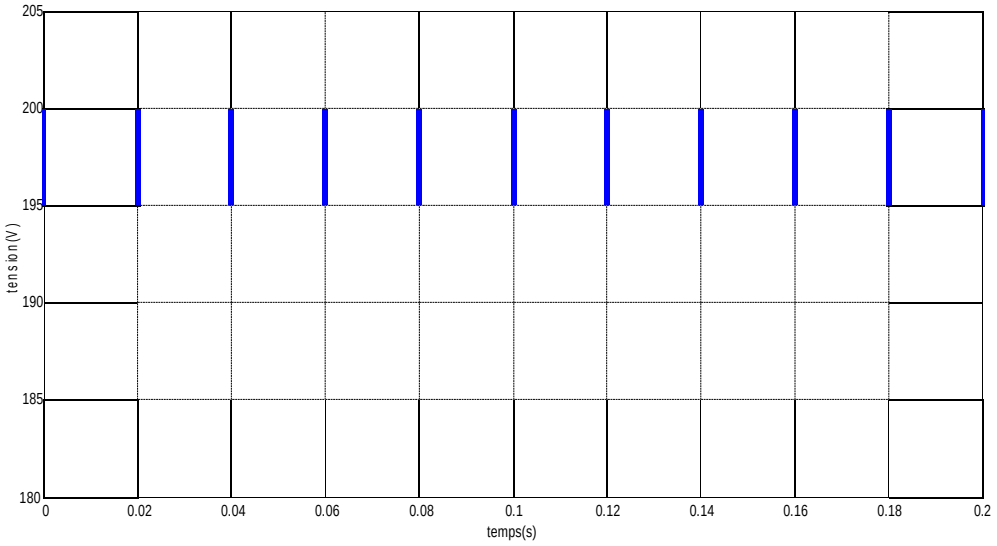


Figure (III.17) : Résultats de simulation de la tension de sortie du hacheur boost.

Les résultats de simulation du convertisseur boost représentent par les figures (III.16) et (III.17). Ces figures représentent les tensions d'entrée et sortie du hacheur boost.

donc les résultats du hacheur boost effectué correctement sans rôle puisque la tension de sortie d'hacheur boost est supérieur à celle l'entrée.

III.5. Mise en œuvre de la commande de poursuite MPPT :

Pour avoir la meilleure connexion entre le «GPV» une source non linéaire et une charge pour produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est développé.

Il forcera le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système.

Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique I-V avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient ou/et la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale [17].

III.5.1. principe du MPPT :

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur

statique reliant La charge et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant.

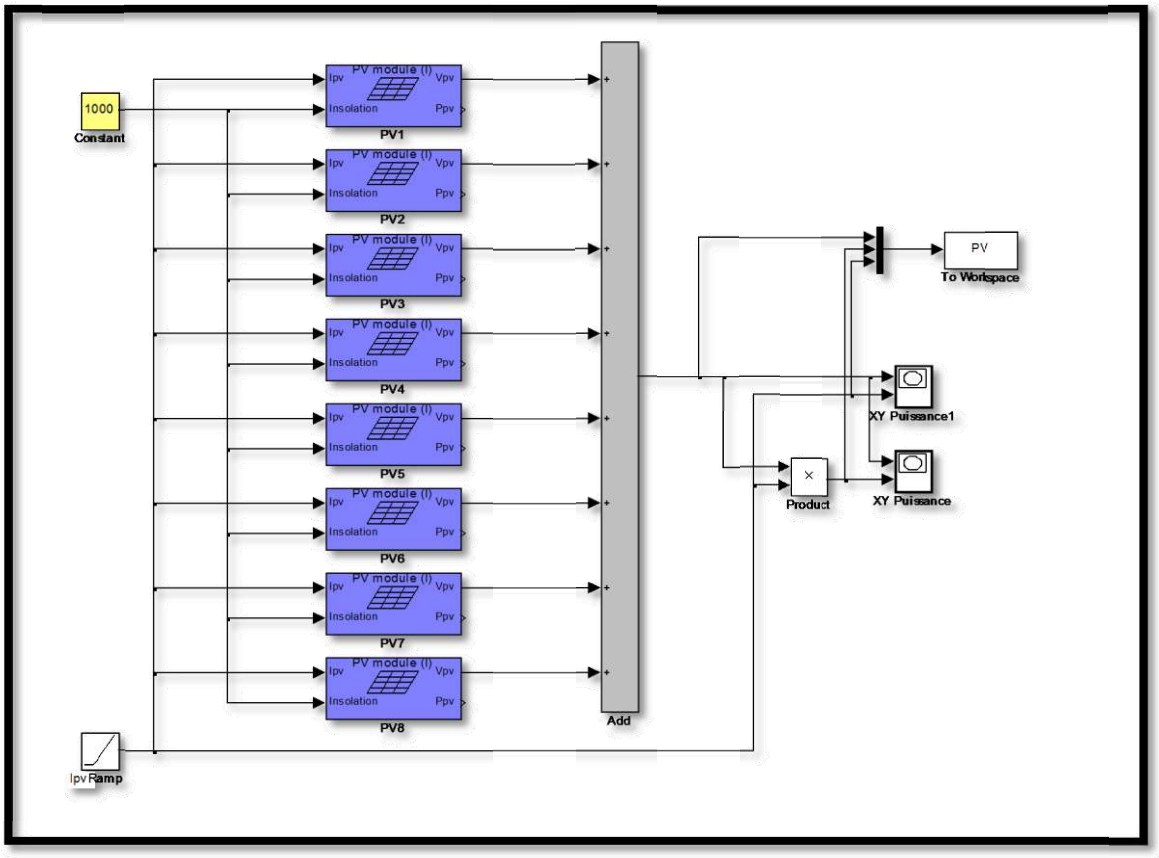


Figure (III.18) : Block des 08 modules en SIMULINK.

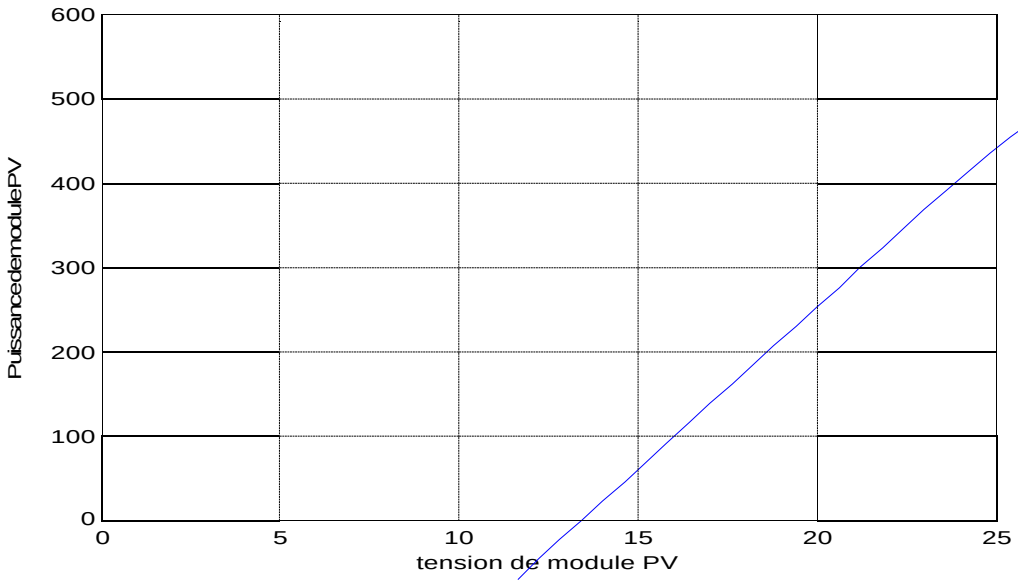


Figure (III.19) : Résultats de simulation de la courbe P(V) des 08 modules.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension Vpv et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV.

III.5.2. Structure et simulation de la commande MPPT numérique « P&O » :

III.5.2.1. structure de la commande « perturbation et observation » :

La méthode de perturbation et d'observation «P/O» est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{ref} et I_{ref} respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température.

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de Vref ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique [8].

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètre de mesure. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température, pour toutes ces raisons, la méthode P&O est devenue une approche largement répandue dans la recherche du MPPT [18].

La figure (III.20) montre l'organigramme de l'algorithme de P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle .Le modèle Simulink est donné par la figure (III.21).

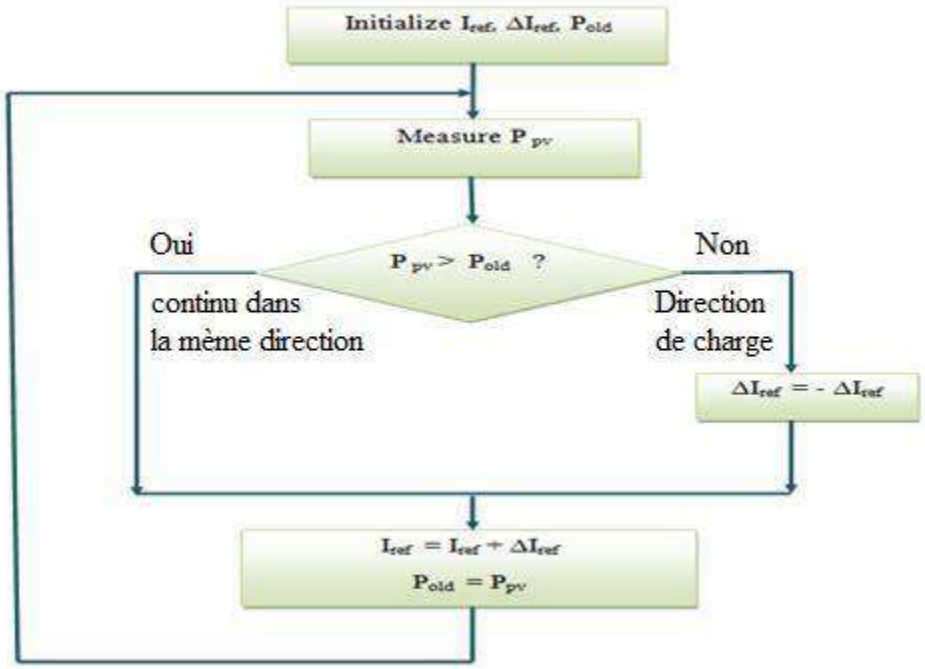


Figure (III.20) : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O).

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension Vpv et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV.

III.5.2.2. Simulation de la méthode MPPT:

Nous avons réalisé le modèle de simulation de l'algorithme P&O.

La figure (III.21) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT :

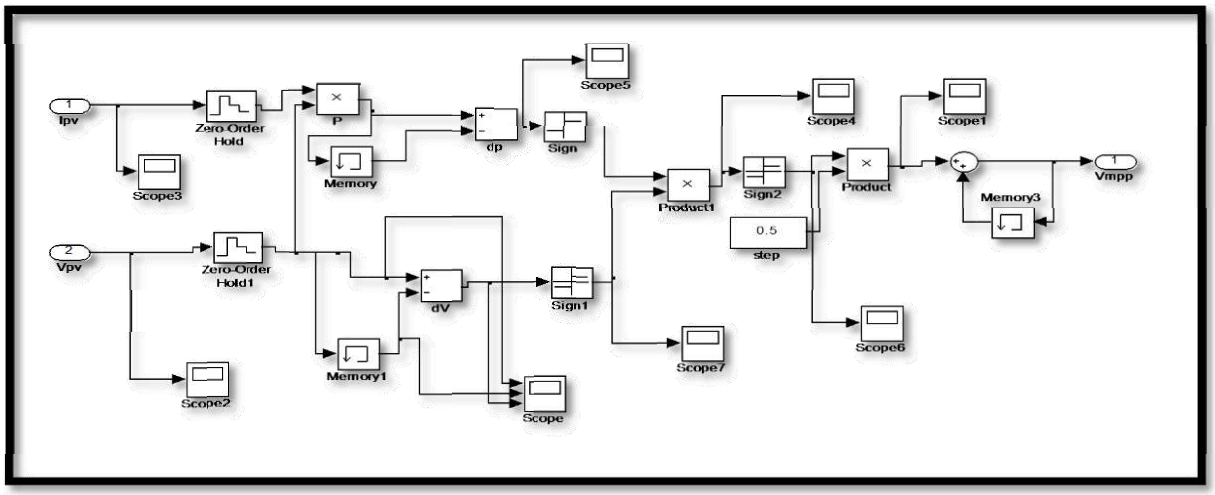


Figure (III.21) : Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).

III.5.2.3. Bloc du système avec MPPT :

La Figure (III.22) illustre le bloc schématique de SIMULINK du générateur photovoltaïque et avec le cheminement de la commande de poursuite MPPT.

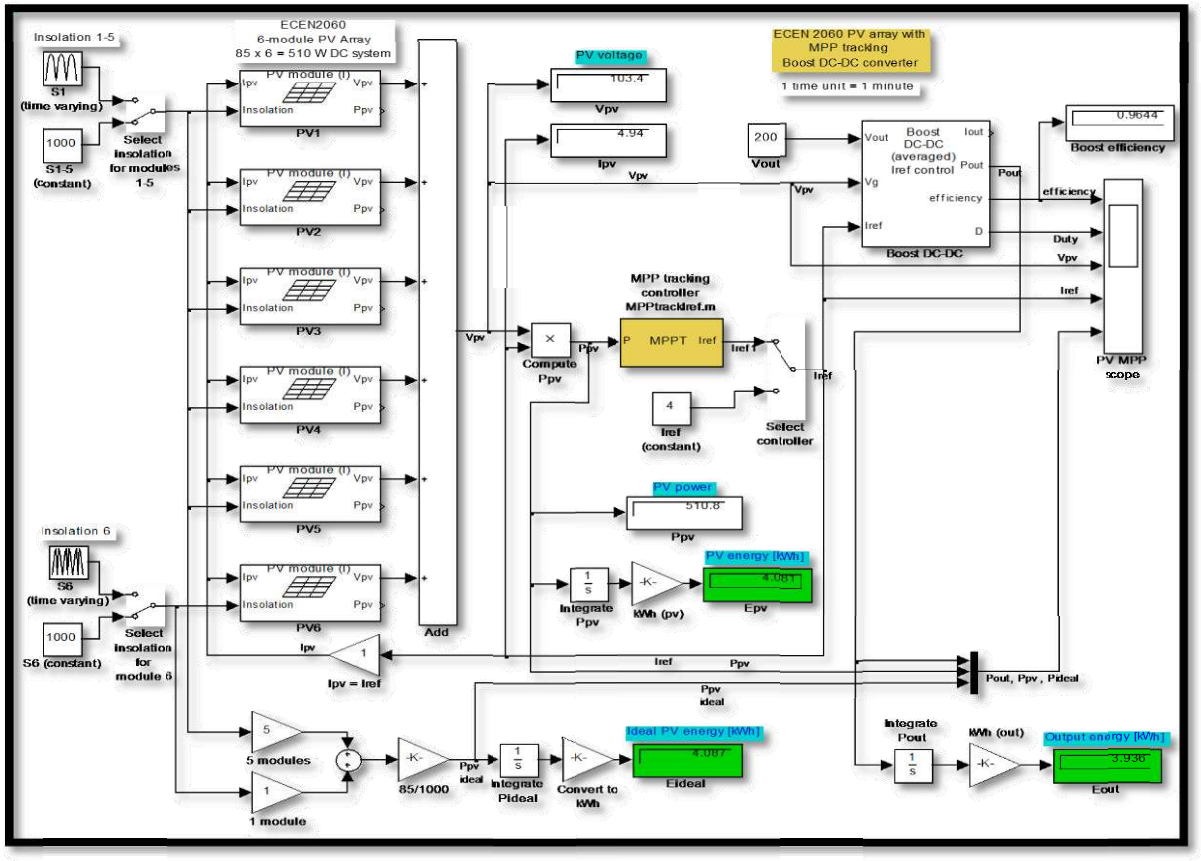


Figure (III.22) : Bloc de MPPT en SIMULINK.

III.5.2.4. Résultats de simulation :

Sans MPPT :

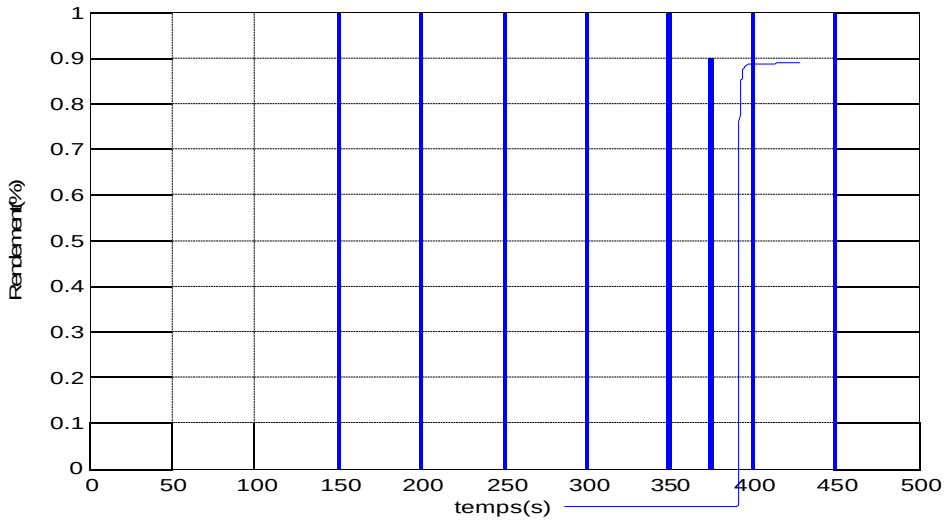


Figure (III.23) : Résultats de simulation du rendement de l'hacheur pour éclairement variable.

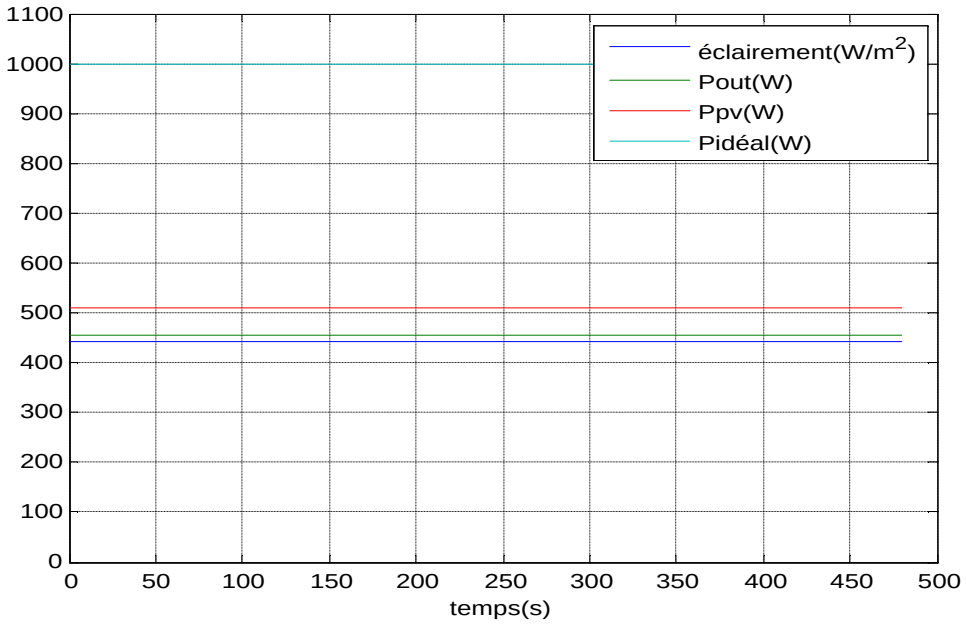


Figure (III.24) : Résultats de simulation des courbes de puissance pour éclairement constante .

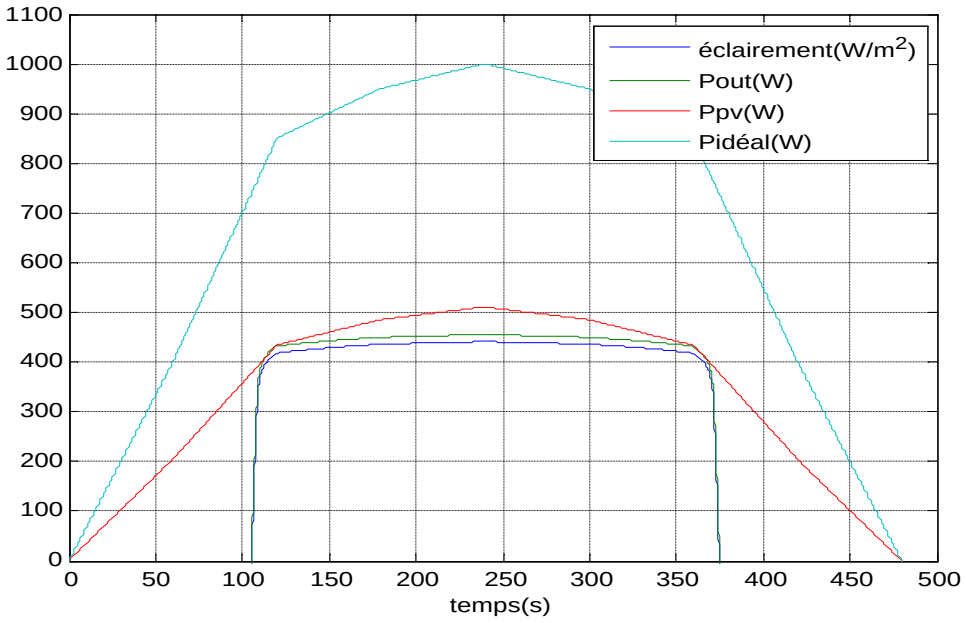


Figure (III.25) : Résultats de simulation des courbes de puissance pour éclairement varriable.

Avec MPPT :

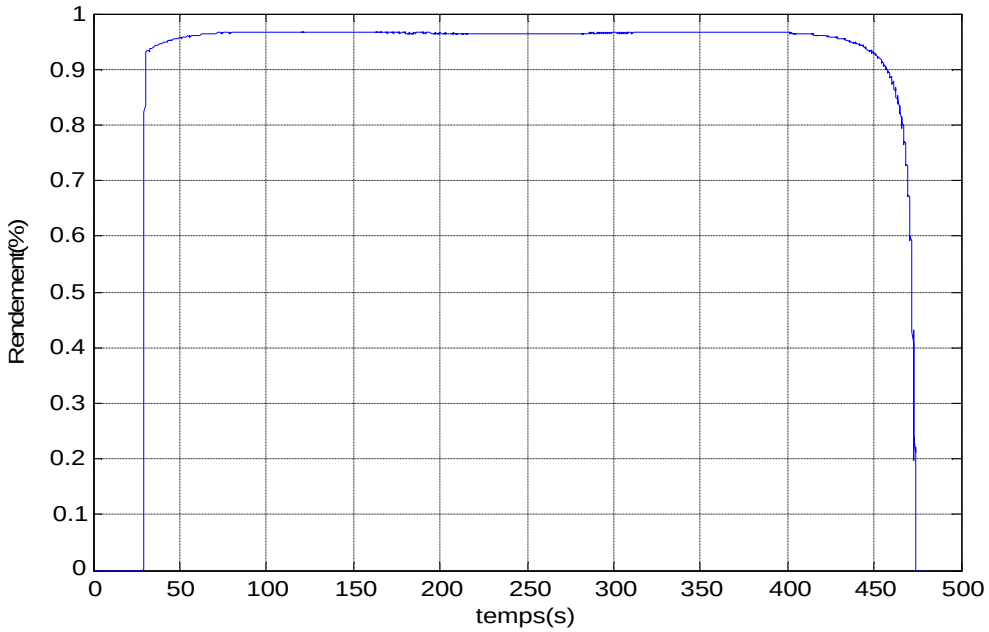


Figure (III.26) : Résultats de simulation du rendement de l'hacheur pour éclairement variable.

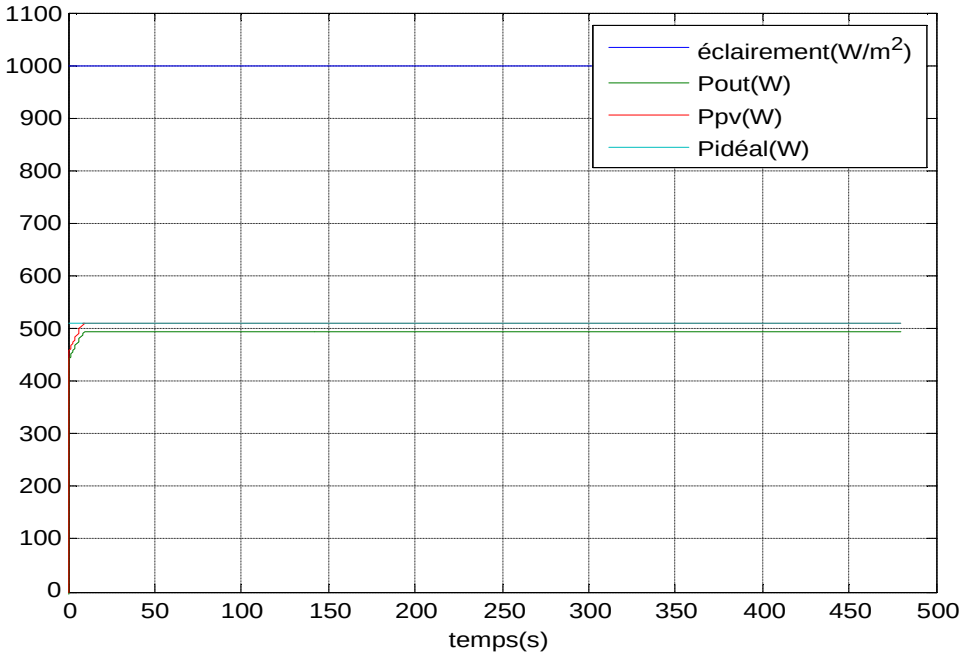


Figure (III.27) : Résultats de simulation des courbes de puissance pour éclairement constante .

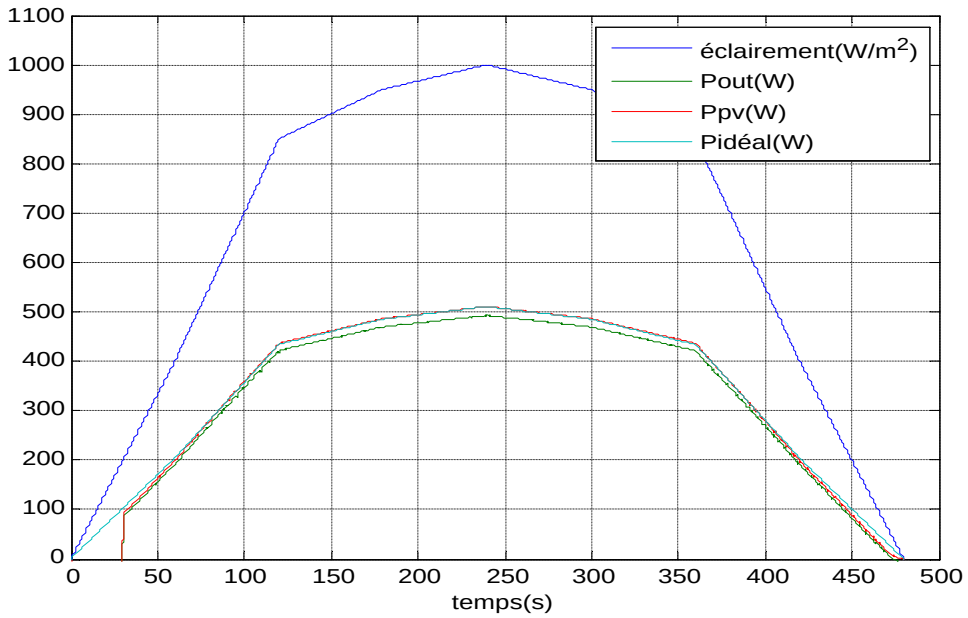


Figure (III.28) : Résultats de simulation des courbes de puissance pour éclairement varriable.

L'énergie solaire des énergies renouvelable les plus importante, Aujourd'hui, un modèle de générateur photovoltaique et modélisé sous Matlab/Simulink, résultat sans observé

La figure (III.23) montre le rendement de l'hacheur Boost pour l'éclairement variable, la figure (III.24) montre les courbes de puissance (idéal, photovoltaique et sortie) pour l'éclairement constant, ainsi la figure (III.25) montre les courbes de puissance (idéile, photovoltaique et sortie) pour l'éclairement variable. Pour un système PV sans régulateur MPPT, nous remarquons que la puissance de sortie diverge par rapport à la puissance idéaile pour l'éclairement constant ou variable.

La figure (III.26) montre les résultats de simulation du rendement du hacheur pour l'éclairement varriable , la figure (III.27) montre les résultats de simulation de la puissance (idéal, photovoltaique et sortie) pour un éclairement constant, ainsi la figure (III.28) montre les résultats de simulation de la puissance (idéal, photovoltaique et sortie) pour éclairement varriable.

Pour un système photovoltaique adapté par une commande MPPT « perturbation et obeservation », nous remarquons que la puissance de sortie suit la consinge appliqueé au régulation, cette consinge noté $P_{idéal}$, pour les deux cas d'éclairement constant ou variable.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé l'ensemble de la chaine de conversion sous MATLAB et l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) a été simulé.

Il est force le générateur GPV à travailler à son point de puissance maximale (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion électrique.

Conclusion générale

Conclusion générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches ont out conduit à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

En effet, pour la conception des systèmes photovoltaïques, la donnée la plus utile est rayonnement solaire reçu par le panneau photovoltaïque solaire, donne des généralités sur les systèmes PV, l'effet PV, principe de cellule PV, Ainsi, les avantages et les inconvénients.

Nous avons étudions à un convertisseur DC/DC de type buck et boost qui fournit une tension continue. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur et abaisseur de tension ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et pour extraire le maximum de puissance disponible et un autre convertisseur DC/AC. Le modèle du MPPT est basé sur un convertisseur DC /DC et un algorithme de recherche de point de puissance maximal, Ainsi, approfondie sur les différents algorithmes des techniques de poursuite de point de puissance maximale basés sur contre réaction (tension courant puissance), algorithme perturbation et observation algorithme incrémentation.

Le choix du convertisseur élévateur (BOOST) après l'analyse mathématique de la différente configuration des convertisseurs DC-DC nous a facilité la tâché de développement d'un modèle de recherche du MPPT en simulink.

Finalement, on a étudié la modélisation et simulation d'un système photovoltaïque. Pour ce la, on a étudié d'abord la modélisation du générateur PV **Shell SP75** par la résolution de l'équation caractéristique non linéaire d'une cellule PV.

Puis, on a représenté la structure de la commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Pour la simulation PV on a démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale. La méthode P&O (perturbation and observation) a été choisie pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau PV (MPPT).

D'après les résultats de la simulation obtenue, on peut dire que :

- Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité d'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m^2 et T = 25°C.
- Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.
- Ces résultats, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Références bibliographiques

Bibliographique

[1] S. Belakehal, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», Thèse Doctorat, université de Constantine, 10/06/ 2010.

[2] Dossier technique «Eolienne et photovoltaïque».

[3] H. Kamelia, «Modélisation D'une Cellule photovoltaïques (Etude Comparative)», Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Thèse de Magister 2012.

[4] M. Blhadj, «Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Bechar, 2007-2008.

[5] R. Merahi, «Modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateur photovoltaïque», Mémoire de Magister, Badji Mokhtar, 2010.

[6] S. Aoufi, «Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque», Mémoire Magister, université Ferhat Abbas - Setif1 Ufas (Algérie), 2014

[7] T. Bouguerra, «Optimisation d'un système photovoltaïque (Application en continu et en alternatif) », Mémoire Magister, université de Constantine1, 30/06/2014.

[8] W. Bensaci, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2011/2012.

[9] H. Boukli, « Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni D'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique », Mémoire de Magister, Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen, 2010/2011.

[10] M.Amaud Deves, « Énergie photovoltaïque (Application au traitement de l'eau potable et des eaux usées en rurales) », document technique Rédition, 2003 FNDAE n 12.

[11] O. Benseddik , F. Djaloud, « Etude et optimation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 27/06/2012.

[12] A. Bouharchouche, A. Bouabdallah, « Étude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne », Projet de fin d'études, ENP, 2010.

[13] Dariga Meekhun, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique », Thèse de doctorat, 2011.

[14] K. Sobaihi «étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction » Mémoire de Magister, Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.

[15] Boukaroura Abdelkader «Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé

Par l'Approche Bond Graph » Mémoire de Magister, Université Ferhat abbas - Setif - 02/12/2009.

[16] F. Slama «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconne ctés au réseau électrique » Mémoire de Magister, Université Ferhat abbas - Setif - 01/04/2011.

[17] A. Meflah « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque » Mémoire de Magister, Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen , 2011.

[18] C. Cabal«Optimation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque » Mémoire de doctorat, Université Toulouse III, Paul Sabatier le 15 décembre 2008.

- www.energies-renouvelables.org

Résumé

L'énergie photovoltaïque (PV) gagne de plus en plus sa place auprès des sources d'énergie alternatives, mais les panneaux solaires, malgré l'évolution des techniques de fabrication, souffrent d'un rendement de conversion d'énergie assez faible, et ce rendement peut être plus faible si le générateur PV ne fonctionne pas autour d'un point appelé : MPP La poursuite d'un point qui change d'emplacement avec les conditions climatiques est une étape très importante dans la conception d'un système PV.

Dans cette thèse, nous analysons la conception et simulons le fonctionnement du système photovoltaïque selon le mécanisme « perturbation et observation » pour s'assurer que la puissance maximale déchargée est surveillée par le générateur photovoltaïque. Les résultats de la simulation ont été réalisés par le programme MATLAB/SIMULINK, qui a indiqué le suivi de l'évolution dynamique du système photovoltaïque .

Mots clés : simulation, système photovoltaïque, Commande MPPT, cellule photovoltaïque, Modélisation, programme MATLAB/SIMULINK.

Abstract

Photovoltaic (PV) energy is increasingly gaining its place among alternative energy sources, but solar panels, despite the development of manufacturing techniques, suffer from a rather low energy conversion efficiency, and this return may be lower if the PV generator does not operate around a point called: MPP Tracking the point of change of location with climatic conditions is a very important step in the design of a PV system.

In this thesis, we analyze the design and operation simulation of the photovoltaic system according to the "perturbation and monitoring" mechanism to ensure that the maximum discharge power is monitored by the photovoltaic generator. The simulation results were carried out by MATLAB / SIMULINK software, which indicated to follow the dynamic development of the photovoltaic system.

Key words: simulation, photovoltaic system, Order MPPT, photovoltaic cell, Modeling, MATLAB/SIMULINK program.

الملخص

تكتسب الطاقة الكهروضوئية (PV) مكانتها بشكل متزايد من مصادر الطاقة البديلة، لكن الألواح الشمسية وعلى الرغم من التطور في تقنيات التصنيع ، تعاني من كفاءة تحويل طاقة منخفضة إلى حد ما، ويمكن أن تكون هذه الكفاءة أقل إذا لم يعمل المولد الكهروضوئي حول نقطة تسمى: نقطة الطاقة القصوى MPP ، يعد السعي وراء هذه النقطة التي تغير الموقع مع الظروف المناخية خطوة مهمة للغاية في تصميم نظام الكهروضوئية.

في هذه الاطروحة قمنا بتحليل التصميم ومحاكاة الاشتغال للنظام الكهروضوئي وفق الآلية "الاضطراب والملاحظة " لضمان متابعة الاستطاعة الأعظمية المفرغة عن طريق المولد الكهروضوئي. نتائج المحاكاة تمت بواسطة برنامج MATLAB/SIMULINK الذي دل على المراقبة في السير الديناميكي للنظام الكهروضوئي.

الكلمات المفتاحية: محاكاة، النظام الكهروضوئي، الآلية MPPT، الخلية الكهروضوئية، التصميم، برنامج MATLAB/SIMULINK.